LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'EAU

Document technique VI du GIEC

OMM

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

PNUE

OMM

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL
SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

PNUE

Le changement climatique et l'eau

Publié sous la direction de

Bryson Bates
CSIRO
Australie

Zbigniew W. Kundzewicz
Académie des sciences,
Pologne
et Institut de recherche de Potsdam
sur les incidences du climat,
Allemagne

Shaohong Wu
Académie des sciences,
Chine

Jean Palutikof
Met Office, Centre Hadley
Royaume-Uni

Le présent document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été établi suite à une décision du Groupe d'experts. Les éléments d'information rassemblés ici ont été vérifiés par des experts et divers gouvernements, mais n'ont pas été examinés par le Groupe aux fins d'une éventuelle acceptation ou approbation.

Juin 2008

Le présent document a été rédigé sous la responsabilité de l'Unité d'appui
technique du Groupe de travail II du GIEC.

Référence du présent document technique:

Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, éd., 2008: *Le changement climatique et l'eau*, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

© Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2008

ISBN: 978-92-9169-223-1

Photo de couverture: © Simon Fraser/Science Photo Library

Sommaire

Préface **vii**
Remerciements **viii**
Résumé exécutif **3**
1. Introduction sur le changement climatique et l'eau **9**
1.1 Rappel 11
1.2 Objet 11
1.3 Contexte du présent document technique: conditions socioéconomiques et environnementales 12
1.3.1 Changements observés 12
1.3.2 Changements prévus 14
1.4 Plan 15
2. Changements climatiques observés et prévus en rapport avec l'eau **17**
2.1 Changements climatiques observés en rapport avec l'eau 19
2.1.1 Précipitations (y compris les épisodes extrêmes) et vapeur d'eau 19
2.1.2 Neige et glace terrestre 24
2.1.3 Niveau de la mer 25
2.1.4 Évapotranspiration 26
2.1.5 Humidité du sol 26
2.1.6 Ruissellement et débit fluvial 27
2.1.7 Modes de variabilité à grande échelle 27
2.2 Influences et rétroactions des modifications hydrologiques sur le climat 29
2.2.1 Effets sur les terres émergées 29
2.2.2 Rétroactions dues aux changements de la circulation océanique 30
2.2.3 Émissions et puits affectés par les processus hydrologiques ou par les rétroactions biogéochimiques 31
2.3 Changements climatiques prévus en rapport avec l'eau 32
2.3.1 Précipitations (y compris les épisodes extrêmes) et vapeur d'eau 33
2.3.2 Neige et glace terrestre 35
2.3.3 Niveau de la mer 35
2.3.4 Évapotranspiration 36
2.3.5 Humidité du sol 36
2.3.6 Ruissellement et débit fluvial 37
2.3.7 Modes de variabilité à grande échelle 38
3. Relation entre le changement climatique et les ressources en eau: incidences et mesures d'intervention **39**
3.1 Incidences observées du changement climatique 41
3.1.1 Effets observés dus aux changements dans la cryosphère 41
3.1.2 Hydrologie et ressources en eau 41
3.2 Changements à venir de la disponibilité et de la demande en eau dus au changement climatique 45
3.2.1 Facteurs climatiques pouvant influer sur les systèmes d'eau douce dans le futur 45
3.2.2 Facteurs non climatiques pouvant influer sur les systèmes d'eau douce dans le futur 51

3.2.3 Incidences des changements climatiques sur les futures disponibilités en eau douce 52
3.2.4 Incidences des changements climatiques sur la demande future en eau douce 52
3.2.5 Incidences des changements climatiques sur le stress hydrique à l'avenir 53
3.2.6 Incidences des changements climatiques sur les coûts et les autres aspects socioéconomiques de l'eau douce 53
3.2.7 Zones d'eau douce et secteurs particulièrement vulnérables aux changements climatiques 56
3.2.8 Incertitudes concernant les incidences prévues du changement climatique sur les systèmes d'eau douce 56
3.3 Adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau: aperçu général 57
3.3.1 Gestion intégrée des ressources en eau 61
4. Changement climatique et ressources en eau par système et par domaine 63
4.1 Écosystèmes et biodiversité 65
4.1.1 Contexte 65
4.1.2 Changements prévus de l'hydrologie et implications pour la biodiversité mondiale 65
4.1.3 Incidences des changements hydrologiques sur les principaux types d'écosystèmes 66
4.2 Agriculture et sécurité alimentaire, utilisation des terres et foresterie 70
4.2.1 Contexte 70
4.2.2 Observations 71
4.2.3 Projections 72
4.2.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable 75
4.3 Santé humaine 80
4.3.1 Contexte 80
4.3.2 Observations 82
4.3.3 Projections 82
4.3.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable 83
4.4 Alimentation en eau et assainissement 83
4.4.1 Contexte 83
4.4.2 Observations 83
4.4.3 Projections 83
4.4.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable 85
4.5 Établissements humains et infrastructures 87
4.5.1 Établissements humains 88
4.5.2 Infrastructures 88
4.5.3 Adaptation 89
4.6 Économie: assurance, tourisme, industrie et transport 89
4.6.1 Contexte 89
4.6.2 Coûts socioéconomiques, atténuation, adaptation, vulnérabilité, développement durable 90
5. Analyse des aspects régionaux du changement climatique et des ressources en eau 91
5.1 Afrique 93
5.1.1 Contexte 93
5.1.2 Observations actuelles 94
5.1.3 Changements prévus 96
5.1.4 Adaptation et vulnérabilité 100
5.2 Asie 101
5.2.1 Contexte 101
5.2.2 Incidences observées du changement climatique sur l'eau 101
5.2.3 Incidence prévue du changement climatique sur l'eau et principales vulnérabilités 102
5.2.4 Adaptation et vulnérabilité 104

5.3 Australie et Nouvelle-Zélande 106
5.3.1 Contexte 106
5.3.2 Changements observés 106
5.3.3 Changements prévus 106
5.3.4 Adaptation et vulnérabilité 108
5.4 Europe 110
5.4.1 Contexte 110
5.4.2 Changements observés 110
5.4.3 Changements prévus 111
5.4.4 Adaptation et vulnérabilité 113
5.5 Amérique latine 113
5.5.1 Contexte 113
5.5.2 Changements observés 114
5.5.3 Changements prévus 117
5.5.4 Adaptation et vulnérabilité 118
5.6 Amérique du Nord 120
5.6.1 Contexte et changements observés 120
5.6.2 Changements prévus et conséquences 120
5.6.3 Adaptation 124
5.7 Régions polaires 126
5.7.1 Contexte 126
5.7.2 Changements observés 127
5.7.3 Changements prévus 128
5.7.4 Adaptation et vulnérabilité 129
5.8 Petites îles 129
5.8.1 Contexte 129
5.8.2 Tendances climatiques observées et projections pour les régions insulaires 130
5.8.3 Adaptation, vulnérabilité et viabilité 134
6. Mesures d'atténuation du changement climatique et eau 137
6.1 Introduction 139
6.2 Atténuation par secteur 139
6.2.1 Piégeage et stockage du dioxyde de carbone (CCS) 139
6.2.2 Cultures bioénergétiques 139
6.2.3 Électricité issue de la biomasse 141
6.2.4 Énergie hydraulique 141
6.2.5 Énergie géothermique 142
6.2.6 Consommation d'énergie dans les bâtiments 142
6.2.7 Changement d'affectation et gestion des terres 142
6.2.8 Gestion des terres cultivées (eau) 143
6.2.9 Gestion des terres cultivées (réduction du labour) 143
6.2.10 Boisement ou reboisement 143
6.2.11 Déboisement évité ou réduit 144
6.2.12 Gestion des déchets solides et traitement des eaux usées 144
6.2.13 Pétrole non conventionnel 145
6.3 Effets des politiques et des mesures de gestion de l'eau sur les émissions et l'atténuation des GES 145
6.3.1 Barrages hydroélectriques 145

6.3.2 Irrigation 146
6.3.3 Retour de résidus 146
6.3.4 Drainage des terres cultivées 147
6.3.5 Traitement des eaux usées 147
6.3.6 Dessalement 147
6.3.7 Énergie géothermique 147
6.4 Conflits potentiels entre adaptation et atténuation pour les ressources en eau 148
7. Implications pour la politique et le développement durable 149
7.1 Implications politiques par secteur 151
7.2 Principaux impacts relatifs à l'eau prévus par région 153
7.3 Implications pour une politique d'atténuation des effets du changement climatique 155
7.4 Implications pour le développement durable 155
8. Lacunes dans les connaissances et suggestions pour les travaux futurs 157
8.1 Besoins en matière d'observations 159
8.2 Comprendre les projections climatiques et leurs impacts 160
8.2.1 Compréhension et projection du changement climatique 160
8.2.2 Impacts liés à l'eau 160
8.3 Adaptation et atténuation 161
Références 163
Appendice I: Descriptions des modèles climatiques 189
Appendice II: Glossaire 191
Appendice III: Acronymes, symboles chimiques et unités de mesure 211
Appendice IV: Liste des auteurs 213
Appendice V: Liste des examinateurs 215
Appendice VI: Autorisation de publication 219
Index 221

Préface

Le document technique intitulé *Le changement climatique et l'eau* du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est le sixième de la série des Documents techniques du GIEC et a été rédigé suite à une demande du Secrétariat du Programme climatologique mondial – Eau (PCM – Eau) et du Comité directeur international du «Dialogue sur l'eau et le climat», lors de la 19e Assemblée plénière du GIEC qui s'est déroulée à Genève en avril 2002. Une réunion consultative sur le changement climatique et l'eau a eu lieu à Genève en novembre 2002 et a recommandé l'élaboration d'un document technique sur ce sujet, plutôt que celle d'un rapport spécial. À l'origine, ce document devait se fonder sur les apports du quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, mais également sur les publications précédentes du GIEC. Le Groupe a également décidé que le sujet de l'eau devait être traité en tant que thème transversal dans le quatrième Rapport d'évaluation.

Le présent document technique traite du thème de l'eau douce. L'élévation du niveau de la mer n'est traitée que dans la mesure où elle peut avoir une incidence sur l'eau douce des zones côtières et au-delà. Le système climatique, le système d'eau douce et les systèmes biophysiques et socioéconomiques sont liés de manière complexe. Ainsi, toute modification de l'un de ces facteurs peut induire un changement de n'importe lequel des autres. Les problèmes associés à l'eau douce sont critiques pour la détermination des principales vulnérabilités par région et par domaine. C'est pourquoi la relation entre le changement climatique et les ressources en eau douce est d'un intérêt capital pour les sociétés humaines. Elle présente également des implications pour toutes les espèces vivantes.

Une équipe de rédaction interdisciplinaire d'auteurs principaux a été choisie par les trois bureaux des Groupes de travail du GIEC, avec la mission d'atteindre un équilibre régional et thématique. Comme l'ensemble des documents techniques du GIEC, le présent document se fonde également sur les données des rapports précédemment approuvés, acceptés ou adoptés et a été soumis à un examen simultané par les experts et les gouvernements, suivi d'un examen final mené par ces derniers. Le Bureau du GIEC a agi en tant qu'équipe éditoriale, pour faire en sorte de transmettre de manière appropriée les commentaires de relecture émis par les auteurs principaux dans la phase de finalisation du document technique.

Le Bureau a tenu sa 37e session à Budapest, en avril 2008, et a examiné les principaux commentaires reçus lors de l'examen final par les gouvernements. À la lumière de ses observations et de ses questions, les auteurs principaux ont finalisé le présent document technique, dont le Bureau a ensuite autorisé la publication.

Nous sommes particulièrement reconnaissants aux auteurs principaux (dont la liste est incluse dans le présent document) d'avoir donné très généreusement leur temps et d'avoir achevé leur tâche en respectant les échéances. Nous tenons à remercier Mme Jean Palutikof, responsable de l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II du GIEC, pour avoir brillamment dirigé la rédaction et la publication du présent document.

Rajendra K. Pachauri
Président du GIEC

Renate Christ
Secrétaire du GIEC

Osvaldo Canziani
Coprésident du Groupe de travail II du GIEC

Martin Parry
Coprésident du Groupe de travail II du GIEC

Remerciements

Nous remercions l'Unité d'appui technique du Groupe de travail II et particulièrement Norah Pritchard et Clair Hanson, pour les efforts déployés dans l'élaboration du présent document technique.

Le Gouvernement du Canada a gracieusement accueilli la deuxième réunion des auteurs principaux et nous remercions Terry Prowse pour la prise en charge de l'important travail d'organisation à Victoria, Colombie britannique.

Maurice Roos, du Département des ressources en eau de l'État de Californie, et Bill Girling, de Manitoba Hydro, ont participé à la deuxième réunion des auteurs principaux pour présenter des avis et des suggestions du point de vue de l'utilisateur.

Marilyn Anderson a constitué l'index et Nancy Boston a édité le texte.

Nos remerciements vont à l'ensemble des auteurs, à leurs familles, aux organisations et aux gouvernements qui ont permis que ce document voie le jour.

Bryson Bates
Zbyszek Kundzewicz
Shaohong Wu
Jean Palutikof

23 juin 2008

Le changement climatique et l'eau

Le présent document technique a été établi à la demande de l'assemblée plénière du GIEC, pour répondre aux suggestions du Programme climatologique mondial – Eau, du Dialogue sur l'eau et d'autres organisations concernées par l'approvisionnement en eau. Il a été préparé sous la direction du Président du GIEC, M. R. K. Pachauri.

Auteurs coordonnateurs principaux
Bryson Bates (Australie), Zbigniew W. Kundzewicz (Pologne) et Shaohong Wu (Chine)

Auteurs principaux
Nigel Arnell (Royaume-Uni), Virginia Burkett (États-Unis), Petra Döll (Allemagne), Daniel Gwary (Nigeria), Clair Hanson (Royaume-Uni), BertJan Heij (Pays-Bas), Blanca Elena Jiménez (Mexique), Georg Kaser (Autriche), Akio Kitoh (Japon), Sari Kovats (Royaume-Uni), Pushpam Kumar (Royaume-Uni), Christopher H. D. Magadza (Zimbabwe), Daniel Martino (Uruguay), Luis José Mata (Allemagne/Venezuela), Mahmoud Medany (Égypte), Kathleen Miller (États-Unis), Taikan Oki (Japon), Balgis Osman (Soudan), Jean Palutikof (Royaume-Uni), Terry Prowse (Canada), Roger Pulwarty (États-Unis/Trinité-et-Tobago), Jouni Räisänen (Finlande), James Renwick (Nouvelle-Zélande), Francesco Nicola Tubiello (États-Unis/IIASA/Italie), Richard Wood (Royaume-Uni) et Zong-Ci Zhao (Chine)

Auteurs collaborateurs
Julie Arblaster (Australie), Richard Betts (Royaume-Uni), Aiguo Dai (États-Unis), Christopher Milly (États-Unis), Linda Mortsch (Canada), Leonard Nurse (La Barbade), Richard Payne (Australie), Iwona Pinskwar (Pologne) et Tom Wilbanks (États-Unis)

Résumé exécutif

Il est largement prouvé par des relevés d'observations et des projections climatiques que les sources d'eau douce sont vulnérables et auront à souffrir gravement du changement climatique, avec de grandes répercussions sur les sociétés humaines et sur les écosystèmes.

Le réchauffement observé pendant plusieurs décennies a été relié aux changements survenus dans le cycle hydrologique à grande échelle, notamment: l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, la modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaces accrue, ainsi que la modification de l'humidité du sol et du ruissellement. Les changements dans les précipitations sont très variables à l'échelle spatiale et d'une décennie à l'autre. Au cours du XXe siècle, les précipitations ont surtout augmenté sur les continents dans les latitudes les plus septentrionales, tandis que des diminutions ont principalement touché les latitudes comprises entre 10°S et 30°N depuis les années 1970. La fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou la partie des précipitations totales imputable à de fortes pluies) a augmenté dans la plupart des régions (*probable*[1]). Au niveau mondial, la superficie des terres considérées comme très sèches a plus que doublé depuis les années 1970 (*probable*). Le volume d'eau stocké dans les glaciers de montagne et la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord a considérablement diminué. On a observé des décalages dans les variations saisonnières du débit des rivières alimentées par la fonte des glaciers et de la neige et dans les phénomènes liés à la glace dans les rivières et les lacs (*degré de confiance élevé*). [2.1[2]]

Les simulations des modèles climatiques pour le XXIe siècle s'accordent à prévoir une augmentation des précipitations dans les latitudes élevées (*très probable*) et une partie des tropiques, et une diminution dans certaines régions subtropicales et aux latitudes moyennes inférieures (*probable*). En dehors de ces régions, le signe et l'ampleur des changements prévus varient d'un modèle à l'autre, ce qui est source de grande incertitude pour les projections de précipitations.[3] De ce fait, les projections de futurs changements de précipitations sont plus solides pour certaines régions que pour d'autres. Les projections sont d'autant plus différentes d'un modèle à l'autre que l'échelle spatiale diminue. [2.3.1]

Vers le milieu du XXIe siècle, le débit moyen annuel des cours d'eau et la disponibilité en eau devraient augmenter en raison du changement climatique[4] aux latitudes élevées et dans certaines zones tropicales humides, et diminuer dans des régions sèches aux latitudes moyennes et dans les régions tropicales sèches.[5] De nombreuses régions semi-arides et arides (par exemple, le bassin méditerranéen, l'ouest des États-Unis d'Amérique, le sud de l'Afrique et le nord-est du Brésil) sont particulièrement exposées aux incidences du changement climatique et devraient voir leurs ressources en eau diminuer en conséquence (*degré de confiance élevé*). [2.3.6]

L'augmentation de l'intensité et de la variabilité des précipitations devrait augmenter les risques de crue et de sécheresse dans plusieurs régions. La fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou la partie des précipitations totales imputables à de fortes pluies) augmentera de manière *très probable* dans la plupart des régions au cours du XXIe siècle, ce qui augmentera le risque de crues d'origine pluviale. En même temps, le pourcentage de la superficie terrestre soumis à une sécheresse extrême à un moment donné devrait augmenter (*probable*), venant s'ajouter à la tendance à la sécheresse prévue pour l'intérieur des terres pendant l'été, en particulier dans les régions subtropicales, à des latitudes basses à moyennes. [2.3.1, 3.2.1]

L'eau stockée dans les glaciers et la couverture neigeuse devrait diminuer au cours du siècle, réduisant ainsi la disponibilité en eau pendant les périodes chaudes et sèches (via un décalage saisonnier de l'écoulement fluvial, une augmentation du rapport du débit hivernal sur le débit annuel, et une réduction des basses eaux) dans les régions alimentées en eau de fonte des principales chaînes montagneuses, où vit actuellement plus du sixième de la population mondiale (*degré de confiance élevé*). [2.1.2, 2.3.2, 2.3.6]

L'augmentation de la température des eaux et les variations des phénomènes extrêmes, notamment les crues et les sécheresses, devraient influencer la qualité de l'eau et aggraver de nombreuses formes de pollution aquatique (sédiments, nutriments, carbone organique dissous, organismes pathogènes, pesticides et sel) ainsi que la pollution thermique, avec d'éventuelles conséquences néfastes sur les écosystèmes, la santé publique, la fiabilité des systèmes de distribution d'eau et les coûts d'exploitation (*degré de confiance élevé*). De plus, l'élévation du niveau de la mer devrait étendre les zones de salinisation des eaux souterraines et les estuaires, ce qui entraînera une diminution de la disponibilité en eau douce pour l'homme et les écosystèmes dans les zones côtières. [3.2.1.4, 4.4.3]

Au niveau mondial, les impacts négatifs du changement climatique sur les systèmes d'eau douce à venir devraient

[1] Voir l'encadré 1.1.

[2] Les chiffres entre crochets renvoient aux diverses sections du corps principal du présent document technique.

[3] Les projections considérées sont basées sur l'éventail de scénarios sans mesures d'atténuation élaborés dans le cadre du Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES).

[4] Cette prévision exclut les changements touchant les facteurs non climatiques tels que l'irrigation.

[5] Ces projections sont fondées sur un ensemble de modèles climatiques utilisant le scénario médian A1B du SRES, sans atténuation des émissions. L'analyse de l'éventail de réponses climatiques dans les scénarios du SRES vers le milieu du XXIe siècle laisse à croire que cette conclusion peut être appliquée à un éventail de scénarios plus large.

l'emporter sur les avantages (*degré de confiance élevé*). À l'horizon 2050, la superficie des terres sujettes à un stress hydrique croissant en raison du changement climatique devrait être plus du double de celle des terres soumises à un stress hydrique décroissant. Les régions où le ruissellement est appelé à décroître seront confrontées à une réduction nette de la valeur des services fournis par les ressources en eau. Une augmentation du ruissellement annuel dans certaines régions devrait entraîner une augmentation de l'approvisionnement total en eau. Cependant, dans de nombreuses régions, cet avantage sera probablement contrebalancé par les effets négatifs de la variabilité accrue des précipitations et des variations saisonnières du ruissellement sur l'approvisionnement en eau, la qualité de l'eau et les risques d'inondation (*degré de confiance élevé*). [3.2.5]

Des changements dans la quantité et la qualité de l'eau attribuables au changement climatique devraient influencer la disponibilité, la stabilité et l'utilisation des aliments ainsi que l'accès à ces derniers. Ceci devrait entraîner une diminution de la sécurité alimentaire et une vulnérabilité accrue des cultivateurs dans les zones rurales pauvres, en particulier dans les régions tropicales arides et semi-arides et dans les mégadeltas asiatiques et africains. [4.2]

Le changement climatique influence le fonctionnement et l'exploitation des infrastructures hydrauliques existantes, notamment pour la production d'énergie hydroélectrique, les ouvrages de protection contre les inondations, les systèmes de drainage et d'irrigation, ainsi que les pratiques de gestion de l'eau. Les effets pervers du changement climatique sur les systèmes d'eau douce amplifient les conséquences d'autres contraintes comme l'accroissement de la population, les modifications de l'activité économique, le changement d'affectation des terres et l'urbanisation (*degré de confiance très élevé*). Au niveau mondial, la demande en eau va augmenter au cours des décennies à venir, essentiellement en raison de la croissance de la population et de l'augmentation de l'afflux. Au niveau régional, le changement climatique devrait entraîner de grandes modifications dans la demande en eau d'irrigation (*degré de confiance élevé*). [1.3, 4.4, 4.5, 4.6]

Les pratiques actuelles en matière de gestion des ressources en eau ne sont probablement pas assez robustes pour pallier aux incidences négatives du changement climatique sur la fiabilité de l'approvisionnement en eau, les risques de crue, la santé, l'agriculture, l'énergie et les écosystèmes aquatiques**.** Dans bien des endroits, la gestion de l'eau ne permet pas de faire face de manière satisfaisante à la variabilité climatique actuelle et, partant, aux dommages importants occasionnés par les inondations et les sécheresses. Une première étape qui consisterait à améliorer l'intégration des informations sur la variabilité climatique actuelle dans la gestion de l'eau faciliterait l'adaptation aux incidences du changement climatique sur le long terme. Les facteurs climatiques et non climatiques, tels que l'augmentation de la population et les dommages potentiels, accentueraient les problèmes dans l'avenir (*degré de confiance très élevé*). [3.3]

Le changement climatique remet en cause le postulat traditionnel selon lequel l'expérience acquise dans le passé en matière d'hydrologie est un appui utile pour faire face aux conditions futures. Les conséquences du changement climatique peuvent modifier la fiabilité de systèmes actuels de gestion de l'eau et des infrastructures liées à l'eau. Tandis que des projections quantitatives des changements dans les précipitations, le débit des fleuves et le niveau des eaux à l'échelle du bassin fluvial restent entachées d'incertitudes, il est *très probable* que les propriétés hydrologiques soient amenées à changer dans le futur. Des procédures d'adaptation et des pratiques de gestion des risques qui intègrent les changements hydrologiques prévus aux incertitudes en la matière sont développées dans certains pays et régions. [3.3]

Les options d'adaptation conçues pour garantir un approvisionnement en eau dans des conditions moyennes et de sécheresse exigent l'intégration de stratégies aussi bien côté demande que côté offre. Les premières permettent d'améliorer le rendement hydraulique, par un recyclage de l'eau par exemple. Le recours accru à des incitations économiques, notamment l'utilisation d'instruments de mesure et d'ajustement des prix, pour encourager la conservation de l'eau et le développement de marchés de l'eau, ainsi que la mise en œuvre d'un commerce virtuel de l'eau, permettraient d'envisager des économies d'eau et la réaffectation de l'eau à des usages largement plus valorisés. Les stratégies côté offre impliquent généralement des augmentations de la capacité de stockage, du captage des cours d'eau et des transferts d'eau. La gestion intégrée des ressources en eau fournit un cadre important pour l'élaboration de mesures d'adaptation au travers des systèmes socioéconomiques, environnementaux et administratifs. Pour être efficaces, les approches intégrées doivent être effectuées aux échelles adéquates. [3.3]

Les mesures d'atténuation peuvent réduire l'ampleur des incidences du réchauffement mondial sur les ressources en eau et, ainsi, réduire les besoins d'adaptation. Cependant, si les projets ne sont pas localisés, conçus et gérés de manière durable, ces mesures peuvent avoir des effets secondaires extrêmement négatifs, à savoir une augmentation des besoins en eau pour les activités de boisement ou reboisement ou les cultures de production de bioénergie. D'un autre côté, les mesures de gestion de l'eau, par exemple les barrages hydroélectriques, peuvent avoir un effet sur les émissions de gaz à effet de serre. Les barrages hydroélectriques génèrent une énergie renouvelable, mais produisent eux-mêmes des émissions de gaz à effet de serre. L'ampleur de ces émissions dépend de circonstances spécifiques et du mode d'exploitation. [section 6]

La gestion des ressources en eau influence manifestement de nombreux autres domaines de politique (par exemple l'énergie, la santé, la sécurité alimentaire et la conservation de la nature). Par conséquent, l'évaluation des possibilités d'adaptation et d'atténuation doit être menée dans les multiples secteurs qui dépendent de l'eau. Les régions et les pays à faibles

revenus resteront *probablement* vulnérables à moyen terme, car ils disposent de moins d'options que les pays à hauts revenus pour s'adapter au changement climatique. C'est pourquoi des stratégies d'adaptation doivent être conçues dans le contexte des politiques de développement, d'environnement et de santé publique. [section 7]

Il existe des lacunes en termes d'observation et de besoins de recherche liés au changement climatique et à l'eau. Les données d'observation et l'accès aux données sont des conditions préalables à la gestion adaptative, et pourtant bien des réseaux d'observation sont en voie de disparition. Il est nécessaire d'approfondir la compréhension et d'améliorer la modélisation des changements climatiques liés au cycle hydrologique à des échelles pertinentes pour une prise de décision. Les informations relatives aux incidences du changement climatique sur l'eau ne sont pas appropriées, surtout en ce qui concerne la qualité de l'eau, les écosystèmes aquatiques et les eaux souterraines, notamment dans leurs dimensions socioéconomiques. Pour finir, les outils actuels ne sont pas adaptés à une évaluation intégrée des possibilités d'adaptation et d'atténuation dans les multiples secteurs qui dépendent de l'eau. [section 8]

1

Introduction sur le changement climatique et l’eau

1.1 Rappel

L'initiative d'une publication spéciale du GIEC sur l'eau et le changement climatique remonte à la 19e Assemblée plénière du GIEC (Genève, avril 2002), lors de laquelle le Secrétariat du Programme climatologique mondial – Eau et le Comité directeur international du «Dialogue sur l'eau et le climat» ont demandé au Groupe d'experts de rédiger un rapport spécial sur le sujet. Une réunion consultative sur le changement climatique et l'eau a eu lieu à Genève en novembre 2002 et a conclu que l'élaboration d'un tel rapport en 2005 ou 2006 aurait peu de valeur, étant donné qu'il serait vite remplacé par le quatrième Rapport d'évaluation, dont la publication était prévue pour 2007. Les participants à la réunion ont préféré recommander l'établissement d'un document technique sur le changement climatique et l'eau se fondant principalement sur le quatrième Rapport, mais tenant compte également de publications antérieures du Groupe d'experts.

Une équipe de rédaction interdisciplinaire a été formée par les bureaux des trois Groupes de travail du GIEC, avec la mission d'atteindre un équilibre régional et thématique, et d'englober de nombreuses disciplines pertinentes. Des organismes des Nations Unies (NU), des organisations non gouvernementales (ONG) et des représentants des parties prenantes concernées, dont le secteur privé, ont participé à l'élaboration du présent document technique et au processus d'examen associé.

Les recommandations du GIEC exigent que les documents techniques soient élaborés d'après:

a) Le texte des rapports d'évaluation et des rapports spéciaux du GIEC et les extraits des études citées sur lesquelles ils se fondent;
b) Des modèles pertinents et leurs hypothèses, et des scénarios fondés sur des hypothèses socioéconomiques, tels qu'ils ont été utilisés comme sources d'information pour ces rapports.

Ces recommandations ont été suivies lors de l'élaboration du présent document technique.

1.2 Objet

Le présent document technique concerne uniquement l'eau douce. L'élévation du niveau de la mer n'est traitée que dans la mesure où elle peut avoir une incidence sur l'eau douce des zones côtières, par exemple sur la salinisation des eaux souterraines. Dans le droit fil de la littérature scientifique, ce document traite principalement du changement climatique au cours du XXIe siècle, mais reconnaît cependant que, même si les concentrations des gaz à effet de serre venaient à se stabiliser, le réchauffement et l'élévation du niveau de la mer se poursuivraient pendant plusieurs siècles. [GT I RiD]

L'eau douce est un élément essentiel à la vie et son rôle capital est largement reconnu et présent dans le contexte international (par exemple le programme Action 21, les forums mondiaux de l'eau, l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire et le Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau). L'eau douce est indispensable à toutes les formes de vie et elle doit être présente en grandes quantités pour la plupart des activités humaines. Le climat, l'eau douce, les systèmes biophysiques et socioéconomiques sont interconnectés de manière complexe; ainsi, une modification touchant l'un de ces facteurs entraîne des modifications des autres. Le changement climatique anthropique augmente notablement la pression dans les pays déjà confrontés au problème de l'utilisation durable de l'eau douce. Les problèmes liés à l'eau douce sont: l'excès d'eau, la pénurie d'eau et la pollution excessive. Chacun d'eux peut être aggravé par le changement climatique. Les problèmes liés à l'eau douce jouent un rôle charnière entre les principales vulnérabilités régionales et sectorielles. De ce fait, la relation entre le changement climatique et les ressources en eau douce est d'une importance capitale.

Les problèmes des ressources en eau n'ont pas été convenablement traités jusqu'à présent dans les analyses du changement climatique et dans la formulation de politiques climatiques. De même, dans la plupart des cas, les changements climatiques n'ont pas été correctement pris en compte dans le cadre des études sur les ressources en eau, de la gestion de ces ressources et de l'élaboration des politiques en la matière. Selon un grand nombre d'experts, l'eau, sa disponibilité et sa qualité seront les principales contraintes qui s'exerceront sur les sociétés et sur l'environnement soumis au changement climatique, pour lesquels elles représenteront un enjeu de taille; il est donc primordial d'approfondir nos connaissances des problèmes en cause.

Les objectifs du présent document technique, tels qu'ils sont décrits dans le document IPCC–XXI/Doc. 9[6], sont résumés ci-dessous:

- Améliorer notre compréhension des liens qui existent entre, d'une part, le changement climatique naturel et le changement climatique anthropique, leurs incidences, les réponses possibles pour l'adaptation et l'atténuation et, d'autre part, les problèmes liés à l'eau;
- Informer les décideurs et les parties prenantes des implications du changement climatique et des amorces de solutions envisageables pour les ressources en eau, ainsi que des implications pour les ressources en eau des différents scénarios et solutions, y compris les synergies et les compromis correspondants.

Comme indiqué dans le document IPCC–XXI/Doc. 9, le présent document technique a pour objet d'évaluer l'incidence du changement climatique sur les processus et les régimes hydrologiques, ainsi que sur les ressources en eau douce

[6] *Scoping Paper for a possible Technical Paper on Climate Change and Water*. Disponible à l'adresse suivante: http://www.ipcc.ch/meetings/session21.htm.

(disponibilité, qualité, utilisations et gestion). Il tient compte des principales vulnérabilités actuelles et prévues, et des perspectives d'adaptation.

Le présent document s'adresse principalement aux décideurs dans tous les domaines liés à la gestion des ressources en eau douce, au changement climatique, aux études stratégiques, à l'aménagement de l'espace et au développement socioéconomique. Il s'adresse également à la communauté scientifique travaillant dans le domaine de l'eau et du changement climatique, et à un public plus large, notamment les ONG et les médias.

Étant donné que les informations relatives à l'eau et au changement climatique sont dispersées dans le quatrième Rapport d'évaluation et dans les rapports de synthèse du GIEC, il est utile de disposer d'un document rassemblant ces données. Le présent document technique fait également référence aux rapports d'évaluation et aux rapports spéciaux antérieurs concernés du GIEC, le cas échéant. La valeur ajoutée de cette publication réside dans l'extraction, la hiérarchisation, la synthèse et l'interprétation de ces textes.

Le texte du présent document technique est fidèle à celui des rapports élaborés par le GIEC, dont il reflète l'équilibre et l'objectivité. Quand il s'en écarte, c'est pour mieux étayer ou expliquer leurs conclusions. Chaque paragraphe de fond fait référence à un rapport du Groupe d'experts. La source est indiquée entre crochets, généralement à la fin du paragraphe (sauf quand un paragraphe renvoie à plusieurs documents du GIEC, auquel cas la source correspondante est indiquée après l'entrée en question). Les conventions suivantes ont été utilisées:

- Le quatrième Rapport d'évaluation est la publication du GIEC la plus citée; elle est par exemple signalée par [GT II 3.5], qui renvoie ainsi à la section 3.5 du chapitre 3 de la contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Voir GIEC (2007a, b, c, d).
- Lorsque des informations sont issues d'autres sources du GIEC, les acronymes suivants sont utilisés: TRE (troisième Rapport d'évaluation: GIEC 2001a, b, c), RICC (Rapport spécial sur les incidences de l'évolution du climat dans les régions: Watson *et al.*, 1997), LULUCF (Rapport spécial sur l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie: GIEC, 2000), SRES (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions: Nakićenović et Swart, 2000), CCB (*Document technique V – Les changements climatiques et la biodiversité*: Gitay *et al.*, 2002) et CCS (Rapport spécial sur le piégeage et le stockage du dioxyde de carbone: Metz *et al.*, 2005). Par conséquent, [GT II TRE 5.8.3] fait référence au paragraphe 5.8.3 du chapitre 5 de la contribution du Groupe de travail II au troisième Rapport d'évaluation.
- D'autres acronymes sont utilisés pour les sources, tels que RE (Résumé exécutif), RiD (Résumé à l'intention des décideurs), RT (Résumé technique) et RSY (Rapport de synthèse), et tous font référence au quatrième Rapport d'évaluation, sauf indication contraire.

Les références aux sources originales (revues, livres et rapports) sont indiquées entre parenthèses après la phrase correspondante.

1.3 Contexte du présent document technique: conditions socio-économiques et environnementales

Le présent document technique étudie les relations qui existent entre le changement climatique et l'eau douce, telles que décrites dans les rapports d'évaluation et les rapports spéciaux du GIEC. Ces relations ne sont pas isolées, mais font partie d'un tout et interagissent avec les conditions socioéconomiques et environnementales. Dans cette section, les principales caractéristiques observées et prévues de ces conditions sont décrites dans leur rapport avec l'eau douce.

Plusieurs moteurs non associés au climat influencent les ressources en eau douce à toutes les échelles, notamment l'échelle mondiale (NU, 2003). Les ressources en eau sont fortement touchées, tant en termes de quantité que de qualité, par l'activité humaine, à savoir l'agriculture et les changements d'affectation des terres, la construction et la gestion des réservoirs, les émissions de polluants, et le traitement de l'eau et des eaux usées. L'utilisation de l'eau est principalement liée aux changements démographiques, à la consommation d'aliments (notamment le type de régime), à la politique économique (notamment la tarification de l'eau), à la technologie, au mode de vie[7] et à la perception de la valeur des écosystèmes d'eau douce par la société. Afin d'évaluer la relation entre le changement climatique et l'eau douce, il est nécessaire d'analyser comment l'eau douce a été influencée (et sera influencée dans l'avenir) par les changements de ces moteurs non associés au climat. [GT II 3.3.2]

1.3.1 Changements observés

Dans les évaluations à l'échelle mondiale, les bassins soumis à un stress hydrique[8] sont souvent définis comme des bassins où les disponibilités en eau par habitant sont inférieures à 1 000 m^3/an (sur la base du ruissellement moyen à long terme), ou dont le rapport de prélèvement sur le ruissellement annuel moyen à long terme est supérieur à 0,4. Un volume d'eau de 1 000 m^3/habitant/an est généralement plus que suffisant pour des utilisations domestiques, industrielles et agricoles. Ces bassins soumis à un stress hydrique sont situés en Afrique du Nord, dans la région méditerranéenne, au Moyen-Orient, au Proche-Orient, en Asie du Sud, au nord de la Chine, en Australie, aux États-Unis, au Mexique, au nord-est du Brésil et sur la côte ouest de l'Amérique du Sud (figure 1.1). Les estimations

[7] Dans ce contexte, l'utilisation d'appareils gros consommateurs d'eau, tels que des lave-vaisselle, des lave-linge, des arroseurs rotatifs, etc.

[8] Le stress hydrique est un concept qui permet de décrire la manière dont les populations sont exposées à un risque de pénurie d'eau.

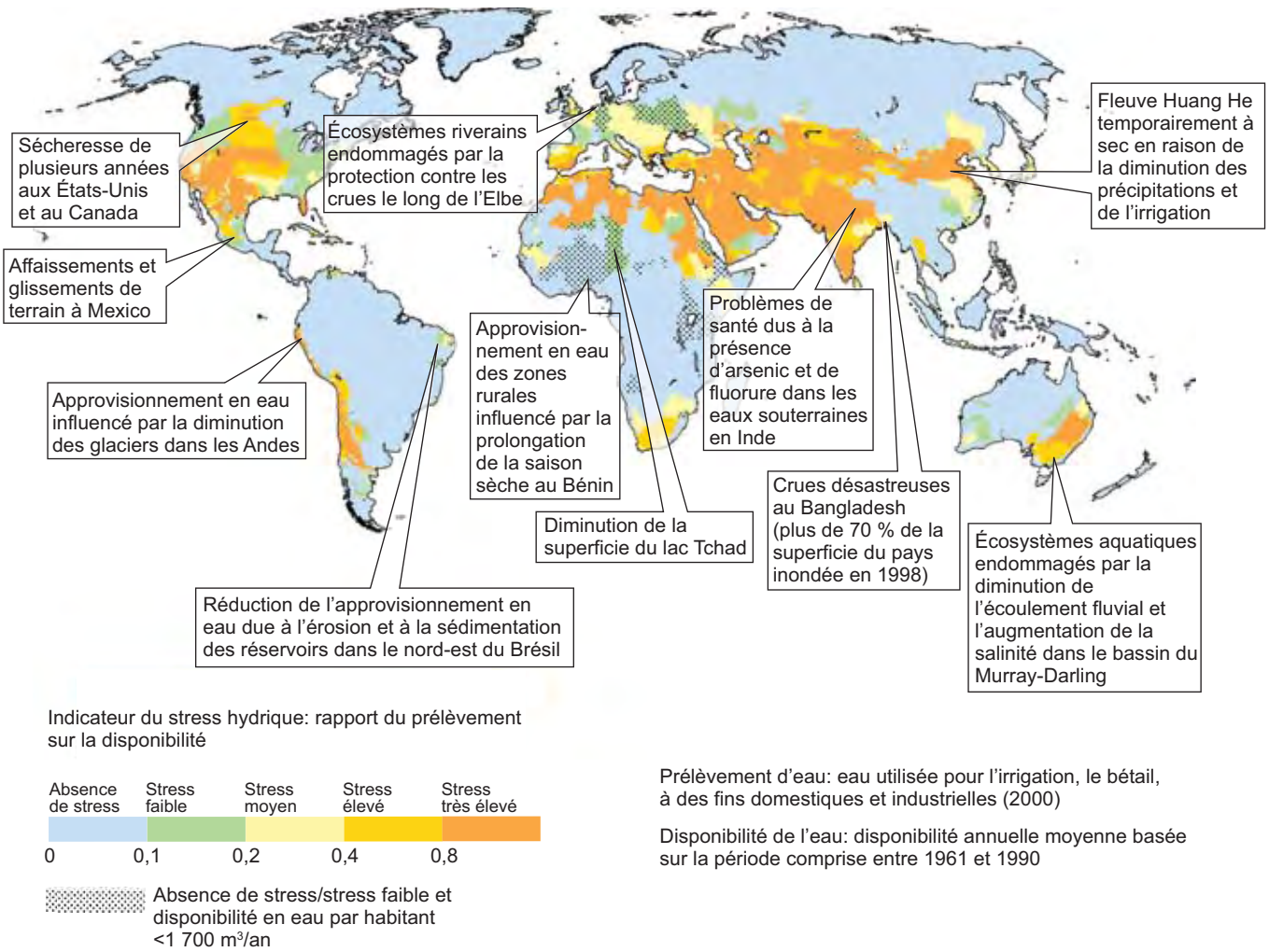


Figure 1.1: *Exemples de vulnérabilités actuelles des ressources en eau douce et de leur gestion; à l'arrière-plan, carte du stress hydrique d'après WaterGAP (Alcamo* et al.*, 2003a). Se reporter au texte pour le rapport avec le changement climatique. [GT II figure 3.2]*

pour les populations habitant ces bassins vont de 1,4 milliard à 2,1 milliards d'habitants (Vörösmarty *et al.*, 2000; Alcamo *et al.*, 2003a, b; Oki *et al.*, 2003; Arnell, 2004). [GT II 3.2]

La consommation d'eau, en particulier pour l'irrigation, augmente généralement avec la température et diminue avec les précipitations; aucune preuve ne permet cependant d'établir un profil, à long terme, de la consommation passée en fonction du climat. Ceci s'explique en partie par le fait que l'utilisation de l'eau est principalement influencée par des facteurs non climatiques ainsi que par la qualité insuffisante des données dans ce domaine en général, et des séries chronologiques en particulier. [GT II 3.2]

La disponibilité hydrique des sources de surface ou des nappes souterraines peu profondes dépend de la saisonnalité et de la variabilité interannuelle de l'écoulement fluvial, et l'approvisionnement en eau est déterminé par les basses eaux saisonnières. Dans les bassins à prédominance neigeuse, une augmentation de la température entraîne une réduction de l'écoulement fluvial et donc une diminution de l'approvisionnement en eau en été (Barnett *et al.*, 2005). [GT II 3.2]

Dans les régions soumises à un stress hydrique, les populations et les écosystèmes sont particulièrement vulnérables à une diminution des précipitations et à une augmentation de leur variabilité dues au changement climatique. Des exemples sont donnés dans la section 5.

L'utilisation de l'eau s'est accrue au cours des dernières décennies dans la plupart des pays (hormis quelques pays industrialisés), ce qui s'explique par la croissance démographique et économique, les changements de mode de vie et l'extension des systèmes d'approvisionnement en eau, l'irrigation étant de loin la cause d'augmentation la plus importante. Elle représente environ 70 % de la totalité des prélèvements d'eau dans le monde et plus de 90 % de la consommation (c'est-à-dire le volume d'eau qui n'est plus disponible pour une utilisation en aval). [GT II 3.2] Les terres irriguées génèrent environ 40 % de la totalité de la production agricole (Fischer *et al.*, 2006). Au

Priorité à l'économie

Canevas A1 Monde: logique de marché Économie: croissance par habitant la plus rapide Population: pic en 2050, puis diminution Gouvernance: fortes interactions régionales; convergence des revenus Technologie: trois groupes de scénarios: • **A1FI**: utilisation intensive de l'énergie fossile • **A1T**: sources d'énergie non fossiles • **A1B** toutes sources équilibrées	**Canevas A2** Monde: différencié Économie: orientée région; croissance par habitant la plus lente Population: augmentation constante Gouvernance: autonomie et préservation des identités locales Technologie: développement le plus lent et le plus fragmenté
Canevas B1 Monde: convergent Économie: basée sur les services et l'information; croissance inférieure à celle du scénario A1 Population: identique à A1 Gouvernance: solutions mondiales pour une durabilité économique, sociale et environnementale Technologie: propre et économe en ressources	**Canevas B2** Monde: solutions locales Économie: croissance intermédiaire Population: augmentation constante à un rythme plus lent qu'en A2 Gouvernance: solutions locales et régionales pour la protection de l'environnement et l'équité sociale Technologie: plus rapide qu'en A2; moins rapide, plus diversifiée qu'en A1/B1

Intégration mondiale

Priorité à la région

Priorité à l'environnement

Figure 1.2: *Résumé des caractéristiques des quatre canevas du SRES (d'après Nakićenović et Swart, 2000). [GT II figure 2.5]*

niveau mondial, leur superficie a augmenté de manière quasi linéaire depuis 1960, à un rythme d'environ 2 % par an, passant de 140 millions d'hectares en 1961-1963 à 270 millions d'hectares en 1997-1999, et représentent environ 18 % de la totalité des terres actuellement cultivées (Bruinsma, 2003).

Bien que l'évolution démographique à l'échelle régionale diffère beaucoup de la moyenne mondiale, la croissance de la population mondiale est déjà ralentie. À l'échelle mondiale, l'utilisation de l'eau est probablement en augmentation du fait de la croissance économique des pays en développement, mais aucune donnée fiable n'est disponible en ce qui concerne le taux d'augmentation. [GT II 3.2, 5.3]

La qualité des eaux de surface et des nappes souterraines a généralement diminué au cours des dernières décennies, principalement en raison de l'augmentation des activités agricoles et industrielles (NU, 2006). Pour résoudre ce problème, de nombreux pays (par exemple, des pays de l'Union européenne et le Canada) ont établi des normes ou renforcé les normes existantes en matière d'effluents et ont remis en état des stations de traitement des eaux usées (GEO-3, 2003). [GT II 3.3.2, tableau 8.1]

1.3.2 Changements prévus

1.3.2.1 Généralités – Rappel

Les quatre canevas de scénarios SRES du GIEC (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions: Nakićenović et Swart, 2000), sur lesquels sont fondées de nombreuses études de prévision concernant le changement climatique et les ressources en eau, envisagent une gamme de changements possibles dans la population et l'activité économique au cours du XXIe siècle (voir figure 1.2). Dans les scénarios qui envisagent une économie dominée par la mondialisation du commerce et des alliances (A1 et B1), la population mondiale devrait passer de 6,6 milliards aujourd'hui à un pic de 8,7 milliards en 2050, tandis que dans les scénarios fondés sur une mondialisation et une coopération moins accentuées (A2 et B2), la population mondiale devrait augmenter jusqu'en 2100, pour atteindre respectivement 10,4 milliards (B2) et 15 milliards (A2) d'habitants d'ici cette échéance. En général, tous les scénarios SRES décrivent une société plus prospère que celle d'aujourd'hui, avec un produit intérieur brut (PIB) mondial multiplié par 10 à 26 à l'horizon 2100. Ils envisagent une diminution des différences de revenu d'une région à l'autre, la technologie étant un moteur aussi important que le changement démographique et le développement économique. [SRES RiD]

1.3.2.2 Ressources en eau

D'éventuels changements dans la construction ou le démantèlement des barrages, les infrastructures d'approvisionnement en eau, le traitement et la réutilisation des eaux usées, le dessalement, les émissions polluantes et l'utilisation des terres (notamment en ce qui concerne l'irrigation) sont particulièrement intéressants pour les prévisions relatives aux ressources en eau, avec ou sans changement climatique. Indépendamment de celui-ci, de nouveaux barrages devraient voir le jour dans les pays en développement pour la production d'énergie hydroélectrique et l'approvisionnement en eau, mais leur nombre sera *probablement* faible par rapport aux 45 000 barrages de grande taille existants. Cependant, les incidences d'une éventuelle augmentation de la demande en énergie hydroélectrique dans l'avenir n'ont pas été prises en compte (Commission internationale des grands barrages, 2000; Scudder, 2005). Dans les pays développés, le nombre de barrages restera *très probablement* stable et certains ouvrages seront démantelés. Étant donné l'augmentation de la variabilité temporelle du ruissellement consécutive au changement climatique, l'augmentation du volume d'eau stocké dans les barrages pourrait s'avérer avantageuse, en particulier lorsque le ruissellement annuel ne diminue pas de manière significative. La prise en compte du débit écologique réservé peut amener à modifier ultérieurement l'exploitation des réservoirs pour restreindre l'utilisation humaine des ressources en eau. Les efforts investis pour atteindre les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD, voir tableau 7.1) devraient permettre d'améliorer les sources d'eau et l'assainissement. Dans l'avenir, la réutilisation des eaux usées et le dessalement représenteront probablement des sources importantes d'approvisionnement en eau

dans les régions arides et semi-arides. Cependant, certains problèmes liés à leur incidence sur l'environnement, notamment le coût énergétique élevé du dessalement, ne sont pas résolus. D'autres solutions, telles que des politiques efficaces de tarification de l'eau et des stratégies rentables de gestion de la demande en eau, doivent d'abord être envisagées. [GT II 3.3.2, 3.4.1, 3.7]

Une augmentation du traitement des eaux usées est prévue tant dans les pays développés que dans les pays en développement, mais les sources ponctuelles de déversement d'éléments nutritifs, de métaux lourds et de substances organiques augmenteront *probablement* dans les pays en développement. Dans ces deux catégories de pays, les émissions de micro-polluants organiques (par exemple, des substances endocrines) vers les eaux de surface et les eaux souterraines sont susceptibles d'augmenter, étant donné que la production et la consommation de substances chimiques (hormis quelques substances très toxiques) s'accroîtront *probablement*. Certains de ces polluants ne sont pas éliminés par les techniques actuelles de traitement des eaux usées. L'élévation du niveau de la mer pourrait influencer le drainage des eaux de ruissellement et l'évacuation des eaux usées dans les régions côtières et, ainsi, modifier la qualité de l'eau. [GT II 3.2.2, 3.4.4]

Les émissions diffuses d'éléments nutritifs et de pesticides imputables à l'agriculture resteront *probablement* importantes dans les pays développés, augmenteront *très probablement* dans les pays en développement et nuiront largement à la qualité de l'eau. Selon les quatre scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005a) («G lobal orchestration», «Order from strength», «Adapting mosaic» et «TechnoGarden»), l'utilisation d'engrais azotés devrait atteindre entre 110 et 140 millions de tonnes dans le monde à l'horizon 2050, contre 90 millions de tonnes en 2000. Dans trois de ces scénarios, une augmentation du transport d'azote par les rivières est envisagée à l'horizon 2050, tandis que le scénario «TechnoGarden» (semblable au scénario SRES B1 du GIEC) prévoit, lui, une réduction (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 3.3.2]

Parmi les moteurs les plus importants de l'utilisation de l'eau se trouvent le développement de la population et de l'économie, mais également le changement de la valeur de l'eau aux yeux de la société. Il s'agit en effet de donner la priorité à l'approvisionnement en eau domestique et industrielle par rapport à l'irrigation et de faire un usage efficace de l'eau, notamment grâce à l'application étendue de techniques d'économie d'eau et de mesures de tarification de l'eau. Dans les quatre scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, le volume d'eau domestique utilisé par habitant est très similaire en 2050 dans toutes les régions du monde et se situe autour de 100 m^3/an, soit la moyenne européenne en 2000 (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 3.3.2]

Les principaux moteurs de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation non associés au changement climatique dans l'avenir sont les suivants: l'étendue de la superficie irriguée, le type de culture, l'intensité des cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation. Selon les prévisions de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), les pays en développement, qui représentent 75 % des terres irriguées dans le monde, augmenteront *probablement* leur surface irriguée de 0,6 % par an jusqu'en 2030, tandis que l'intensité des cultures des terres irriguées devrait passer de 1,27 à 1,41 culture par hectare et par an, et que l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation devrait augmenter légèrement (Bruinsma, 2003). Ces estimations excluent le changement climatique qui, selon Bruinsma, ne devrait pas toucher l'agriculture avant 2030. La plus grande partie de l'extension devrait se produire dans des régions déjà soumises à un stress hydrique comme le sud de l'Asie, le nord de la Chine, le Proche-Orient et l'Afrique du Nord. Cependant, une extension bien moindre des terres irriguées est prévue par les quatre scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, avec des taux de croissance mondiale de seulement 0 à 0,18 % par an jusqu'en 2050. Après 2050, la superficie des terres irriguées devrait se stabiliser ou diminuer légèrement d'après tous les scénarios, sauf «Global orchestration» (semblable au scénario SRES A1 du GIEC) (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005a). Une autre étude, basée sur un scénario de population A2 révisé et sur les prévisions à long terme de la FAO, prévoit une augmentation des terres irriguées de plus de 40 % à l'horizon 2080 à l'échelle mondiale, principalement dans le sud de l'Asie, en Afrique et en Amérique latine, ce qui correspond à une augmentation moyenne de 0,4 % par an (Fischer *et al.*, 2006). [GT II 3.3.2]

1.4 Plan

Le présent document technique comprend huit sections. Après l'introduction (section 1), la section 2 est principalement fondée sur les évaluations du Groupe de travail I, et examine la science du changement climatique, observé et prévu, ainsi que sa relation avec les variables hydrologiques. La section 3 présente une vue générale des incidences (observées et prévues) du changement climatique liées à l'eau et d'éventuelles stratégies d'adaptation, issues principalement des évaluations du Groupe de travail II. La section 4 examine ensuite les systèmes et les secteurs dans le détail, tandis que la section 5 suit une approche régionale. La section 6, fondée sur les évaluations du Groupe de travail III, couvre les aspects de l'atténuation liés à l'eau. La section 7 est consacrée aux implications pour la politique et le développement durable, et la dernière section (section 8) concerne les lacunes dans les connaissances et propose des suggestions pour les travaux futurs. Le présent document technique reprend la terminologie standard utilisée dans le quatrième Rapport d'évaluation pour décrire l'incertitude (voir encadré 1.1).

Encadré 1.1: Traitement des incertitudes au niveau des connaissances actuelles dans le document technique [RSY]

La note d'orientation du GIEC sur l'incertitude[9] établit un cadre de référence pour le traitement de l'incertitude à l'intention des trois Groupes de travail et aux fins du présent document technique. Il s'agit d'un cadre général, étant donné que les informations évaluées relèvent de différentes disciplines et que les méthodes de traitement de l'incertitude tirées de la littérature sont variées. Les données, indicateurs et analyses utilisés en sciences naturelles sont généralement d'une autre nature que ceux qui servent à évaluer le développement technologique ou qui sont utilisés en sciences sociales. Les travaux du Groupe de travail I entrent dans la première catégorie, ceux du Groupe de travail III dans la seconde, tandis que le domaine d'étude du Groupe de travail II englobe les deux catégories.

Trois approches différentes, faisant chacune appel à une terminologie particulière, sont adoptées pour décrire les incertitudes. Leur choix dépend tout à la fois de la nature de l'information disponible et de l'avis autorisé des auteurs quant à l'exactitude et au degré d'exhaustivité des connaissances scientifiques actuelles.

Lorsque l'évaluation de l'incertitude est qualitative, elle consiste à donner une idée approximative de la quantité et de la qualité des éléments probants (c'est-à-dire des informations théoriques ou tirées d'observations ou de modèles indiquant si une opinion ou une proposition est vraie ou valable) ainsi que du degré de concordance (c'est-à-dire du niveau de convergence des documents sur une conclusion donnée). C'est cette approche qu'adopte le Groupe de travail III en utilisant une série de termes explicites tels que: *large concordance, degré élevé d'évidence; large concordance, degré moyen d'évidence; concordance moyenne, degré moyen d'évidence*, etc.

Lorsque l'évaluation de l'incertitude est plutôt quantitative et fondée sur un avis autorisé quant à l'exactitude des données, des analyses ou des modèles utilisés, on emploie les degrés de confiance ci-après pour exprimer la probabilité qu'une conclusion est correcte: *degré de confiance très élevé* (9 chances au moins sur 10); *degré de confiance élevé* (environ 8 chances sur 10); *degré de confiance moyen* (environ 5 chances sur 10); *faible degré de confiance* (environ 2 chances sur 10); et *très faible degré de confiance* (moins d'une chance sur 10).

Lorsque l'évaluation de l'incertitude concerne des résultats précis et qu'elle est fondée sur un avis autorisé et une analyse statistique d'une série d'éléments probants (par exemple des observations ou des résultats de modèles), on utilise les fourchettes de probabilité ci-après pour exprimer la probabilité d'occurrence: *pratiquement certain* (probabilité supérieure à 99 %); *extrêmement probable* (probabilité supérieure à 95 %); *très probable* (probabilité supérieure à 90 %); *probable* (probabilité supérieure à 66 %); *plus probable qu'improbable* (probabilité supérieure à 50 %); à *peu près aussi probable qu'improbable* (probabilité de 33 % à 66 %); *improbable* (probabilité inférieure à 33 %); *très improbable* (probabilité inférieure à 10 %); *extrêmement improbable* (probabilité inférieure à 5 %); *exceptionnellement improbable* (probabilité inférieure à 1 %).

Le Groupe de travail II a eu recours aux évaluations du degré de confiance et de la probabilité, tandis que le Groupe de travail I a essentiellement utilisé les évaluations de la probabilité.

Le présent document technique reprend les modes d'évaluation de l'incertitude adoptés par les trois Groupes de travail. Lorsque des conclusions synthétiques reposent sur des informations provenant de plus d'un Groupe de travail, l'incertitude est exprimée dans les termes qui apparaissent dans les rapports des Groupes de travail respectifs.

[9] Voir http://www.giec.ch/meetings/ar4-workshops-express-meetings/uncertainty-guidance-note.pdf.

2

Changements climatiques observés et prévus en rapport avec l’eau

L'eau joue un rôle dans toutes les composantes du système climatique (l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface des terres émergées et la biosphère). Par conséquent, le changement climatique a une incidence sur l'eau à travers plusieurs mécanismes. La présente section traite des observations des modifications récentes des variables liées à l'eau et des projections concernant les changements à venir.

2.1 Changements climatiques observés en rapport avec l'eau

Le cycle hydrologique est étroitement lié aux modifications de la température atmosphérique et du bilan radiatif. Le réchauffement du système climatique au cours de ces dernières décennies est sans équivoque, ainsi qu'il ressort aujourd'hui des observations des augmentations mondiales des températures moyennes de l'air et des océans, de la fonte généralisée de la neige et de la glace ainsi que l'élévation du niveau de la mer à l'échelle du globe. On estime que le forçage radiatif anthropique net du climat est positif (effet de réchauffement), la valeur la plus probable se situant à 1,6 Wm^{-2} pour 2005 (par rapport aux valeurs préindustrielles de 1750). L'estimation la plus probable de la tendance linéaire au réchauffement de la température en surface du globe entre 1906 et 2005 (qui oscille *probablement* entre 0,56 et 0,92 °C) est de 0,74 °C, avec une tendance à l'accélération du réchauffement au cours des 50 dernières années. De nouvelles analyses font apparaître des taux de réchauffement de la troposphère inférieure et moyenne analogues à ceux constatés pour les températures en surface. Les études sur l'attribution de ces changements montrent que la majeure partie de la hausse des températures mondiales observée depuis la moitié du XXe siècle est *très probablement* due à l'augmentation constatée des concentrations de gaz à effet de serre anthropiques. À l'échelle continentale, il est *probable* qu'un réchauffement anthropique moyen important se soit produit au cours des 50 dernières années sur l'ensemble des continents, à l'exception de l'Antarctique. Dans des régions étendues, le nombre de journées et de nuits froides a diminué et le gel a été moins fréquent, tandis que les journées et les nuits chaudes ainsi que les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes durant ce même laps de temps. [GT I RiD]

Le réchauffement climatique observé ces dernières décennies est indissociable des changements affectant un certain nombre de composantes du cycle hydrologique et des systèmes hydrologiques, tels que la modification du régime, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la fonte généralisée de la neige et de la glace, l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique et de l'évaporation ainsi que les modifications de l'humidité du sol et du ruissellement. Tous les éléments du cycle hydrologique sont sujets à une forte variabilité naturelle, sur des échelles de temps interannuelles à décennales, qui masque souvent les tendances à long terme. Les tendances des variables hydrologiques restent très incertaines en raison de l'existence de grandes différences régionales et de la couverture spatiale et temporelle limitée des réseaux de surveillance (Huntington, 2006). À l'heure actuelle, il demeure très difficile de recueillir des données sur les variations et les tendances interannuelles des précipitations à la surface des océans. [GT I 3.3]

La compréhension et l'attribution des changements observés constituent également un défi. S'agissant des variables hydrologiques, comme le ruissellement, les facteurs non climatiques peuvent jouer un rôle important au niveau local (par exemple, les changements des méthodes d'extraction). La réaction du climat aux agents de forçage est également complexe. Par exemple, les aérosols absorbants (comme le carbone noir) ont entre autres effets de capter la chaleur dans la couche d'aérosol, qui, autrement, parviendrait jusqu'à la surface, conduisant à une évaporation et, ultérieurement, à un dégagement de chaleur latente au-dessus de la surface. Ainsi, les aérosols absorbants peuvent diminuer l'évaporation et les précipitations localement. Bon nombre de processus régissant les aérosols sont omis dans les modèles climatiques ou y sont inclus de façon quelque peu simpliste; de même, l'ampleur de la répercussion de ces mécanismes sur les précipitations au niveau local est parfois mal connue. Malgré ces incertitudes, plusieurs affirmations peuvent être faites sur l'attribution des changements hydrologiques observés. Celles-ci sont reprises au niveau de l'examen des diverses variables effectué dans la présente section, qui s'appuie sur les évaluations figurant dans le quatrième Rapport d'évaluation. [GT I 3.3, 7.5.2, 8.2.1, 8.2.5, 9.5.4; GT II 3.1, 3.2]

2.1.1 Précipitations (y compris les épisodes extrêmes) et vapeur d'eau

Les tendances des précipitations sur les terres émergées ont été analysées grâce à plusieurs ensembles de données provenant, notamment, du Réseau mondial de données climatologiques anciennes (GHCN: Peterson et Vose, 1997), mais également du «Precipitation Reconstruction over Land» (PREC/L: Chen *et al*., 2002), du Projet mondial de climatologie des précipitations (GPCP: Adler *et al*., 2003), du Centre mondial de climatologie des précipitations (GPCC: Beck *et al*., 2005) et de l'Unité de recherche climatologique (CRU: Mitchell et Jones, 2005). Les précipitations sur les terres émergées ont généralement augmenté durant le XXe siècle entre 30°N et 85°N; néanmoins, des baisses importantes se sont produites au cours de ces 30 à 40 dernières années entre 10°S et 30°N (figure 2.1). Les diminutions de la salinité dans l'Atlantique Nord et au sud de 25°S suggèrent des changements identiques des précipitations au-dessus de l'océan. Les précipitations ont sensiblement augmenté entre 1900 et les années 1950, entre 10°N et 30°N, mais elles ont diminué après 1970 environ. Pour ce qui concerne les hémisphères, il n'existe pas de tendances marquées pour les précipitations au-dessus des masses continentales extratropicales de l'hémisphère Sud. Au moment de la rédaction de la présente section, l'attribution des changements des précipitations mondiales n'est pas claire du fait que ces dernières sont fortement influencées par l'amplitude du phénomène de variabilité naturelle. [GT I 3.3.2.1]

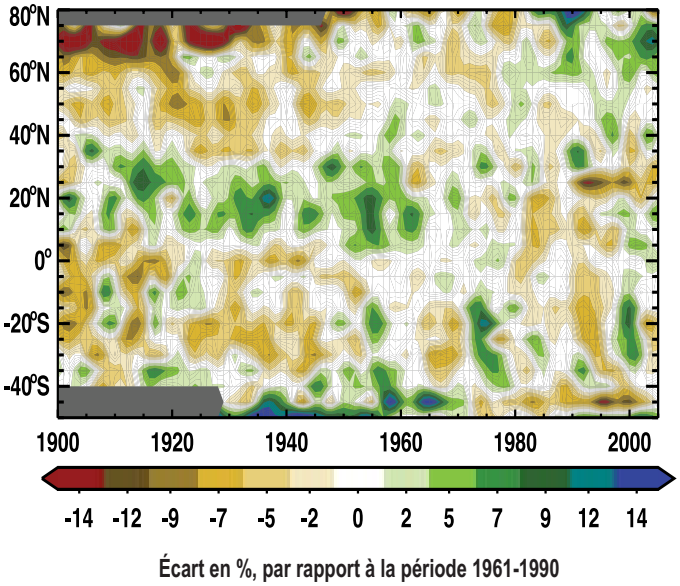


Figure 2.1: *Diagramme latitude/temps de la moyenne annuelle des anomalies de précipitations (en %) sur les terres émergées, déterminée pour la période 1900-2005 par rapport aux moyennes calculées pour la période 1961-1990. Les valeurs sont des moyennes portant sur l'ensemble des longitudes et ont été lissées à l'aide d'un filtre pour supprimer les fluctuations de moins de six ans environ. L'échelle de couleurs n'est pas linéaire et les parties en gris correspondent aux zones pour lesquelles aucune donnée n'est disponible. [GT I figure 3.15]*

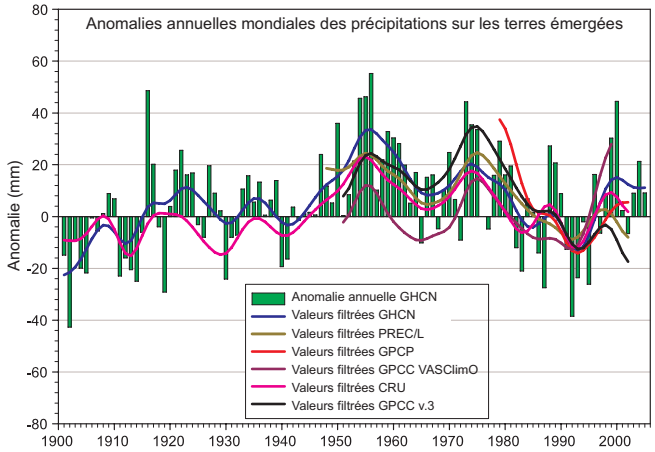


Figure 2.2: *Séries chronologiques des anomalies annuelles mondiales de précipitations sur les terres émergées (en mm), calculées pour la période 1900-2005 par rapport à la période de référence 1981-2000. La figure présente également des valeurs décennales, lissées pour les ensembles de données du Réseau mondial de données climatologiques anciennes (GHCN), du Precipitation Reconstruction over Land (PREC/L), du Projet mondial de climatologie des précipitations (GPCP), du Centre mondial de climatologie des précipitations (GPCC) et de l'Unité de recherche climatologique (CRU). [GT I figure 3.12]*

La tendance linéaire de la moyenne planétaire observée par le Réseau mondial de données climatologiques anciennes durant la période 1901-2005 est statistiquement non significative (figure 2.2). Aucune des estimations concernant la période comprise entre 1951 et 2005 n'est significative: on observe de nombreuses divergences entre les ensembles de données, ce qui démontre la difficulté de mesurer une quantité comme les précipitations, qui varient considérablement dans l'espace et le temps. Les changements à l'échelle du globe ne sont pas linéaires dans le temps et présentent une forte variabilité décennale, avec une période relativement humide des années 1950 aux années 1970, suivie d'une baisse des précipitations. Les moyennes mondiales sont essentiellement marquées par des précipitations tropicales et subtropicales. [GT I 3.3.2.1]

Les configurations spatiales des tendances des précipitations annuelles sont illustrées dans la figure 2.3 au moyen des données des stations du GHCN interpolées dans une grille latitude-longitude de 5° × 5° de côté. Les précipitations annuelles ont augmenté, conformément aux données présentées dans la figure 2.1, au cours des 105 années qui ont suivi l'an 1901, dans une grande partie de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie. La période qui a pour point de départ l'année 1979 fait apparaître une configuration plus complexe, avec une sécheresse régionale évidente (par exemple, au sud-ouest de l'Amérique du Nord). Sur la plus grande partie de l'Eurasie, le nombre de mailles indiquant des augmentations de précipitations est supérieur à celui montrant des baisses, pour les deux périodes concernées. Les variations entre l'Europe du Nord et la Méditerranée ont tendance à s'inverser, ce phénomène allant de pair avec les changements du mode de téléconnexion qu'est l'oscillation nord-atlantique (voir également le paragraphe 2.1.7 du présent document). [GT I 3.3.2.2]

Des conditions météorologiques marquées par une humidité croissante ont été observées en Amérique du Sud, plus précisément dans le bassin amazonien et le sud-est de l'Amérique du Sud, y compris en Patagonie, tandis que des tendances négatives des précipitations annuelles ont été constatées au Chili et dans certaines zones de la côte ouest du continent. Les variations observées en Amazonie, en Amérique centrale et dans l'ouest de l'Amérique du Nord sont indicatives de changements latitudinaux des caractéristiques de la mousson. [GT I 3.3.2.2]

Les tendances négatives des précipitations annuelles les plus importantes depuis 1901 sont observées en Afrique de l'Ouest et au Sahel (voir également le paragraphe 5.1), bien que de nombreuses autres régions de l'Afrique et l'Asie australe aient connu des tendances à la baisse. Depuis 1979, les précipitations ont augmenté dans la région du Sahel et dans d'autres zones de l'Afrique tropicale, en partie en raison des variations liées aux mécanismes de téléconnexion (voir également le paragraphe 2.1.7). Une grande partie du nord-ouest de l'Inde a enregistré des augmentations de précipitations de

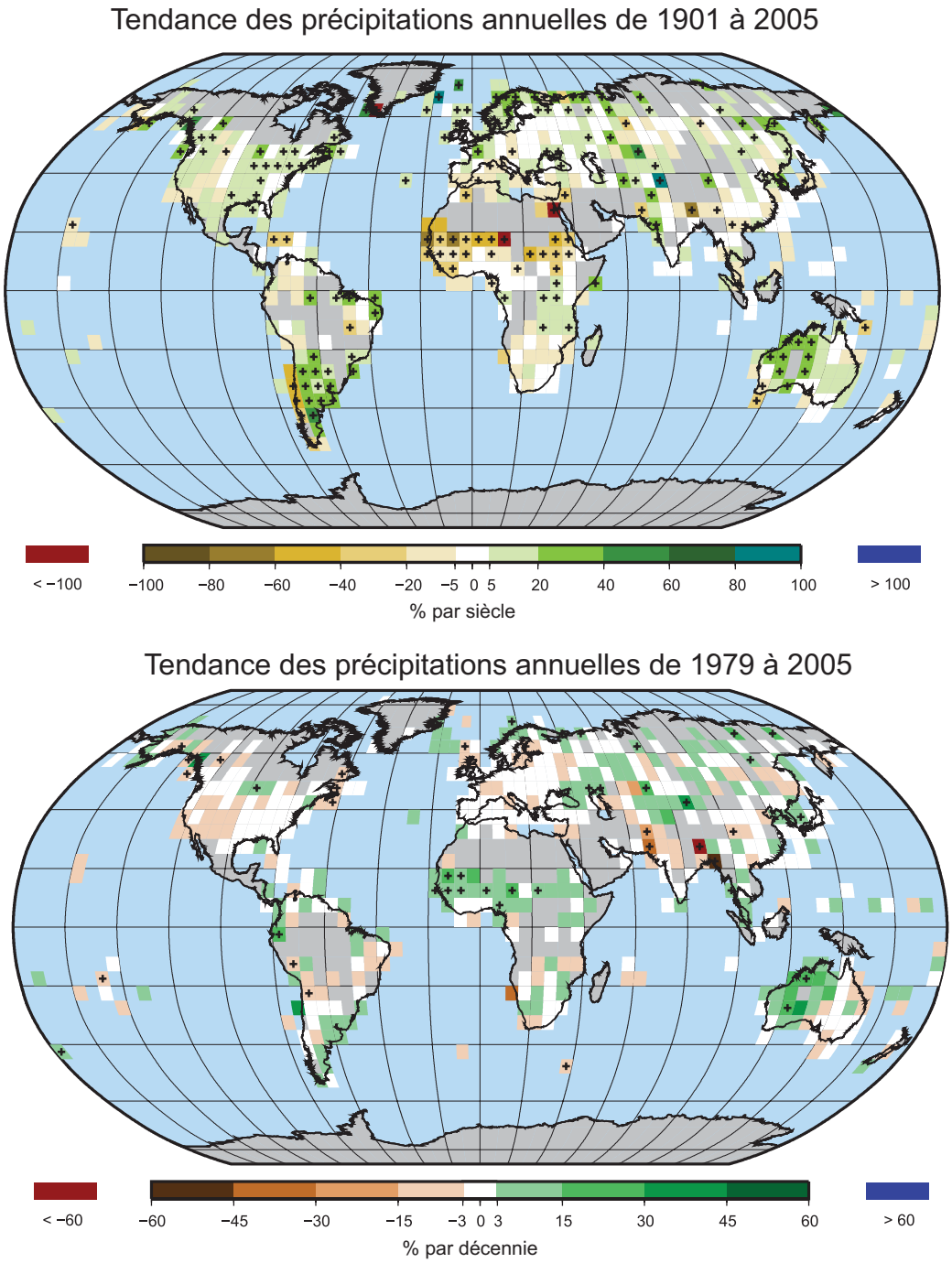


Figure 2.3: *Tendance des précipitations annuelles pour les périodes 1901-2005 (en haut, en % par siècle) et 1979-2005 (en bas, en % par décennie), en pourcentage de la moyenne calculée pour la période 1961-1990, établie sur la base des données des stations du GHCN. Les parties en gris illustrent les zones pour lesquelles les données sont incomplètes et ne permettent pas de fournir des tendances fiables. [GT I figure 3.13]*

plus de 20 % par siècle de 1901 à 2005, mais cette région connaît une forte diminution de ses précipitations annuelles depuis 1979. Le nord-ouest de l'Australie se caractérise par des zones d'augmentation modérée à forte des précipitations annuelles sur les deux périodes. Les conditions météorologiques sont devenues plus humides dans le nord-ouest de l'Australie, mais il y a eu une nette tendance à la baisse à l'extrême sud-ouest du pays, plus marquée vers 1975. [GT I 3.3.2.2]

Selon plusieurs études réalisées à partir de modèles donnés, les changements du forçage radiatif (provenant de sources anthropiques, volcaniques et solaires combinées) ont contribué aux tendances observées des précipitations moyennes. Néanmoins, les modèles climatiques paraissent sous-estimer la variance des précipitations terrestres moyennes par rapport aux estimations basées sur l'observation. On ne sait pas avec certitude si cette divergence tient à la sous-estimation de la réaction

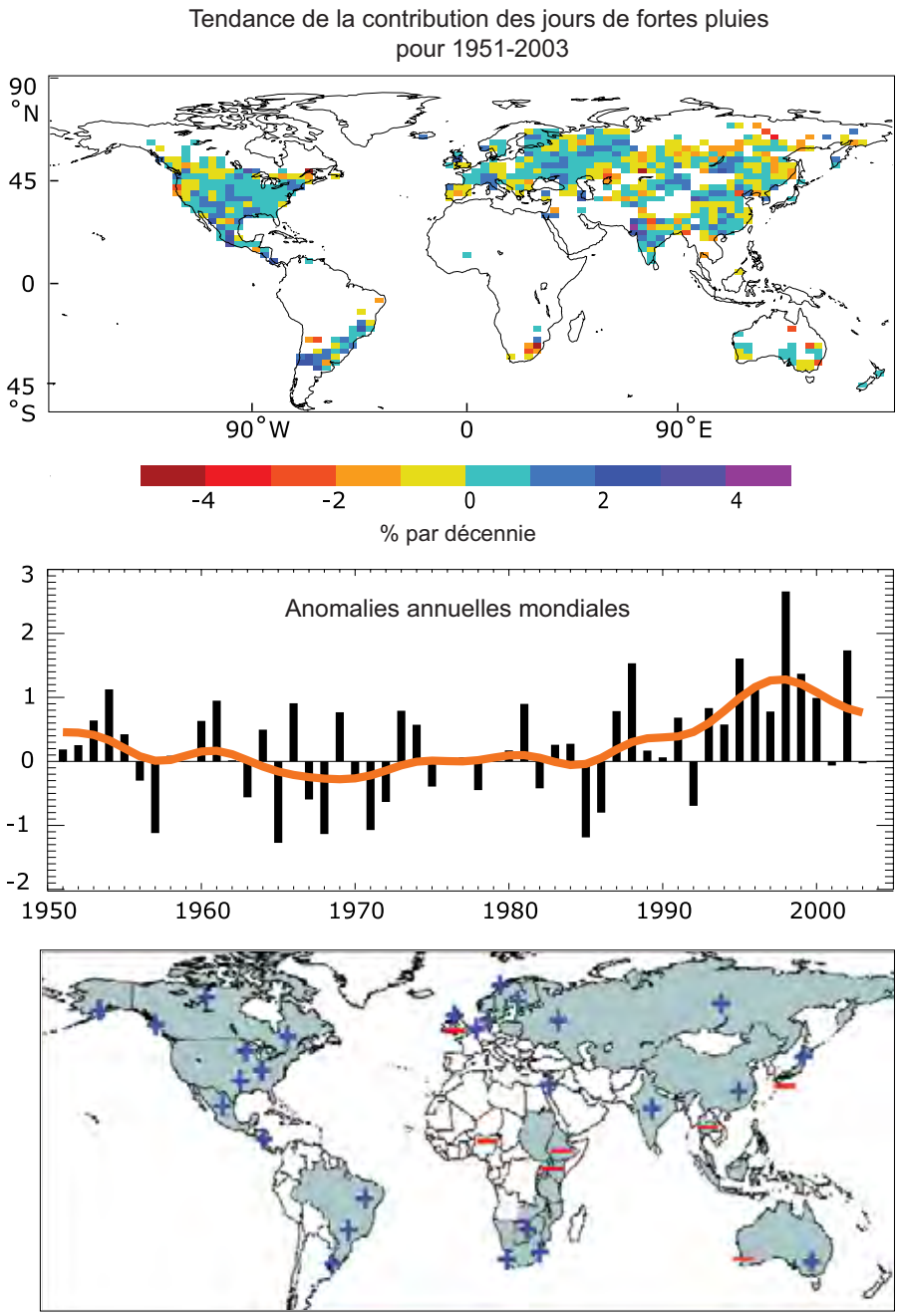


Figure 2.4: *Le cadre supérieur montre les tendances observées (en % par décennie) de la contribution des jours de forte pluie (à hauteur et au-dessus du 95e percentile) aux précipitations annuelles totales au cours de la période 1951-2003. Le cadre central montre le changement, pour les précipitations annuelles mondiales, de la contribution des jours de forte pluie au total (en %, par rapport à la moyenne de la période 1961-1990, soit 22,5 %) (d'après Alexander* et al.*, 2006). Le cadre inférieur indique les régions où l'on a enregistré des changements disproportionnés – augmentation (+) ou diminution (-) – des fortes et des très fortes précipitations par rapport aux variations des précipitations annuelles et/ou saisonnières (actualisé de Groisman* et al.*, 2005). [GT I figure 3.39]*

au forçage aux courtes longueurs d'ondes ou de la variabilité interne du climat, à des erreurs d'observation ou à des combinaisons de ces facteurs. Les études théoriques indiquent que l'influence de l'augmentation des gaz à effet de serre sur la hauteur moyenne des précipitations peut être difficile à détecter. [GT I 9.5.4]

Des augmentations généralisées des épisodes de fortes précipitations (par exemple, au-dessus du 95e percentile) ont été observées, ceci même dans les endroits où les quantités totales des précipitations ont diminué. Cette augmentation est liée à l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique et correspond au réchauffement observé (figure 2.4). Cependant, les

statistiques sur les précipitations sont dominées par des variations interannuelles à décennales et les évaluations de tendance sont incohérentes à l'échelle géographique (voir par exemple Peterson *et al.*, 2002; Griffiths *et al.*, 2003; Herath et Ratnayake, 2004). En outre, seules quelques régions possèdent des séries de données d'observation sur une durée de temps et d'une qualité suffisantes pour permettre d'évaluer les tendances des phénomènes extrêmes de manière fiable. Des augmentations statistiquement significatives de la fréquence de fortes précipitations ont été observées en Europe et en Amérique du Nord (Klein Tank et Können, 2003; Kunkel *et al.*, 2003; Groisman *et al.*, 2004; Haylock et Goodess, 2004). Le caractère saisonnier des changements des précipitations varie selon le lieu: les augmentations sont les plus marquées durant la saison chaude aux États-Unis d'Amérique, alors qu'en Europe, les variations ont été les plus importantes durant la saison froide (Groisman *et al.*, 2004; Haylock et Goodess, 2004). Un examen plus poussé des changements des précipitations au niveau régional est présenté à la section 5. [GT I 3.8.2.2]

Il ressort des études théoriques et des modèles climatiques que, sous un climat qui se réchauffe par suite de l'augmentation des gaz à effet de serre, les épisodes de précipitations extrêmes devraient être plus élevés que la moyenne. En conséquence, il se peut que l'influence des actions anthropiques soit plus facile à détecter dans les précipitations extrêmes que moyennes du fait que les premières dépendent de la disponibilité de la vapeur d'eau, tandis que les secondes sont tributaires de la capacité de l'atmosphère à rayonner de l'énergie aux grandes longueurs d'onde (libérée comme chaleur latente par la condensation) vers l'espace, capacité limitée par l'augmentation des gaz à effet de serre. Prises ensemble, les études fondées sur les données d'observation et celles basées sur la modélisation aboutissent à la conclusion générale selon laquelle une augmentation de la fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou de la proportion des précipitations totales correspondant à de fortes précipitations) a *probablement* eu lieu sur la majeure partie des terres émergées à la fin du XXe siècle et qu'il est *plus probable qu'improbable* que cette tendance prenne en considération une action anthropique. Le niveau de l'intervention humaine ne peut pas être évalué à ce stade. [GT I RiD, 9.5.4, 10.3.6, QF 10.1]

Les données d'observation mettent en évidence une intensification de l'activité cyclonique tropicale dans l'Atlantique Nord depuis 1970 environ, corrélée avec des augmentations des températures de la mer en surface dans les zones tropicales. Elles tendent également à indiquer un accroissement de l'intensité de l'activité cyclonique dans certaines autres régions où la qualité des données est une préoccupation majeure. La variabilité à l'échelle pluridécennale et la qualité des relevés concernant les cyclones tropicaux avant l'instauration d'observations régulières par satellite, vers 1970, compliquent la détection des tendances à long terme de l'activité cyclonique tropicale. Il n'existe pas de tendance claire quant au nombre annuel de cyclones tropicaux. Il est *plus probable qu'improbable* que les facteurs anthropiques aient contribué aux augmentations observées de l'intensité de l'activité cyclonique tropicale. Cependant, l'augmentation apparente de la proportion de tempêtes très intenses depuis 1970 dans certaines régions est beaucoup plus importante que celle simulée par les modèles actuels pour cette période. [GT I RiD]

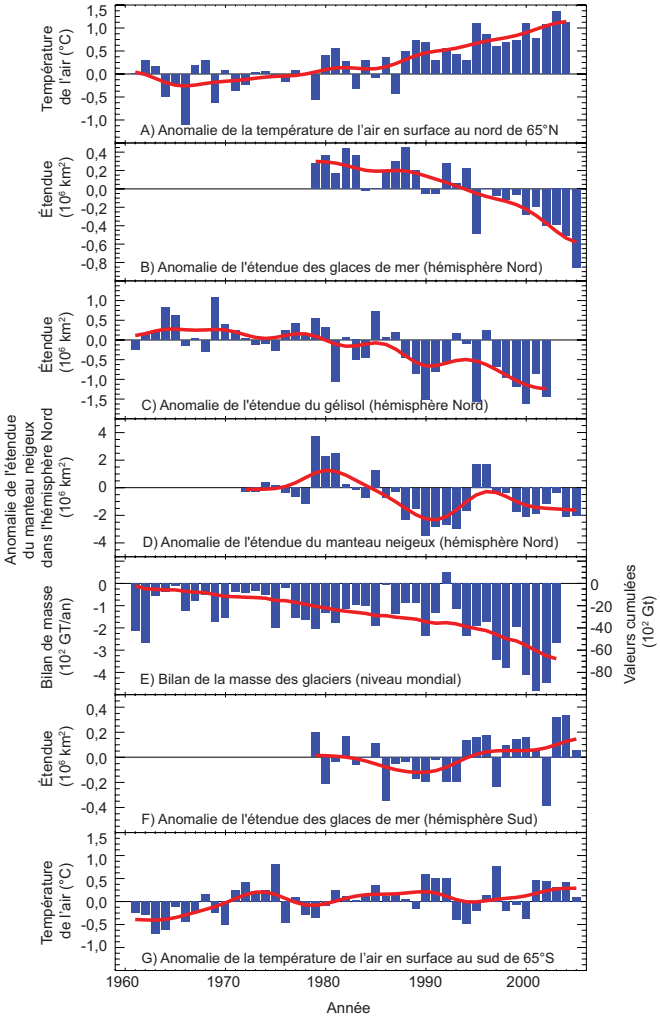


Figure 2.5: *Séries chronologiques des anomalies (écart par rapport à la moyenne à long terme) de la température de l'air polaire en surface (A et E), de l'étendue du gélisol saisonnier dans l'hémisphère Nord (B), de l'étendue du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord de mars à avril (C) et du bilan de masse des glaciers mondiaux (D). La ligne continue rouge en D) représente le bilan de masse cumulé des glaciers mondiaux; dans les autres graphiques, elle indique les séries chronologiques lissées. [Adapté de GT I QF 4.1]*

On observe une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de la troposphère au cours de ces dernières décennies, correspondant au réchauffement constaté et à l'humidité relative quasi constante. La colonne totale de vapeur d'eau a augmenté dans les océans mondiaux de 1,2 ± 0,3 % par décennie de 1988 à 2004, dans une configuration conforme aux variations de la

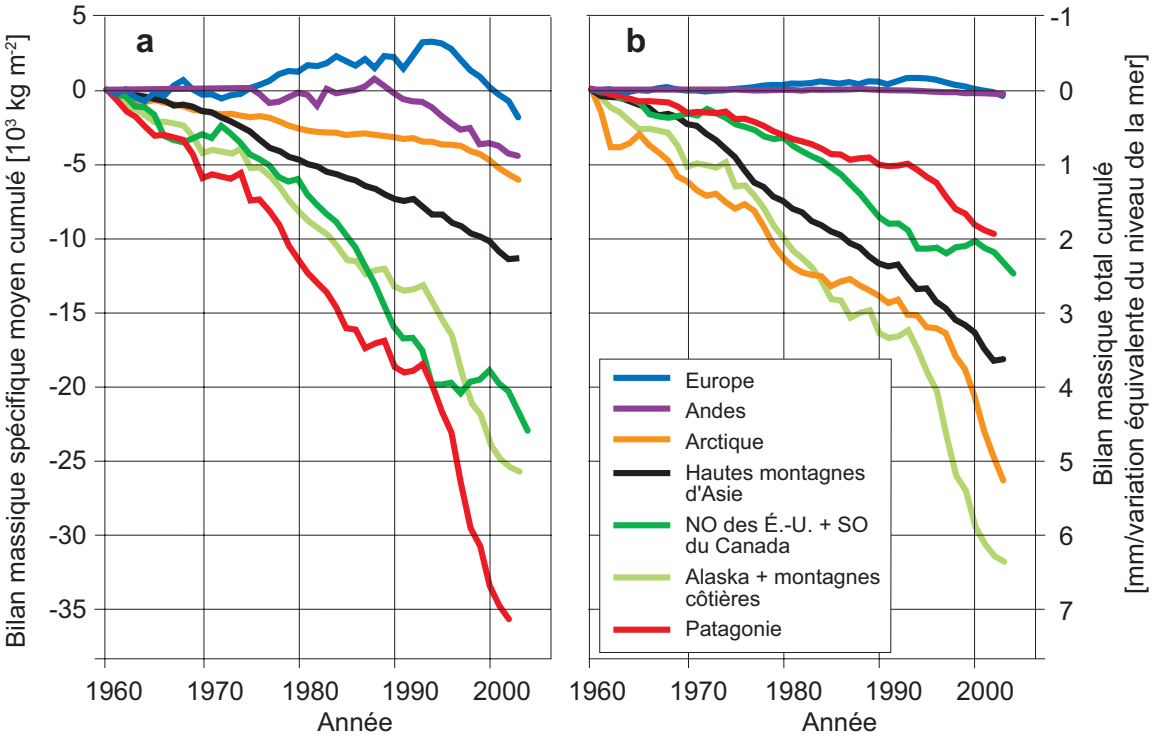


Figure 2.6: *Bilans massiques spécifiques moyens cumulés (a) et bilans massiques totaux cumulés (b) des glaciers et des calottes glaciaires, calculés sur de vastes régions (Dyurgerov et Meier, 2005). Le bilan massique d'un glacier est la somme de l'ensemble des gains et des pertes de sa masse durant une année hydrologique. Le bilan massique spécifique moyen correspond au bilan massique total divisé par la superficie totale de l'ensemble des glaciers et des calottes glaciaires d'une région; il donne l'intensité du changement dans la région en question. Le bilan massique total est présenté comme la contribution de chaque région à l'élévation du niveau de la mer. [GT I 4.5.2, figure 4.15]*

température de la mer en surface. De nombreuses études montrent des hausses de l'humidité atmosphérique à proximité de la surface, mais il existe des différences selon les régions et entre le jour et la nuit. Comme d'autres composantes du cycle hydrologique, les variations interannuelles à décennales sont importantes. Cependant, une nette tendance à la hausse a été relevée dans les océans mondiaux et sur certaines terres émergées de l'hémisphère Nord. La hausse observée de la température de la mer en surface, qui est *probablement* pour une bonne part d'origine anthropique, laisse penser que l'action de l'homme a contribué à l'augmentation constatée de la vapeur d'eau atmosphérique au-dessus des océans. Néanmoins, au moment de la rédaction du quatrième Rapport d'évaluation, aucune étude formelle sur l'attribution de ces changements n'était disponible. [GT I 3.4.2, 9.5.4]

2.1.2 Neige et glace terrestre

La cryosphère (composée de neige, de glace et de gélisol) stocke, sur les terres émergées, environ 75 % de l'eau douce du globe. Dans le système climatique, la cryosphère et les modifications qu'elle subit sont très étroitement liées au bilan énergétique de surface, au cycle de l'eau et à la variation du niveau de la mer. Plus d'un sixième de la population mondiale vit dans des bassins fluviaux alimentés par des glaciers ou par la fonte de la neige (Stern, 2007). [GT II 3.4.1] La figure 2.5, qui montre l'évalution de la cryosphère, fait état d'importantes baisses en matière de stockage de la glace dans de nombreuses composantes. [GT I chapitre 4]

2.1.2.1 Manteau neigeux, gélisol, glace lacustre et glace de rivière

Le manteau neigeux a diminué dans la plupart des régions, en particulier au printemps et en été. L'enneigement observé par satellite dans l'hémisphère Nord au cours de la période 1966-2005 a diminué tous les mois, sauf en novembre et décembre, avec une baisse graduelle de 5 % de la moyenne annuelle à la fin des années 1980. Le recul du manteau neigeux dans les montagnes de l'ouest de l'Amérique du Nord et dans les Alpes suisses a été le plus important à basse altitude. Dans l'hémisphère Sud, les quelques relevés ou données indirectes disponibles pour de longues périodes montrent surtout des diminutions, ou aucun changement durant ces 40 dernières années au moins. [GT I 4.2.2]

La dégradation du pergélisol et du gélisol saisonnier entraîne des modifications des caractéristiques de la surface terrestre et des systèmes de drainage. Le gélisol saisonnier comprend le gel et le dégel saisonnier du sol dans les régions sans pergélisol, ainsi que le mollisol (ou couche active) situé au-dessus du pergélisol, qui fond en été et gèle en hiver. L'étendue maximale estimée du gélisol saisonnier dans les

zones caractérisées par une absence de pergélisol a diminué d'environ 7 % dans l'hémisphère Nord de 1901 à 2002, avec une baisse allant jusqu'à 15 % au printemps. Son épaisseur maximale a diminué d'environ 0,3 m en Eurasie depuis le milieu du XXe siècle sous l'effet du réchauffement hivernal et des augmentations de l'épaisseur de neige. De 1956 à 1990, la profondeur du mollisol mesurée dans 31 stations en Russie présentait un accroissement statistiquement significatif de près de 21 cm. Les relevés disponibles dans les autres régions ont été effectués sur une période de temps trop courte pour permettre d'analyser les tendances. La température à la surface de la couche de pergélisol a augmenté d'un maximum de 3 °C depuis les années 1980 dans l'Arctique. Le réchauffement du pergélisol et la dégradation du gélisol semblent résulter de l'augmentation de la température de l'air en été et des modifications de l'épaisseur du manteau neigeux et de la durée de l'enneigement. [GT I 4.7, chapitre 9]

Les dates d'embâcle et de débâcle dans les lacs et les rivières présentent une forte variabilité spatiale. La moyenne obtenue à partir des données disponibles pour l'hémisphère Nord sur les 150 dernières années montre que l'embâcle est intervenu plus tardivement, au rythme de 5,8 ± 1,6 jours par siècle, alors que la débâcle s'est produite plus tôt, au rythme de 6,5 ± 1,2 jours par siècle. On ne dispose pas de suffisamment de données publiées concernant l'épaisseur de la glace lacustre et de la glace de rivière pour procéder à l'évaluation des tendances. Des études de modélisation (par exemple, Duguay *et al.*, 2003) indiquent qu'une bonne partie de la variabilité de l'épaisseur maximale de la glace et des dates de débâcle est déterminée par les variations des chutes de neige. [GT I 4.3]

2.1.2.2 Glaciers et calottes glaciaires

Les glaciers et les calottes glaciaires situés dans l'hémisphère Nord et en Patagonie présentent en moyenne une augmentation modérée mais assez constante du renouvellement de leur masse pour les 50 dernières années, ainsi qu'une hausse importante de leur fonte. [GT I 4.5.2, 4.6.2.2.1] Par conséquent, la majorité des glaciers et des calottes glaciaires de la planète ont connu une perte de masse considérable (figure 2.6), avec des taux croissants: de 1960/61 à 1989/90, la perte était de 136 ± 57 Gt/an (0,37 ± 0,16 mm/an en variation équivalente du niveau de la mer) et elle s'établissait à ± 79 Gt/an (0,77 ± 0,22 mm/an en variation équivalente du niveau de la mer) entre 1990/91 et 2003/04. La cause première du recul généralisé des glaciers au cours du XXe siècle semble être le réchauffement général, bien que, sous les tropiques, les variations de l'humidité atmosphérique soient susceptibles d'y avoir contribué. Les données disponibles indiquent que cette fonte a *très probablement* concouru à l'élévation observée du niveau de la mer. [GT I 4.5 tableau 4.4, 9.5]

La formation de lacs résulte du recul des langues de glacier des moraines du petit age glaciaire (PAG) dans plusieurs massifs montagneux abrupts, notamment l'Himalaya, les Andes et les Alpes. Ces lacs glaciaires sont fortement susceptibles de donner lieu à des crues soudaines. [GT II 1.3.1.1, tableau 1.2]

2.1.3 Niveau de la mer

Le niveau moyen de la mer a monté et on estime avec un *degré de confiance élevé* que son rythme d'élévation a augmenté entre le milieu du XIXe et le milieu du XXe siècle. Ainsi, le taux moyen était de 1,7 ± 0,5 mm/an au XXe siècle; il s'établissait à 1,8 ± 0,5 mm/an entre 1961 et 2003, et à 3,1 ± 0,7 mm/an entre 1993 et 2003. On ne sait pas si le rythme plus élevé observé au cours de la dernière période est le reflet de la variabilité décennale ou s'il est dû à une hausse de la tendance à long terme. Les variations du niveau moyen de la mer sont géographiquement très disparates. Par exemple, au cours de la période 1993-2003, le rythme d'élévation dans certaines régions était plusieurs fois supérieur au rythme moyen d'élévation enregistré à l'échelle du globe tandis que, dans d'autres régions, le niveau de la mer baissait. [GT I 5.RE]

Les estimations concernant les facteurs qui contribuent à la variation du niveau de la mer à long terme comportent des incertitudes. De 1993 à 2003, la dilatation thermique (1,6 ± 0,5 mm/an), la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires (0,77 ± 0,22 mm/an) ainsi que la perte de masse des nappes glaciaires du Groenland (0,21 ± 0,07 mm/an) et de l'Antarctique (0,21 ± 0,35 mm/an) ont contribué à une variation totale de 2,8 ± 0,7 mm/an. Durant cette période, le total de ces contributions climatiques a concordé, dans les limites des incertitudes d'observation, avec l'élévation du niveau de la mer directement observée qui a été mentionnée précédemment. Pour la période plus longue comprise entre 1961 et 2003, le total des contributions climatiques serait, selon les estimations réalisées, inférieur à l'élévation totale observée du niveau de la mer; il convient toutefois de noter que le système d'observation du climat était moins fiable avant 1993. Pour les deux périodes concernées, les contributions estimées de la dilatation thermique ainsi que des glaciers et des calottes glaciaires ont été plus importantes que celles des nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Les grandes marges d'erreur pour l'Antarctique ne permettent pas de conclure avec certitude à une contribution positive ou négative de celui-ci à la variation du niveau de la mer. L'élévation du niveau de la mer correspond au réchauffement et il ressort des études de modélisation qu'il est globalement *très probable* que la réaction au forçage anthropique ait contribué à cette élévation durant la deuxième moitié du XXe siècle; cependant, les incertitudes d'observation et l'absence d'études adéquates permettent difficilement de quantifier l'influence humaine. [GT I RiD, 5.5, 9.5.2]

L'élévation du niveau de la mer peut avoir une incidence sur les régions côtières, bien que cette influence ne soit pas toujours évidente. Au niveau mondial, la hausse des niveaux maximaux extrêmes depuis 1975 est liée à la fois

à l'élévation moyenne du niveau de la mer et à la variabilité interdécennale du climat à grande échelle (Woodworth et Blackman, 2004). [GT II 1.3.3]

2.1.4 Évapotranspiration

On ne dispose que de très peu de mesures directes de l'évapotranspiration effective sur l'ensemble des terres émergées du globe, alors que les produits d'analyse mondiaux[10] sont sensibles aux types d'analyses effectuées et peuvent renfermer d'importantes erreurs, rendant impossible leur utilisation pour l'analyse des tendances. Par conséquent, il n'existe que peu de littérature sur les tendances observées en matière d'évapotranspiration réelle ou potentielle. [GT I 3.3.3]

2.1.4.1 Évaporation mesurée au bac

Les rares relevés de l'évaporation mesurée au bac (c'est-à-dire la quantité d'eau s'évaporant d'une surface d'eau libre contenue dans un bac, qui donne une indication indirecte de l'évapotranspiration potentielle) font état de tendances à la baisse au cours de ces dernières décennies aux États-Unis d'Amérique (Peterson *et al*., 1995; Golubev *et al*., 2001; Hobbins *et al*., 2004), en Inde (Chattopadhyay et Hulme, 1997), en Australie (Roderick et Farquhar, 2004), en Nouvelle-Zélande (Roderick et Farquhar, 2005), en Chine (Liu *et al*., 2004; Qian *et al*., 2006b) et en Thaïlande (Tebakari *et al*., 2005). Les mesures au bac ne donnent pas d'informations sur l'évaporation effective (Brutsaert et Parlange, 1998) et les tendances enregistrées peuvent être dues à la baisse du rayonnement solaire en surface (aux États-Unis d'Amérique et dans certaines régions d'Europe et de Russie) et à la diminution de la durée d'insolation en Chine, laquelle peut être liée à la hausse de la pollution de l'air et des aérosols atmosphériques ainsi qu'à l'augmentation de la nébulosité. [GT I 3.3.3, encadré 3.2]

2.1.4.2 Évapotranspiration effective

Le troisième Rapport d'évaluation rend compte de la hausse de l'évapotranspiration effective durant la deuxième moitié du XXe siècle dans la plupart des régions sèches des États-Unis et de Russie (Golubev *et al*., 2001), due à l'augmentation de l'humidité en surface imputable à l'augmentation des précipitations et à l'accroissement des besoins en humidité atmosphérique attribuable à l'élévation des températures. Sur la base d'un modèle des surfaces continentales complet, ainsi que des observations disponibles sur les précipitations, la température et le rayonnement solaire en surface déduit de la nébulosité, Qian *et al*. (2006a) sont arrivés à la conclusion que l'évapotranspiration à la surface des terres émergées du globe suit de près les variations des précipitations terrestres. Les valeurs des précipitations mondiales ont atteint leur maximum au début des années 1970, avant de baisser légèrement, mais elles reflètent principalement les valeurs tropicales. Par ailleurs, les précipitations ont augmenté, plus généralement, sur les terres situées à des latitudes plus élevées. Les variations de l'évapotranspiration sont déterminées non seulement par l'apport d'humidité, mais également par la disponibilité en énergie et le vent de surface. [GT I 3.3.3]

Les effets directs de l'enrichissement en dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère sur la physiologie végétale figurent parmi les autres facteurs agissant sur l'évapotranspiration effective. Il n'existe pas de publications sur ces impacts, bien que l'on ait observé des répercussions sur le ruissellement. [GT I 9.5.4]

Les taux annuels d'évapotranspiration dépendent, en partie, de la durée de la période de végétation. Le quatrième Rapport d'évaluation apporte des preuves d'augmentations observées de la durée de cette saison. Ces hausses, corrélées avec le fait que les dernières gelées de printemps sont de moins en moins tardives et que les premières gelées d'automne le sont de plus en plus, sont visibles dans les régions tempérées de l'Eurasie (Moonen *et al*., 2002; Menzel *et al*., 2003; Genovese *et al*., 2005; Semenov *et al*., 2006) et dans une grande partie de l'Amérique du Nord (Robeson, 2002; Feng et Hu, 2004). [GT II 1.3.6.1]

2.1.5 Humidité du sol

Les données historiques sur la teneur en eau du sol mesurée *in situ* sont disponibles pour quelques régions seulement et portent souvent sur une très courte durée. [GT I 3.3.4] Robock *et al*. (2000) ont établi, sur la base des données récoltées auprès de plus de 600 stations dispersées dans des régions soumises à des climats très variés, une augmentation de la tendance à long terme de l'humidité du sol en surface (jusqu'à 1 m) durant l'été pour les stations possédant les relevés sur les plus longues périodes et qui sont situées pour l'essentiel dans l'ex-Union soviétique, la Chine et le centre des États-Unis. Les relevés portant sur les plus longues périodes dont on dispose pour l'Ukraine font apparaître des augmentations globales de l'humidité du sol en surface, quoique celles-ci soient moins marquées ces dernières décennies (Robock *et al*., 2005). L'approche initiale utilisée pour évaluer la teneur en eau du sol consistait à calculer les valeurs de l'indice de sévérité

[10] Les «produits d'analyse» font référence aux estimations des variations climatiques passées produites par l'intégration d'une série d'observations dans un modèle de prévision météorologique ou un modèle climatique, selon le même processus systématique que celui utilisé pour initialiser les prévisions météorologiques quotidiennes. Les systèmes d'analyse ou de prévisions météorologiques opérationnels étant développés au fil du temps, plusieurs exercices de «réanalye» ont été effectués, dans le cadre desquels les observations disponibles ont été intégrées dans un système unique afin de supprimer tous sauts ou tendances erronés provenant des modifications du système sous-jacent. Un avantage des systèmes d'analyse est de produire des champs globaux incluant de nombreuses quantités qui ne sont pas observées directement. Ces systèmes peuvent cependant présenter l'inconvénient suivant: l'ensemble des champs sont composés d'un mélange d'observations et de modèles et, pour les régions ou les variables pour lesquelles on ne dispose que de peu d'observations, ils correspondent pour l'essentiel à la climatologie du modèle sous-jacent.

de la sécheresse de Palmer à partir des observations des précipitations et des températures. Les variations de cet indice sont examinées dans le paragraphe 3.1.2.4. [GT I encadré 3.1, 3.3.4]

2.1.6 Ruissellement et débit fluvial

Toute une série d'études ont examiné les tendances potentielles qui peuvent être tirées des mesures du débit fluvial, à l'échelle des bassins hydrographiques et à l'échelle mondiale, au cours du XXe siècle. Certaines ont décelé des tendances significatives au niveau de certains indicateurs de débit; d'autres ont mis en évidence des liens statistiquement significatifs entre les débits fluviaux et les tendances des températures et des précipitations. De nombreuses études n'ont toutefois pas établi de tendances ou n'ont pas été en mesure de faire la distinction entre les effets des variations des températures et des précipitations et ceux des actions humaines sur le bassin hydrographique. La méthodologie utilisée pour déterminer les tendances peut également avoir une influence sur les résultats. Par exemple, les différents tests statistiques qui sont utilisés peuvent donner des indications dissemblables sur les répercussions; les différentes périodes de relevé des données (notamment, les dates de début et de fin de relevé) peuvent tendre à indiquer des rythmes de changement divergents; la non prise en compte des corrélations croisées entre les bassins hydrographiques peut conduire à une surestimation du nombre de bassins hydrographiques présentant d'importantes modifications. Un autre inconvénient des analyses de tendance réside dans la disponibilité de données cohérentes de qualité éprouvée. Les données instrumentales relatives à l'écoulement fluvial couvrent environ deux tiers seulement des zones continentales mondiales activement drainées, comportent souvent des lacunes et varient en fonction de la durée pendant laquelle les éléments déterminés ont été observés en un point particulier (Dai et Trenberth, 2002). Pour finir, les actions humaines ont eu des répercussions sur les régimes d'écoulement de bon nombre de bassins hydrographiques. [GT I 3.3.4, 9.1, 9.5.1; GT II 1.3.2]

Selon les données disponibles, il semble y avoir, à l'échelle mondiale, un profil d'évolution du ruissellement annuel qui soit cohérent dans les grandes lignes, et selon lequel certaines régions enregistrent une augmentation du ruissellement (par exemple, aux hautes latitudes et dans certaines vastes zones des États-Unis) et d'autres (comme certaines régions de l'Afrique de l'Ouest, de l'Europe méridionale et de l'extrême sud de l'Amérique du Sud) connaissent une baisse de celui-ci (d'après Milly *et al.*, 2005 ainsi que de nombreuses études réalisées à l'échelle du bassin hydrographique). Les variations de l'écoulement d'une année sur l'autre sont également influencées dans de nombreuses parties du globe par des configurations du climat à grande échelle, corrélées avec, par exemple, le phénomène *El Niño*-oscillation australe, l'oscillation nord-atlantique et la téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord (PNA).[11] Une étude (Labat *et al.*, 2004) a conclu à une hausse de 4 % du ruissellement total mondial pour une augmentation de 1 °C de la température durant le XXe siècle, avec des variations régionales autour de cette tendance. Néanmoins, les débats autour de cette conclusion (Labat *et al.*, 2004; Legates *et al.*, 2005) ont porté principalement sur les effets des facteurs non climatiques sur le ruissellement et l'influence d'un petit nombre de points de données sur les résultats. Gedney *et al.* (2006) ont attribué les augmentations générales du ruissellement au cours du XXe siècle pour l'essentiel à la suppression de l'évapotranspiration par la hausse des concentrations de CO_2 (qui influe sur la conductance stomatique), bien que d'autres preuves d'une telle relation soient difficiles à établir et que le paragraphe 2.1.4 fasse état de constatations de l'augmentation de l'évapotranspiration. [GT II 1.3.2]

Les tendances relatives au ruissellement ne concordent pas toujours avec les variations des précipitations. Cela peut provenir des données elles-mêmes (en particulier des lacunes du réseau d'observation des précipitations), des incidences des actions anthropiques telles que la construction de réservoirs de retenue (comme c'est le cas avec les principaux cours d'eau d'Eurasie) ou des effets opposés des changements des précipitations et des températures (comme en Suède: voir Lindstrom et Bergstrom, 2004).

Il existe toutefois des preuves beaucoup plus solides et généralisées selon lesquelles la périodicité de l'écoulement fluvial dans de nombreuses régions où les précipitations hivernales tombent sous forme de neige s'est considérablement modifiée. En raison de l'augmentation des températures, les précipitations hivernales tombent davantage sous forme de pluie que de neige et la saison de fonte des neiges commence plus tôt. La fonte des neiges dans certaines régions de la Nouvelle-Angleterre a été décalée d'une à deux semaines entre 1936 et 2000 (Hodgkins *et al.*, 2003), quoique cela n'ait eu qu'une faible incidence visible sur les débits fluviaux estivaux (Hodgkins *et al.*, 2005). [GT II 1.3.2]

2.1.7 Modes de variabilitéà grande échelle

Le système climatique dispose de plusieurs configurations de variabilité préférées ayant une influence directe sur les composantes du cycle hydrologique. Les régimes climatiques régionaux peuvent connaître un déphasage en raison de l'action de ces «téléconnexions». Celles-ci sont souvent corrélées avec les sécheresses et les crues et avec d'autres changements qui ont des impacts importants sur les êtres humains. Une présentation succincte des principales configurations suit, alors

[11] Respectivement, ENSO = *El Niño*-oscillation australe, NAO = oscillation nord-atlantique, PNA = téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord. Se reporter au paragraphe 2.1.7 et au glossaire pour de plus amples explications.

qu'un examen plus approfondi est fourni au paragraphe 3.6 de la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation.

Une téléconnexion est déterminée par une configuration spatiale et des séries chronologiques dépeignant les variations de son ampleur et de sa phase. Les configurations spatiales peuvent être définies à l'aide d'une grille ou par des indices fondés sur les observations provenant des stations de mesure. Par exemple, l'indice d'oscillation australe, qui est entièrement fondé sur les différences des anomalies de pression atmosphérique moyenne en surface de la mer entre Tahiti (Pacifique Est) et Darwin (Pacifique Ouest), rend pourtant compte d'une bonne partie de la variabilité de la circulation atmosphérique à grande échelle dans toute la partie tropicale du Pacifique. Les configurations de téléconnexion ont tendance à être plus marquées en hiver (surtout dans l'hémisphère Nord), lorsque la circulation moyenne est la plus forte. L'intensité des téléconnexions, et la façon dont ces dernières influent sur le climat de surface, varient également sur de longues périodes. [GT I 3.6.1]

L'indice d'oscillation australe décrit la composante atmosphérique du phénomène *El Niño*-oscillation australe, le mode le plus important de variabilité interannuelle du climat mondial. Ce phénomène a des impacts globaux sur la circulation atmosphérique, les précipitations et la température (Trenberth et Caron, 2000). Il est corrélé avec un déplacement d'est en ouest des précipitations dans la partie tropicale du Pacifique, et avec une modulation des principales zones de convergence tropicales. Le phénomène *El Niño*-oscillation australe est également associé aux perturbations en forme d'ondulations de la circulation atmosphérique à l'extérieur des tropiques, telles que les téléconnexions Pacifique-Amérique du Nord et Pacifique-Amérique du Sud, qui ont des effets importants sur les régimes climatiques régionaux. L'intensité et la fréquence du phénomène *El Niño*-oscillation australe (ENSO) sont fonction de l'échelle décennale, en lien avec l'oscillation décennale du Pacifique (ODP, également connue sous le nom d'oscillation interdécennale du Pacifique ou OIP), qui module l'état moyen des températures de surface océaniques et la circulation atmosphérique tropicale sur une période égale ou supérieure à 20 ans. La variation climatique qui a eu lieu en 1976/77 (Trenberth, 1990) était liée à un changement de comportement du phénomène *El Niño* (Trenberth et Stepaniak, 2001) et à une tendance vers des épisodes *El Niño* de plus longue durée et d'intensité accrue. Les observations disponibles jusqu'à présent ne font pas état d'un changement formellement détectable de la variabilité du phénomène ENSO. [GT I 3.6.2, 3.6.3]

Hors de la zone tropicale, la variabilité de la circulation atmosphérique sur des périodes d'un mois ou plus est dominée par des variations de l'intensité et des emplacements des courants-jets et des trajectoires des tempêtes connexes, caractérisées par les «modes annulaires» boréal (NAM) et austral (SAM) (Quadrelli et Wallace, 2004; Trenberth *et al.*, 2005). Le mode annulaire boréal est étroitement lié à l'oscillation nord-atlantique (NAO), bien que cette dernière soit plus fortement corrélée avec les trajectoires des tempêtes dans l'Atlantique et les variations du climat que connaît l'Europe. La NAO est marquée par des anomalies de pression déphasées entre les latitudes tempérées et les hautes latitudes de l'Atlantique. Elle est la plus marquée en hiver, quand sa phase positive (négative) présente une augmentation (diminution) de la basse pression centrée sur l'Islande et de la haute pression des Açores (Hurrell *et al.*, 2003). Le mode annulaire boréal, étroitement lié à l'oscillation nord-atlantique, a une structure identique au niveau de l'Atlantique, mais est plus symétrique par rapport à l'axe longitudinal. L'oscillation nord-atlantique a une forte influence sur les températures de surface en hiver dans une grande partie de l'hémisphère Nord, et sur l'activité orageuse et les précipitations enregistrées sur l'Europe et l'Afrique du Nord, avec un déplacement en direction du pôle des précipitations dans la phase positive et un déplacement vers l'équateur dans la phase négative. Les données disponibles font état de périodes positives et négatives prolongées de l'oscillation nord-atlantique au cours des siècles passés (Cook *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2003). On a assisté en hiver à un renversement des indices minimums de la fin des années 1960 vers des indices très positifs de l'oscillation nord-atlantique vers le milieu des années 1990. Depuis lors, les valeurs de la NAO ont baissé pour se rapprocher de leur moyenne à long terme. Il ressort des études d'attribution que la tendance du mode annulaire boréal observée au cours de ces dernières décennies est *probablement* liée en partie aux activités humaines. Cependant, la réaction aux forçages naturels et anthropiques simulée par les modèles du climat est plus faible que la tendance observée. [GT I 3.6.4, 9.RE]

Le mode annulaire austral est corrélé avec les variations synchrones de la pression atmosphérique de signe opposé aux latitudes moyennes et élevées, reflétant les changements au niveau de la principale ceinture des vents subpolaires d'ouest. L'augmentation de la zone des vents d'ouest des mers australes a eu lieu lors de la phase positive du mode annulaire austral, devenue plus courante ces dernières décennies, ce qui s'est traduit par l'augmentation du nombre de cyclones dans le creux barométrique circumpolaire (Sinclair *et al.*, 1997), un déplacement des précipitations en direction du pôle et une plus grande contribution aux précipitations dans l'Antarctique (Noone et Simmonds, 2002). Le mode annulaire austral a également des répercussions sur les configurations spatiales de la variabilité des précipitations dans l'Antarctique (Genthon *et al.*, 2003) et dans le sud de l'Amérique du Sud (Silvestri et Vera, 2003). Selon les simulations des modèles, la récente tendance observée du mode annulaire austral a été affectée par l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre et, notamment, par l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. [GT I 3.6.5, 9.5.3.3]

Les températures de la mer en surface dans l'Atlantique Nord présentent une variation de près de 70 ans durant la période instrumentale (et dans les reconstructions indirectes),

dénommée oscillation atlantique multidécennale (OAM: Kerr, 2000). Une phase chaude a eu lieu au cours de la période 1930-1960 et des phases froides ont marqué les périodes 1905-1925 et 1970-1990 (Schlesinger et Ramankutty, 1994). L'oscillation atlantique multidécennale semble connaître à nouveau une phase chaude depuis le milieu des années 1990. Elle peut être apparentée à des variations de l'intensité de la circulation thermohaline (Delworth et Mann, 2000; Latif, 2001; Sutton et Hodson, 2003; Knight *et al.*, 2005). Elle a été reliée aux anomalies de précipitations pluriannuelles sur l'Amérique du Nord, semble moduler les téléconnexions du phénomène ENSO (Enfield *et al.*, 2001; McCabe *et al.*, 2004; Shabbar et Skinner, 2004) et joue également un rôle dans la formation des cyclones au-dessus de l'Atlantique (Goldenberg *et al.*, 2001). On estime que l'oscillation atlantique multidécennale est un facteur des variations pluridécennales de la sécheresse frappant le Sahel, des précipitations dans les Caraïbes, du climat que connaissent l'Amérique du Nord et l'Europe durant l'été, des concentrations de glace dans la mer du Groenland et de la pression au niveau de la mer au sud des États-Unis, de l'Atlantique Nord et de l'Europe méridionale (voir par exemple Venegas et Mysak, 2000; Goldenberg *et al.*, 2001; Sutton et Hodson, 2005; Trenberth et Shea, 2006). [GT I 3.6.6]

2.2 Influences et rétroactions des modifications hydrologiques sur le climat

De fortes corrélations ont été observées entre les températures et les précipitations dans de nombreuses régions, confortant l'idée selon laquelle les processus qui régulent le cycle hydrologique et les températures sont étroitement liés. Au niveau mondial, les variations de la vapeur d'eau, des nuages et de la glace modifient le bilan radiatif de la Terre et, partant, jouent un rôle extrêmement important dans la détermination de la réaction du climat à l'augmentation des gaz à effet de serre. L'impact mondial de ces processus sur la courbe des températures est examiné au paragraphe 8.6 de la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation. La présente sous-section traite de certains processus à travers lesquels les changements des variables hydrologiques peuvent donner lieu à des effets rétroactifs sur le climat régional ou sur le budget atmosphérique des principaux gaz à effet de serre. L'objectif de cette partie n'est pas de faire un examen complet de ces processus, mais d'illustrer le couplage étroit entre les processus hydrologiques et le reste du système climatique. [GT I 3.3.5, chapitre 7, 8.6]

2.2.1 Effets sur les terres émergées

Le bilan hydrique de surface reflète les disponibilités en eau et en énergie. Dans les régions où les disponibilités hydriques sont élevées, l'évapotranspiration est régulée par les propriétés de la couche limite atmosphérique et du tapis végétal à la surface. Les variations du bilan hydrique de surface peuvent avoir un effet rétroactif sur le système climatique en recyclant l'eau dans la couche limite (au lieu de la laisser s'écouler ou s'infiltrer dans les couches profondes des sols). Le signe et l'ampleur de ces effets varient généralement beaucoup selon les particularités de l'environnement local. Par conséquent, alors que ces rétroactions peuvent être parfois relativement petites à l'échelle mondiale, elles peuvent devenir extrêmement importantes sur des échelles de temps ou d'espace plus petites, et entraîner ainsi des changements régionaux ou locaux de la variabilité ou des extrêmes. [GT I 7.2]

Les impacts du déboisement sur le climat donnent un exemple de cette complexité. D'après certaines études, le déboisement pourrait entraîner des températures réduites durant le jour et des augmentations des nuages de couche limite sous l'effet de l'augmentation de l'albédo, de la transpiration et de la perte de chaleur latente. Néanmoins, ces impacts sont fonction des propriétés de la végétation de remplacement et de la surface du sol ou de la neige sous-jacente. À noter que, dans certains cas, des effets contraires ont été avancés. Les impacts du déboisement sur les précipitations sont également complexes: ils peuvent être négatifs ou positifs selon les caractéristiques des terres émergées et de la végétation. [GT I 7.2, 7.5]

Plusieurs études avancent que, dans les zones semi-arides telles que le Sahel, la végétation peut, par sa présence, renforcer les conditions de sa propre croissance en recyclant l'eau du sol vers l'atmosphère, d'où elle peut être précipitée à nouveau. Il peut en résulter la formation de multiples équilibres possibles pour ces régions, selon la présence ou l'absence de précipitations et de végétation, ainsi que des changements de régime brusques, comme cela peut avoir été le cas lors du passage de l'holocène moyen aux conditions météorologiques modernes. [GT I chapitre 6, 7.2]

L'humidité du sol est une source d'inertie thermique du fait de sa capacité calorifique et de la chaleur latente requise pour l'évaporation. Aussi, on a suggéré qu'elle était un important instrument de régulation, par exemple, des températures et des précipitations estivales. Les rétroactions entre l'humidité du sol, les précipitations et la température sont particulièrement importantes dans les régions de transition situées entre les régions sèches et les régions humides, mais la force du couplage entre l'humidité des sols et les précipitations peut être multipliée par 10 entre les différents modèles climatiques, et l'on ne dispose pas à l'heure actuelle de contraintes d'observation permettant de réduire cette incertitude. [GT I 7.2, 8.2]

La fermeture des stomates sous l'effet de l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2 a également un effet de régulation sur les précipitations. Outre sa tendance à faire augmenter le ruissellement grâce aux diminutions de grande ampleur de l'évapotranspiration totale (paragraphe 2.3.4), cet effet peut conduire à des réductions importantes des précipitations dans certaines régions. [GT I 7.2]

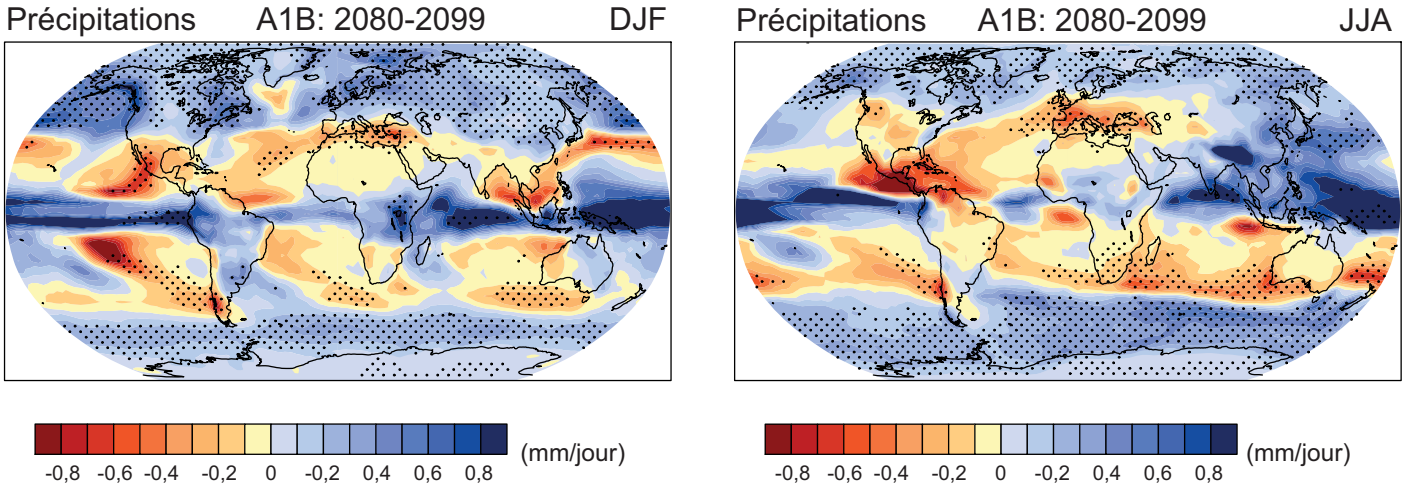


Figure 2.7: *Moyenne des variations des précipitations, calculée à partir de quinze modèles (en mm/jour) de décembre à février (DJF, à gauche) et de juin à août (JJA, à droite). Les changements sont donnés pour le scénario A1B du SRES pour la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999. Les pointillés désignent les zones où le niveau de la moyenne de l'ensemble des multi-modèles excède l'écart type de l'inter-modèle. [GT I figure 10.9]*

Les variations du manteau neigeux dues au réchauffement régional ont un effet de rétroaction sur la température par le biais des modifications de l'albédo. Tandis que l'ampleur de cette rétroaction varie considérablement entre les modèles, il ressort d'études récentes que la vitesse de la fonte de la neige au printemps peut donner une bonne estimation observable de la force de cette rétroaction, offrant une chance de réduire les incertitudes dans les prévisions futures des variations de température dans les régions recouvertes de neige. [GT I 8.6]

2.2.2 Rétroactions dues aux changements de la circulation océanique

L'apport d'eau douce dans l'océan modifie la salinité et, par conséquent, la densité de l'eau de mer. Ainsi, les variations du cycle hydrologique peuvent modifier la circulation océanique sous l'effet des variations de densité («circulation thermohaline») et, dès lors, avoir un effet de rétroaction sur le climat. Un exemple précis en est la circulation méridienne océanique dans l'Atlantique Nord. Cette circulation a une incidence substantielle sur les températures de surface, les précipitations et le niveau de la mer dans les régions situées aux alentours de l'Atlantique Nord et au-delà. On prévoit que la circulation méridienne océanique dans l'Atlantique s'affaiblira au cours du XXIe siècle et que cet affaiblissement sera important dans la modulation de la réaction globale au changement climatique. D'une manière générale, on prévoit qu'un affaiblissement de la circulation méridienne océanique viendra modérer la vitesse de réchauffement aux moyennes latitudes boréales. Néanmoins, il ressort de plusieurs études que cet affaiblissement donnera lieu également à une augmentation du rythme de réchauffement de l'Arctique. Ces réponses ont également des effets de rétroaction sur les précipitations à grande échelle sous l'action des variations de l'évaporation aux latitudes basses et moyennes de l'Atlantique. Alors que, d'après de nombreux modèles, l'élément moteur de l'affaiblissement de la circulation méridienne océanique est le réchauffement (et non le refroidissement) de la surface, dans les régions de sources d'eau profonde, les modifications hydrologiques jouent un rôle important et l'incertitude quant à l'influence exercée par l'apport d'eau douce entre pour une bonne part dans les écarts importants des projections de la réponse de la circulation méridienne océanique entre les modèles. Les variations observées de la salinité des océans ces dernières décennies suggèrent des variations des apports d'eau douce. Alors que presque toutes les intégrations des modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) font apparaître un affaiblissement de la circulation méridienne océanique au cours du XXIe siècle, aucune n'indique un passage brusque vers un autre état. Cette éventualité est considérée comme étant *très improbable* au cours du XXIe siècle, mais il s'avère impossible d'évaluer la probabilité de survenance de ce genre d'événements à long terme. [GT I 10.3.4]

Les variations des précipitations, de l'évaporation et du ruissellement et leur impact sur la circulation méridienne océanique sont modélisés de manière explicite dans les projections climatiques actuelles. Néanmoins, peu de modèles climatiques donnent une représentation détaillée des modifications du bilan de masse des nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, qui représentent une autre source possible d'eau douce dans l'océan. Les quelques études disponibles à ce jour, qui comportent une modélisation approfondie de l'apport d'eau douce provenant du Groenland, ne semblent pas indiquer que cette source additionnelle d'eau douce viendra modifier les conclusions générales exposées précédemment. [GT I 5.2, 8.7, 10.3, encadré 10.1]

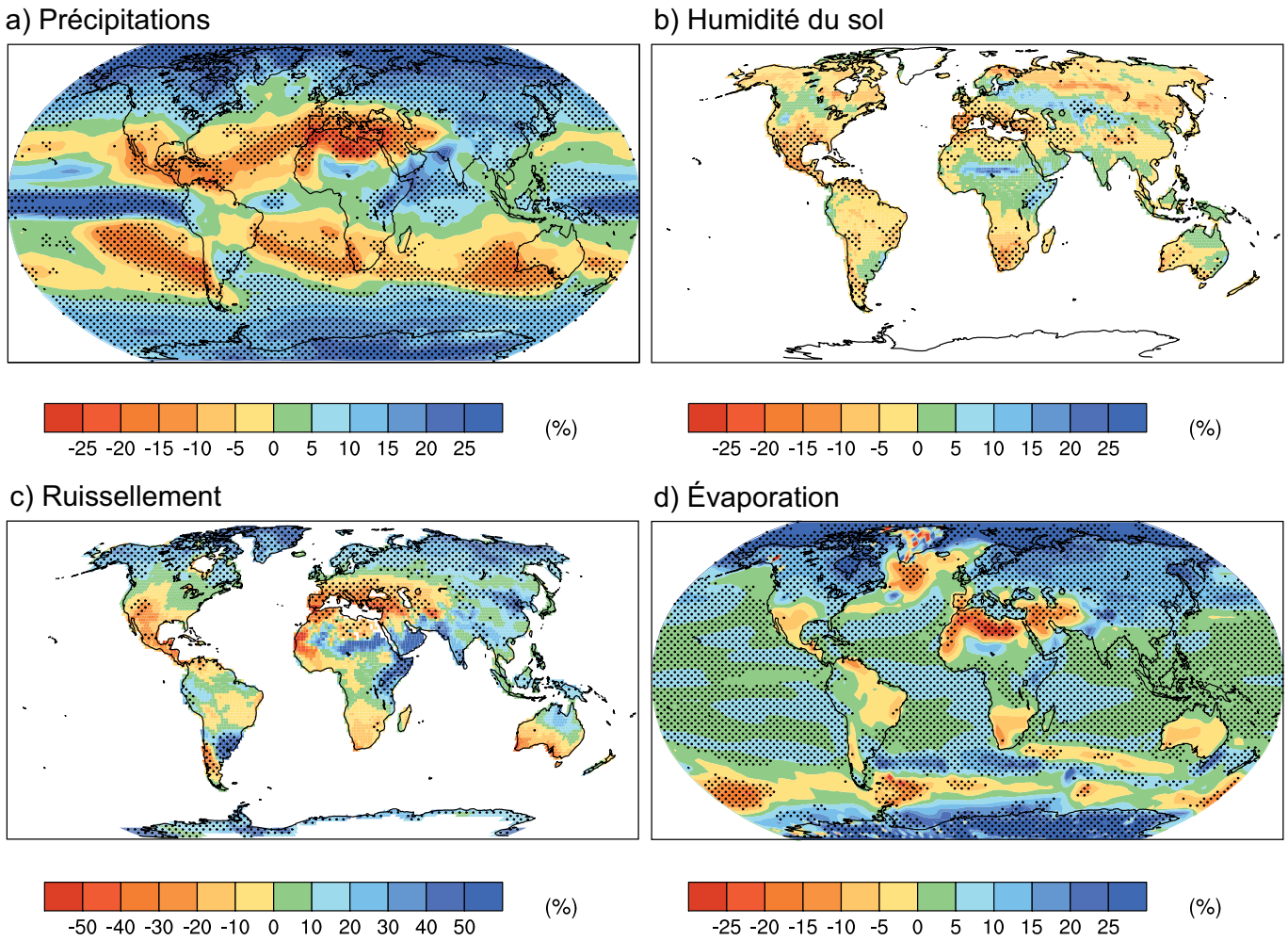


Figure 2.8: *Moyenne des variations a) des précipitations (en %), b) de la teneur en eau du sol (en %), c) du ruissellement (en %) et d) de l'évaporation (en %), calculée à partir de quinze modèles. Les pointillés représentent les régions où 80 % des modèles au moins concordent sur le signe du changement moyen. Les changements correspondent aux moyennes annuelles du scénario A1B du SRES calculées pour la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999. Les variations de l'humidité du sol et du ruissellement sont indiquées aux points terre à partir de données valables découlant de dix modèles au moins. [D'après GT I figure 10.12]*

2.2.3 Émissions et puits affectés par les processus hydrologiques ou par les rétroactions biogéochimiques

Les modifications du cycle hydrologique peuvent avoir des effets rétroactifs sur le climat à travers les variations des budgets atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres substances chimiques qui influent sur le rayonnement, souvent régulés par la biosphère. Les processus impliqués sont complexes: par exemple, la réaction de la respiration hétérotrophe du sol – une source de CO_2 – à l'augmentation de la température est fortement conditionnée par la quantité d'humidité du sol. Une nouvelle génération de modèles climatiques, qui intègrent les réactions de la végétation et du cycle du carbone au changement climatique, a permis d'étudier certains de ces processus pour la première fois. Il ressort de tous les modèles que le changement climatique a une rétroaction positive sur le cycle mondial du carbone, de sorte qu'une plus grande proportion d'émissions anthropiques de CO_2 reste dans l'atmosphère dans un climat plus chaud. Cependant, l'ampleur de la rétroaction totale varie considérablement entre les modèles. Les variations de la productivité primaire terrestre nette sont particulièrement incertaines, rendant compte de l'écart de fond entre les projections des variations régionales des précipitations. [GT I 7.3]

Un certain nombre de sources et de puits de méthane sont sensibles aux modifications hydrologiques, comme les zones humides, le pergélisol, la riziculture (sources) et l'oxydation du sol (puits). Il en va de même d'autres substances chimiques actives, telles que l'ozone, le plus souvent en raison de mécanismes biogéochimiques complexes. Les bilans des aérosols atmosphériques sont directement sensibles aux précipitations (par exemple par le biais de l'humectation des

sources de poussière d'origine terrestre et l'importance de dépôts humides comme les puits) et les aérosols ont des effets rétroactifs sur les précipitations en agissant comme des noyaux de condensation, influant de la sorte sur la capacité de précipitation des nuages. L'ampleur de ces rétroactions demeure néanmoins incertaine. De plus, elles ne sont généralement prises en compte que de manière simpliste, quand elles le sont, dans la génération de modèles climatiques actuellement disponibles. [GT I 7.4]

2.3 Changements climatiques prévus en rapport avec l'eau

Les nombreuses simulations disponibles réalisées à partir d'un éventail plus large de modèles climatiques, utilisés pour divers scénarios d'émissions, constituent une avancée décisive pour les projections des changements climatiques par rapport à celles considérées dans le troisième Rapport d'évaluation. Les estimations les plus probables des projections par les modèles indiquent que le réchauffement décennal moyen sur chaque continent habité d'ici 2030 ne dépendra pas du choix du scénario SRES et qu'il sera *très probablement* au moins deux fois plus important (autour de 0,2 °C tous les 10 ans) que la variabilité naturelle correspondante telle qu'estimée pour le XXe siècle par les modèles. Les émissions continues de gaz à effet de serre à un niveau égal ou supérieur aux taux actuels, selon les scénarios SRES sans mesure d'atténuation, accentueraient le réchauffement et seraient à l'origine de nombreux changements du système climatique mondial durant le XXIe siècle; ces modifications seraient *très probablement* plus importantes que celles constatées au cours du XXe siècle. La variation prévue de la température moyenne mondiale pour 2090-2099 (par rapport à 1980-1999), d'après les scénarios SRES illustratifs et de référence, se situe entre 1,8 °C (estimation la plus probable comprise dans un intervalle *probable* de 1,1 à 2,9 °C) pour le scénario B1, et 4,0 °C (estimation la plus probable comprise dans un intervalle *probable* de 2,4 à 6,4 °C) pour le scénario A1FI. Le réchauffement devrait être le plus intense sur les terres et aux plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord, et le plus faible au-dessus de l'Océan antarctique et de certaines zones de l'océan Atlantique Nord. Il est *très probable* que les chaleurs extrêmes et les vagues de chaleur continueront de se multiplier. [GT I RiD, chapitre 10]

Incertitudes des projections hydrologiques

Les incertitudes sur les changements prévus du système hydrologique sont imputables à la variabilité interne du système climatique, à l'incertitude sur les émissions futures de gaz à effet de serre et d'aérosols, à l'intégration de ces émissions dans le changement climatique par les modèles du climat mondial et à l'incertitude des modèles hydrologiques. D'ici la fin du XXIe siècle, selon le scénario A1B, les différences entre les projections des précipitations des

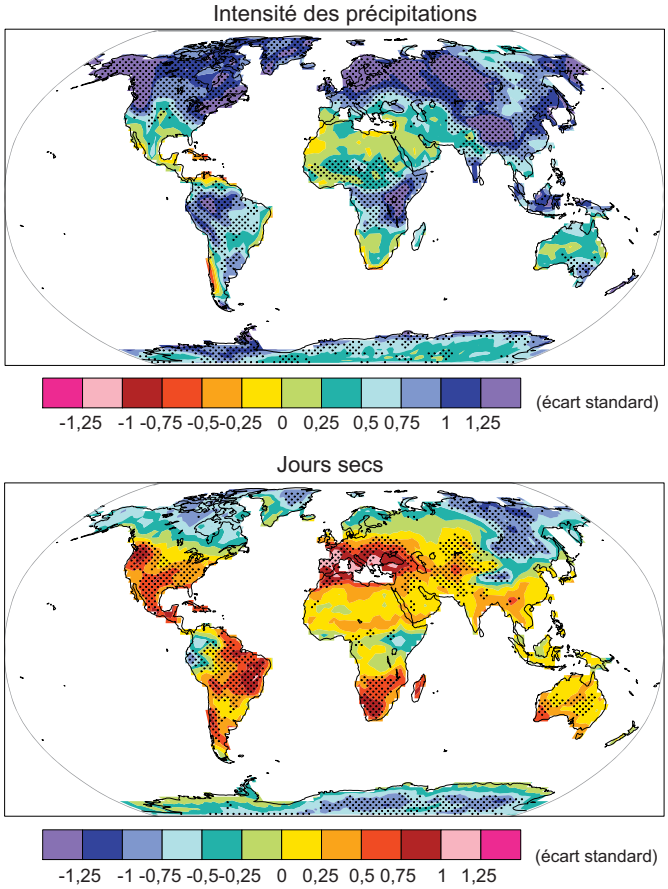


Figure 2.9: *Évolution des phénomènes extrêmes, fondée sur les simulations multi-modèles de neuf modèles climatiques couplés mondiaux sur la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999 pour le scénario A1B. Changements des configurations spatiales de l'intensité pluviométrique (soit les précipitations totales annuelles divisées par le nombre de jours de pluie) (en haut). Changements des configurations spatiales des jours secs (soit le nombre maximum annuel de jours secs consécutifs) (en bas). Les pointillés désignent les zones où au moins cinq des neuf modèles s'accordent à reconnaître que le changement est statistiquement significatif. Les indices extrêmes sont seulement calculés pour les terres émergées. Les changements sont donnés en unités d'écarts types. [GT I figure 10.18]*

modèles climatiques constitueront une source plus grande d'incertitude que la variabilité interne. Cela semble indiquer également que, bien souvent, les changements modélisés de la hauteur moyenne des précipitations annuelles sont supérieurs à la variabilité interne modélisée à cette échéance. Les projections des différents modèles perdent en cohérence au fur et à mesure de la diminution de l'échelle spatiale. [GT I 10.5.4.3] Aux latitudes élevées et dans certaines zones des tropiques, tous les modèles ou presque prévoient une augmentation des précipitations, alors que dans certaines régions subtropicales et des latitudes moyennes inférieures, les

précipitations diminuent dans tous les modèles ou presque. Même le signe des variations des précipitations diverge également entre ces zones d'augmentations et de baisses prononcées des précipitations pour la génération actuelle de modèles. [GT I 10.3.2.3, 10.5.4.3] En ce qui concerne les autres aspects du cycle hydrologique, tels que les modifications de l'évaporation, l'humidité du sol et le ruissellement, l'écart relatif des projections est identique ou supérieur à celui des variations des précipitations. [GT I 10.3.2.3]

D'autres sources d'incertitude sur les projections hydrologiques sont imputables à la structure des modèles climatiques actuels. Certains exemples de processus qui, au mieux, sont représentés uniquement de manière simpliste dans les modèles climatiques sont présentés au paragraphe 2.2. Les modèles actuels écartent généralement de l'analyse certaines rétroactions de la transformation de la végétation sur le changement climatique. La majorité des simulations utilisées pour établir les projections climatiques excluent également les transformations anthropiques du couvert terrestre. Le traitement du forçage lié aux aérosols anthropiques est relativement sommaire dans la majorité des modèles climatiques. Alors que certains modèles incluent une large gamme d'espèces d'aérosols anthropiques, certaines espèces pouvant s'avérer importantes (telles que le carbone noir) ne sont pas prises en compte dans la plupart des simulations ayant été utilisées pour établir le quatrième Rapport d'évaluation (voir l'analyse de l'attribution des changements observés, au paragraphe 2.1). Plus de la moitié des modèles de ce Rapport d'évaluation n'intègrent pas non plus les effets indirects des aérosols sur les nuages. La résolution des modèles climatiques actuels limite également une représentation adéquate des cyclones tropicaux et des fortes précipitations. [GT I 8.2.1, 8.2.2, 8.5.2, 8.5.3, 10.2.1]

L'inclusion des résultats des modèles climatiques dans les études entraîne des incertitudes pour les deux raisons suivantes: les différentes échelles spatiales utilisées par les modèles du climat mondial et les modèles hydrologiques, et les biais de la hauteur moyenne des précipitations à long terme, telle que calculée par les modèles du climat mondial pour le climat actuel. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour s'attaquer aux différences d'échelle, qui vont de la simple interpolation des résultats des modèles climatiques aux méthodes dynamiques ou statistiques de réduction d'échelle. Néanmoins, toutes introduisent des incertitudes dans la projection. Les biais en matière de simulation de la hauteur moyenne des précipitations sont souvent traités par l'intégration des anomalies modélisées aux précipitations observées, afin d'obtenir un ensemble de données motrices pour les modèles hydrologiques. Par conséquent, les modifications des variabilités interannuelles ou quotidiennes des paramètres climatiques ne sont pas prises en considération dans la majorité des études sur les impacts hydrologiques. Il en résulte une sous-estimation des crues, des sécheresses et des besoins en eau d'irrigation dans le futur. [GT II 3.3.1]

Les incertitudes concernant les impacts du changement climatique sur les ressources hydriques, les sécheresses et les crues surviennent pour diverses raisons, telles que les différents scénarios de développement économique, d'émissions de gaz à effet de serre, de modélisation du climat et de modélisation hydrologique. Néanmoins, on ne dispose pas encore d'étude évaluant la façon dont les différents modèles hydrologiques réagissent au même signal de changement climatique. [GT II 3.3.1] Depuis le troisième Rapport d'évaluation, l'incertitude des projections des modèles climatiques pour les évaluations des ressources en eau douce est souvent prise en considération par l'utilisation d'ensembles multi-modèles. Les évaluations probabilistes formelles sont encore rares.[GT II 3.3.1, 3.4]

En dépit de ces incertitudes, des résultats fiables sont disponibles. Dans les sections qui suivent, les incertitudes quant aux changements prévus sont examinées sur la base des évaluations effectuées pour le quatrième Rapport d'évaluation.

2.3.1 Précipitations (y compris les épisodes extrêmes) et vapeur d'eau

2.3.1.1 Précipitations moyennes

Les projections climatiques réalisées au moyen d'ensembles multi-modèles mettent en évidence des augmentions de la moyenne de la vapeur d'eau, de l'évaporation et des précipitations à l'échelle mondiale au cours du XXIe siècle. Il ressort des modèles que les précipitations augmentent généralement dans les zones des maximums des précipitations tropicales (comme les régimes des moussons et la zone tropicale du Pacifique, en particulier) ainsi qu'aux latitudes élevées avec des baisses générales dans les régions subtropicales. [GT I RiD, 10.RE, 10.3.1, 10.3.2]

Les augmentations des précipitations à des latitudes élevées durant les saisons hivernale et estivale sont fortement homogènes entre les modèles (voir la figure 2.7). Les hausses des précipitations à la surface des océans tropicaux et dans certains régimes des moussons, comme la mousson d'Asie du Sud en été (de juin à août) et la mousson d'Australie en été (de décembre à février), sont manifestes et, bien que moins homogènes au niveau local, les modèles s'accordent très largement à grande échelle dans les tropiques. À l'exclusion de l'Asie orientale qui connaît des augmentations des précipitations estivales, les moyennes latitudes font face à des baisses généralisées des précipitations en été. La baisse des précipitations dans de nombreuses régions subtropicales s'observe dans la moyenne des ensembles multi-modèles, et les modèles s'accordent généralement sur le signe du changement, notamment dans certaines régions telles que la zone tropicale de l'Amérique centrale et des Caraïbes et la région méditerranéenne. [GT I 10.3.2] Un examen plus approfondi des modifications régionales est présenté à la section 5.

La figure 2.8 montre, à partir d'un ensemble de 15 modèles, la répartition mondiale de la variation des précipitations moyennes de 2080 à 2099 pour le scénario A1B du SRES, de même que d'autres quantités hydrologiques. La plupart des régions de latitude élevée, ainsi que l'Afrique de l'Est, la partie nord de l'Asie centrale et la partie équatoriale de l'océan Pacifique, connaissent des augmentations des précipitations annuelles supérieures à 20 %. Des baisses importantes pouvant atteindre 20 % se sont produites dans la région méditerranéenne, dans les Caraïbes et sur les côtes ouest subtropicales de chaque continent. Dans l'ensemble, les précipitations terrestres augmentent d'environ 5 %, alors que les précipitations à la surface des océans augmentent de 4 %. Le changement net à la surface des terres intervient pour 24 % dans l'augmentation moyenne mondiale des précipitations. [GT I 10.3.2]

Les variations de l'évaporation mondiale moyenne s'équilibrent pratiquement avec les variations des précipitations mondiales dans les projections des modèles climatiques pour le XXIe siècle. Néanmoins, ce rapport ne s'observe pas au niveau local en raison des changements dans le transport atmosphérique de la vapeur d'eau. L'évaporation annuelle moyenne augmente sur une bonne partie de l'océan, avec des variations spatiales qui ont tendance à se rattacher aux variations du réchauffement de surface. La convergence de l'humidité atmosphérique augmente à la surface des océans équatoriaux et aux latitudes élevées. Sur les terres émergées, les variations des précipitations ont tendance à être contrebalancées par l'évaporation et le ruissellement. Sur des échelles globales, on prévoit que la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère augmentera sous l'effet du réchauffement des températures, avec une humidité relative demeurant à peu près constante. Les augmentations de la vapeur d'eau, qui est un gaz à effet de serre, ont une rétroaction positive sur le réchauffement climatique. Néanmoins, le changement corrélé du profil vertical de la température atmosphérique («gradient vertical») atténue en partie la rétroaction positive. Des preuves récentes provenant de modèles et de données d'observations tendent fortement à valider la présence d'une rétroaction combinée vapeur d'eau/gradient vertical sur le climat d'une force comparable à celle trouvée dans les modèles de circulation générale du climat. [GT I 8.6, 10.RE, 10.3.2]

2.3.1.2 Extrêmes de précipitations

Il est *très probable* que le nombre d'épisodes de fortes précipitations augmente. On prévoit une hausse de l'intensité des précipitations, notamment dans les régions tropicales et les zones situées à des latitudes élevées enregistrant des augmentations de la hauteur moyenne des précipitations. La tendance est à la sécheresse durant l'été dans les régions situées au centre des continents, indiquant un risque accru de sécheresse dans ces régions. Dans la plupart des régions tropicales et des moyennes et hautes latitudes, les précipitations extrêmes augmentent davantage que les précipitations moyennes. [GT I 10.3.5, 10.3.6]

Un résultat consacré découlant des modèles couplés mondiaux, inscrit dans le troisième Rapport d'évaluation, révèle une possibilité accrue d'augmentation de la sécheresse estivale aux latitudes tempérées associée à un risque élevé de sécheresse (figure 2.8). Quinze modèles récents de la circulation générale couplés atmosphère-océan, exécutés pour un réchauffement du climat futur, montrent une sécheresse estivale dans la plus grande partie des régions situées dans le nord des subtropiques et aux latitudes tempérées. Il est à noter cependant que l'intensité de la sécheresse estivale varie considérablement entre les modèles. Les sécheresses corrélées avec ces sécheresses estivales pourraient conduire à la disparition de la végétation au niveau régional et contribuer à la hausse du pourcentage de surfaces émergées en proie à un épisode de sécheresse – par exemple, une sécheresse extrême augmentant de 1 % de la surface émergée actuelle (par définition) à 30 % d'ici 2100 dans le scénario A2. La texture plus sèche du sol peut également concourir à des vagues de chaleur plus fortes. [GT I 10.3.6]

L'augmentation prévue du risque de précipitations intenses et d'inondations doit également être reliée au risque de sécheresse. Bien que quelque peu paradoxal, ceci est dû au fait qu'on prévoit une concentration des précipitations dans des épisodes plus intenses, avec des périodes plus longues de précipitations moindres entre eux (voir le paragraphe 2.1.1 pour de plus amples explications). Par conséquent, les phénomènes épisodiques de précipitations intenses accompagnés de niveaux de ruissellement élevés sont entrecoupés de périodes relativement sèches plus longues, caractérisées par une augmentation de l'évapotranspiration, en particulier dans les régions subtropicales. Néanmoins, selon le seuil utilisé pour définir ces phénomènes, une augmentation du nombre de jours secs ne signifie pas nécessairement une diminution de la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes. Un autre aspect de ces changements se rapporte aux variations des précipitations moyennes, avec des précipitations extrêmes s'amplifiant dans de nombreuses régions où les précipitations moyennes augmentent et des sécheresses extrêmes s'aggravant dans les régions touchées par une baisse de la hauteur moyenne des précipitations. [GT I 10.3.6]

Les projections climatiques multi-modèles pour le XXIe siècle mettent en évidence des augmentations de l'intensité pluviométrique et du nombre de jours secs consécutifs dans bon nombre de régions (figure 2.9). L'intensité pluviométrique augmente presque partout, mais surtout aux latitudes moyennes et élevées, où la hauteur moyenne des précipitations augmente également. Cependant, la figure 2.9 (cadre inférieur) fait apparaître des régions connaissant une augmentation des jours secs entre les phénomènes pluvieux dans les régions subtropicales et à des latitudes moyennes inférieures, et des passages décroissants de jours secs aux latitudes moyennes supérieures et aux hautes latitudes, où la hauteur moyenne des précipitations augmente. [GT I 10.3.6.1]

Compte tenu de l'existence de zones d'augmentation et de diminution du nombre de jours secs consécutifs entre les épisodes de précipitations dans les valeurs moyennes des multi-modèles (figure 2.9), les tendances moyennes mondiales sont plus petites et moins uniformes entre les modèles. Un ensemble physique perturbé à un modèle montre seulement quelques zones enregistrant une augmentation régulière du nombre de jours de pluie en juillet. Cet ensemble comprend des variations plus larges des précipitations extrêmes par rapport à la moyenne de l'ensemble témoin (comparé avec la réaction plus uniforme des extrêmes de températures), faisant état d'une réaction moins uniforme pour les extrêmes de précipitations en général, par rapport aux extrêmes de températures. [GT I 10.3.6, QF 10.1]

Selon divers modèles, il est *probable* que les futurs cyclones tropicaux s'intensifieront, avec une accélération des vitesses de pointe des vents et un accroissement des précipitations du fait de l'augmentation continue des températures de la mer en surface dans les tropiques. C'est avec un degré de con fiance moindre qu'on anticipe une diminution du nombre de cyclones tropicaux sur l'ensemble de la planète. [GT I RiD]

2.3.2 Neige et glace terrestre

Le climat se réchauffant, le manteau neigeux devrait se contracter et diminuer, et les glaciers et les calottes glaciaires devraient perdre de la masse du fait que la fonte de la neige durant l'été augmentera davantage que les chutes de neige en hiver. On prévoit des augmentations généralisées d'épaisseur de la couche de dégel dans une bonne partie des régions de pergélisol, sous l'effet du réchauffement. [GT I RiD, 10.3.3]

2.3.2.1 Modifications du manteau neigeux, du gélisol, de la glace lacustre et de la glace de rivière

Le manteau neigeux est une réaction intégrée à la température et aux précipitations et présente une corrélation négative forte avec la température de l'air dans la plupart des régions qui connaissent un enneigement saisonnier. En raison de cette association aux températures, les simulations prévoient des réductions massives du manteau neigeux tout au long du XXIe siècle, bien que des augmentations soient prévues aux altitudes élevées. Par exemple, les modèles climatiques utilisés dans l'Évaluation de l'impact du changement climatique dans l'Arctique prévoient dans le cadre du scénario B2, une diminution de 9 à 17 % de la moyenne annuelle du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord d'ici la fin du siècle. De manière générale, la saison d'accumulation de la neige devrait commencer plus tard, la saison de la fonte des neiges commencerait plus tôt et la fraction de couverture neigeuse diminuerait durant la saison hivernale. [GT I 10.3.3.2, chapitre 11]

Les résultats provenant de modèles forcés par divers scénarios climatiques du GIEC montrent que, d'ici à 2050, la zone de pergélisol dans l'hémisphère Nord va *probablement* se rétracter de 20 à 35 %. Les modifications prévues de la profondeur de la fonte saisonnière ne sont uniformes ni dans l'espace, ni dans le temps. Il est *probable* que les épaisseurs du mollisol se situent, au cours de ces 30 prochaines années, dans des limites de 10 à 15 % de leurs valeurs actuelles sur la plus grande partie de la zone de pergélisol; d'ici 2050, l'ampleur du processus saisonnier de dégel peut augmenter en moyenne de 15 à 25 % et de 50 % ou plus dans les régions situées à l'extrême nord; d'ici 2080, il est *probable* qu'une augmentation de 30 à 50 % ou plus ait lieu sur l'ensemble des zones de pergélisol. [GT II 15.3.4]

Le réchauffement climatique devrait entraîner des diminutions de la glace de rivière et de la glace lacustre. On s'attend néanmoins à ce que cet effet soit réduit dans les cours d'eau importants qui s'écoulent en direction du nord en raison des différences régionales réduites au niveau des températures du sud au nord et des gradients hydrologiques et physiques connexes. [GT II 15.4.1.2]

2.3.2.2 Glaciers et calottes glaciaires

En présence d'un réchauffement climatique pendant toute la durée du XXIe siècle, la masse des glaciers et des calottes glaciaires devrait diminuer en raison de la dominance de la fonte d'été sur les augmentations des précipitations hivernales. Selon les simulations portant sur 11 glaciers situés dans diverses régions, ceux-ci devraient perdre 60 % de leur masse d'ici à 2050 (Schneeberger *et al.*, 2003). Selon une étude comparative de sept simulations MCG avec un régime climatique deux fois plus riche en CO_2, bon nombre de glaciers pourraient disparaître totalement en raison de la hausse de l'altitude de la ligne d'équilibre (Bradley *et al.*, 2004). La fonte de ces masses de glace est beaucoup plus rapide que la survenance d'une possible glaciation dans les siècles qui viennent et elle peut, dans certaines régions, être irréversible. [GT I 10.7.4.2, encadré 10.1]. Les projections mondiales pour le XXIe siècle prévoient une fonte de l'ordre de 0,07 à 0,17 m en variation équivalente du niveau de la mer des glaciers et des calottes glaciaires, dont la masse estimée à ce jour est de 0,15 à 0,37 m en variation équivalente du niveau de la mer. [GT I chapitre 4, tableau 4.1, 10, tableau 10.7]

2.3.3 Niveau de la mer

Du fait de notre compréhension trop limitée de certains effets importants déterminant l'élévation du niveau de la mer, le quatrième Rapport d'évaluation n'évalue pas la probabilité ni ne fournit la valeur la plus probable ou une limite supérieure de cette élévation. Les projections ne prennent pas en considération les incertitudes sur les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone ou les effets totaux des changements de l'écoulement dans les nappes glaciaires. Par conséquent, les valeurs supérieures des fourchettes indiquées ne doivent pas être considérées comme des limites supérieures de l'élévation du niveau de la mer. Les projections par les modèles de l'élévation moyenne mondiale du niveau de la mer entre la fin du XXe siècle (1980-1999) et la fin de ce siècle (2090-2099) sont de l'ordre de 0,18

à 0,59 m, si l'on se fonde sur l'éventail des résultats des modèles MCGAO et des différents scénarios SRES, tout en écartant les incertitudes susmentionnées. Dans l'ensemble des scénarios SRES de référence, à l'exclusion du scénario B1, le rythme moyen d'élévation du niveau de la mer durant le XXIe siècle devrait *très probablement* dépasser celui de 1961-2003 (1,8 ± 0,5 mm/an). La dilatation thermique est la composante la plus importante dans ces projections pour tous les scénarios, et concourt à hauteur de 70 à 75 % de l'estimation centrale. Les glaciers, les calottes glaciaires et l'inlandsis groenlandais devraient également contribuer positivement au niveau de la mer. Les modèles de la circulation générale montrent que, dans l'ensemble, l'inlandsis antarctique bénéficiera des chutes de neige plus importantes sans enregistrer une fonte en surface importante, gagnant par conséquent de la masse et participant négativement au niveau de la mer. L'élévation du niveau de la mer durant le XXIe siècle devrait connaître une variabilité géographique importante. [RSY 3.2.1; GT I RiD, 10.6.5, RT 5.2] La perte partielle des nappes glaciaires du Groenland et/ou de l'Antarctique pourrait conduire à une élévation de plusieurs mètres du niveau de la mer, à des modifications majeures des littoraux et à des inondations dans les basses terres, les deltas et les îles de faible altitude étant les plus touchés. Il ressort de la modélisation actuelle que ces changements pourraient survenir dans le Groenland au cours des prochains millénaires. Néanmoins, étant donné que les processus dynamiques d'écoulement des deux nappes glaciaires sont très mal compris à ce jour, l'élévation plus rapide du niveau de la mer sur des périodes séculaires ne peut pas être écartée. [GT I RiD; GT II 19.3]

2.3.4 Évapotranspiration

Le bilan hydrologique ou «évaporation potentielle» devrait augmenter presque partout suite à la hausse de la capacité de rétention d'eau dans l'atmosphère due à l'élévation des températures. L'humidité relative ne devrait toutefois pas se modifier sensiblement. En conséquence, le déficit en vapeur d'eau dans l'atmosphère augmenterait, tout comme le taux d'évaporation (Trenberth *et al.*, 2003). [GT I figures 10.9, 10.12; GT II 3.2, 3.3.1] L'évaporation effective au-dessus de l'eau libre devrait augmenter, par exemple, sur une bonne partie de la surface de l'océan [GT I figure 10.12] et des lacs, avec des variations spatiales tendant à se rapprocher des variations spatiales du réchauffement de surface. [GT I 10.3.2.3, figure 10.8] Les changements dans l'évapotranspiration à la surface des terres émergées sont régulés par les variations des précipitations et du forçage radiatif. Ces modifications auront, à leur tour, des effets sur le bilan hydrique du ruissellement, l'humidité du sol, l'eau des réservoirs, le niveau hydrostatique et la salinisation des aquifères de faible profondeur. [GT II 3.4.2]

L'enrichissement en dioxyde de carbone de l'atmosphère a deux implications contradictoires potentielles pour l'évapotranspiration de la végétation. D'une part, des concentrations plus élevées de CO_2 peuvent réduire la transpiration du fait que la stomate des feuilles, grâce à laquelle la transpiration des plantes a lieu, n'a pas besoin de s'ouvrir autant afin d'absorber la même quantité de CO_2 pour la photosynthèse (voir Gedney *et al.*, 2006, bien que d'autres preuves d'un tel lien soient difficiles à trouver). Inversement, des concentrations plus élevées de CO_2 peuvent accélérer la croissance des plantes, donnant lieu à une augmentation de la surface foliaire et, par conséquent, à une transpiration accrue. L'ampleur relative de ces deux impacts varie entre les types de plantes et sous l'effet d'autres influences telles que la disponibilité des nutriments et les impacts des variations de la température et des quantités d'eau disponible. La prise en compte des effets de l'enrichissement en CO_2 sur l'évapotranspiration nécessite d'inclure dans l'analyse un modèle dynamique de la végétation, comme c'est le cas pour un petit nombre de modèles maintenant (Rosenberg *et al.*, 2003; Gerten *et al.*, 2004; Gordon et Famiglietti, 2004; Betts *et al.*, 2007), mais généralement à l'échelle mondiale plutôt qu'à l'échelle du bassin hydrographique. Bien que les études réalisées au moyen de modèles d'équilibre de la végétation affirment que l'augmentation de la surface foliaire peut atténuer la fermeture des stomates (Betts *et al.*, 1997; Kergoat *et al.*, 2002), les études effectuées au niveau mondial au moyen de modèles dynamiques de la végétation indiquent que les effets de la fermeture des stomates sont supérieurs à ceux de l'augmentation de la surface foliaire. Si l'on tient compte des changements dans la végétation causés par le CO_2, les simulations indiquent que le ruissellement moyen mondial sous un climat enrichi deux fois en CO_2 augmente d'environ 5 % en raison de la diminution de l'évapotranspiration résultant uniquement de l'enrichissement en CO_2 (Leipprand et Gerten, 2006; Betts *et al.*, 2007). [GT II 3.4.1]

2.3.5 Humidité du sol

Les variations de l'humidité du sol sont déterminées par les changements du volume et de la périodicité non seulement des précipitations, mais également de l'évaporation (qui peut être affectée par les changements dans la végétation). La répartition géographique des modifications de l'humidité du sol est, par conséquent, légèrement différente de la distribution des variations des précipitations: une augmentation de l'évaporation peut largement contrebalancer les augmentations des précipitations. Les modèles simulent l'humidité dans les quelques mètres de la tranche supérieure des terres émergées de diverses façons, et l'évaluation du taux d'humidité du sol est toujours difficile. Les projections de la teneur annuelle moyenne en eau du sol (figure 2.8 b)) font généralement apparaître des baisses dans les régions subtropicales et la région méditerranéenne, et des augmentations en Afrique de l'Est, en Asie centrale et dans d'autres régions enregistrant une augmentation des précipitations. Les latitudes élevées, où le manteau neigeux se réduit, connaissent également des baisses de la teneur en eau du sol (paragraphe 2.3.2). Tandis que l'ampleur des variations reste souvent incertaine, il existe une cohérence quant au signe des changements dans un grand nombre de ces régions. Il est fait état des mêmes configurations de changements au niveau des résultats saisonniers. [GT I 10.3.2.3]

2.3.6 Ruissellement et débit fluvial

Les variations du débit fluvial ainsi que des niveaux des lacs et des zones humides dues au changement climatique sont déterminées avant tout par les modifications du volume des précipitations, de leur répartition dans le temps et, surtout, par leur nature – neige ou pluie. Les changements dans l'évaporation influent également sur l'écoulement fluvial. Plusieurs centaines d'études menées sur les impacts potentiels du changement climatique sur l'écoulement fluvial ont été publiées dans des revues scientifiques, et davantage d'études ont été présentées dans des rapports internes. Les études réalisées portent principalement sur l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Australasie, et quelques-unes sont axées sur l'Asie. Pratiquement toutes ces études utilisent un modèle hydrologique de bassin fondé sur des scénarios qui s'appuient sur des simulations de modèles climatiques, et presque toutes ont été conduites à l'échelle du bassin hydrographique. Les rares études réalisées à l'échelle mondiale en utilisant le ruissellement, simulé directement par les modèles climatiques [GT I 10.3.2.3] et les modèles hydrologiques, exécutés hors ligne [GT II 3.4], font apparaître une augmentation du ruissellement aux latitudes élevées et dans les zones humides des tropiques, et une diminution du ruissellement aux latitudes moyennes et dans certaines régions sèches des tropiques. La figure 2.8 c) montre les variations du ruissellement moyen simulées par un ensemble dans le scénario A1B. Le ruissellement a considérablement diminué en Europe méridionale et augmenté en Asie du Sud-est et aux latitudes élevées, où les modèles s'accordent sur le signe du changement (moins cependant sur son ampleur). Les variations les plus importantes sont de l'ordre de 20 % ou plus des valeurs simulées pour 1980-1999, soit de 1 à 5 mm/jour dans les régions humides à moins de 0,2 mm/jour dans les régions désertiques. Les débits fluviaux à des latitudes élevées augmentent, tandis que ceux des principaux cours d'eau du Moyen-Orient, d'Europe et d'Amérique centrale ont tendance à diminuer. [GT I 10.3.2.3] L'ampleur du changement varie, néanmoins, entre les modèles climatiques et, dans certaines régions comme l'Asie méridionale, le ruissellement pourrait augmenter ou diminuer. Comme indiqué au paragraphe 2.2.1, les effets de l'enrichissement en CO_2 peuvent entraîner une diminution de l'évaporation et, partant, des augmentations plus importantes ou des diminutions moindres du volume du ruissellement. [GT I 7.2]

La figure 2.10 met en évidence le changement dans le ruissellement annuel pour 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Les valeurs représentent la médiane de 12 modèles climatiques utilisés dans le scénario A1B du SRES. Les parties hachurées

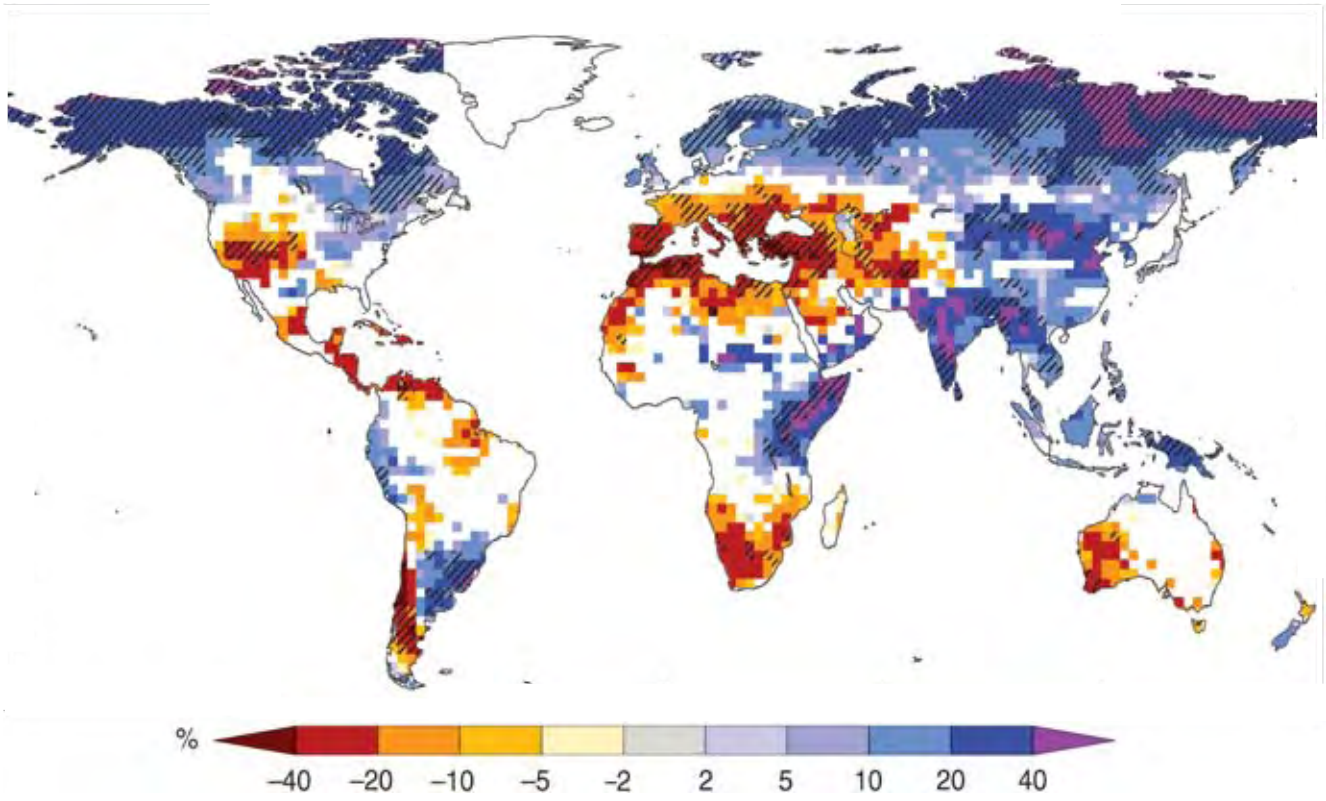


Figure 2.10: *Changements relatifs à grande échelle du ruissellement annuel pour la décennie 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Les zones en blanc désignent les régions pour lesquelles moins de 66 % de l'ensemble des 12 modèles concordent sur le signe du changement, et les zones hachurées les régions pour lesquelles plus de 90 % des modèles concordent sur ce signe (Milly* et al.*, 2005). [D'après RSY figure 3.5 et GT II figure 3.4]*

et les parties blanches délimitent respectivement les régions où les modèles concordent ou diffèrent sur le signe des changements: à noter les zones de grande dimension où ce signe reste flou. Cette carte mondiale du ruissellement annuel illustre les changements à grande échelle et n'est pas destinée à être interprétée à des petites échelles temporelles (par exemple, à l'échelle des saisons) et spatiales. Dans les régions où la pluviosité et le ruissellement sont très faibles (par exemple, les zones désertiques), de faibles modifications du ruissellement peuvent se traduire par des changements importants en pourcentage. Dans certaines régions, le signe des changements prévus dans le ruissellement diffère des tendances récemment observées (paragraphe 2.1.6). Dans certaines régions où l'on prévoit des augmentations du ruissellement, différents impacts saisonniers sont attendus, tels que l'augmentation du ruissellement durant la saison humide et sa diminution durant la saison sèche. [GT II 3.4.1]

Un résultat extrêmement fiable est que le réchauffement climatique donnerait lieu à des variations saisonnières de l'écoulement fluvial là où une grande partie des précipitations hivernales tombent actuellement sous forme de neige, avec des débits printaniers inférieurs en raison de la baisse ou de la précocité de la fonte de neige, et des débits hivernaux supérieurs. C'est notamment le cas dans les Alpes européennes, en Scandinavie et autour de la mer Baltique, en Russie, dans la chaîne de l'Himalaya ainsi que dans l'ouest, le centre et l'est de l'Amérique du Nord. Cet effet est plus marqué aux altitudes plus basses, où les chutes de neige sont plus marginales. Bien souvent, les débits maximaux apparaîtraient un mois plus tôt au moins vers le milieu du XXIe siècle. Dans les régions où les chutes de neige sont rares ou absentes, les modifications du ruissellement sont beaucoup plus tributaires des variations de la pluviométrie que des changements de température. La plupart des études réalisées dans ces régions prévoient une augmentation du caractère saisonnier des débits, souvent avec des débits plus élevés au cours de la saison des débits maximaux, et des débits plus bas durant la saison de faibles débits ou au cours des périodes sèches prolongées. [GT II 3.4.1]

Bon nombre de cours d'eau qui drainent les régions glacées, notamment dans les chaînes de montagnes élevées de l'Asie et les Andes sud-américaines, sont alimentés par la fonte des glaciers durant les périodes chaudes et sèches. Le repli de ces glaciers, dû au réchauffement mondial, se traduirait par l'augmentation de l'écoulement fluvial à court terme, mais la contribution de la fonte des glaciers aux débits fluviaux devrait s'amenuiser graduellement au cours des prochaines décennies. [GT II 3.4.1]

Les variations des niveaux des lacs reflètent les changements de la répartition saisonnière des débits fluviaux entrants, des précipitations et de l'évaporation, parfois intégrés sur un grand nombre d'années. En conséquence, les lacs pourraient réagir de façon largement non linéaire à un changement linéaire des contributions. Les études sur les Grands Lacs d'Amérique du Nord et sur la mer Caspienne laissent entendre que les niveaux hydriques pourraient varier de plusieurs dizaines de centimètres, voire de plusieurs mètres, d'ici la fin du siècle. [GT II 3.4.1]

2.3.7 Modes de variabilité à grande échelle

D'après les modèles du climat mondial examinés dans le quatrième Rapport d'évaluation, la pression au niveau de la mer devrait augmenter dans les régions subtropicales et aux latitudes moyennes, et baisser aux latitudes élevées. Ces changements sont corrélés avec l'expansion de la circulation de Hadley et les tendances positives du mode annulaire boréal et de l'oscillation nord-atlantique (NAM/NAO) ainsi que du mode annulaire austral (SAM). Ils devraient entraîner un déplacement des trajectoires des tempêtes en direction des pôles, et, en conséquence, des changements de la configuration des vents, des précipitations et de la température à l'extérieur des régions tropicales, en continuité avec la configuration générale des tendances observées au cours des cinquante dernières années. [GT I RT, 10.3.5.6, 10.3.6.4]

Il est *probable* que les cyclones tropicaux à venir s'intensifient, avec des pointes de vent plus marquées et des précipitations accrues liées aux augmentations constantes des températures de la mer en surface dans les zones tropicales. [GT I RiD, 10.3.6.3]

Les températures de la mer en surface dans le centre et l'est du Pacifique équatorial devraient augmenter davantage que celles enregistrées dans l'ouest du Pacifique équatorial et s'accompagner d'un déplacement moyen correspondant des précipitations vers l'est. Tous les modèles mettent en évidence la variabilité interannuelle continue du phénomène *El Niño*-oscillation australe dans le futur. Cependant, les grandes différences entres les modèles quant aux changements de l'amplitude prévue du phénomène *El Niño*, et la variabilité pluri-décennale inhérente de ce phénomène dans les modèles ne permettent pas d'établir une projection définitive des tendances de la variabilité de l'ENSO. [GT I RT 10.3.5.3, 10.3.5.4]

La variabilité interannuelle de la température moyenne mensuelle de l'air en surface devrait diminuer durant la saison froide dans la zone extratropicale de l'hémisphère Nord, et augmenter aux basses latitudes et aux latitudes tempérées de l'hémisphère Nord durant la saison chaude. La première tendance est probablement due à la diminution de la glace de mer et de la neige en raison de l'augmentation de la température. La baisse estivale de l'humidité du sol à la surface des terres émergées aux latitudes moyennes contribue à la deuxième tendance. La variabilité des précipitations moyennes mensuelles devrait augmenter dans la plupart des régions, en valeur absolue (écart type) et en valeur relative (coefficient de variation). Néanmoins, le niveau de signification des changements de variabilité ainsi prévus est bas. [GT I 10.3.5.1]

3

Relation entre le changement climatique et les ressources en eau: incidences et mesures d’intervention

3.1 Incidences observées du changement climatique

3.1.1 Effets observés dus aux changements dans la cryosphère

Les effets des changements dans la cryosphère ont été constatés dans presque toutes les composantes cryosphériques, avec des preuves solides qu'ils constituent, en général, une réaction à la réduction des masses de neige et de glace due au réchauffement accru.

3.1.1.1 Glaciers, calottes glaciaires, nappes glaciaires et plates-formes de glace

Les effets des changements dans les glaciers et les calottes glaciaires ont été constatés en termes de ruissellement (Kaser *et al*., 2003; Box *et al*., 2006), de modification des conditions dangereuses (Haeberli et Burn, 2002) et d'adoucissement des océans (Bindoff *et al*., 2007). Il existe également de nouvelles preuves d'un soulèvement actuel de la croûte dû à la récente fonte des glaciers en Alaska (Larsen *et al*., 2005). L'accélération de la fonte et l'allongement de la saison de fonte des glaciers, conduisent en premier lieu à un écoulement et à des débits de pointe accrus des cours d'eau, alors que, sur une échelle de temps plus longue (d'une décennie à un siècle), on s'attend à une diminution du ruissellement des glaciers (Jansson *et al*., 2003). Au cours de ces dernières décennies, des preuves de l'augmentation du ruissellement due à l'accroissement de la fonte des glaciers ont déjà été découvertes dans les Andes tropicales et dans les Alpes. [GT I 4.6.2; GT II 1.3.1.1]

La formation de lacs se produit lorsque les glaciers reculent dans les moraines saillantes du petit âge glaciaire (PAG), dans plusieurs chaînes de montagnes escarpées, dont l'Himalaya (voir encadré 5.4), les Andes et les Alpes. Le dégel des glaces souterraines menace également de déstabiliser les moraines du petit âge glaciaire. Ces lacs ont ainsi un potentiel élevé de débâcles glaciaires. Les organismes publics des pays concernés ont entrepris un intense travail de sécurisation, et plusieurs de ces lacs sont désormais solidement drainés ou pourvus de barrages. Cependant, une vigilance permanente est nécessaire, car il reste encore plusieurs dizaines de lacs glaciaires potentiellement dangereux dans l'Himalaya (Yamada, 1998) et les Andes (Ames, 1998), ainsi que dans d'autres chaînes de montagne à travers le monde. [GT II 1.3.1.1]

Le recul des glaciers provoque des modifications spectaculaires du paysage, avec des répercussions sur les conditions de vie et le tourisme local dans de nombreuses régions montagneuses du monde (Watson et Haeberli, 2004; Mölg *et al*., 2005). La figure 5.10 indique les effets du recul du glacier Chacaltaya sur le paysage local et sur l'industrie des sports d'hiver. Le réchauffement engendre une accélération de la fonte des glaciers au printemps et en été, notamment dans les zones d'ablation, avec une perte analogue du manteau neigeux saisonnier. Cette perte génère une exposition accrue des crevasses de surface, qui peut affecter à son tour, par exemple, les opérations d'entretien des pistes, comme on l'a observé dans la péninsule antarctique (Rivera *et al*., 2005). [GT II 1.3.1.1]

3.1.1.2 Manteau neigeux et gélisol

En raison d'une plus faible étendue et d'une durée moins longue du manteau neigeux, les débits maximaux des cours d'eau au printemps se sont produits une à deux semaines plus tôt ces 65 dernières années en Amérique du Nord et en Eurasie septentrionale. Il existe également des preuves d'une augmentation du débit de base en hiver dans ces régions, ainsi qu'une tendance modérée à une baisse des volumes de neige à basse altitude, ce qui a des répercussions sur les régions de sports d'hiver. [GT II 1.3.1.1]

La diminution de l'étendue du gélisol saisonnier et du pergélisol, ainsi qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche active, ont eu les effets suivants:

- Une disparition des lacs due au drainage à l'intérieur du pergélisol, comme détecté en Alaska (Yoshikawa et Hinzman, 2003) et en Sibérie (voir la figure 5.12) (Smith *et al*., 2005);
- Une diminution du nombre de jours de circulation potentielle des véhicules sur les routes gelées de l'Alaska;
- Une plus grande érosion des côtes arctiques (par exemple, Beaulieu et Allard, 2003).

[GT II 1.3.1.1, chapitre 15]

3.1.2 Hydrologie et ressources en eau

3.1.2.1 Changements dans les systèmes des eaux de surface et des nappes souterraines

Les nombreuses études réalisées depuis la parution du troisième Rapport d'évaluation ont traité des tendances de l'écoulement fluvial au XXe siècle, à des échelles allant des bassins hydrographiques au monde entier. Certaines de ces études ont décelé des évolutions significatives de certains indicateurs de l'écoulement fluvial et d'autres ont mis en évidence des liens statistiquement significatifs avec les tendances de la température ou des précipitations; toutefois, aucune tendance globalement homogène n'a été rapportée. Néanmoins, de nombreuses études n'ont ni fait état de tendance ni été capables de faire une distinction entre les effets des variations de température et des précipitations, et les effets des activités humaines sur les bassins hydrographiques, comme le changement d'affectation des terres et la construction de réservoirs. Les variations de l'écoulement des rivières d'une année sur l'autre sont également très fortement influencées dans certaines régions par les modes de la circulation atmosphérique à grande échelle associés aux phénomènes ENSO et NAO, ainsi qu'à d'autres systèmes de variabilité qui se produisent au cours d'une décennie et sur des échelles pluridécennales. [GT II 1.3.2.1]

À l'échelle mondiale, il existe des preuves d'un profil d'évolution du ruissellement annuel largement cohérent, certaines régions connaissant une augmentation (Tao *et al*.,

2003a, b, pour la Chine; Hyvarinen, 2003, pour la Finlande; Walter *et al*., 2004, pour les 48 États contigus des États-Unis), notamment aux hautes latitudes, et d'autres une diminution, par exemple dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest, d'Europe méridionale et du sud de l'Amérique latine (Milly *et al*., 2005). Labat *et al*. (2004) ont avancé une augmentation de 4 % du ruissellement total mondial pour une élévation de 1 °C de la température au XXe siècle, avec une variation régionale autour de cette tendance. Néanmoins, ce chiffre a été contesté en raison des effets de moteurs non climatiques sur le ruissellement, et de biais dus au petit nombre de points de données (Legates *et al*., 2005). Gedney *et al*. (2006) ont été les premiers à fournir des éléments de preuve provisoires indiquant que le forçage du CO_2 conduit à une augmentation du ruissellement en raison des effets des concentrations élevées de ce gaz sur la physiologie végétale, bien qu'il soit difficile de trouver d'autres preuves de ce lien. La méthodologie utilisée pour rechercher les tendances peut également influencer les résultats, puisque la non prise en compte des effets des corrélations croisées entre les bassins fluviaux peut conduire à une surestimation du nombre de bassins présentant des tendances significatives (Douglas *et al*., 2000). [GT II 1.3.2.1]

L'écoulement souterrain des aquifères peu profonds fait partie du cycle hydrologique et est affecté par la variabilité du climat et le changement climatique via les processus d'alimentation (Chen *et al*., 2002), ainsi que par les interventions humaines en de nombreux lieux (Petheram *et al*., 2001). [GT II 1.3.2.1] Les niveaux de nombreux aquifères dans le monde montrent une tendance à diminuer ces dernières décennies [GT II 3.2, 10.4.2], cela étant néanmoins généralement dû à ce que les taux de pompage des nappes souterraines dépassent les taux d'alimentation de celles-ci, et non pas à une diminution de l'alimentation liée au climat. Il peut y avoir des régions, comme le sud-ouest de l'Australie, où les prélèvements accrus des eaux souterraines n'ont pas résulté uniquement d'une augmentation de la demande en eau, mais aussi de la diminution, liée au climat, de l'alimentation des nappes par l'eau de surface (Gouvernement d'Australie-Occidentale, 2003). Dans l'aquifère carbonaté supérieur proche de Winnipeg (Canada), les hydrogrammes des puits peu profonds ne présentent pas de tendance nette, mais montrent des variations sur 3 à 4 ans corrélées avec les changements de la température et des précipitations annuelles (Ferguson et George, 2003). Du fait d'un manque de données et de la grande lenteur de réaction des systèmes phréatiques au changement des conditions d'alimentation, on n'a pas observé de modification de l'alimentation des nappes souterraines qui soit liée au climat. [GT II 1.3.2, 3.2]

Pour le moment, aucune tendance cohérente au niveau mondial n'a été trouvée en ce qui concerne le niveau des lacs. Alors que le niveau de certains lacs s'est élevé en Mongolie et en Chine (Xinjiang) en raison de la fonte accrue de la neige et de la glace, celui d'autres lacs a diminué en Chine (Qinghai), en Australie, en Afrique (Zimbabwe, Zambie et Malawi), en Amérique du Nord (Dakota du Nord) et en Europe (centre de l'Italie), en raison des effets combinés de la sécheresse, du réchauffement et des activités humaines. Le réchauffement récent dans les zones de pergélisol de l'Arctique a provoqué la formation temporaire de lacs due à la survenue de la fonte; ces lacs se sont ensuite rapidement vidés du fait de la dégradation du pergélisol (par exemple, Smith *et al*., 2005). Un effet analogue a été signalé pour un lac formé sur une plate-forme de glace en Arctique (c'est-à-dire, un lac épi-plateforme[12]), qui a disparu lorsque la plate-forme de glace s'est affaissée (Mueller *et al*., 2003). Le pergélisol et les lacs épi-plateformes sont examinés en détail par Le Treut *et al*. (2007). [GT II 1.3.2.1]

3.1.2.2 Qualité de l'eau

Un réchauffement des lacs et des cours d'eau lié au climat a été observé au cours des dernières décennies. [GT II 1.3.2] Ce phénomène a eu pour conséquence que les écosystèmes d'eau douce ont présenté des changements dans la composition des espèces, l'abondance d'organismes et la productivité, ainsi que des variations phénologiques, dont une migration plus précoce des poissons. [GT II 1.3.4] Le réchauffement a également été la cause d'une stratification prolongée de nombreux lacs, avec des diminutions de la concentration en nutriments dans les couches superficielles [GT II 1.3.2], et un appauvrissement prolongé en oxygène des couches profondes. [GT II encadré 4.1] Les fortes incidences des activités humaines non liées au changement climatique n'ont pas permis d'établir la preuve de tendances cohérentes liées au climat dans les autres paramètres de qualité de l'eau (par exemple, la salinité, les agents pathogènes ou les nutriments) des lacs, des cours d'eau et des nappes souterraines. [GT II 3.2]

Structure thermique des lacs

On a relevé des températures plus élevées de l'eau des lacs dues à des conditions plus chaudes (tableau 3.1). Les périodes raccourcies de la couverture de glace et la diminution de l'épaisseur de la glace lacustre et de la glace de rivière sont examinées au paragraphe 2.1.2 et dans Le Treut *et al*. (2007). La dynamique et la productivité primaire du phytoplancton ont également été altérées en conjonction avec les changements de la physique des lacs. [GT II 1.3.4.4, figure 1.2, tableau 1.6] Depuis les années 1960, les températures des eaux de surface se sont élevées entre 0,2 et 2,0 °C dans les lacs et les cours d'eau en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. Parallèlement au réchauffement des eaux de surface, les températures des eaux profondes (qui reflètent les tendances à long terme) des grands lacs d'Afrique de l'Est (Édouard, Albert, Kivu, Victoria, Tanganyika et Malawi) ont gagné entre 0,2 et 0,7 °C depuis le début des années 1900. Une température de l'eau plus élevée et des saisons sans glace plus longues influent sur la stratification thermique et l'hydrodynamique interne des lacs. Durant les années plus

[12] Masse d'eau, le plus souvent douce, retenue derrière une plate-forme de glace.

chaudes, les températures des eaux de surface sont plus élevées, les pertes en eau par évaporation augmentent, la stratification estivale se produit plus tôt dans la saison et les thermoclines sont moins profondes. Dans plusieurs lacs d'Europe et d'Amérique du Nord, la période stratifiée a été avancée jusqu'à 20 jours et allongée de 2 à 3 semaines, avec une stabilité thermique accrue. [GT II 1.3.2.3]

Chimie

Une stratification accrue diminue le mouvement de l'eau à travers la thermocline, empêchant la remontée et le mélange des eaux, qui fournissent les nutriments essentiels au réseau alimentaire. Les nutriments ont diminué dans les eaux de surface et leur concentration a augmenté dans la même proportion dans les eaux profondes des lacs d'Europe et d'Afrique de l'Est, en raison d'une diminution de la remontée des eaux due à une plus grande stabilité thermique. Un grand nombre de lacs et de rivières connaissent, au niveau de leur bassin, une augmentation de leurs concentrations en sulfates, en cations basiques et en silice, ainsi qu'une plus grande alcalinité et conductivité liées à l'augmentation de la dissolution de silicates et de sulfates ou de carbonates de calcium et de magnésium. Au contraire, lorsque des températures plus élevées ont accéléré le développement végétatif et du sol dans certains écosystèmes alpins de haute montagne, l'alcalinité a diminué en raison de l'augmentation des apports en acide organique (Karst-Riddoch *et al*., 2005). La fonte des glaciers a augmenté l'apport en organochlorés (qui ont été transportés par l'atmosphère et ont été stockés dans le glacier) d'un lac subalpin au Canada (Blais *et al*., 2001). [GT II 1.3.2.3]

Une température plus élevée affecte également les processus chimiques lacustres (tableau 3.1; voir également GT II, tableau SM1.3 pour les autres changements observés des propriétés chimiques de l'eau). Des diminutions de l'azote inorganique dissous provenant d'une plus grande productivité du phytoplancton (Sommaruga-Wograth *et al*., 1997; Rogora *et al*., 2003), une production accrue d'alcalinité lacustre et des augmentations du pH des lacs d'eau douce ont été constatées (Psenner et Schmidt, 1992). La solubilité plus faible découlant de températures supérieures a contribué de manière significative à 11 à 13 % de la diminution de la concentration en aluminium (Vesely *et al*., 2003), alors que les lacs qui ont connu des températures de l'eau plus chaudes ont vu augmenter la méthylation du mercure et la teneur en mercure dans les poissons (Bodaly *et al*., 1993). Une diminution de la teneur en silicium liée au réchauffement régional a été enregistrée dans le lac Baïkal en Russie. Des données sur la qualité des eaux de 27 cours d'eau japonais suggèrent également une détérioration des propriétés chimiques et biologiques due aux augmentations de la température de l'air. [GT II 1.3.2.3]

Érosion et sédimentation

De nombreuses régions du monde connaissent une augmentation de l'érosion due à l'eau, le plus souvent en raison d'un changement d'affectation des terres. Il n'existe pas de preuves, en raison du manque de données d'observation, de l'existence ou de l'absence de changements passés liés au climat dans l'érosion et dans le transport des sédiments. [GT II 3.2]

3.1.2.3 Crues

Un grand nombre de processus climatiques et non climatiques ont des répercussions sur les processus des crues et provoquent des crues des cours d'eau, des crues éclair, des crues en milieu urbain ou des débordements des égouts, des crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF, voir encadré 5.4) et des inondations côtières. Ces processus de formation des crues comprennent des précipitations intenses ou de longue durée, la fonte des neiges, la rupture de barrages, une débitance réduite par l'embâcle ou un glissement de terrain, ou l'orage. Les crues dépendent de l'intensité, du volume, de la répartition dans le temps et de la phase (pluie ou neige) des précipitations, de l'état antérieur des cours d'eau et de leurs bassins hydrographiques (par exemple, présence de neige et de glace, du caractère et de l'état du sol (gelé ou non, saturé ou non saturé), de l'humidité, de la vitesse et de la répartition dans le temps de la fonte de la neige ou de la glace, de l'urbanisation et de l'existence de digues, de barrages et de réservoirs). L'empiètement humain sur les plaines inondables et le manque de plans d'intervention face aux crues augmentent les dommages potentiels. [GT II 3.4.3] L'augmentation observée de l'intensité des précipitations et d'autres changements climatiques observés, par exemple, une augmentation des situations météorologiques liées au courant d'ouest pendant l'hiver sur l'Europe qui conduit à des systèmes de basse pression très pluvieux, souvent à l'origine de crues (Kron et Berz, 2007), indique que le changement climatique pourrait d'ores et déjà avoir eu une incidence sur l'intensité et la fréquence des crues. [GT II 3.2] Le «Résumé à l'intention des décideurs» figurant dans la contribution au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe de travail I a conclu qu'il est *probable* que la fréquence des épisodes de fortes précipitations ait augmenté sur la plupart des régions à la fin du XXe siècle, et qu'il est *plus probable qu'improbable* que le genre humain ait contribué à cette tendance. [GT I tableau RiD-2]

Au niveau mondial, le nombre de grandes catastrophes par décennie provoquées par les crues continentales au cours de la période 1996-2005 a doublé par rapport à la période 1950-1980 et les pertes économiques associées ont été multipliées par cinq (Kron et Berz, 2007). Les moteurs dominants de cette tendance à la hausse des dommages causés par les crues sont des facteurs socioéconomiques comme la croissance économique, les augmentations de la population et de la richesse concentrées dans des zones vulnérables, ainsi que le changement d'affectation des terres. Affectant 140 millions de personnes par an en moyenne, les crues constituent les catastrophes naturelles les plus signalées dans de nombreuses régions (WDR, 2003, 2004). Au Bangladesh, pendant l'inondation de 1998,

environ 70 % du pays a été inondé (comparé à une moyenne de 20 à 25 %) (Mirza, 2003; Clarke et King, 2004). [GT II 3.2]

Puisque les dommages causés par les inondations se sont accrus plus rapidement que la population ou que la croissance économique, il faut examiner d'autres facteurs, dont le changement climatique (Mills, 2005). La tendance générale des observations indique une accélération constante du cycle de l'eau (Huntington, 2006). [GT II 3.4.3] La fréquence des épisodes de fortes précipitations a augmenté en phase avec le réchauffement et les augmentations observées de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau. [GT I RiD, 3.8, 3.9] Cependant, aucun accroissement généralisé n'est visible dans les tendances observées pour les écoulements fluviaux élevés. Bien que Milly *et al*. (2002) aient identifié une apparente augmentation de la fréquence des crues «de grande ampleur» (périodicité >100 ans) sur la plus grande partie du globe, à partir de l'analyse des données provenant de larges bassins fluviaux, les études suivantes ont apporté des preuves moins évidentes. Sur les 195 bassins hydrographiques examinés dans le monde entier, Kundzewicz *et al*. (2005) ont trouvé des augmentations dans 27 lieux, des diminutions dans 31 lieux et aucune tendance dans les 137 autres. [GT II 1.3.2.2]

3.1.2.4 Sécheresses

Le terme sécheresse peut faire référence à une sécheresse météorologique (précipitations très inférieures à la moyenne), hydrologique (faibles écoulements fluviaux et niveau d'eau peu élevé dans les cours d'eau, les lacs et les nappes souterraines), agricole (faible humidité du sol) ou environnementale (une association des précédentes). Les incidences socioéconomiques des sécheresses peuvent résulter de l'interaction entre les conditions naturelles et les facteurs humains, comme le changement d'affectation des terres et la modification de la couverture terrestre, de la demande en eau et de son utilisation.

Tableau 3.1: *Changements observés dans le ruissellement ou l'écoulement fluvial, le niveau des lacs, les crues et les sécheresses. [GT II, tableau 1.3]*

Facteur environnemental	Changements observés	Période de temps	Lieu
Ruissellement/ écoulement fluvial	Augmentation annuelle de 5 %, augmentation hivernale de 25 à 90 %, augmentation hivernale du débit de base due à la fonte et au dégel accrus du pergélisol	1935-1999	Bassin hydrographique arctique: Ob, Lena, Ienisseï, Mackenzie
	Écoulement fluvial maximal se produisant 1 à 2 semaines en avance en raison de la fonte précoce de la neige due au réchauffement	1936-2000	Ouest de l'Amérique du Nord, Nouvelle-Angleterre, Canada, Eurasie septentrionale
Crues	Augmentation de la fréquence des crues catastrophiques (0,5 à 1 %) due à la débâcle plus précoce des rivières gelées et à de fortes pluies	Années récentes	Cours d'eau arctiques russes
Sécheresses	Diminution de 29 % du maximum annuel de l'écoulement fluvial journalier due à l'élévation de température et à l'accroissement de l'évaporation sans modification des précipitations	1847-1996	Sud du Canada
	En raison des étés inhabituellement secs et chauds liés au réchauffement de l'océan Pacifique tropical ouest et de l'océan Indien ces dernières années	1998-2004	Ouest des États-Unis
Température de l'eau	Augmentation de 0,1 à 1,5 °C de la température des lacs	40 ans	Europe, Amérique du Nord, Asie (100 stations)
	Augmentation de 0,2 à 0,7 °C de la température (des eaux profondes) des lacs	100 ans	Afrique de l'Est (6 stations)
Chimie de l'eau	Diminution des nutriments provenant d'une stratification accrue ou de l'augmentation de la période de végétation dans les lacs et les cours d'eau	100 ans	Amérique du Nord, Europe, Europe de l'Est, Afrique de l'Est (8 stations)
	Augmentation de la dissolution ou des processus internes au niveau du bassin des lacs et des cours d'eau	10 à 20 ans	Amérique du Nord, Europe (88 stations)

Le captage excessif des eaux peut aggraver les incidences de la sécheresse. [GT II 3.4.3]

Les sécheresses sont devenues plus fréquentes, en particulier dans les zones tropicales et subtropicales, depuis les années 1970. Le «Résumé à l'intention des décideurs» figurant dans la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation a conclu qu'il est *probable* que les superficies touchées par la sécheresse aient augmenté depuis les années 1970, et qu'il est *plus probable qu'improbable* que les activités humaines y aient contribué. [GT I tableau RiD-2] La diminution des précipitations terrestres et l'augmentation des températures, qui accroissent l'évapotranspiration et réduisent l'humidité du sol, sont des facteurs importants qui ont contribué à ce que davantage de régions connaissent des sécheresses, comme l'a mesuré l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Dai *et al*., 2004b). [GT II 3.3.4]

Les zones où des sécheresses sont survenues semblent être déterminées en grande partie par la variation de la température de surface océanique, en particulier sous les tropiques, via des changements associés de la circulation atmosphérique et des précipitations. À l'ouest des États-Unis, la diminution du manteau neigeux et les réductions consécutives de l'humidité du sol paraissent y contribuer également. En Australie et en Europe, des liens directs avec le réchauffement planétaire ont été déduits en raison du caractère extrême des températures élevées et des vagues de chaleur accompagnant les récentes sécheresses. [GT I 3.RE 3.3.4]

En utilisant l'indice PDSI, Dai *et al*. (2004b) ont trouvé une importante tendance à l'aridité dans les zones terrestres de l'hémisphère Nord depuis le milieu des années 1950, avec une sécheresse étendue sur la plus grande partie de l'Eurasie, de l'Afrique du Nord, du Canada et de l'Alaska (figure 3.1). Dans l'hémisphère Sud, les terres émergées étaient humides dans les années 1970 et relativement sèches dans les années 1960 et 1990. Ces régions ont présenté une tendance à l'aridité de 1974 à 1998, bien que la tendance sur l'ensemble de la période de 1948 à 2002 ait été faible. Ces dernières décennies, la diminution des précipitations terrestres est la cause première de la tendance à l'aridité, bien qu'au cours des 20 à 30 dernières années, un réchauffement important de la température à la surface ait *probablement* contribué à la sécheresse. Au niveau mondial, les zones très sèches (définies comme des zones continentales qui présentent un indice PDSI inférieur à -3,0) ont plus que doublé (d'environ 12 % à 30 %) depuis les années 1970, avec un bond important au début des années 1980 en raison de la diminution des précipitations terrestres liée au phénomène ENSO, et des augmentations consécutives dues essentiellement au réchauffement de surface (Dai *et al*., 2004b). [GT I 3.3.4]

Les sécheresses ont une incidence sur la production agricole pluviale ainsi que sur l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques, industriels et agricoles. Certaines régions semi-arides et subhumides, par exemple l'Australie [GT II 11.2.1], l'ouest des États-Unis et le sud du Canada [GT II 14.2.1], ainsi que le Sahel (Nicholson, 2005), ont souffert de sécheresses plus intenses et pluriannuelles. [GT II 3.2]

En Europe, la vague de chaleur de 2003, imputable au réchauffement mondial (Schär *et al*., 2004), a été accompagnée d'un déficit des précipitations annuelles pouvant atteindre 300 mm. Cette sécheresse a contribué à la réduction estimée de 30 % de la production primaire brute des écosystèmes terrestres européens (Ciais *et al*., 2005). Bon nombre de fleuves importants (par exemple, le Pô, le Rhin, la Loire et le Danube) sont descendus à des niveaux bas records, ce qui a conduit à une interruption de la navigation intérieure, de l'irrigation et du refroidissement des centrales électriques (Beniston et Diaz, 2004; Zebisch *et al*., 2005). La fonte extrême des glaciers alpins a permis d'éviter un écoulement encore plus faible du Danube et du Rhin (Fink *et al*., 2004). [GT II 12.6.1]

3.2 Changements à venir de la disponibilité et de la demande en eau dus au changement climatique

3.2.1 Facteurs climatiques pouvant influer sur les systèmes d'eau douce dans le futur

Les agents climatiques les plus importants pour la disponibilité en eau sont les précipitations, la température et la demande évaporative (déterminée par le rayonnement net au niveau du sol, l'humidité atmosphérique, la vitesse du vent et la température). La température est particulièrement importante dans les bassins dominés par la neige et dans les zones côtières, en raison de l'incidence de la température sur le niveau de la mer pour ces dernières (élévation du niveau de la mer par effet stérique en raison de la dilatation thermique de l'eau). [GT II 3.3.1]

Les changements prévus de ces composantes du bilan hydrique sont décrits au paragraphe 2.3. En résumé, il est prévu que le ruissellement fluvial annuel total sur l'ensemble des terres émergées augmente, même si certaines régions connaissent une augmentation ou une diminution significative du ruissellement. Toutefois, le ruissellement accru ne peut pas être entièrement utilisé tant qu'il n'existe pas d'infrastructures adéquates pour capter et stocker l'eau supplémentaire. Au-dessus des océans, l'on s'attend à une augmentation nette de la différence entre évaporation et précipitations.

3.2.1.1 Nappes souterraines

Le changement climatique a des incidences sur le rythme d'alimentation des nappes souterraines (c'est-à-dire les ressources souterraines renouvelables) sur la hauteur de leur surface libre. Toutefois, les connaissances sur l'alimentation et les niveaux actuels, tant pour les pays développés que pour les pays en

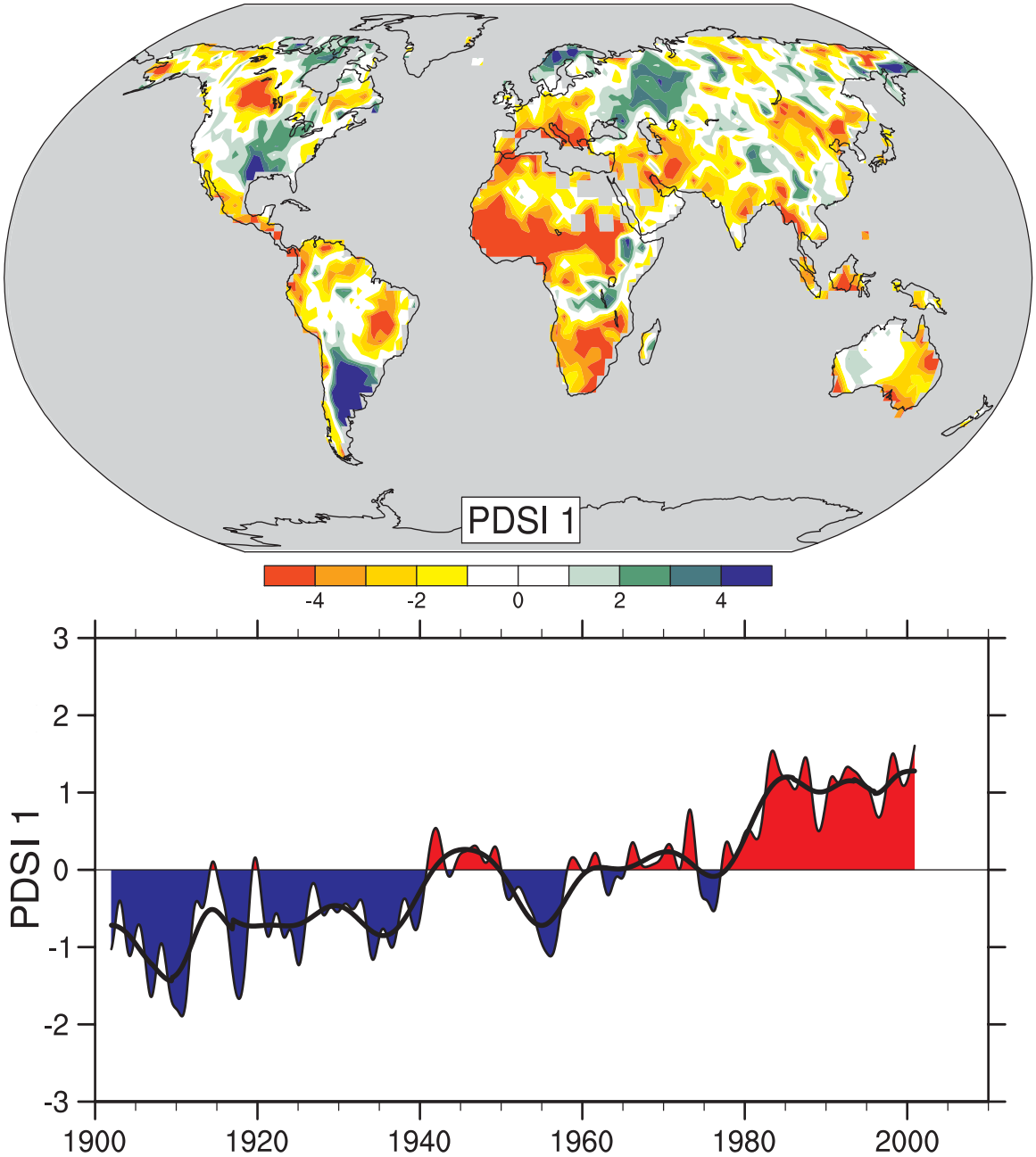


Figure 3.1: *La configuration spatiale la plus importante (le premier élément de l'analyse des composantes principales; en haut) de l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) mensuel de 1900 à 2002. Le PDSI est un indice majeur de la sécheresse qui mesure le déficit cumulé (par rapport aux conditions locales moyennes) d'humidité à la surface des terres émergées, en intégrant les précipitations antérieures et les estimations de l'humidité passée dans l'atmosphère (sur la base des températures atmosphériques) dans un système comptable hydrologique.*[13] *Le graphique du bas indique l'évolution du signe et de l'intensité de cette configuration depuis 1900. Lorsque les valeurs de ce graphique sont positives (ou négatives), les zones en rouge et en orange de la carte du haut sont plus arides (ou plus humides) et les zones en bleu et en vert sont plus humides (ou plus arides) que la moyenne. La courbe lissée noire indique les variations décennales. Les séries chronologiques correspondent approximativement à une tendance, et cette configuration et ses variations représentent 67 % de la tendance linéaire du PDSI de 1900 à 2002, sur la surface émergée du globe. Elles montrent ainsi une augmentation généralisée de la sécheresse africaine, notamment au Sahel, par exemple. On relève également des zones plus humides, en particulier à l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, ainsi qu'en Eurasie septentrionale (d'après* Dai et al.*, 2004b). [GT I QF 3.2]*

[13] Il convient de noter que le PDSI ne modélise pas la sécheresse de manière réaliste dans les régions où les précipitations sont comprises dans le manteau neigeux, par exemple dans les régions polaires.

développement, sont limitées. En outre, très peu de recherches ont été menées sur l'incidence à venir du changement climatique sur les eaux souterraines ou sur leurs interactions avec les eaux de surface. Aux latitudes élevées, le dégel du pergélisol modifie le niveau et la qualité des nappes souterraines, en raison du couplage renforcé avec les eaux de surface. [GT II 15.4.1] Du fait qu'un grand nombre de nappes souterraines sont à la fois transformées en eaux de surface et alimentées par celles-ci, les incidences des régimes d'écoulement des eaux de surface pourraient affecter les nappes souterraines. La variabilité accrue des précipitations peut diminuer l'alimentation de ces nappes dans les zones humides du fait que l'augmentation de la fréquence des épisodes de fortes précipitations peut conduire plus souvent à un dépassement de la capacité d'infiltration du sol. Cependant, dans les zones arides et semi-arides, la variabilité accrue des précipitations peut augmenter l'alimentation des nappes souterraines, car seules des précipitations intenses sont capables de s'infiltrer assez rapidement avant de s'évaporer et du fait que les nappes alluviales sont principalement alimentées par les inondations causées par les crues. [GT II 3.4.2]

D'après les résultats d'un modèle hydrologique mondial (voir la figure 3.2), l'alimentation moyenne des nappes souterraines au niveau mondial augmente moins que le ruissellement total (de 2 % en comparaison avec les 9 % prévus jusque dans les années 2050, en ce qui concerne la réponse au changement climatique du modèle ECHAM4 selon le scénario A2 du SRES: Döll et Flörke, 2005). Pour les quatre scénarios de changement climatique examinés (modèles de la circulation générale ECHAM4 et HadCM3, avec les scénarios d'émissions A2 et B2 du SRES[14]), il a été calculé que l'alimentation des nappes souterraines diminuera dans les années 2050 de plus de 70 % au nord-est du Brésil, au sud-ouest de l'Afrique et

[14] Voir l'appendice I pour la description des modèles.

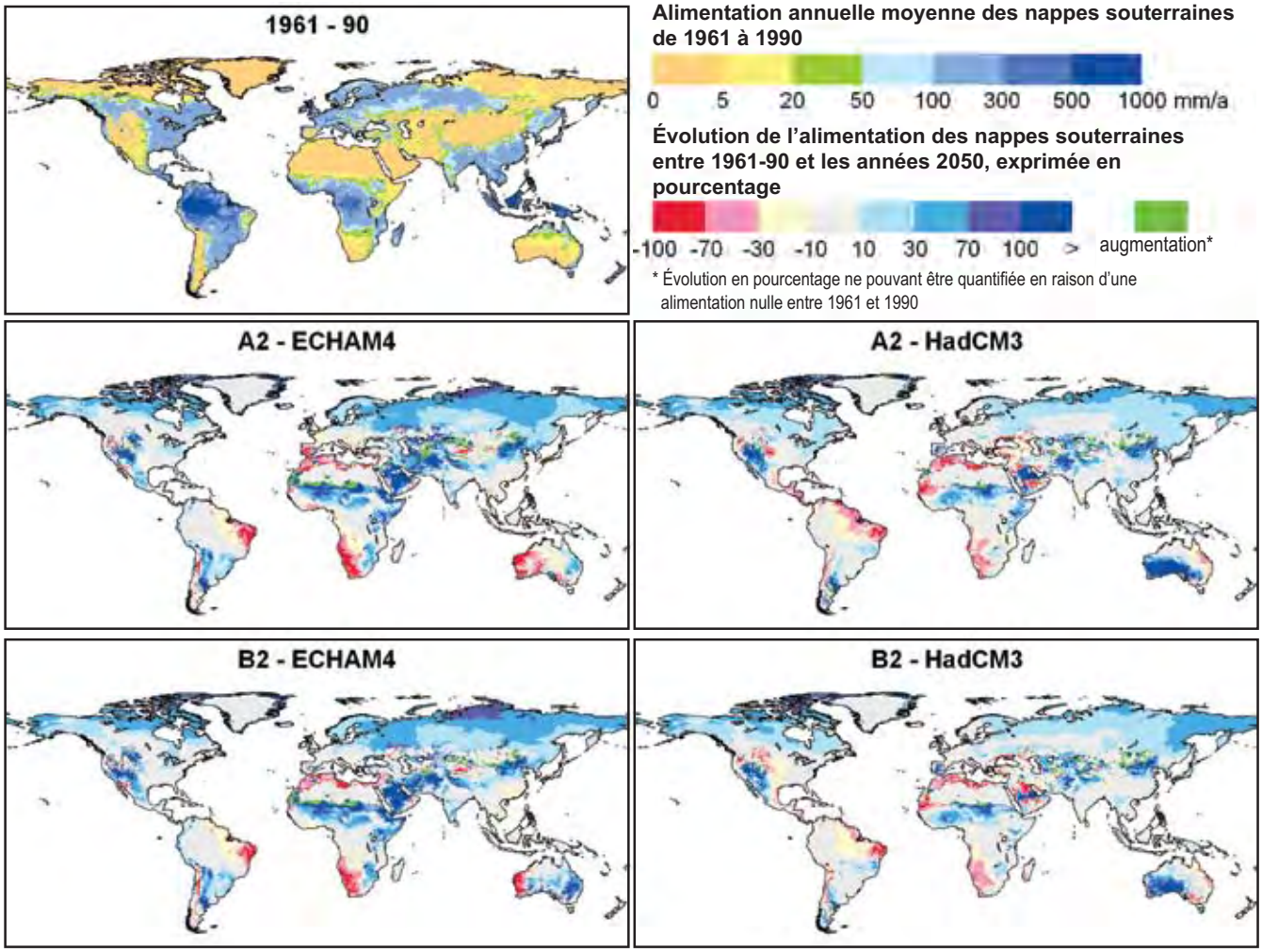


Figure 3.2: *Incidence simulée du changement climatique sur l'alimentation diffuse annuelle moyenne des nappes souterraines à long terme. Variations exprimées en pourcentage de l'alimentation moyenne des nappes souterraines sur 30 ans, depuis la période actuelle (1961-1990) jusqu'aux années 2050 (2041-2070), calculées par le modèle hydrologique mondial WGHM à partir de quatre scénarios de changement climatique différents (sur la base des modèles climatiques ECHAM4 et HadCM3, ainsi que des scénarios d'émissions A2 et B2 du SRES) (Döll et Flörke, 2005). [GT II figure 3.5]*

à l'extrémité sud de la mer Méditerranée. Cependant, comme cette étude n'a pas tenu compte de l'augmentation attendue de la variabilité des précipitations quotidiennes, il est possible que la diminution soit quelque peu surévaluée. Lorsque la hauteur de la surface libre augmente et que l'alimentation des nappes souterraines diminue, les zones humides dépendantes des aquifères sont mises en danger et le débit de base des cours d'eau est réduit pendant la saison sèche. Les régions dans lesquelles il est estimé que l'alimentation des nappes souterraines pourrait s'accroître de plus de 30 % d'ici les années 2050 comprennent le Sahel, le Proche-Orient, le nord de la Chine, la Sibérie et l'ouest des États-Unis. Dans les zones où le niveau des nappes phréatiques est déjà haut, une augmentation de l'alimentation pourrait provoquer des problèmes dans les villes et dans les zones agricoles, sous l'effet de la salinisation du sol et de la saturation des sols en eau. [GT II 3.4.2]

Les quelques études des incidences du changement climatique sur les nappes phréatiques pour les aquifères individuels montrent des résultats particulièrement spécifiques aux différents sites et modèles climatiques (par exemple, Eckhardt et Ulbrich, 2003, pour un bassin hydrographique de chaîne de montagnes de faible altitude en Europe centrale; Brouyere *et al*., 2004, pour un aquifère crayeux en Belgique). Par exemple, dans la région de l'aquifère Ogallala, il est attendu que l'alimentation naturelle des nappes souterraines diminue de plus de 20 % dans toutes les simulations avec un réchauffement de 2,5 °C ou plus (Rosenberg *et al*., 1999). [GT II 14.4] Le résultat du changement climatique est que, dans de nombreux aquifères du monde, l'alimentation de printemps se décale vers l'hiver et celle d'été décline. [GT II 3.4.2]

3.2.1.2 Crues

Comme examiné au paragraphe 2.3.1, les épisodes de fortes précipitations devraient devenir plus fréquents dans la plupart des régions au cours du XXIe siècle, ce qui devrait entraîner des risques de crues éclair et d'inondations en milieu urbain. [GT I 10.3.5, 10.3.6; GT II 3.4.3] Le tableau 3.2 montre quelques incidences potentielles de ce phénomène.

Dans une analyse multimodèle, Palmer et Räisänen (2002) ont prévu une augmentation considérable du risque d'hivers très humides sur la plupart des régions de l'Europe centrale et du Nord en raison de l'augmentation des précipitations intenses associées aux orages des latitudes moyennes. Ces auteurs ont estimé que la probabilité que les précipitations hivernales boréales totales dépassent la normale de deux écarts types augmenterait considérablement (de cinq à sept fois) pour un doublement du CO_2 sur de vastes régions européennes, avec *probablement* des conséquences sur le risque de crue hivernale. Il est également prévu un accroissement du risque de mousson très humide en Asie (Palmer et Räisänen, 2002). Selon Milly *et al*. (2002), pour 15 des 16 grands bassins mondiaux, les volumes de pointe centennaux de contrôle des écoulements fluviaux mensuels devraient être dépassés plus fréquemment pour un quadruplement du CO_2. Dans certaines zones, il a été estimé que les crues actuellement indiquées comme centennales (dans le passage de contrôle) devraient se produire beaucoup plus fréquemment, voire tous les 2 à 5 ans, bien que ces projections soient très incertaines. Dans de nombreuses régions tempérées, la contribution de la fonte de la neige aux crues de printemps va *probablement* diminuer (Zhang *et al*., 2005). [GT II 3.4.3]

Sur la base des modèles climatiques, les régions inondées au Bangladesh devraient augmenter d'au moins 23 à 29 %, pour une élévation mondiale de la température de 2 °C (Mirza, 2003). [GT II 3.4.3]

La réduction de la couverture de névés[15] sur les glaciers induite par le réchauffement provoque un ruissellement accru et immédiat de l'eau de fonte et peut aboutir à une crue des rivières alimentées par les glaciers. [GT II 3.4.3]

Il existe un degré d'incertitude quant aux estimations des changements à venir de la fréquence de crue dans tout le Royaume-Uni. Selon le modèle climatique utilisé, l'importance de la contribution de la neige fondue, les caractéristiques et l'emplacement du bassin hydrographique, l'incidence du changement climatique sur le régime de crue (amplitude et fréquence) peut être positive ou négative, soulignant l'importance de l'incertitude résiduelle sur les incidences du changement climatique (Reynard *et al*., 2004). [GT II 3.4.3]

3.2.1.3 Sécheresses

Il est *probable* que les surfaces affectées par la sécheresse augmentent. [GT I RiD] Il existe une tendance à l'aridité des régions situées au centre des continents pendant l'été, ce qui indique un risque plus élevé de sécheresse dans ces régions. [GT I 10.RE] Selon une étude à un seul modèle de la fréquence de la sécheresse dans le monde, la proportion de terres émergées qui subissent une sécheresse extrême à un moment donné devrait être multipliée par 10 à 30, la fréquence des épisodes de sécheresse extrême par deux et la durée moyenne de la sécheresse par six d'ici les années 2090 pour le scénario A2 du SRES (Burke *et al*., 2006). [GT I 10.3.6; GT II 3.4.3] Une diminution des précipitations estivales en Europe du Sud et en Europe centrale, accompagnée d'une hausse des températures (qui accroît la demande évaporative), conduirait inévitablement à une réduction de l'humidité estivale du sol (Douville *et al*., 2002; Christensen *et al*., 2007) et à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses. [GT II 3.4.3] Comme indiqué dans la figure 3.3, d'ici les années 2070, il est attendu qu'une sécheresse centennale[16] d'une amplitude comparable aux sécheresses actuelles revienne à une fréquence accrue (intervalles de moins de 10 ans en moyenne) dans certaines zones de l'Espagne, du Portugal, de l'ouest de la France, du bassin de la Vistule en Pologne et de l'ouest de la Turquie (Lehner *et al*., 2005). [GT II 3.4.3]

[15] Névé: vieille neige (encore perméable) qui se trouve dans un état intermédiaire avant la transformation en glace (imperméable).

[16] Chaque année, la probabilité de dépassement d'une crue centennale est de 1 %, alors que celle d'une crue décennale est de 10 %.

Certaines des incidences de l'augmentation des sécheresses sont présentées dans le tableau 3.2. La fonte de neige devrait se produire plus tôt et être moins abondante pendant la période de fonte, ce qui pourrait augmenter le risque de sécheresse dans les bassins alimentés par la fonte des neiges à la saison de débit d'étiage, en été et en automne. Une augmentation du risque de sécheresse pourrait se produire dans les régions qui dépendent fortement de l'eau de fonte des glaciers pour leurs principaux approvisionnements en eau à la saison sèche (Barnett *et al*., 2005). Dans les Andes, l'eau de fonte des glaciers concourt à l'écoulement des rivières et contribue à l'approvisionnement en eau de dizaines de millions d'habitants pendant la longue saison sèche. Il est attendu que de nombreux petits glaciers, par exemple en Bolivie, en Équateur et au Pérou (Ramírez *et al*., 2001; encadré 5.5) disparaissent au cours des prochaines décennies. L'approvisionnement en eau dans les zones alimentées par l'eau de fonte des glaciers et de la neige de l'Hindū Kush et de l'Himalaya, dont dépendent des centaines de millions de personnes en Chine, au Pakistan et en Inde, sera compromis (Barnett *et al*., 2005). [GT II 3.4.3]

3.2.1.4 Qualité de l'eau

Des températures de l'eau plus élevées, une intensité accrue des précipitations et des périodes plus longues du débit d'étiage devraient aggraver de nombreuses formes de pollution de l'eau, y compris les sédiments, les nutriments, le carbone organique dissous, les agents pathogènes, les pesticides, le

Tableau 3.2: *Exemples d'incidences possibles du changement climatique dues aux changements dans les phénomènes météorologiques et climatiques liés aux précipitations extrêmes, sur la base des projections sur la seconde moitié du XXIe siècle. Ne sont pas pris en compte les changements ou le renforcement des capacités d'adaptation. Les probabilités indiquées dans la deuxième colonne concerne les phénomènes recensés qui figurent dans la première colonne. La direction des tendances et de la probabilité des phénomènes correspondent aux projections SRES du GIEC sur le changement climatique. [GT I tableau RiD-2; GT II tableau RiD-2]*

Phénomène[a] et évolution anticipée	Probabilité de l'évolution future selon les projections établies pour le XXIe siècle sur la base des scénarios SRES	Exemples des principales incidences anticipées par secteur			
		Agriculture, foresterie et écosystèmes [4.4, 5.4]	Ressources en eau [3.4]	Santé [8.2]	Industrie, établissements humains et société [7.4]
Fortes précipitations plus fréquentes dans la plupart des régions	**Très probable**	Perte de récoltes; érosion des sols; impossibilité de cultiver les terres détrempées	Effets néfastes sur la qualité de l'eau de surface ou souterraine; contamination des sources d'approvisionnement; atténuation possible de la pénurie d'eau	Risque accru de décès, de blessures, de maladies infectieuses, d'affections des voies respiratoires et de maladies de la peau	Perturbation des établissements humains, du commerce, des transports et de l'organisation sociale lors des inondations; pressions sur les infrastructures urbaines et rurales; pertes matérielles
Progression de la sécheresse	**Probable**	Dégradation des sols; baisse des rendements ou perte de récoltes; mortalité plus fréquente du bétail; risque accru d'incendies	Intensification du stress hydrique	Risque accru de pénurie d'aliments et d'eau, de malnutrition, de maladies d'origine hydrique et alimentaire	Pénurie d'eau dans les établissements humains, l'industrie et les collectivités; baisse du potentiel hydroélectrique; possibilité de migration des populations
Augmentation de l'activité cyclonique intense	**Probable**	Perte de récolte; déracinement d'arbres par le vent; dégâts causés aux récifs coralliens	Perturbation de l'approvisionnement en eau lors des pannes de courant	Risque accru de décès, de blessures et de maladies d'origine hydrique et alimentaire; états de stress post-traumatique	Perturbations causées par les inondations et les vents violents; impossibilité de s'assurer auprès du secteur privé dans les zones vulnérables; possibilité de migration des populations; pertes matérielles

[a] Voir le tableau 3.7 pour de plus amples renseignements sur les définitions.

sel et la pollution thermique. Ce phénomène va favoriser la prolifération de fleurs d'eau (Hall *et al*., 2002; Kumagai *et al*., 2003) et accroître les teneurs en bactéries et champignons (Environnement Canada, 2001), ce qui pourrait avoir une incidence sur les écosystèmes et la santé humaine, ainsi que sur la fiabilité et les coûts de fonctionnement des systèmes hydriques. [GT II 3.RE]

L'augmentation des températures va *probablement* baisser la qualité de l'eau dans les lacs en raison d'une stabilité thermique accrue et des modifications des types de mélange, avec pour résultat une diminution des concentrations en oxygène et une émission accrue du phosphore contenu dans les sédiments. Par exemple, les concentrations en phosphore déjà élevées pendant l'été dans la baie du lac Ontario pourraient doubler pour une élévation de la température de l'eau de 3 à 4 °C (Nicholls, 1999). Cependant, l'élévation des températures peut également améliorer la qualité de l'eau pendant l'hiver ou au printemps, en raison de la rupture plus précoce de la glace, de l'augmentation consécutive des taux d'oxygène et de la diminution de l'hécatombe des poissons en hiver. [GT II 4.4.8, 14.4.1]

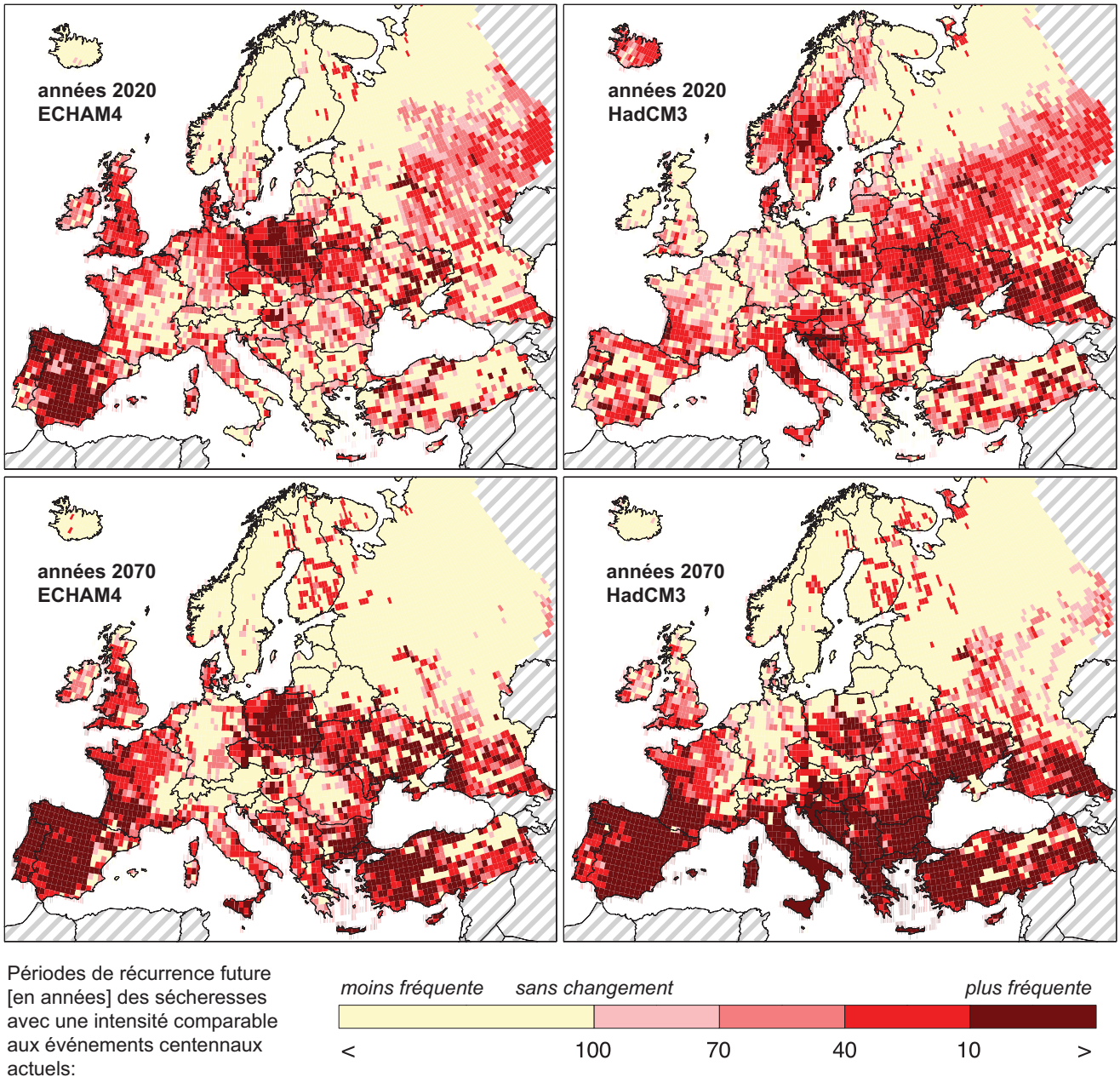


Figure 3.3: *Changement de la récurrence à venir des sécheresses centennales, fondée sur des comparaisons entre le climat et l'utilisation de l'eau de 1961 à 1990 (Lehner* et al.*, 2005). [GT II figure 3.6]*

Des pluies plus intenses conduiront à une augmentation des matières solides en suspension (turbidité) dans les lacs et dans les réservoirs, en raison de l'érosion fluviale du sol (Leemans et Kleidon, 2002), et à une introduction de polluants (Mimikou *et al.*, 2000; Neff *et al.*, 2000; Bouraoui *et al.*, 2004). Il est attendu que l'augmentation de l'intensité des précipitations prévue conduise à une détérioration de la qualité de l'eau, puisqu'elle résulterait en un transport accru d'agents pathogènes et d'autres polluants dissous (par exemple, des pesticides) vers les eaux de surface et souterraines; elle entraînerait aussi une érosion accrue, qui à son tour conduirait à la mobilisation des polluants absorbés tels que le phosphore et les métaux lourds. En outre, des épisodes de fortes pluies plus fréquents surchargeront plus souvent les capacités des systèmes d'assainissement et des usines de traitement de l'eau et des eaux usées. [GT II 3.4.4] Une occurrence plus élevée des débits d'étiage conduira à une diminution de la capacité de dilution des contaminants, et ainsi à l'augmentation des concentrations en polluants, dont les agents pathogènes. [GT II 3.4.4, 14.4.1] Dans les zones qui subiront une diminution du ruissellement global (par exemple, dans de nombreuses régions semi-arides), la détérioration de la qualité de l'eau sera encore pire.

Dans les zones semi-arides et arides, le changement climatique va *probablement* accroître la salinisation des nappes souterraines peu profondes, en raison d'une évapotranspiration accrue. [GT II 3.4.2] Comme il est prévu que l'écoulement fluvial diminue dans de nombreuses zones semi-arides, la salinité des rivières et des estuaires augmentera. [GT II 3.4.4] Par exemple, les taux de salinité des eaux d'amont du bassin du Murray-Darling en Australie devraient augmenter de 13 à 19 % d'ici 2050 (Pittock, 2003). De manière générale, une alimentation moindre des nappes souterraines, qui diminue la mobilisation du sel dans les eaux souterraines, peut contrebalancer l'effet de la dilution plus faible des sels dans les cours d'eau et les estuaires. [GT II 11.4]

Dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer pourrait avoir des effets négatifs sur le drainage des eaux de pluie et sur les systèmes d'évacuation des eaux [GT II 3.4.4] et accroître le potentiel d'intrusion d'eau salée dans les nappes souterraines d'eau douce des aquifères côtiers, affectant de la sorte négativement les ressources en eau souterraine. [GT II 3.4.2] Pour deux petites îles coralliennes plates situées au large de l'Inde, il a été calculé que l'épaisseur des lentilles d'eau douce diminuerait respectivement de 25 à 10 m et de 36 à 28 m pour une élévation du niveau de la mer de seulement 0,1 m (Bobba *et al.*, 2000). Toute diminution de l'alimentation des nappes souterraines aggravera l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Dans les aquifères intérieurs, une diminution de cette alimentation peut conduire à une intrusion d'eau salée provenant des aquifères salés voisins (Chen *et al.*, 2004). [GT II 3.4.2]

3.2.1.5 Érosion hydrique et sédimentation

Toutes les études sur l'érosion du sol montrent que l'augmentation attendue de l'intensité des pluies conduirait à des taux d'érosion supérieurs. [GT II 3.4.5] En outre, l'évolution des précipitations de neige moins érosive en hiver vers de la pluie plus érosive, suite à l'augmentation des températures hivernales, accroît l'érosion, ce qui conduit, par exemple, à des incidences négatives sur la qualité de l'eau dans les zones agricoles. [GT II 3.4.5, 14.4.1]

La fonte du pergélisol rend érodables les sols qui ne l'étaient pas auparavant. [GT II 3.4.5] D'autres incidences indirectes du changement climatique sur l'érosion sont associées aux changements du sol et de la végétation causés par le changement climatique et par les mesures d'adaptation associées. [GT II 3.4.5] Le très petit nombre d'études sur l'incidence du changement climatique sur le transport des sédiments suggère une augmentation du transport due à une plus forte érosion, en particulier dans les zones qui connaissent une augmentation du ruissellement. [GT II 3.4.5]

3.2.2 Facteurs non climatiques pouvant influer sur les systèmes d'eau douce dans le futur

De nombreux facteurs non climatiques ont une incidence sur les ressources en eau douce à l'échelle planétaire (NU, 2003). La qualité et la quantité des ressources en eau sont toutes deux influencées par le changement d'affectation des terres, la construction et la gestion de réservoirs, les émissions de polluants et le traitement de l'eau et des eaux usées. L'utilisation de l'eau est liée aux variations démographiques, à la consommation d'aliments, à la politique économique (dont la tarification de l'eau), à la technologie, aux modes de vie et à l'importance accordée par la société à la valeur des écosystèmes d'eau douce. La vulnérabilité des systèmes d'eau douce au changement climatique dépend également de la gestion nationale et internationale de l'eau. Le paradigme de la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM)[17] sera de plus en plus suivi dans le monde entier (NU, 2002; Banque mondiale, 2004a; Conseil mondial de l'eau, 2006), et ce mouvement est susceptible de placer les problèmes liés à l'eau, à la fois en tant que ressource et en tant qu'écosystème, au centre du processus décisionnel. Cela va *probablement* décroître

[17] Notion courante pour la gestion de l'eau, mais dont la définition n'est pas sans ambiguïté. La gestion intégrée des ressources en eau est fondée sur quatre principes énoncés lors de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement qui s'est tenue à Dublin en 1992: 1) l'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, nécessaire à la vie, au développement et à l'environnement; 2) la mise en valeur et la gestion des ressources en eau devraient être fondées sur une approche participative faisant intervenir les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs de tous niveaux; 3) les femmes ont un rôle prépondérant à jouer en matière d'approvisionnement en eau, et de gestion et de conservation des ressources en eau; 4) du fait de ses multiples usages concurrentiels, l'eau a une valeur économique et devrait être considérée comme un bien économique.

la vulnérabilité des systèmes d'eau douce au changement climatique. La prise en compte du débit écologique réservé peut amener à modifier ultérieurement l'exploitation des réservoirs pour restreindre l'utilisation humaine de ces ressources en eau. [GT II 3.3.2]

3.2.3 Incidences des changements climatiques sur les futures disponibilités en eau douce

En ce qui concerne l'approvisionement en eau, il est *très probable* que les coûts résultant des changements climatiques soient supérieurs aux bénéfices retirés à l'échelle mondiale. L'une des raisons en est que la variabilité des précipitations va *très probablement* augmenter, et l'on prévoit des crues et des sécheresses plus fréquentes, comme déjà indiqué aux paragraphes 2.1.6 et 2.3.1. Le risque de sécheresses dans les bassins alimentés par les eaux provenant de la fonte des neiges à la saison des basses eaux va s'accroître, comme l'explique le paragraphe 3.2.1. Les incidences des crues et des sécheresses pourraient être tempérées par des investissements appropriés en matière d'infrastructures et par des réformes de la gestion de l'eau et de l'utilisation des terres. Néanmoins, la mise en œuvre de telles mesures engendrera des coûts (US Global Change Research Program, 2000). Les infrastructures hydrauliques, les modes d'utilisation de l'eau et les institutions se sont développés dans les conditions actuelles. Tout changement important de la fréquence des crues et des sécheresses, ou bien de la quantité, de la qualité ou du rythme saisonnier de l'eau disponible nécessitera des ajustements qui pourraient s'avérer coûteux, non seulement en termes monétaires mais aussi en termes d'incidence sur l'environnement et la société, y compris la nécessité de gérer les conflits potentiels entre les différents groupes d'intérêt (Miller *et al*., 1997). [GT II 3.5]

Les changements hydrologiques peuvent avoir des impacts à la fois positifs et négatifs. Par exemple, l'augmentation du ruissellement annuel peut être bénéfique pour de nombreux usagers faisant de l'eau une utilisation consommatrice ou non, en augmentant les ressources en eau renouvelables, mais elle peut simultanément générer des dangers en augmentant le risque de crues. Ces dernières décennies, la tendance aux conditions plus humides dans certaines régions du sud de l'Amérique du Sud s'est soldée par l'augmentation des surfaces des zones inondées par les crues, mais elle a également amélioré le rendement des cultures dans la pampa argentine et a offert de nouvelles possibilités de pêche commerciale (Magrin *et al*., 2005). [GT II 13.2.4] L'augmentation du ruissellement pourrait également endommager les zones dont la nappe phréatique est peu profonde. La montée du niveau de la nappe phréatique dans ces zones perturbe l'agriculture et endommage les constructions urbaines. En Russie, par exemple, les dommages annuels actuels provoqués par les nappes phréatiques peu profondes sont estimés entre 5 et 6 milliards de dollars des États-Unis (Kharkina, 2004) et devraient *probablement* augmenter à l'avenir. De surcroît, l'augmentation du ruissellement annuel peut ne pas conduire à une augmentation bénéfique des ressources en eau facilement disponibles, si ce ruissellement supplémentaire se concentre durant la saison à forts débits. [GT II 3.5]

L'augmentation de l'intensité des précipitations peut engendrer des périodes de plus forte turbidité et des charges en agents pathogènes et en nutriments dans les sources des eaux de surface. Le service des eaux de la ville de New York a identifié les épisodes de fortes précipitations comme l'une de ses principales préoccupations liées aux changements climatiques, parce que de tels épisodes peuvent augmenter les niveaux de turbidité dans certains des principaux réservoirs de la ville jusqu'à plus de 100 fois la limite légale fixée pour la qualité de la source, au niveau de l'adduction par le service des eaux, ce qui nécessite des traitements supplémentaires considérables et entraîne d'importants coûts de surveillance (Miller et Yates, 2006). [GT II 3.5.1]

3.2.4 Incidences des changements climatiques sur la demande future en eau douce

Des températures plus élevées et une augmentation de la variabilité des précipitations peuvent conduire, d'une manière générale, à une hausse de la demande en eau d'irrigation, même si les précipitations totales restent identiques pendant la saison de croissance. L'incidence des changements climatiques sur les périodes culturales optimales et sur une utilisation de l'eau d'irrigation qui optimise les rendements a été modélisée en prenant l'hypothèse d'une surface irriguée et d'une variabilité du climat constantes (Döll, 2002; Döll *et al*., 2003). En appliquant les scénarios A2 et B2 du SRES/GIEC, tels qu'interprétés dans deux modèles climatiques, les projections établissent que les besoins en eau d'irrigation nets de la Chine et de l'Inde, pays qui ont les plus grandes surfaces irriguées au monde, pourraient fluctuer, d'ici 2020, de +2 % à +15 % pour la Chine, et de –6 % à +5 % pour l'Inde, selon les scénarios d'émissions et les modèles climatiques retenus (Döll, 2002; Döll *et al*., 2003). Divers modèles climatiques prévoient différents changements mondiaux des besoins nets en eau d'irrigation, avec des augmentations estimées de 1 à 3 % dans les années 2020 et de 2 à 7 % dans les années 2070. À l'échelle mondiale, les plus fortes augmentations des besoins en eau d'irrigation nets résultent d'un scénario climatique fondé sur le scénario d'émissions B2. [GT II 3.5.1]

Selon une étude sur l'irrigation du maïs dans l'Illinois dans des conditions de maximisation des profits, une diminution de 25 % des précipitations annuelles a eu le même effet sur la rentabilité de l'irrigation qu'une diminution de 15 % des précipitations annuelles s'accompagnant d'un doublement de l'écart type des précipitations quotidiennes (Eheart et Tornil, 1999). Cette étude a également montré que l'utilisation de l'eau d'irrigation en situation de maximisation des profits réagit plus fortement aux changements des précipitations que l'usage qui optimise les rendements, et qu'un doublement du taux de CO_2 dans l'atmosphère n'a qu'un effet limité. [GT II 3.5.1]

L'augmentation de la demande en eau des ménages (en raison, par exemple, d'un arrosage accru des jardins) et de l'industrie, due au changement climatique, sera *probablement* plutôt faible, c'est-à-dire inférieure à 5 % d'ici aux années 2050 dans certains endroits spécifiques (Mote *et al.*, 1999; Downing *et al.*, 2003). Un effet secondaire indirect, mais faible, pourrait être une augmentation de la demande d'électricité pour le refroidissement des bâtiments, avec une tendance à la hausse des prélèvements d'eau pour le refroidissement des centrales thermiques. Une analyse statistique de l'utilisation de l'eau dans la ville de New York a montré que, les jours où la température dépasse les 25 °C, l'utilisation quotidienne d'eau par personne augmente de 11 litres/°C (environ 2 % de l'utilisation quotidienne actuelle par personne) (Protopapas *et al.*, 2000). [GT II 3.5.1]

3.2.5 Incidences des changements climatiques sur le stress hydrique à l'avenir

Les estimations mondiales du nombre de personnes vivant dans des zones soumises à un stress hydrique diffèrent considérablement selon les études (Vörösmarty *et al.*, 2000; Alcamo *et al.*, 2003a, b, 2007; Oki *et al.*, 2003; Arnell, 2004). Cependant, le changement climatique n'est que l'un des nombreux facteurs qui influencent le stress hydrique futur; les changements démographiques, socioéconomiques et technologiques jouent peut-être des rôles plus importants, pour la plupart des horizons temporels et dans la majorité des régions. Dans les années 2050, les différences dans les projections démographiques des quatre scénarios SRES du GIEC devraient avoir une incidence plus élevée sur le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique que les différences entre les scénarios climatiques (Arnell, 2004). Le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique devrait beaucoup augmenter (tableau 3.3). L'évolution du nombre de personnes susceptibles de subir un stress hydrique après les années 2050 dépend fortement du scénario SRES retenu. Le scénario A2 prévoit une augmentation importante, alors que le taux d'accroissement est inférieur dans les scénarios A1 et B1, en raison de l'augmentation mondiale des ressources d'eau douce renouvelables et d'une légère diminution de la population (Oki et Kanae, 2006). Il convient de noter qu'en utilisant l'indicateur de disponibilité en eau par personne, le changement climatique semblerait réduire le stress hydrique global au niveau mondial. La raison en est que les augmentations du ruissellement sont fortement concentrées dans les zones les plus fortement peuplées du globe, principalement en Asie de l'Est et du Sud-Est. Cependant, étant donné que ce ruissellement accru se produit principalement pendant les saisons de hautes eaux (Arnell, 2004), il pourrait ne pas atténuer les problèmes engendrés par la saison sèche si l'eau excédentaire n'est pas stockée, ni réduire le stress hydrique dans les autres régions du monde. Les changements des cycles saisonniers et une probabilité croissante de survenance d'épisodes extrêmes peuvent contrebalancer les effets de l'augmentation des ressources d'eau douce annuelles disponibles et des changements démographiques. [GT II 3.5.1]

Tableau 3.3: *Incidence de la croissance démographique et du changement climatique sur le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique (défini comme étant les ressources en eau renouvelables par personne inférieures à 1 000 m³/an) vers 2050. [GT II tableau 3.2]*

	Estimation de la population vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique en 2050 (en milliards de personnes)	
	Arnell (2004)	Alcamo *et al.* (2007)
1995: année de référence	1,4	1,6
2050: scénario d'émissions A2	4,4-5,7	6,4-6,9
2050: scénario d'émissions B2	2,8-4,0	4,9-5,2

Les estimations sont fondées sur les scénarios d'émissions pour plusieurs passages de modèle climatique. L'écart est dû aux différents modèles climatiques utilisés et aux divers pasages de modèles qui ont été effectués pour traduire les émissions dans les scénarios climatiques.

Si le stress hydrique est évalué en fonction non seulement de la population et du changement climatique, mais également de la modification de l'utilisation de l'eau, l'importance des moteurs non climatiques (revenu, efficacité de l'utilisation de l'eau, productivité de l'eau et production industrielle) augmente (Alcamo *et al.*, 2007). L'augmentation des revenus a parfois une incidence plus importante que la croissance de la population sur l'augmentation de l'utilisation de l'eau et du stress hydrique (lorsqu'ils sont exprimés comme le prélèvement d'eau: coefficient de ressources en eau). D'après la modélisation, le stress hydrique devrait diminuer d'ici les années 2050 sur 20 à 29 % des terres émergées du globe, et augmenter sur 62 à 76 % de cette surface, selon deux modèles climatiques et les scénarios A2 et B2 du SRES. La plus grande disponibilité en eau due à l'augmentation des précipitations est la cause principale de la diminution du stress hydrique, alors que l'accroissement des prélèvements d'eau est la cause principale d'un stress hydrique plus important. L'on a trouvé que l'augmentation de la consommation d'eau des ménages, favorisée par la croissance des revenus, est dominante (Alcamo *et al.*, 2007). [GT II 3.5.1]

3.2.6 Incidences des changements climatiques sur les coûts et les autres aspects socio-économiques de l'eau douce

La quantité d'eau disponible pour prélèvement dépend du ruissellement, de l'alimentation des nappes souterraines, de l'état de l'aquifère (par exemple, degré de confinement, profondeur, épaisseur et limites), de la qualité de l'eau et des infrastructures d'approvisionnement (par exemple, réservoirs, puits de rabattement et réseaux de distribution). Un accès sûr

à l'eau potable dépend davantage du niveau des infrastructures de distribution d'eau que de la quantité de ruissellement. Cependant, l'amélioration de cet accès à l'eau potable sera plus difficile à concrétiser dans les régions où le ruissellement et l'alimentation des nappes souterraines diminuent du fait du changement climatique. En outre, le changement climatique entraîne des coûts supplémentaires pour le secteur de la distribution d'eau, par exemple en raison des variations des niveaux d'eau qui affectent les infrastructures de distribution d'eau, ce qui peut entraver l'élargissement des services de distribution à davantage de personnes. Il en résulte alors des répercussions socioéconomiques et des coûts de suivi plus importants, en particulier dans les zones où la prévalence du stress hydrique a également augmenté en raison des changements climatiques. [GT II 3.5.1]

Les modifications des régimes de ruissellement saisonniers et de la variabilité interannuelle du ruissellement provoquées par le changement climatique peuvent s'avérer aussi importantes pour la disponibilité en eau que les changements du ruissellement annuel moyen à long terme (*US Global Change Research Program, 2000*). Les personnes vivant dans les bassins alimentés par l'eau provenant de la fonte nivale qui subissent une diminution de la réserve d'eau de la couche nivale en hiver peuvent pâtir de la baisse de l'écoulement fluvial en été et en automne (Barnett *et al*., 2005). Le Rhin, par exemple, pourrait souffrir d'une diminution des faibles débits d'été de 5 à 12 % d'ici les années 2050, ce qui affecterait de manière négative l'approvisionnement en eau, notamment pour les centrales thermiques (Middelkoop *et al.,* 2001). Les études réalisées pour le bassin de l'Elbe ont montré que l'évapotranspiration réelle devrait augmenter d'ici 2050 (Krysanova et Wechsung, 2002), alors que l'écoulement du fleuve, l'alimentation des nappes souterraines, le rendement des récoltes et la pollution diffuse vont *probablement* diminuer (Krysanova *et al*., 2005). [GT II 3.5.1]

Dans l'ouest de la Chine, la fonte précoce des neiges au printemps et le recul des glaciers vont *probablement* réduire la disponibilité en eau pour les besoins de l'agriculture irriguée. Les coûts d'investissement et de fonctionnement des puits et des réservoirs supplémentaires, nécessaires pour assurer un approvisionnement en eau fiable dans le contexte du changement climatique, ont été évalués pour la Chine. Ces coûts sont bas dans les bassins où le stress hydrique actuel est faible (par exemple celui du Chang Jiang) et élevé dans ceux où le stress hydrique est élevé (par exemple, celui du fleuve Huang He) (Kirshen *et al*., 2005a). De surcroît, l'incidence du changement climatique sur le coût de l'approvisionnement en eau va augmenter dans les années à venir, en raison non seulement d'un changement climatique plus marqué, mais également de la croissance de la demande. [GT II 3.5.1]

Pour un aquifère situé dans le Texas, on prévoit une diminution des revenus nets des agriculteurs de 16 à 30 % d'ici aux années 2030 et de 30 à 45 % d'ici aux années 2090, en raison d'une diminution de l'approvisionnement en eau d'irrigation et d'une augmentation de la demande en cette même eau. Le bénéfice net total dû à l'utilisation de l'eau (essentiellement pour la consommation municipale et industrielle) devrait diminuer de moins de 2 % durant la même période (Chen *et al*., 2001). [GT II 3.5.1]

Si l'approvisionnement en eau douce doit être remplacé par de l'eau dessalée à cause du changement climatique, le coût du changement climatique inclura alors le coût moyen de dessalement, qui avoisine actuellement 1,00 dollar des États-Unis/m^3 pour l'eau de mer et 0,60 dollar des États-Unis/m^3 pour les eaux saumâtres (Zhou et Tol, 2005). Le coût de chloration de l'eau douce est d'environ 0,02 dollar des États-Unis/m^3. Dans les zones côtières densément peuplées d'Égypte, de Chine, du Bangladesh, d'Inde et de l'Asie du Sud-Est (FAO, 2003), les coûts de dessalement pourraient s'avérer prohibitifs. Dans ces régions, notamment en Égypte, des activités de recherche sur les nouvelles technologies de dessalement sont nécessaires pour réduire les coûts, grâce surtout à l'utilisation de sources d'énergie non conventionnelles qui permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre. En outre, le dessalement des eaux saumâtres permet d'améliorer l'économie de tels projets (voir le paragraphe 4.4.4). [GT II 3.5.1]

Les futurs dommages causés par les crues dépendront fortement des modes de peuplement, des décisions en matière d'utilisation des terres, de la qualité de la prévision des crues, des systèmes d'alerte et d'intervention, ainsi que de la valeur des structures et des autres biens immobiliers implantés dans les zones vulnérables (Mileti, 1999; Pielke et Downton, 2000; Changnon, 2005), et également des changements climatiques en soi, comme la modification de la fréquence des cyclones tropicaux (Schiermeier, 2006). [GT II 3.5.2]

Il est possible de prévoir l'incidence du changement climatique sur les dommages causés par les crues, sur la base des changements modélisés dans l'intervalle actuel de récurrence des crues, de vingt ou de cent ans, et en conjonction avec les dommages causés par les inondations dues à des événements actuels, tels que déterminés par la relation hauteur-débit et les données détaillées disponibles sur les biens immobiliers. Avec une telle méthodologie, il a été possible de prévoir que les dommages directs annuels moyens causés par les crues pour trois bassins hydrographiques australiens seraient de quatre à dix fois plus grands en cas de doublement du taux de CO_2 dans l'atmosphère (Schreider *et al*., 2000). [GT II 3.5.2]

Choi et Fisher (2003) ont estimé le changement attendu des dommages causés par les crues pour certaines régions des États-Unis selon deux scénarios de changement climatique, dans lesquels la moyenne annuelle des précipitations a augmenté de 13,5 % et de 21,5 %, respectivement, avec un écart type des précipitations annuelles qui reste inchangé ou augmente de manière proportionnelle à la moyenne. En utilisant un modèle économétrique structurel (régression) fondé sur une série chronologique de dommages causés par les crues et avec pour prédicteurs la population, un indicateur de richesse et les

précipitations annuelles, on prévoit que la moyenne et l'écart type des dommages causés par les crues devraient augmenter de plus de 140 % pour une augmentation de la moyenne et de l'écart type des précipitations annuelles de 13,5 %. Cette estimation suggère que les pertes causées par les crues seraient principalement associées à l'exposition des personnes aux risques naturels en raison du manque d'équipements sociaux, étant donné que le pouvoir explicatif du modèle tenant compte de la population et de la richesse est de 82 % et que l'ajout des précipitations au modèle porte le résultat à 89 %. [GT II 3.5.2]

Une autre étude a examiné les incidences potentielles des dommages causés par les crues dues aux modifications des épisodes de précipitations extrêmes, en utilisant le modèle du Centre climatique canadien et le scénario IS92a pour l'agglomération de Boston, au nord-est des États-Unis d'Amérique (Kirshen *et al.*, 2005b). Cette étude a trouvé que, sans investissements d'adaptation, les dégâts matériels et les coûts totaux des dommages causés par les crues doubleraient d'ici 2100 par rapport à ceux qui pourraient survenir sans changement climatique. Elle a également trouvé que le retard dans les transports liés à ces phénomènes pourrait devenir une nuisance de plus en plus importante au cours de ce siècle. Cette étude a conclu que l'ampleur économique probable de ces dommages est suffisamment élevée pour justifier l'attribution de sommes importantes à la mise en place de stratégies d'adaptation, telles que la mise hors d'eau dans des plaines inondables. [GT II 3.5.2]

Ces résultats sont également renforcés par une étude de scénario sur les dommages causés par les inondations fluviales et côtières en Angleterre et au pays de Galles dans les années 2080, qui a combiné quatre scénarios d'émissions et quatre scénarios de changement socioéconomique dans un cadre similaire aux scénarios du SRES (Hall *et al.*, 2005). Dans tous les scénarios, les dommages causés par les crues devraient augmenter, à moins que les mesures politiques et pratiques actuelles adoptées pour résoudre le problème des crues et que les infrastructures correspondantes ne soient modifiées. D'ici aux années 2080, les dommages annuels

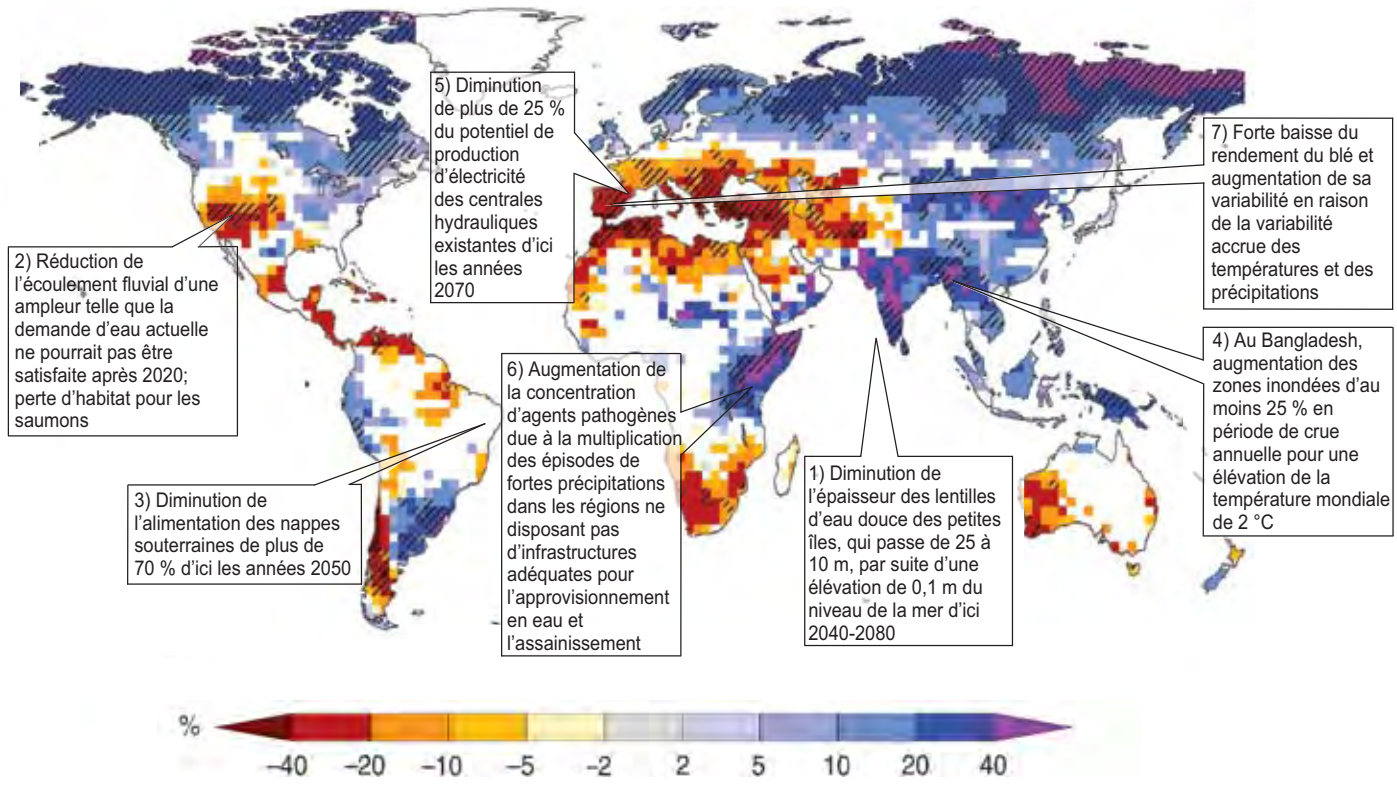


Figure 3.4: *Carte illustrant les incidences futures du changement climatique liées à l'eau douce, là où ces incidences représentent une menace pour le développement durable des régions touchées. 1) Bobba* et al. *(2000), 2) Barnett* et al. *(2004), 3) Döll et Flörke (2005), 4) Mirza* et al. *(2003), 5) Lehner* et al. *(2005), 6) Kistemann* et al. *(2002), 7) Porter et Semenov (2005). La carte en arrière-plan, voir (figure 2.10), illustre la variation moyenne du ruissellement annuel (%), simulée par un ensemble, entre la période actuelle (1980 à 1999) et 2090 à 2099, pour le scénario d'émissions A1B du SRES (d'après Milly* et al.*, 2005). Les zones en bleu (rouge) indiquent l'augmentation (la diminution) du ruissellement annuel. [D'après la figure 3.8 du rapport du GT II et la figure 3.5 du RSY]*

devraient atteindre cinq milliards de livres sterling dans un monde de type B1, contre un milliard actuellement, alors qu'avec des changements climatiques quasi identiques, les dommages ne seraient que de 1,5 milliard de livres sterling dans un monde de type B2. Les scénarios B1 et B2 donnent des résultats pratiquement similaires lorsque ces chiffres sont pondérés en fonction du produit intérieur brut. Dans un monde de type A1, les dommages annuels atteindraient 15 milliards de livres sterling d'ici les années 2050 et 21 milliards de livres sterling d'ici les années 2080 (Evans *et al.*, 2004; Hall *et al.*, 2005). [GT II 3.5.2]

À l'avenir, l'augmentation des périodes de crue pourrait perturber la navigation plus souvent et le régime de basses eaux qui limite le chargement des bateaux pourrait augmenter. Par exemple, les restrictions au chargement des bateaux navigant sur le Rhin pourraient passer de 19 jours, dans les conditions climatiques actuelles, à 26 et jusqu'à 34 jours dans les années 2050 (Middelkoop *et al.*, 2001). [GT II 3.5.1]

Le changement climatique va *probablement* modifier le débit des rivières, avec d'importantes incidences sur l'eau disponible pour une utilisation non consommatrice, en particulier pour la production d'énergie hydraulique. Les incidences de l'hydroélectricité pour l'Europe ont été évaluées au moyen d'un modèle hydrologique à grande échelle. Les résultats indiquent que d'ici les années 2070, le potentiel de production d'électricité des centrales hydroélectriques existant à la fin du XXe siècle augmentera (dans l'hypothèse du scénario d'émissions IS92a) de 15 à 30 % en Scandinavie et dans le nord de la Russie, où actuellement entre 19 % (Finlande) et près de 100 % (Norvège) de l'électricité sont d'origine hydraulique (Lehner *et al.*, 2005). Le Portugal, l'Espagne, l'Ukraine et la Bulgarie, où actuellement entre 10 % (Ukraine, Bulgarie) et 39 % de l'électricité proviennent de l'énergie hydraulique, ont connu des diminutions de 20 à 50 % et plus (Lehner *et al.*, 2005). Une diminution du potentiel hydroélectrique de 7 à 12 % dans les années 2070 est prévue dans l'ensemble de l'Europe (avec un pourcentage de 20 % d'hydroélectricité). [GT II 3.5.1]

En Amérique du Nord, les réductions potentielles du débit en sortie des Grands Lacs pourraient engendrer des pertes économiques importantes dues à la diminution de la production d'énergie hydraulique sur les fleuves Niagara et Saint-Laurent (Lofgren *et al.*, 2002). D'après une projection issue du modèle CGCM1 avec un réchauffement mondial de 2 °C, la production d'énergie hydraulique des fleuves Niagara et Saint-Laurent dans l'Ontario déclinerait de 25 à 35 %, avec pour résultat des pertes annuelles de 240 à 350 millions de dollars canadiens aux prix de 2002 (Buttle *et al.*, 2004). Cependant, le modèle climatique HadCM2[18] a établi un faible gain du potentiel hydroélectrique (+3 %), d'une valeur approximative de 25 millions de dollars canadiens par an. Une autre étude qui a examiné différents scénarios de modèles climatiques est arrivée à la conclusion qu'un réchauffement mondial de 2 °C pourrait réduire la capacité de production d'énergie hydraulique du fleuve Saint-Laurent de 1 à 17 % (LOSLR, 2006). [GT II 3.5.1]

3.2.7 Zones d'eau douce et secteurs particulièrement vulnérables aux changements climatiques

Dans de nombreuses régions du globe, les incidences des changements climatiques sur les ressources en eau douce peuvent avoir des impacts négatifs sur le développement durable et mettre en péril, par exemple, la lutte contre la pauvreté et de la mortalité infantile. Même avec une gestion optimale des ressources en eau, il est *très probable* que les incidences négatives sur le développement durable ne pourront pas être évitées. La figure 3.4 présente quelques cas clés à travers le monde où les incidences des changements climatiques sur l'eau douce constituent une menace pour le développement durable des régions touchées. On s'efforce généralement d'instaurer la gestion «durable» des ressources en eau grâce à la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM: se reporter à la note de bas de page n° 17 pour une définition). Cependant, l'interprétation précise de ce terme varie considérablement. Toutes les définitions incluent le concept de conservation et d'amélioration de l'environnement au sens large, et notamment du milieu aquatique, tout en tenant compte des utilisateurs en concurrence, des eaux des écosystèmes et des zones humides. Elles considèrent également les implications environnementales plus larges des politiques de gestion de l'eau, telles que leurs implications sur la gestion des terres et, inversement, les implications des politiques de gestion des terres sur le milieu aquatique. La gouvernance liée à l'eau est une composante importante pour instaurer une gestion de l'eau permettant d'obtenir des ressources en eau durables pour un éventail de systèmes politiques, socioéconomiques et administratifs (GWP, 2002; Eakin et Lemos, 2006). [GT II 3.7]

3.2.8 Incertitudes concernant les incidences prévues du changement climatique sur les systèmes d'eau douce

Les incertitudes concernant les incidences du changement climatique sur les ressources en eau sont principalement dues à l'incertitude concernant les apports qui proviennent des précipitations et, dans une moindre mesure, à l'incertitude liée aux émissions de gaz à effet de serre (Döll *et al.*, 2003; Arnell, 2004), à la sensibilité du climat (Prudhomme *et al.*, 2003) ou aux modèles hydrologiques eux-mêmes (Kaspar, 2003). Une autre source d'incertitude concernant les incidences prévues du changement climatique sur les systèmes d'eau douce réside dans la nature, l'étendue et le succès relatif des initiatives et des mesures dont l'intervention est déjà planifiée. Les incidences indiquées à la figure 3.4 se manifesteraient différemment selon les mesures d'adaptation prises. Les prévisions actuelles ne tiennent pas entièrement

[18] Voir l'appendice I pour la description des modèles.

compte des rétroactions des mesures d'adaptation au changement climatique, telles que l'allongement de la saison de croissance des plantes cultivées ou une meilleure régularisation des cours d'eau grâce à un stockage accru dans les réservoirs. La comparaison de différentes sources d'incertitude dans les statistiques des crues de deux bassins hydrographiques du Royaume-Uni (Kay *et al*., 2006a) a conduit à la conclusion que la principale source d'incertitude était la structure du MCG, suivie par les scénarios d'émissions et la modélisation hydrologique. Prudhomme et Davies (2006) sont arrivés aux mêmes conclusions sur les débits mensuels moyens et les statistiques sur les étiages en Grande-Bretagne. [GT II 3.3.1]

Les méthodes probabilistes multi-modèles sont préférables à l'utilisation des résultats d'un seul modèle climatique, lors de l'évaluation de l'incertitude de l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau. Depuis le troisième Rapport d'évaluation, plusieurs études portant sur les incidences hydrologiques ont utilisé des données climatologiques multi-modèles (par exemple, Arnell (2004) à l'échelle mondiale, et Jasper *et al*. (2004) à l'échelle des bassins fluviaux), mais les études intégrant des évaluations probabilistes sont rares. [GT II 3.3.1]

Dans de nombreuses études d'impact, les séries chronologiques des valeurs climatiques observées sont ajustées en utilisant le changement calculé des variables climatiques afin d'obtenir des scénarios cohérents avec les conditions actuelles. Ces ajustements visent à réduire le plus possible les incidences de l'erreur survenant lors de la modélisation climatique des modèles de la circulation générale, en partant du postulat que les biais liés à la modélisation climatique sont de la même ampleur pour les horizons temporels actuels et futurs. Ceci est particulièrement important pour les projections de précipitations, où les différences entre les valeurs observées et calculées par les modèles climatiques sont importantes. [GT II 3.3.1]

Les changements dans la variabilité interannuelle ou quotidienne des variables climatiques ne sont pas souvent pris en compte dans les études des incidences hydrologiques. Il en résulte une sous-estimation des crues et des sécheresses à venir, ainsi que de l'eau disponible et des besoins en eau d'irrigation. [GT II 3.3.1] Le choix des indicateurs et des valeurs de seuil pour quantifier l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau douce constitue également une source d'incertitude.

Afin d'éliminer les incompatibilités entre les échelles des grilles spatiales des modèles de la circulation générale et des processus hydrologiques, des techniques ont été élaborées afin de réduire l'échelle des données des modèles de la circulation générale à une résolution spatiale et temporelle plus fine. [GT I troisième Rapport d'évaluation, chapitre 10] Ces techniques posent comme postulat principal que les relations statistiques identifiées pour le climat actuel resteront valides si les conditions futures changent. Les techniques de réduction d'échelle peuvent permettre aux modélisateurs d'intégrer la variabilité quotidienne aux changements futurs (par exemple, Diaz-Nieto et Wilby, 2005) et d'appliquer un cadre probabiliste destiné à produire des informations sur l'écoulement fluvial futur pour la planification des ressources en eau (Wilby et Harris, 2006). Ces approches permettent de comparer les différentes sources d'incertitude qui affectent les projections concernant les ressources en eau. [GT II 3.3.1]

Les efforts destinés à quantifier les incidences économiques des variations des ressources en eau liées au climat sont entravés par le manque de données et le fait que les estimations sont extrêmement sensibles aux méthodes d'estimation retenues, ainsi qu'aux différents postulats concernant la répartition des changements de l'eau disponible entre les différents types d'utilisation, par exemple agricole, urbaine ou non consommatrice (Changnon, 2005; Schlenker *et al*., 2005; Young, 2005). [GT II 3.5]

3.3 Adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau: aperçu général

Les gestionnaires des ressources en eau examinent depuis longtemps l'évolution de la demande d'eau. Jusqu'à présent, en règle générale, ils ont fait l'hypothèse que cette base de ressources naturelles sera relativement constante à moyen terme et, par conséquent, que l'expérience hydrologique acquise offre un bon guide pour déterminer les conditions futures. Le changement climatique remet en cause ces hypothèses conventionnelles et peut modifier la fiabilité des systèmes de gestion de l'eau. [GT II 3.6.1]. Les mesures de gestion permettant de faire face au changement climatique comprennent l'élaboration de nouvelles approches d'évaluation et de conception des systèmes, ainsi que de méthodes non structurelles par le biais de mécanismes tels que la Directive-cadre sur l'eau de l'Union européenne. [GT II 12.2.2]

Le tableau 3.4 résume certaines possibilités d'adaptation du côté de l'offre et de la demande, conçues pour assurer l'approvisionnement dans des conditions moyennes et en cas de sécheresse. Les solutions du côté de l'offre comportent généralement des augmentations de la capacité de stockage de l'eau ou des prélèvements dans les cours d'eau et, ainsi, peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement. Les possibilités du côté demande peuvent manquer d'efficacité pratique parce qu'elles se fondent sur des actions individuelles cumulées. Certaines possibilités peuvent être en contradiction avec les mesures d'atténuation du fait qu'elles demandent une forte consommation d'énergie, comme pour le dessalement et le pompage de l'eau.

Tableau 3.4: *Exemples de possibilités d'adaptation en matière d'approvisionnement et de demande d'eau (la liste n'est pas exhaustive). [GT II, tableau 3.5]*

Offre	Demande
Prospection et extraction des eaux souterraines	Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par son recyclage
Accroissement de la capacité de stockage de l'eau grâce à la construction de réservoirs et de barrages	Réduction de la demande d'eau d'irrigation par la modification du calendrier cultural, de la composition des cultures, des méthodes d'irrigation et des surfaces plantées
Dessalement de l'eau de mer	Réduction de la demande d'eau d'irrigation grâce à l'importation de produits agricoles, à savoir de l'eau virtuelle
Extension de la collecte des eaux de pluie	Promotion des pratiques autochtones pour une utilisation durable de l'eau
Défrichement de la végétation allochtone dans les zones riveraines	Utilisation accrue des marchés de l'eau pour redistribuer/transférer l'eau aux utilisations à forte valeur ajoutée
Transfert de l'eau	Utilisation accrue des incitations économiques, dont des mesures de comptage et la tarification de l'eau, pour encourager sa conservation

L'on distingue fréquemment les adaptations autonomes et planifiées. Les *adaptations autonomes* sont celles qui ne constituent pas une réponse consciente aux stimuli liés au climat, mais qui résultent de changements destinés à satisfaire les demandes, attentes et objectifs modifiés qui, bien que n'étant pas délibérément destinés à faire face au changement climatique, peuvent en atténuer les conséquences. Ces adaptations sont largement répandues dans le secteur de l'eau, bien qu'avec des degrés variables d'efficacité d'adaptation au changement climatique (voir le tableau 3.5). [GT II 3.6.1] Certaines mesures d'adaptation autonome ont été mises en place en Amérique latine; parmi elles, la gestion des dérivations transbassins et l'optimisation de l'utilisation de l'eau. [GT II 13.5.1.3] En Afrique, les communautés locales et les agriculteurs ont élaboré des dispositifs d'adaptation, afin de prévoir la pluviosité grâce à l'expérience acquise. Les agriculteurs du Sahel utilisent également des dispositifs traditionnels de récupération de l'eau qui viennent compléter les pratiques d'irrigation. [GT II 9.6.2.1, 9.5.1, tableau 9.2]

Les *adaptations planifiées* résultent de décisions stratégiques délibérées et prennent spécifiquement en compte le changement climatique et la variabilité du climat; cependant, à ce jour, elles n'ont pas souvent été mises en œuvre. Dans quelques pays, dont les Pays-Bas, l'Australie, le Royaume-Uni, l'Allemagne, les États-Unis et le Bangladesh, les gestionnaires des ressources en eau ont commencé à traiter directement les implications du changement climatique comme élément de leurs pratiques normales de gestion de l'approvisionnement en eau et des crues. [GT II 3.2, 3.6.5, 17.2.2] Ces adaptations ont généralement pris la forme d'une modification des méthodes et des procédures, telles que l'adoption de normes de conception et le calcul des indemnités pour les dommages causés par le changement climatique. Par exemple, ces adaptations ont été mises en œuvre pour la préparation aux crues au Royaume-Uni et aux Pays-Bas (Klijn *et al.*, 2001; Richardson, 2002), pour l'approvisionnement en eau au Royaume-Uni (Arnell et Delaney, 2006), ainsi que pour la planification des ressources en eau en général au Bangladesh. [GT II 3.6.5, 17.2.2] Il y a très peu d'exemples de mesures «concrètes» dans le domaine de l'eau destinées à s'adapter spécifiquement et uniquement à l'évolution du climat. Ce phénomène peut s'expliquer en partie par le fait que le changement climatique peut ne constituer que l'un des nombreux facteurs qui affectent les stratégies et les plans d'investissement (et il peut ne pas être le plus important en matière de planification à court terme); il dépend aussi en partie de l'incertitude des projections des futurs changements hydrologiques.

Non seulement les agences de gestion de l'eau, mais également les utilisateurs privés du milieu aquatique devront s'adapter aux changements de la quantité et de la qualité de l'eau disponible. Cela concerne l'industrie, les agriculteurs (particulièrement les exploitants qui irriguent leurs terres) et les particuliers. En dépit de la grande expérience acquise en matière d'adaptation à l'évolution de la demande évolutive et de la législation, les connaissances restent faibles en ce qui a trait à la manière dont ces entités et ces individus seront capables de s'adapter aux changements climatiques.

Le tableau 3.5 met en valeur certaines mesures d'adaptation, planifiées ou autonomes, actuellement mises en œuvre à travers le monde, telles que présentées dans les chapitres consacrés aux diverses régions du globe qui figurent dans la contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Ce tableau n'est pas exhaustif et un grand nombre de mesures individuelles peuvent être prises en de nombreux endroits.

Il existe un *degré de confiance* élevé en ce que l'adaptation permet de réduire la vulnérabilité, en particulier à court terme. [GT II 17.2, 18.1, 18.5, 20.3, 20.8] Cependant, la capacité d'adaptation est étroitement liée au développement social et économique, et elle n'est pas répartie uniformément entre les sociétés et en leur sein. Les populations pauvres, les

Tableau 3.5: *Exemples d'adaptation dans la pratique*

Région	Mesure d'adaptation	Source
Afrique	• Prévisions saisonnières, leur production, leur diffusion, leur prise en compte et leur intégration dans les systèmes de soutien à la prise de décision fondées sur les modèles • Augmentation de la résilience face aux futures périodes de stress causé par la sécheresse, grâce aux améliorations des systèmes d'exploitation agricole pluvieux actuels provenant de l'amélioration des infrastructures matérielles, y compris les systèmes de récupération de l'eau; la construction de barrages, la conservation de l'eau et les pratiques agricoles, l'irrigation au goutte à goutte, la création de variétés culturales résistantes à la sécheresse et à maturité précoce, de cultures alternatives et de variétés hybrides	GT II 9.5, tableau 9.2
Asie	Améliorations de l'infrastructure agricole, y compris: • Alimentation des pâturages en eau • Mécanismes d'irrigation et leur efficacité • Utilisation et stockage de l'eau pluviale et nivale • Système d'échange d'informations sur les nouvelles technologies au niveau national, ainsi qu'aux niveaux régional et international • Accès des éleveurs, pêcheurs et agriculteurs à des prévisions météorologiques disponibles en temps utile (données sur la pluviométrie et les températures) • Recyclage et réutilisation des eaux usées municipales, par exemple à Singapour • Réduction du gaspillage de l'eau et des fuites d'eau, et utilisation d'approches orientées vers le marché, afin de diminuer le gaspillage de l'eau	GT II 10.5, tableau 10.8 GT II 10.5.2
Australie et Nouvelle-Zélande	• Initiative nationale sur l'eau • Usine de traitement destinée à fournir de l'eau recyclée • Diminution des infiltrations au niveau ds canaux et mesures de conservation • Canalisations pour remplacer les canaux d'irrigation à ciel ouvert • Amélioration de l'efficacité et de la qualité de la consommation de l'eau • Préparation aux sécheresses, nouvelle tarification de l'eau • Installation de réservoirs d'eau de pluie • Dessalement de l'eau de mer	GT II 11.2, tableau 11.2, encadré 11.2; voir tableau 5.2 dans la présente publication
Europe	• Mise en place de stratégies au niveau de la demande, telles que la conservation de l'eau domestique, industrielle et agricole, la réparation des réservoirs municipaux et d'eau d'irrigation qui fuient dans les zones situées en altitude et des digues dans les zones de plaine • Élargissement de la surface des zones inondables, des réservoirs de maîtrise des crues, des zones de conservation pour l'eau de crue et des systèmes d'alerte aux crues, notamment les crues éclair • Mesures au niveau de l'offre, telles que les retenues des cours d'eau, pour constituer des réservoirs dans les cours d'eau eux-mêmes, les systèmes de réutilisation des eaux usées et de dessalement, et la tarification de l'eau • Intégration de stratégies, à l'échelle des régions et des bassins versants, d'adaptation aux changements climatiques, dans des plans de gestion intégrée de l'eau	GT II 12.5.1
Amérique latine	• Bassins hydrographiques et systèmes de stockage • Programmes d'«auto-organisation» pour améliorer les systèmes d'approvisionnement en eau dans les communautés très pauvres • Techniques de conservation, de réutilisation et de recyclage de l'eau par la modification des procédés industriels et l'optimisation de la consommation de l'eau	GT II 13.2.5.3, encadré 13.2, 13.5.1
Amérique du Nord	• Meilleure conservation de l'eau et méthodes culturales de conservation du sol • Investissement dans les systèmes de conservation de l'eau et dans de nouvelles installations d'approvisionnement en eau et de distribution d'eau • Réforme du programme national de l'assurance contre les inondations aux États-Unis, pour réduire le risque d'innombrables déclarations de sinistre après les inondations • Les habitations ayant fait l'objet de deux déclarations de sinistre liées à une inondation nécessitent désormais d'être surélevées de 2,5 cm au-dessus du niveau des crues centennales, ou d'être déplacées • Chasse des réseaux de drainage et remplacement des systèmes d'égouts principaux pour répondre à des critères de crues quinquennales plus extrêmes • Détournement du ruissellement des toits vers les pelouses pour permettre l'infiltration, et accroissement de la rétention dans les dépressions de surface et au niveau des rues	GT II 14.2.4 GT II 14.5.1
Régions polaires	• Stratégie d'adaptation fructueuse déjà utilisé auparavant utilisée pour contrer les effets de la sécheresse des étangs des deltas, qui implique une bonne gestion des lâchers d'eau des réservoirs pour accroître la probabilité d'embâcle et d'inondations connexes • Régulation des flux pour la production hydroélectrique, stratégies de collecte de l'eau et méthodes d'accès à l'eau potable • Stratégies destinées à faire face aux dangers accrus/diminués concernant l'eau douce (par exemple, structures de protection destinées à réduire les risques d'inondation ou à accroître les crues des systèmes aquatiques)	GT II 15.6.2 GT II 15.2.2.2
Petites îles	• Usines de dessalement • Grands réservoirs de stockage et amélioration de la récupération de l'eau • Protection des nappes souterraines, accroissement de la collecte et des capacités de stockage de l'eau de pluie, utilisation de la distillation solaire, gestion des eaux pluviales et distribution des zones d'alimentation des nappes souterraines insulaires	GT II 16.4.1 Encadré 16.5

Tableau 3.6: *Problèmes interéchelles posés par la gestion intégrée de l'eau du bassin du fleuve Colorado (Pulwarty et Melis, 2001). [GT II tableau 3.4]*

Échelle temporelle	Problème
Indéterminée	Écoulement nécessaire pour protéger les espèces menacées
Long terme	Attribution interbassins et entre les bassins de différents États
Décennale	Obligation de distribution dans le bassin supérieur
Annuelle	Obligations de remplissage du lac Powell, pour atteindre une égalité de niveau avec le stockage du lac Mead
Saisonnière	Mois de pointe du chauffage et de la climatisation
Quotidienne à mensuelle	Opérations de lutte contre les crues
Horaire	Génération électrique de l'Administration de production de la zone ouest
Échelle spatiale	
Mondiale	Influences climatiques, parc national du Grand Canyon
Régionale	Appropriation préalable (par exemple, la Commission du bassin supérieur du fleuve Colorado)
Étatique	Différents accords concernant le marketing de l'eau, pour les districts situés à l'intérieur d'un État et à l'extérieur de celui-ci
Municipale et des communautés	Horaires d'arrosage, traitement, utilisation domestique

personnes âgées, les femmes, les personnes malades et les populations autochtones ont généralement des capacités d'adaptation moindres. [GT II 7.1, 7.2, 7.4, 17.3]

Il est possible de définir cinq types différents de limites de l'adaptation aux effets des changements climatiques. [GT II 17.4.2]

a) *Physique ou écologique*: les moyens techniques et les réformes institutionnelles mis en place peuvent ne pas empêcher les effets néfastes causés par les changements climatiques. Par exemple, une adaptation peut s'avérer impossible là où les rivières sont entièrement asséchées. [GT II 3.6.4]
b) *Technique, politique ou sociale*: par exemple, il peut être difficile de trouver des sites adaptés à l'implantation de nouveaux réservoirs, ou de faire en sorte que les utilisateurs consomment moins d'eau. [GT II 3.6.4]
c) *Économique*: une stratégie d'adaptation peut simplement s'avérer trop coûteuse par rapport aux bénéfices retirés de sa mise en œuvre.
d) *Culturelle et institutionnelle*: ce type de limites peut comprendre le cadre institutionnel au sein duquel est gérée l'eau, la faible priorité donnée à la gestion de l'eau, le manque de coordination interagences, les tensions entre les différents niveaux, l'inefficacité de la gouvernance et l'incertitude quant aux changements climatiques à venir (Ivey *et al.*, 2004; Naess *et al.*, 2005; Crabbe et Robin, 2006). L'ensemble de ces limites agissent comme des contraintes institutionnelles sur l'adaptation. [GT II 3.6.4]
e) *Cognitive et informationnelle*: par exemple, les gestionnaires des ressources en eau peuvent ne pas reconnaître les défis du changement climatique, ou leur accorder une faible priorité par rapport aux autres défis auxquels ils doivent faire face. La principale barrière informationnelle est le manque d'accès aux méthodologies permettant de faire face de manière cohérente et rigoureuse au changement climatique. [GT II 17.4.2.4]

Le changement climatique pose un problème conceptuel aux gestionnaires des ressources en eau en introduisant une incertitude dans la détermination des conditions hydrologiques futures. Il peut être également très difficile de détecter une tendance sous-jacente (Wilby, 2006), ce qui signifie que les décisions d'adaptation doivent parfois être prises avant que l'évolution réelle des régimes hydrologiques ne soit clairement connue. La gestion de l'eau dans la perspective du changement climatique exige ainsi d'adopter une approche fondée sur les scénarios (Beuhler, 2003; Simonovic et Li, 2003), comme c'est le cas, par exemple, au Royaume-Uni (Arnell et Delaney, 2006) et en Australie (Dessai *et al.*, 2005). Ceci pose toutefois deux sortes de problèmes. En premier lieu, les incidences sont souvent très différentes entre les scénarios, obligeant à fonder les analyses sur plusieurs scénarios. En second lieu, dans certains pays, les gestionnaires des ressources en eau ont besoin de données sur la probabilité de survenance des résultats définis pour prendre des décisions fondées sur les risques (voir Jones et Page, 2001). Des techniques sont par conséquent développées dans le but de construire des distributions de probabilité de résultats spécifiques, nécessitant des hypothèses concernant les distributions de probabilité des principaux facteurs d'incertitude agissant sur les incidences (par exemple, Wilby et Harris, 2006). [GT II 3.6.4]

Une deuxième approche pour traiter à l'incertitude, appelée «gestion adaptative» (Stakhiv, 1998), implique l'utilisation accrue de mesures de gestion de l'eau relativement robustes par rapport à l'incertitude. Ces outils comprennent des mesures destinées à réduire la demande d'eau et ont été prônés comme moyens de réduire le plus possible l'exposition d'un système au changement climatique (par exemple, en Californie: Beuhler, 2003). De la même façon, certaines stratégies résilientes de gestion des crues, qui consistent par exemple à permettre des crues temporaires des cours d'eau et à réduire l'exposition aux dommages causés par les crues, sont plus robustes par rapport à l'incertitude que les mesures traditionnelles de protection dans ce domaine (Klijn *et al*., 2004; Olsen, 2006). [GT II 3.6.4]

3.3.1 Gestion intégrée des ressources en eau

La gestion intégrée des ressources en eau (IWRM: voir la note de bas de page n° 17) devrait être un instrument d'exploration des mesures d'adaptation au changement climatique, mais n'en est pour le moment qu'à ses débuts. Les stratégies intégrées de gestion de l'eau qui donnent de bons résultats demandent, entre autres, de tenir compte de l'opinion publique, de réformer les processus de planification, de coordonner la gestion des ressources en sol et en eau, de reconnaître les liens entre quantité et qualité de l'eau, d'utiliser en parallèle les eaux souterraines et les eaux de surface, de protéger et de restaurer les milieux naturels, en incluant la prise en compte du changement climatique. De surcroît, les stratégies intégrées cherchent à lever de manière explicite les obstacles au flux d'informations. Une approche entièrement intégrée n'est pas toujours nécessaire, mais l'échelle d'intégration appropriée dépendra plutôt de la mesure dans laquelle elle facilite une action efficace en réponse à des besoins spécifiques (Moench *et al*., 2003). En particulier, une approche intégrée de la gestion de l'eau pourrait aider à résoudre les conflits entre les utilisateurs concurrentiels de l'eau. Dans différentes zones de l'ouest des États-Unis, les gestionnaires des ressources en eau et divers groupes d'intérêt ont expérimenté des méthodes qui favorisent la prise de décisions consensuelles. Ces efforts comprennent des initiatives locales au niveau des bassins versants et des initiatives menées par l'État ou parrainées au niveau fédéral pour obtenir la participation des parties prenantes aux processus de planification (par exemple, Département de l'intérieur, États-Unis, 2005). Ces initiatives permettent de faciliter les négociations entre les groupes ayant des intérêts divergents pour parvenir à une résolution des problèmes mutuellement satisfaisante qui prend en compte tout un ensemble de facteurs. Dans le cas des bassins versants de grande taille, comme le bassin du fleuve Colorado, ces facteurs traversent plusieurs niveaux spatiaux et temporels (tableau 3.6). [GT II 3.6.1, encadré 14.2]

4

Changement climatique et ressources en eau par système et par domaine

4.1 Écosystèmes et biodiversité

4.1.1 Contexte

Les régimes de températures et d'humidité font partie des principales variables qui déterminent la distribution, la croissance, la productivité et la reproduction des plantes et des animaux. Les changements de l'hydrologie peuvent influencer des espèces de bien des manières différentes, mais les processus les mieux compris sont ceux qui lient la disponibilité de l'humidité aux seuils intrinsèques qui gouvernent les processus métaboliques et reproductifs (Burkett *et al.*, 2005). Les changements climatiques prévus dans les décennies à venir auront des effets variés sur la disponibilité de l'humidité, allant des modifications dans la variation dans le temps et dans le volume de l'écoulement fluvial jusqu'à la diminution des niveaux d'eau dans un grand nombre de zones humides, en passant par l'extension des lacs thermokarstiques de l'Arctique, et par une diminution de la disponibilité en eau des brumes dans les forêts des montagnes tropicales.

Les tendances mondiales observées pour la précipitation, l'humidité, la sécheresse et le ruissellement au cours du siècle dernier sont résumées dans le chapitre 3 de la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation. Bien que les changements de précipitations au cours du siècle dernier soient extrêmement variables selon les régions [GT I figure 3.14], on observe tout de même des tendances importantes et hautement significatives. Les précipitations ont globalement augmenté dans l'hémisphère Nord de 1900 à 2005, mais la tendance à une sécheresse plus généralisée a augmenté simultanément dans de nombreuses grandes régions des tropiques et de l'hémisphère Sud, en particulier au Sahel, dans le sud de l'Afrique, en Amérique centrale, dans le sud de l'Asie et dans l'est de l'Australie. [GT I 3.3.5]

4.1.2 Changements prévus de l'hydrologie et implications pour la biodiversité mondiale

Les estimations du quatrième Rapport d'évaluation du GIEC pour le réchauffement mondial varient de 0,5 °C dans l'hémisphère Sud à 2 °C dans la région polaire septentrionale d'ici 2030, selon les scénarios SRES B1, A1 et A2, le scénario B1 étant celui qui prévoit le réchauffement le plus important. Tandis que les modèles simulent une augmentation des précipitations moyennes mondiales, les variations spatiales et temporelles sont grandes. Les modèles de la circulation générale (MCG) prévoient une augmentation des précipitations aux latitudes élevées, bien que l'ampleur de cette augmentation varie d'un modèle à l'autre. Ils prévoient également une diminution des précipitations dans un grand nombre de régions subtropicales et de moyenne latitude dans les deux hémisphères. [GT I figures 10.8 et 10.12] Au cours des prochaines décennies, les précipitations devraient être davantage concentrées dans des épisodes plus intenses, entre lesquels s'installeront des périodes plus longues de faibles précipitations. [GT I 10.3.6.1] L'augmentation du nombre de jours secs consécutifs devrait être plus importante en Amérique du Nord et en Amérique centrale, dans les Caraïbes, le nord-est et le sud-ouest de l'Amérique du Sud, le sud de l'Europe et la Méditerranée, le sud de l'Afrique et l'ouest de l'Australie. [GT I figure 10.18] Les incidences du réchauffement et des changements de configuration des précipitations dans les régions tropicales et subtropicales ont des implications importantes sur la biodiversité mondiale, car la diversité des espèces diminue généralement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur.

Les changements de l'hydrologie prévus pour le XXIe siècle par le Groupe de travail I dans sa contribution au quatrième Rapport d'évaluation (voir la section 2) auront *très probablement* une influence sur la biodiversité sur tous les continents. Des incidences ont déjà été détectées sur les espèces dans la plupart des régions du monde. [GT II 1.3, 4.2] Root *et al.* (2003) ont examiné 143 études publiées et indiquent que les plantes et les animaux démontrent déjà des changements visibles en accord avec les tendances climatiques du XXe siècle. Environ 80 % des changements correspondaient au changement de température observé, mais il convient de noter que la température peut également exercer une influence sur les espèces via des changements de disponibilité de l'humidité. [GT II 1.4.1]

Les réponses des écosystèmes aux changements hydrologiques impliquent souvent des interactions complexes entre les processus biotiques et abiotiques. L'assemblage d'espèces dans les communautés écologiques reflète le fait que ces interactions et réponses sont souvent non linéaires, ce qui augmente la difficulté de projection de résultats écologiques spécifiques. Étant donné que le moment où se produisent les réponses n'est pas toujours le même pour les espèces de groupes taxinomiques différents, une dissociation des espèces de leurs sources d'aliments et une perturbation des relations de symbiose, de facilitation ou de compétition entre les espèces pourraient survenir. En raison de la combinaison des réponses différentes d'une espèce à l'autre et des interactions pouvant se produire en théorie en un point quelconque du réseau alimentaire, certaines des communautés écologiques qui existent actuellement pourraient facilement se décomposer dans le futur (Root et Schneider, 2002; Burkett *et al.*, 2005). [GT II 1.3.5.5, 4.2.2, 4.4]

Du fait de l'effet combiné de la température et du stress hydrique, l'extinction de certains amphibiens et d'autres espèces aquatiques est prévue au Costa Rica, en Espagne et en Australie (Pounds *et al.*, 2006). [GT II tableau 4.1] Au Sahel, l'assèchement des zones humides compromettra la migration des oiseaux qui font étape dans ces régions lors de leur déplacement vers les sites de reproduction de l'hémisphère Nord. Dans le sud de l'Afrique, sont envisagés des niveaux inédits d'extinction tant de plantes que d'animaux.

[GT II tableau 9.1] Dans les forêts montagnardes, de nombreuses espèces dépendent du brouillard en tant que source d'eau: le réchauffement mondial élèvera la base des nuages et touchera les espèces qui sont dépendantes de cette ressource. [GT II 13.4.1] Parmi tous les écosystèmes, ce sont cependant les écosystèmes aquatiques d'eau douce qui semblent contenir la proportion la plus élevée d'espèces menacées d'extinction du fait du changement climatique (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 3.5.1]

4.1.3 Incidences des changements hydrologiques sur les principaux types d'écosystèmes

4.1.3.1 Lacs et rivières

Les incidences du réchauffement mondial sur les lacs sont, entre autres, une extension de la période de croissance aux latitudes élevées, une intensification de la stratification et de la perte d'éléments nutritifs des eaux de surface, une diminution de l'oxygène hypolimnique (en dessous de la thermocline) dans les lacs profonds et stratifiés, et une extension de nombreuses plantes aquatiques invasives. Les niveaux d'eau devraient augmenter dans les lacs des latitudes élevées où les modèles climatiques prévoient des précipitations accrues, tandis que les niveaux d'eau des lacs des latitudes moyennes et basses devraient diminuer. Les lacs endoréiques (fermés) sont les lacs les plus vulnérables au changement climatique car ils sont très sensibles aux changements d'équilibre entre les apports et l'évaporation. Les changements des apports de ces lacs peuvent avoir des répercussions très importantes qui, dans certaines conditions climatiques, peuvent entraîner leur disparition complète. L'étendue de la mer d'Aral, par exemple, a été considérablement réduite à cause de l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation en amont; en Chine, le lac Qinghai a rétréci suite à une diminution des précipitations dans le bassin hydrographique. [GT II TRE 4.3.7]

La durée de la couche de glace des lacs et des rivières aux latitudes moyennes à élevées a diminué d'environ deux semaines dans l'hémisphère Nord, au cours du siècle dernier. [GT I TRE RiD] Une augmentation de la température de l'eau en été peut entraîner une anoxie accrue dans les lacs stratifiés, une augmentation du relargage de phosphore par les sédiments au fond des lacs, et l'apparition de fleurs d'eau qui restructurent le réseau alimentaire aquatique. [GT II 4.4.8] Une augmentation de la température de 1 °C entraîne une différence de densité proportionnellement plus élevée dans les lacs tropicaux que dans les lacs tempérés plus froids. Ainsi, les températures tropicales prévues [GT I chapitres 10 et 11] provoqueraient une grande stratification thermique, avec une anoxie des couches profondes des lacs et un appauvrissement en éléments nutritifs des eaux peu profondes. Des concentrations réduites en oxygène entraîneraient généralement la réduction de la diversité des espèces aquatiques, en particulier lorsque la qualité de l'eau serait compromise par l'eutrophisation. [CCB 4.4]

Ces mêmes concentrations réduites en oxygène ont tendance à modifier les assemblages biotiques, la biogéochimie et la productivité globale des lacs et des rivières. Pour de nombreux taxons des eaux froides des latitudes moyennes et élevées, l'optimum thermique est inférieur à 20 °C. Des extinctions d'espèces sont prévues lorsque les températures estivales chaudes et l'anoxie supprimeront les refuges des eaux froides profondes. Dans le sud des Grandes Plaines des États-Unis, les températures de l'eau approchent déjà des limites létales pour de nombreux poissons indigènes des rivières. Le taux de décomposition de la matière organique augmente avec la température, ce qui raccourcit la période pendant laquelle les détritus sont disponibles pour les invertébrés aquatiques. [CCB 6.2] Les espèces exotiques invasives représentent une menace majeure pour la biodiversité indigène des écosystèmes aquatiques. [GT II 4.2.2] La hausse de la température mondiale aura tendance à étendre vers les pôles les aires de répartition d'un grand nombre de plantes aquatiques invasives telles que *Eichhornia* et *Salvinia*. [RICC 2.3.6]

Les effets du réchauffement sur les systèmes riverains peuvent être plus importants dans les régions humides où les flux sont moins variables et où les interactions biologiques contrôlent l'abondance des organismes. L'assèchement des lits des cours d'eau et des lacs pendant des périodes prolongées pourrait réduire la productivité des écosystèmes du fait de la restriction de l'habitat écologique, combinée à une moins bonne qualité de l'eau résultant d'une augmentation des déficits en oxygène et des concentrations en polluants. Dans les régions semi-arides du monde, la réduction de l'écoulement fluvial saisonnier et l'assèchement complet des lacs (notamment au Sahel en Afrique) peuvent avoir des répercussions graves sur les écoservices, y compris sur le maintien de la biodiversité. [CCB 6.7]

Actuellement, la richesse spécifique est à son maximum dans les systèmes d'eau douce de l'Europe centrale et elle diminue vers le nord et vers le sud du fait des sécheresses périodiques et de la salinisation (Declerck *et al*., 2005). Des analyses d'ensembles de MCG effectuées pour le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC mettent en évidence un contraste sud-nord des précipitations, avec une augmentation au nord et une diminution au sud. [GT I 11.3.3.2] Une augmentation du ruissellement prévu et un risque de sécheresse diminué pourraient avantager la faune des systèmes aquatiques du nord de l'Europe, tandis qu'une diminution de la disponibilité en eau dans le sud pourrait avoir l'effet opposé (Álvarez Cobelas *et al*., 2005). [GT II 12.4.6]

4.1.3.2 Zones humides d'eau douce

La grande variabilité de structure des systèmes de zones humides découle principalement de leur hydrologie particulière, qui comprend aussi bien les tourbières des forêts boréales à latitudes élevées que les zones humides de haute altitude des montagnes tibétaines et andines et les zones humides tropicales des moussons (notamment les zones humides de Kakadu, en Australie). Les répercussions les plus

prononcées du changement climatique se manifesteront sur les zones humides d'eau douce à l'intérieur des terres via une altération des précipitations et des épisodes de perturbations plus fréquents ou plus intenses (sécheresses, tempêtes, inondations). Une augmentation relativement faible de la variabilité des précipitations peut affecter significativement les plantes et les animaux des zones humides à différentes étapes de leur cycle de vie (Keddy, 2000). [GT II 4.4.8] En général, le réchauffement climatique devrait déclencher une tendance à l'assèchement des écosystèmes des zones humides. Cette influence essentiellement indirecte du changement climatique, entraînant des modifications du niveau d'eau, serait la principale cause du changement des écosystèmes des zones humides et occulterait les incidences de l'augmentation de la température et de l'allongement des périodes de croissance dans les tourbières boréales et subarctiques (Gorham, 1991). Les régions à mousson assisteront plus probablement à des épisodes de chutes de pluie plus intenses, concentrés dans des saisons de pluies plus courtes, aggravant les inondations et l'érosion dans les bassins hydrographiques et dans les zones humides elles-mêmes. [GT II TRE 5.8.3]

La plupart des processus des zones humides dépendent de l'hydrologie au niveau du bassin hydrographique, qui peut souffrir des changements d'affectation des terres ainsi que des pratiques de gestion des ressources en eaux de surface. [GT II TRE 5.RE] L'alimentation des réseaux locaux ou régionaux d'eaux souterraines, la position des zones humides par rapport à la topographie locale et le gradient de réseaux régionaux d'eaux souterraines plus étendus sont aussi des éléments critiques qui déterminent la variabilité et la stabilité du stockage de l'humidité dans les zones humides de régions climatiques où les précipitations ne dépassent pas de beaucoup l'évaporation (Winter et Woo, 1990). Les changements de l'alimentation externe de la zone humide peuvent être tout aussi importants que les changements des précipitations directes et l'évaporation pour le devenir de la zone, dans des conditions de changement climatique (Woo *et al.*, 1993). [GT II TRE 5.8.2.1] Ainsi, il sera peut-être très difficile, voire impossible, de s'adapter aux conséquences des changements prévus pour la disponibilité en eau. [GT II TRE 5.8.4] Du fait, en partie, de leur capacité d'adaptation limitée, les zones humides font partie des écosystèmes jugés les plus vulnérables au changement climatique. [GT II 4.4.8]

Les zones humides sont très souvent des points chauds de la biodiversité, qui sont nombreux à être protégés au niveau de la planète (sites Ramsar, sites du patrimoine mondial). Leur perte pourrait entraîner de nombreuses extinctions, en particulier parmi les amphibiens et les reptiles aquatiques. [GT II 4.4.8] Le troisième Rapport d'évaluation a identifié des tourbières ombrotrophiques («alimentées par les nuages») arctiques et subarctiques et des zones humides dépressionnaires ayant des bassins hydrographiques peu étendus comme étant les systèmes aquatiques les plus vulnérables au changement climatique. [GT II TRE 5.8.5] Le quatrième Rapport d'évaluation, plus récent, met toutefois en avant la grande vulnérabilité de nombreux autres types de zones humides, à savoir les zones humides à mousson de l'Inde et de l'Australie, les tourbières boréales, les zones humides de la cuvette des prairies en Amérique du Nord et celles de la région des Grands Lacs africains. [GT II 4.4.8, 4.4.10] Les modes et les itinéraires migratoires saisonniers de nombreuses espèces des zones humides devront évoluer au risque de voir certaines espèces menacées d'extinction. [GT II 4.4.8] En ce qui concerne les principaux habitats, leur restauration pourrait être possible à petite échelle, dans la mesure où la disponibilité en eau est suffisante. [GT II TRE 5.8.4]

En raison des changements hydrologiques associés au réchauffement atmosphérique, l'étendue de l'habitat des zones humides a augmenté dans certaines régions. Dans la région arctique, le dégel du pergélisol entraîne la création de nouvelles zones humides. [GT II 1.3] Les propriétés thermokarstiques, qui sont issues de la fonte de la glace du sol dans une région surmontant le pergélisol, peuvent déplacer le biote arctique suite à une saturation excessive ou à un assèchement (Hinzman *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 2005). En Amérique du Nord, près de Council, en Alaska (Yoshikawa et Hinzman, 2003), et dans le centre de la République de Sakha (Gavriliev et Efremov, 2003), on a mis en évidence un développement extensif de thermokarst. [GT I 4.7.2.3] Le dégel du pergélisol crée initialement des dépressions où se forment des zones humides et des étangs qui sont reliés par de nouveaux drainages. Au fur et à mesure que le dégel se poursuit, les eaux de surface percolent vers les réseaux souterrains, et sont perdues pour l'habitat d'eau douce. [GT II 15.4.1.3] Il se pourrait que le réchauffement ait déjà provoqué la diminution de la superficie des zones humides du fait de l'extension des lacs du delta du Yukon au cours du siècle dernier (Coleman et Huh, 2004). [GT II 15.6.2]

Une faible augmentation de la variabilité des régimes de pluie peut affecter significativement les plantes et les animaux des zones humides (Keddy, 2000; Burkett et Kusler, 2000). La biodiversité des zones humides saisonnières, comme les mares vernales, peut être fortement influencée par les changements des précipitations et de l'humidité des sols (Bauder, 2005). Dans les régions touchées par la mousson, des périodes sèches prolongées favorisent la terrestrialisation des zones humides, telle qu'on a pu l'observer dans le parc national Keoladeo (Chauhan et Gopal, 2001). [GT II 4.4.8]

4.1.3.3 Côtes et estuaires

Des changements dans la périodicité et le volume du ruissellement d'eau douce peuvent altérer la salinité, la disponibilité des sédiments et des éléments nutritifs, ainsi que les régimes d'humidité des écosystèmes côtiers. Le changement climatique peut influencer chacune de ces variables en modifiant les précipitations et le ruissellement local, ou de manière plus importante, le ruissellement des bassins versants vers la région côtière. [GT II 6.4.1.3] L'hydrologie exerce une grande influence sur la distribution des communautés végétales des zones humides côtières

qui se répartissent généralement à l'intérieur des terres, des espèces d'eau salée jusqu'à celles d'eau douce, en passant par celles d'eau saumâtre. [GT II 6.4.1.4]

Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur le relief côtier varient d'une région côtière à l'autre, du fait que la vitesse de l'élévation n'est pas uniforme dans l'espace [GT I 5.5.2] et que certaines régions côtières subissent des soulèvements ou des affaissements dus à des processus indépendants du changement climatique. De tels processus incluent les prélèvements d'eau souterraine, l'extraction de pétrole et de gaz et l'isostasie (ajustement de la surface de la Terre, à l'échelle géologique, aux changements de masse surfacique, dus par exemple aux changements de la masse des nappes glaciaires suite à la dernière déglaciation). En sus des changements d'élévation le long de la côte, des facteurs survenant à l'intérieur des terres peuvent influencer l'effet net de l'élévation du niveau de la mer sur les écosystèmes côtiers. Les écosystèmes naturels ont été fragmentés à l'intérieur des bassins versants, et l'écoulement de l'eau, des sédiments et des éléments nutritifs vers la côte en a été perturbé (Nilsson *et al*., 2005). Outre les influences localisées, y compris le développement humain sur la côte, le changement d'affectation des terres et les modifications hydrologiques ont eu des incidences en aval. L'érosion a augmenté la charge de sédiments qui atteint la côte. Par exemple, les charges en suspension dans le fleuve Huang He (fleuve Jaune) ont augmenté de 2 à 10 fois au cours des 2 000 dernières années (Jiongxin, 2003). En revanche, pour d'autres rivières, la construction de barrages et de canaux a réduit de beaucoup l'apport de sédiments à la côte, car ces derniers sont retenus dans les réservoirs (Syvistki *et al*., 2005). Cet effet sera probablement prévalent au XXIe siècle. [GT II 6.4]

Des passages d'ensembles de modèles climatiques réalisés par Milly *et al*. (2005) indiquent que, pendant les 50 à 100 années à venir, le changement climatique entraînera l'augmentation des débits vers les eaux côtières dans l'Arctique, le nord de l'Argentine et le sud du Brésil, des régions du sous-continent indien et en Chine, tandis qu'une réduction des débits est prévue dans le sud de l'Argentine et du Chili, l'ouest de l'Australie, l'ouest et le sud de l'Afrique et le bassin méditerranéen. [GT II 6.3.2; voir la figure 2.10 de la présente publication] Si les débits des rivières diminuent, la salinité des zones humides et des estuaires côtiers devrait augmenter, alors que la quantité de sédiments et d'éléments nutritifs apportés vers la côte devrait diminuer. Dans les régions côtières où l'écoulement fluvial diminue, la salinité aura tendance à remonter les cours d'eau et donc altérera la zonation des espèces animales et végétales, ainsi que la disponibilité en eau douce pour l'homme. La salinité accrue des eaux côtières depuis 1950 a contribué au recul des forêts de chou palmiste en Floride (Williams *et al*., 1999) et de cyprès chauve en Louisiane (Krauss *et al*., 2000). Elle a également joué un rôle dans l'extension des mangroves vers les marécages avoisinants dans la région des Everglades, en Floride (Ross *et al*., 2000) et dans tout le sud-est de l'Australie au cours des 50 dernières années (Saintilan et Williams, 1999). [GT II 6.4.1.4] L'intrusion d'eau salée consécutive à l'élévation du niveau de la mer, combinée à la diminution du débit des rivières et à l'augmentation de la fréquence des sécheresses, devrait perturber les pêcheries côtières dépendantes des estuaires au cours de ce siècle dans des régions d'Afrique, d'Australie et d'Asie. [GT II 6.4.1.3, 9.4.4, 10.4.1, 11.4.2]

Les côtes des deltas sont particulièrement vulnérables aux changements du ruissellement et du transport des sédiments, qui ont une influence sur la capacité d'un delta à faire face aux incidences physiques du changement climatique. En Asie, où les activités humaines ont entraîné une augmentation des charges en sédiments des principales rivières dans le passé, la construction de barrages en amont appauvrit l'apport en sédiments vers de nombreux deltas avec, comme répercussion généralisée, une augmentation de l'érosion côtière (Li *et al*., 2004; Syvitski *et al*., 2005; Ericson *et al*., 2006). [GT II 6.2.3, 6.4.1] Dans la plaine subsidente du delta du Mississippi, au sud-est de la Louisiane, le faible remplissage sédimentaire consécutif à l'intervention humaine dans les processus du delta et l'augmentation simultanée de la salinité et du niveau de l'eau des marécages côtiers se sont produits si rapidement que les marécages côtiers intertidaux et les basses terres côtières adjacentes (soit une superficie de 1 565 km^2) se sont transformés en hautes eaux entre 1978 et 2000 (Barras *et al*., 2003). [GT II 6.4.1]

Certaines des plus fortes incidences potentielles du changement climatique sur les estuaires pourraient être la conséquence de changements des caractéristiques de mélange physique dus aux changements du ruissellement d'eau douce (Scavia *et al*., 2002). Les apports d'eau douce dans les estuaires influencent le temps de séjour de l'eau, l'apport d'éléments nutritifs, la stratification verticale, la salinité et le contrôle des taux de croissance du phytoplancton (Moore *et al*., 1997). Les changements des débits des cours d'eau dans les environnements marins peu profonds et proches de la côte entraîneront des changements de la turbidité, de la salinité, de la stratification et de la disponibilité en éléments nutritifs (Justic *et al*., 2005). [GT II 6.4.1.3]

4.1.3.4 Écosystèmes de montagne

La zonation des écosystèmes le long des pentes des montagnes dépend de la température et de l'humidité des sols. Des études récentes (Williams *et al*., 2003; Pounds et Puschendorf, 2004; Andreone *et al*., 2005; Pounds *et al*., 2006) ont montré le danger disproportionné qui pèse sur les écosystèmes de montagne quant au risque d'extinction, en particulier d'espèces endémiques. [GT II 4.4.7] De nombreuses espèces d'amphibiens, de petits mammifères, de poissons, d'oiseaux et de plantes sont très vulnérables aux changements climatiques actuels et à venir qui altèrent leur niche de montagne hautement spécifique. [GT II 1.3.5.2, 4.4.7, 9.4.5]

Dans de nombreux bassins versants alimentés par la fonte des neiges, l'augmentation de la température a provoqué le décalage de l'ampleur et de la périodicité des épisodes hydrologiques. Une tendance à la précocité du débit fluvial de pointe au printemps et à l'augmentation des débits de base d'hiver a été observée en Amérique du Nord et en Eurasie. [GT II 1.3.2] Une plus grande partie des précipitations annuelles provient des chutes de pluie plutôt que des chutes de neige dans 74 % des stations météorologiques étudiées dans les montagnes de l'ouest des États-Unis entre 1949 et 2004 (Knowles *et al*., 2006). Depuis les années 1970, la profondeur de la neige d'hiver et la couverture neigeuse de printemps ont diminué au Canada, en particulier dans l'ouest, où les températures de l'air ont augmenté constamment (Brown et Braaten, 1998). La couverture neigeuse au printemps et en été diminue dans l'ouest des États-Unis (Groisman *et al*., 2004). L'équivalent en eau de la neige au 1er avril a diminué entre 15 et 30 % depuis 1950 dans les montagnes de l'ouest de l'Amérique du Nord, en particulier à basse altitude au printemps, surtout du fait du réchauffement plutôt que des changements de précipitation (Mote *et al*., 2005). Les pics d'écoulement fluvial dans les montagnes de l'ouest des États-Unis alimentées par la fonte des neiges se sont produits de 1 à 4 semaines plus tôt en 2002 qu'en 1948 (Stewart *et al*., 2005). [GT II 14.2.1]

La durée et la profondeur de la couverture neigeuse, souvent liées à la température et aux précipitations moyennes (Keller *et al*., 2005; Monson *et al*., 2006), sont des facteurs essentiels pour de nombreux écosystèmes alpins (Körner, 1999). Le manque de couverture neigeuse expose les plantes et les animaux au gel, et influence l'approvisionnement en eau au printemps (Keller *et al*., 2005). Si les déplacements des animaux sont perturbés par des configurations neigeuses changeantes, comme cela a été observé au Colorado (Inouye *et al*., 2000), la mortalité des espèces sauvages pourrait augmenter du fait d'un décalage entre ces dernières et l'environnement. [GT II 4.4.7] Pour chaque degré Celsius d'augmentation de la température, la durée de la couverture neigeuse devrait diminuer de plusieurs semaines aux altitudes moyennes dans les Alpes européennes. Il est *pratiquement certain* que la flore européenne subira des changements majeurs en réponse au changement climatique, les changements de la durée de la couverture neigeuse étant un moteur plus important que les effets directs de la température sur le métabolisme animal. [GT II 12.4.3]

Un changement de ruissellement des glaciers a des répercussions significatives sur les écoservices. Le biote des cours d'eau de petits bassins versants dépendants de la fonte des glaciers est très vulnérable à la disparition locale. [GT II 1.3.1, 3.2, 3.4.3]

4.1.3.5 Forêts, savanes et pâturages

La disponibilité en eau est un facteur essentiel pour la restructuration des systèmes forestiers et des pâturages au fur et à mesure du réchauffement climatique. On sait que le changement climatique modifie la probabilité d'une augmentation de l'ampleur et de la fréquence des feux incontrôlés, tout en créant des facteurs de stress pour les arbres, ce qui aggrave indirectement les effets de ces perturbations. De nombreux écosystèmes forestiers sous les tropiques, les latitudes élevées et les hautes altitudes deviennent de plus en plus sensibles à la sécheresse et donc aux incendies, aux maladies et aux parasites consécutifs. [GT II chapitre 4, 5.1.2, 13.4] On a estimé que jusqu'à 40 % des forêts amazoniennes pourraient être affectées par des diminutions des précipitations, si minimes soient elles (Rowell et Moore, 2000). Les simulations de plusieurs modèles MCG sur les changements de précipitation en Amérique du Sud pour les 100 prochaines années prévoient une diminution significative (20 % ou plus) aux mois de juin, juillet et août dans le bassin amazonien, mais une légère augmentation (environ 5 %) aux mois de décembre, janvier et février. [GT I 11.6.3.2] Ces changements prévus des précipitations, couplés à une augmentation de la température, laissent présager le remplacement de certaines forêts amazoniennes par des écosystèmes qui sont plus résistants aux multiples contraintes occasionnées par l'augmentation de la température, des sécheresses et des incendies. [GT II 13.4.2]

Une augmentation des conditions de sécheresse dans plusieurs régions (Europe, quelques régions d'Amérique latine) pendant la période de croissance devrait accompagner l'augmentation des températures en été et la diminution des précipitations, avec des effets généralisés sur la productivité nette des écosystèmes forestiers. Les effets de la sécheresse sur les forêts incluent la mortalité due aux maladies, le stress de sécheresse et les parasites, une réduction de la résilience et des rétroactions biotiques qui varient d'un endroit à l'autre. [GT II 4.4.5] Dans certaines régions, les forêts devraient remplacer d'autres types de végétation, notamment la toundra et les pâturages, et la disponibilité en eau peut être un paramètre tout aussi important que la température et les effets de l'enrichissement en CO_2 sur la photosynthèse. [GT II 4.4.3, 4.4.5]

De nombreuses études ont évalué l'incidence directe de la fertilisation par le CO_2 et les effets du réchauffement sur les types de forêts et de pâturages dominants. Des études portant sur un large éventail d'espèces ligneuses et herbacées laissent entendre que l'augmentation de la photosynthèse en raison de l'enrichissement en CO_2 prévu dépendra de la disponibilité en eau. [GT II 4.4.3] Des effets plus importants de l'enrichissement en CO_2 dans les forêts et les savanes peuvent entraîner de notables rétroactions sur les ressources en eau. Par exemple, l'enrichissement en CO_2 de l'atmosphère peut nuire à la valeur nutritionnelle de la litière dans les cours d'eau (Tuchman *et al*., 2003), et l'équilibre hydrique du sol peut être fortement influencé par une teneur élevée en CO_2 dans la plupart des types de pâturages. [GT II 4.4.10] La productivité des pâturages et de la savane est très sensible à la variabilité des précipitations. Par exemple, dans les évaluations de la productivité des prairies à herbes hautes, une augmentation de la variabilité des précipitations était plus significative que le volume des pluies, une augmentation de 50 % de la durée des périodes de sécheresse entraînant une réduction de 10 % de la productivité primaire nette (Fay *et al*., 2003a). [GT II 4.4.3]

4.2 Agriculture et sécurité alimentaire, utilisation des terres et foresterie

4.2.1 Contexte

La productivité des systèmes agricoles et forestiers et des pêcheries dépend en grande partie de la distribution temporelle et spatiale des précipitations et de l'évaporation, ainsi que de la disponibilité des ressources en eau douce pour l'irrigation, en particulier pour les cultures. [GT II 5.2.1] Avec le changement climatique, les systèmes de production des régions marginales sont confrontés à une augmentation de la vulnérabilité climatique et des risques, en ce qui concerne l'eau à cause de facteurs dont la dégradation des ressources en sols via l'érosion des sols, une extraction excessive des eaux souterraines et la salinisation correspondante, ainsi que le surpâturage des terres arides (FAO, 2003). [GT II 5.2.2] Dans ces régions marginales, les cultures des petites exploitations sont particulièrement vulnérables au changement climatique et la variabilité du climat, et les sources de stress socioéconomique viennent souvent aggraver des conditions environnementales déjà difficiles. [GT II 5.2.2, tableau 5.2, encadré 5.3] Dans les forêts, on a démontré que les incendies et les pullulations d'insectes liés à la fréquence de phénomènes extrêmes augmentent la vulnérabilité au climat. Dans les pêcheries, la pollution de l'eau et les changements des ressources en eau augmentent également la vulnérabilité et le risque. [GT II 5.2.2]

4.2.1.1 Agriculture et sécurité alimentaire

L'eau joue un rôle prépondérant dans la production alimentaire au niveau régional et mondial. D'un côté, plus de 80 % des terres agricoles mondiales ne sont pas irriguées. Dans ces régions, la productivité des cultures dépend uniquement d'un volume de pluie suffisant pour répondre aux besoins d'évaporation et assurer la distribution correspondante de l'humidité dans le sol (FAO, 2003). [GT II 5.4.1.2] Lorsque ces variables sont limitées par le climat, comme dans les régions arides et semi-arides des régions tropicales et subtropicales, ainsi que dans les régions de type méditerranéen en Europe, Australie et Amérique du Sud, la production agricole est très vulnérable au changement climatique (FAO, 2003). D'un autre côté, la production mondiale d'aliments dépend de l'eau, non seulement sous forme de précipitations, mais aussi en grande partie sous forme de ressources en eau disponibles pour l'irrigation. En effet, les terres irriguées, qui ne représentent que 18 % des terres agricoles mondiales, produisent 1 milliard de tonnes de blé par an, à savoir environ la moitié de l'approvisionnement total du monde. Cela s'explique par le rendement des cultures irriguées qui est de 2 à 3 fois plus élevé en moyenne que celui des terres non irriguées[19] (FAO, 2003).

Tandis qu'un déficit d'eau entraîne la vulnérabilité de la production, l'excès d'eau peut également avoir des effets préjudiciables sur la productivité des cultures, soit directement, par exemple en affectant les propriétés du sol et en perturbant la croissance des plantes, soit indirectement, par exemple en troublant ou en retardant les actions nécessaires pour l'exploitation. Des phénomènes de pluies intenses, une humidité excessive dans le sol et les inondations perturbent la production d'aliments et les moyens de subsistance ruraux au niveau mondial (Rosenzweig *et al.*, 2002). [GT II 5.4.2.1]

[19] Voir le paragraphe 1.3 pour une analyse des relations entre l'irrigation, le changement climatique et l'alimentation des nappes souterraines. Ces sujets sont également abordés dans les paragraphes 5.1.3 (concernant l'Afrique) et 5.2.3 (concernant l'Asie).

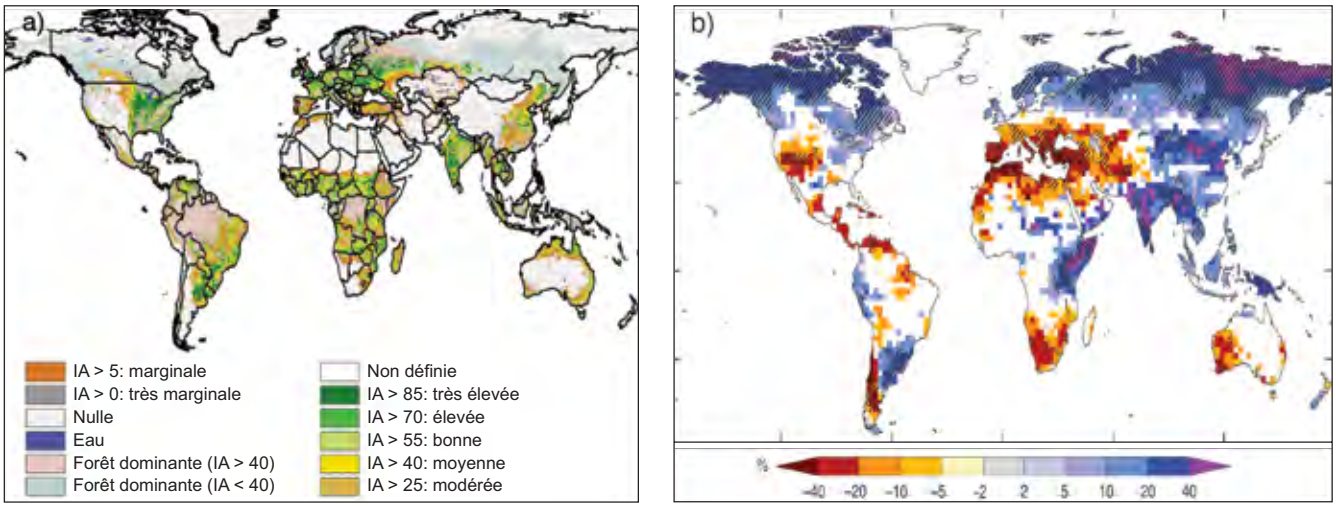


Figure 4.1: *a) Adéquation actuelle des terres aux cultures non irriguées (hormis les écosystèmes forestiers) (d'après Fischer* et al.*, 2002b). IA = Indice d'adéquation [GT II figure 5.1a]; b) changement moyen prévu (en pourcentage) du ruissellement annuel moyen, simulé par un ensemble, entre la période actuelle (1980 à 1999) et 2090 à 2099. [D'après RSY figure 3.5]*

L'eau joue un rôle prépondérant dans la sécurité alimentaire, car non seulement elle est indispensable dans les processus de préparation des aliments, mais elle influence aussi la productivité des récoltes et la production des aliments. Actuellement, 850 millions de personnes souffrent encore de malnutrition dans le monde (FAO, 2003). [GT II 5.3.2.1, 5.6.5] Les contraintes socioéconomiques des prochaines décennies entraîneront une augmentation de la compétition entre les besoins pour l'irrigation et la demande des secteurs non agricoles, et réduiront potentiellement la disponibilité et la qualité des ressources en eau pour les aliments. [GT II 3.3.2] Des études récentes indiquent qu'il est *improbable* que les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) concernant la faim soient atteints d'ici 2015. [GT II 5.6.5] En même temps, au cours du siècle, le changement climatique pourrait davantage réduire la disponibilité en eau pour la production alimentaire mondiale du fait des changements moyens prévus des régimes de température et de précipitations, mais également du fait de l'augmentation prévue de la fréquence des phénomènes extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations (Rosenzweig *et al.*, 2002). [GT II 5.6.5]

Les évaluations des incidences climatiques sur la production d'aliments sont, en général, grandement dépendantes des particularités des projections de précipitations du MCG utilisées. [GT II 5.4.1.2] Un large éventail de scénarios est actuellement disponible pour les précipitations. En général, les évaluations fondées sur des scénarios de diminution des précipitations régionales laissent entrevoir une diminution de la production des cultures et inversement. Les projections d'une augmentation de l'aridité dans plusieurs environnements de type méditerranéen (Europe, Australie et Amérique du Sud), ainsi que dans des régions tropicales arides et semi-arides marginales, en particulier l'Afrique subsaharienne, semblent être fondées quel que soit le modèle (voir figure 2.10). Ces régions risquent d'être plus vulnérables avec le changement climatique, comme indiqué à la figure 4.1. [GT II 5.3.1]

4.2.1.2 Utilisation des terres et écosystèmes forestiers

Les écosystèmes forestiers occupent environ quatre milliards d'hectares de terres, une superficie comparable à celle occupée par les cultures et les pâturages combinés. De ces terres, seulement environ 200 millions d'hectares sont exploitées pour la production forestière commerciale à l'échelle mondiale (FAO, 2003). [GT II 4.4.5, 5.1.1, 5.4.5]

Les forêts jouent un rôle déterminant dans l'approvisionnement, la qualité et la quantité de l'eau, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. L'importance des forêts en tant que bassins versants peut être amenée à augmenter considérablement dans les prochaines décennies, car les ressources en eau douce se raréfient, en particulier dans les pays en développement (Mountain Agenda, 1997; Liniger et Weingartner, 1998). [LULUCF 2.5.1.1.4; GT II 4.1.1]

Les forêts sont impliquées dans le cycle régional de l'eau, avec des effets potentiels importants des changements d'affectation des terres sur les climats locaux et régionaux (Harding, 1992; Lean *et al.*, 1996). En revanche, la protection des forêts peut avoir des effets bénéfiques sur l'atténuation des sécheresses et des crues, en particulier sous les tropiques (Kramer *et al.*, 1997; Pattanayak et Kramer, 2000). [LULUCF 2.5.1.1.6]

Le boisement et le reboisement sont susceptibles d'augmenter l'humidité, de diminuer la température et d'augmenter les précipitations dans les régions concernées (Harding, 1992; Blythe *et al.*, 1994). En revanche, le déboisement peut entraîner une diminution locale des précipitations et une augmentation de la température. En Amazonie et en Asie, il peut entraîner de nouvelles conditions climatiques inadaptées pour la régénération des espèces de la forêt tropicale (Chan, 1986; Gash et Shuttleworth, 1991; Meher-Homji, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.6]

Les écosystèmes forestiers sont différemment sensibles au changement climatique (par exemple, Kirschbaum et Fischlin, 1996; Sala *et al.*, 2000; Gitay *et al.*, 2001), les biomes dont le facteur limitant est la température étant sensibles aux impacts du réchauffement, et les biomes dont le facteur limitant est l'eau étant sensibles à l'augmentation de la sécheresse. Certains écosystèmes, comme ceux qui dépendent des incendies, peuvent changer rapidement suite à des changements climatiques ou à d'autres changements environnementaux (Scheffer *et al.*, 2001; Sankaran *et al.*, 2005). [GT II 4.1, 4.4.5]

Les écosystèmes forestiers et leur biodiversité peuvent être particulièrement menacés en Afrique, du fait d'une combinaison de contraintes socioéconomiques et de facteurs liés à l'utilisation des terres et au changement climatique. [GT II 4.2] À l'horizon 2100, les incidences négatives peuvent entraîner une diminution de la qualité de l'eau ainsi que des biens et des services des écosystèmes sur 25 % de l'Afrique (notamment le sud et l'ouest). [GT II 4.RE, 4.4.8] En effet, des changements sont déjà détectés et documentés dans divers écosystèmes, en particulier dans le sud de l'Afrique. [GT II 9.2.1.4]

4.2.2 Observations

4.2.2.1 Incidences climatiques et eau

Bien qu'il soit admis que l'agriculture et la sylviculture sont très dépendantes du climat, il est difficile de trouver des preuves de changements observés liés aux changements climatiques régionaux, et en particulier à l'eau. L'agriculture et la sylviculture sont également fortement influencées par des facteurs non climatiques, en particulier des pratiques de gestion et des changements technologiques (Easterling, 2003) à l'échelle locale et régionale, ainsi que par les prix du marché et les politiques relatives aux subventions. [GT II 1.3.6]

Bien qu'il soit difficile d'identifier les réponses au récent changement climatique dans les systèmes humains, en raison de nombreux éléments moteurs non climatiques et de l'existence d'adaptations, des effets ont été détectés dans les systèmes forestiers et dans quelques systèmes agricoles. Des changements concernant plusieurs aspects du système de santé publique ont été liés au réchauffement récent. L'adaptation à ce réchauffement commence à être systématiquement documentée. Par rapport à d'autres facteurs, ce phénomène a eu des conséquences limitées sur l'agriculture et la sylviculture. On a cependant observé une progression significative de la phénologie dans ces deux domaines dans de grandes régions de l'hémisphère Nord, avec des réponses limitées de gestion des cultures. Dans de nombreuses régions, l'allongement de la période de croissance a contribué à l'augmentation observée de la productivité des forêts, tandis que des conditions plus chaudes et plus sèches sont en partie responsables de la réduction de la productivité des forêts et de l'augmentation des incendies de forêt en Amérique du Nord et dans le bassin méditerranéen. Tant l'agriculture que la sylviculture ont démontré leur vulnérabilité aux tendances récentes aux vagues de chaleur, aux sécheresses et aux crues. [GT II 1.3.6,1.3.9, 5.2]

4.2.2.2 $C0_2$ atmosphérique et dynamique de l'eau

Les effets de la concentration élevée de CO_2 atmosphérique sur les fonctions végétales peuvent avoir des répercussions importantes sur les ressources en eau, étant donné que le rendement hydraulique au niveau de la feuille augmente du fait d'une résistance stomatique accrue par rapport aux concentrations actuelles. Pour les espèces végétales en C_3 (c'est-à-dire la plupart des cultures alimentaires), l'effet du CO_2 peut être relativement plus fort sur les plantes qui souffrent d'un stress hydrique que sur celles qui sont bien irriguées. [GT II TRE 5.3.3.1]

Cependant, les implications des interactions du CO_2 avec l'eau à grande échelle (c'est-à-dire au niveau du couvert forestier, du champ et de la région) sont vraiment incertaines. En général, on admet que les avantages d'une concentration élevée de CO_2 sur les relations entre les plantes et l'eau devraient être diminués par des besoins accrus en évaporation dans des conditions thermiques plus chaudes. [GT II TRE 5.3.3.1]

De nombreuses études récentes confirment et généralisent les résultats du troisième Rapport d'évaluation, selon lequel les changements des températures et des précipitations attendus au cours des prochaines décennies modifieront et, souvent, limiteront les effets directs du CO_2 sur les plantes. Par exemple, des températures élevées pendant la floraison peuvent diminuer les effets du CO_2 en réduisant le nombre, la taille et la qualité des graines (Thomas *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2004; Caldwell *et al.*, 2005). De même, une augmentation de la demande en eau liée au réchauffement peut réduire les éventuels effets positifs du CO_2. Le rendement en grains de cultures de blé non irriguées poussant dans une atmosphère de 450 ppm de CO_2 s'accroît pour une augmentation de la température jusqu'à 0,8 °C, mais diminue si le réchauffement se poursuit au-delà de 1,5 °C; une irrigation est alors nécessaire pour contrecarrer les effets négatifs. [GT II 5.4.1.2]

Enfin, les physiologistes végétaux et les modélisateurs de cultures reconnaissent que les effets d'une concentration élevée de CO_2, mesurés dans un contexte expérimental et mis en œuvre dans les modèles, pourraient surestimer les réponses réelles au niveau du champ et de l'exploitation agricole. Cela s'explique par les nombreux facteurs limitants qui agissent typiquement au niveau du champ, tels que les parasites, les mauvaises herbes, la compétition pour les ressources, la qualité de l'eau, du sol et de l'air. Ces facteurs critiques sont peu étudiés en contexte expérimental à grande échelle et ne sont donc pas correctement intégrés dans les principaux modèles de croissance végétale. La compréhension de la dynamique essentielle qui caractérise les interactions d'un CO_2 élevé avec le climat, la qualité du sol et de l'eau, les parasites, les mauvaises herbes et les maladies, la variabilité climatique et la vulnérabilité des écosystèmes, reste une priorité pour la compréhension des incidences futures du changement climatique sur les systèmes gérés. [GT II 5.4.1, 5.8.2]

4.2.3 Projections

Les changements de la demande et de la disponibilité en eau suite au changement climatique affecteront grandement les activités agricoles et la sécurité alimentaire, la sylviculture et les pêcheries au XXIe siècle. D'un côté, les changements des rapports évaporation/précipitations modifieront la demande en eau des plantes par rapport à une courbe de référence sans changement climatique. D'un autre côté, les configurations modifiées des pluies et des cycles de stockage au niveau des bassins versants changeront la disponibilité en eau saisonnière, annuelle et interannuelle pour les agroécosystèmes terrestres et aquatiques (FAO, 2003). Les changements climatiques augmentent la demande en irrigation dans la plupart des régions du monde en raison d'une diminution des précipitations et d'une augmentation de l'évaporation sous l'effet de l'augmentation de la température. [GT II 5.8.1]

Il est attendu que les changements prévus de la fréquence et de la sévérité des phénomènes climatiques extrêmes, notamment l'augmentation de la fréquence du stress thermique, des sécheresses et des inondations, auront des conséquences significatives sur les aliments, la sylviculture (et le risque d'incendies de forêt) et d'autres productions des agrosystèmes, en plus des incidences des changements des variables moyennes seules. [GT II 5.RE] En particulier, plus de 90 % des simulations prévoient des sécheresses accrues dans les régions subtropicales d'ici la fin du XXIe siècle

[GT I RiD], tandis qu'une augmentation des extrêmes des précipitations est attendue dans les principales régions agricoles du sud et de l'est de l'Asie, de l'est de l'Australie et du nord de l'Europe. [GT I 11.3, 11.4, 11.7] Il convient de noter que les modèles d'incidence du changement climatique pour les aliments, les produits forestiers et les fibres n'incluent pas encore ces résultats récents sur les configurations prévues du changement de précipitations; une fois les effets des phénomènes extrêmes sur la productivité inclus, les incidences négatives devraient être plus graves que celles qui sont calculées actuellement. [GT II 5.4.1, 5.4.2]

Les changements des chiffres du ruissellement annuel moyen sont un indice de la disponibilité moyenne en eau pour la couverture végétale. Les changements prévus d'ici 2100 [GT II chapitre 3] suivent des configurations cohérentes: augmentation aux latitudes élevées et dans les régions tropicales humides, et diminution aux latitudes moyennes et dans certaines régions tropicales sèches (figure 4.1b)). Une diminution de la disponibilité en eau est un indice de stress hydrique accru et, en particulier, d'aggravation dans les régions dans lesquelles l'eau utilisable pour la production est déjà rare (par exemple, le bassin méditerranéen, l'Amérique centrale et les régions subtropicales d'Afrique et d'Australie, voir figure 4.1b)). [GT II 5.3.1]

Enfin, il sera important de reconnaître que les systèmes de production et les ressources en eau seront largement influencés par les interactions concurrentes des moteurs socioéconomiques et climatiques dans les décennies à venir. Par exemple, une demande accrue en eau d'irrigation dans l'agriculture dépendra des conditions climatiques modifiées et d'une augmentation de la demande alimentaire du fait de la croissance démographique; de plus, la disponibilité en eau pour la productivité forestière dépendra tout aussi bien des moteurs climatiques que des impacts anthropiques critiques, en particulier du déboisement dans les régions tropicales. Par exemple, dans le bassin amazonien, le déboisement combiné à un morcellement accru sont susceptibles de déclencher des sécheresses sévères dépassant le signal climatique, et donc d'augmenter les risques d'incendie. [GT II 5.3.2.2]

4.2.3.1 Cultures

En général, tandis qu'un réchauffement modéré des régions des latitudes élevées avantagerait les rendements des cultures et des pâturages, un réchauffement, même léger, dans les régions de faible latitude ou dans les régions à saisons sèches serait préjudiciable pour les rendements. Les résultats des modélisations sur un éventail de sites indiquent, dans les régions de latitude élevée, qu'une augmentation modérée à moyenne de la température locale (de 1 à 3 °C), accompagnée d'une augmentation du CO_2 et des changements de précipitations correspondants, peut avoir une incidence légèrement bénéfique sur les rendements des cultures. Cependant, dans les régions de faible latitude, une augmentation même modérée de la température (de 1 à 2 °C) aurait *probablement* une incidence négative sur les rendements des principales cultures céréalières. Un réchauffement plus important aurait des répercussions de plus en plus négatives sur toutes les régions. [GT II 5.RE]

Les régions dans lesquelles l'agriculture est actuellement marginale, en grande partie à cause de sols pauvres combinés à une pénurie d'eau et à une pauvreté rurale, pourront être de plus en plus vulnérables aux incidences du changement climatique sur l'eau. De ce fait, même des changements climatiques minimes augmenteront le nombre de personnes susceptibles de souffrir de la faim, l'incidence se faisant surtout sentir en Afrique subsaharienne. [GT II 5.RE]

Une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques peut diminuer les rendements des cultures au-delà des incidences du changement climatique moyen. Depuis le troisième Rapport d'évaluation, des études de simulation ont considéré différents aspects de la variabilité climatique accrue dans les scénarios de changement climatique. Rosenzweig *et al.* (2002) ont calculé que, selon des scénarios d'augmentation des précipitations intenses, les pertes de production dues à une humidité du sol excessive (déjà significative actuellement) doubleraient aux États-Unis pour atteindre 3 milliards de dollars des États-Unis par an en 2030. Au Bangladesh, le risque de perte des cultures devrait augmenter en raison de l'augmentation de la fréquence des crues, du fait du changement climatique. Enfin, les études d'impact du changement climatique qui intègrent une augmentation de l'intensité des chutes de pluie indiquent une augmentation du risque d'érosion des sols, dans les régions arides et semi-arides, l'intensification des précipitations peut être associée à un risque accru de salinisation, à cause de l'augmentation de la perte d'eau au-delà de la zone radiculaire de la culture. [GT II 5.4.2.1]

Les impacts du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation peuvent être importants. Quelques nouvelles études ont poursuivi la quantification des incidences du changement climatique sur les besoins d'irrigation au niveau mondial et régional, indépendamment des effets positifs du CO_2 élevé sur le rendement hydraulique des cultures. Döll (2002), en considérant les incidences directes du changement climatique sur la demande en évaporation, mais sans tenir compte des effets du CO_2, a estimé que les besoins nets en irrigation des cultures (c'est-à-dire, après les pertes par transpiration) augmenteraient entre 5 et 8 % dans le monde d'ici 2070, avec des augmentations régionales plus importantes (à savoir +15 %) dans le sud-est de l'Asie. [GT II 5.4.2.1]

Dans une étude qui englobait les effets positifs du CO_2 sur le rendement hydraulique des cultures, Fischer *et al.* (2006) ont trouvé une augmentation de 20 % des besoins nets en irrigation au niveau mondial à l'horizon 2080, avec des incidences plus

importantes dans les pays développés que dans les pays en développement, qui s'expliqueraient par une augmentation de la demande en évaporation et par un allongement des périodes de croissance dans un contexte de changement climatique. Fischer *et al*. (2006) et Arnell *et al*. (2004) ont également prévu une augmentation du stress hydrique (mesuré en tant que rapport des prélèvements pour l'irrigation sur les ressources en eau renouvelables) au Moyen-Orient et dans le sud-est de l'Asie. Des études régionales récentes ont également souligné la dynamique critique du changement climatique et de l'eau dans des régions irriguées importantes, telles que le nord de l'Afrique (augmentation des besoins en irrigation; Abou-Hadid *et al*., 2003) et la Chine (diminution des besoins; Tao *et al*., 2003a). [GT II 5.4.2.1]

Quelques études d'intégration ont été réalisées à l'échelle nationale. Aux États-Unis, deux études de modélisation sur l'adaptation du secteur agricole au changement climatique (c'est-à-dire sur les décalages entre production irriguée et production non irriguée) prévoient une diminution des régions irriguées et des prélèvements au-delà de 2030, selon divers scénarios climatiques (Reilly *et al*., 2003; Thomson *et al*., 2005a). Cela s'explique par la diminution de l'écart de rendement entre l'agriculture irriguée et non irriguée, engendrée par une réduction du rendement des cultures irriguées du fait de la hausse de la température, ou par l'augmentation du rendement des cultures non irriguées du fait de l'augmentation des précipitations. Ces études ne tiennent pas compte de l'augmentation de la variabilité des précipitations journalières et, de ce fait, les rendements des cultures non irriguées sont probablement surestimés. [GT II 3.5.1]

Dans le cas des pays en développement, une augmentation de 14 % du prélèvement d'eau pour l'irrigation d'ici 2030 a été prévue dans une étude de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui ne tenait pas compte des incidences du changement climatique (Bruinsma, 2003). Cependant, les quatre scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire prévoient des augmentations bien inférieures du prélèvement pour l'irrigation à l'échelle mondiale, étant donné qu'ils estiment que les régions irriguées n'augmenteront que de 0 à 6 % d'ici 2030, et de 0 à 10 % d'ici 2050. [GT II 3.5.1]

L'augmentation de la consommation d'eau sera *probablement* spectaculaire dans les secteurs domestique et industriel, les prélèvements augmentant de 14 à 83 % d'ici 2050 (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005a, b). Cette hypothèse est fondée sur l'idée que la valeur de l'eau sera beaucoup plus élevée pour les utilisations domestique et industrielle, ce qui est particulièrement vrai dans des conditions de stress hydrique. [GT II 3.5.1]

L'agriculture irriguée pourrait être localement confrontée à de nouveaux problèmes liés à la distribution spatiale et temporelle de l'écoulement fluvial. Par exemple, aux basses latitudes, en particulier dans le sud-est de l'Asie, une fonte des neiges précoce pourrait entraîner des inondations au printemps et une pénurie d'eau pour l'irrigation en été. [GT II 5.8.2]

4.2.3.2 Pâturages et bétail

De nombreux parcours du monde se trouvent dans les régions semi-arides et sont sensibles aux déficits d'eau; toute diminution future des ressources en eau aura une grande influence sur leur capacité de charge. De ce fait, une augmentation de la variabilité climatique et des sécheresses pourrait entraîner une perte de bétail. En particulier, l'incidence sur la productivité animale de l'augmentation de la variabilité des situations météorologiques sera *probablement* bien supérieure aux effets liés aux changements des conditions climatiques moyennes. Les pertes catastrophiques les plus fréquentes dues à un manque de conditionnement préalable aux phénomènes météorologiques se produisent dans les terrains d'élevage confinés, les pertes économiques découlant d'une diminution de la performance du bétail étant plusieurs fois supérieures aux pertes par mort de bétail. [GT II 5.4.3.1]

De nombreux parcours dans le monde sont influencés par les épisodes d'*El Niño*-oscillation australe (ENSO). Lors de sécheresses liées à ces épisodes, les régions sèches sont exposées à une rétroaction positive entre la dégradation des sols et de la végétation, et les réductions des précipitations, avec des conséquences en termes de perte de terres pastorales et cultivées. [GT II 5.4.3.1] Cependant, alors que, dans sa contribution au troisième Rapport d'évaluation, le Groupe de travail I a indiqué la probabilité accrue d'une augmentation de la fréquence du phénomène ENSO avec le changement climatique, dans sa contribution au quatrième Rapport d'évaluation, le Groupe de travail n'a pas trouvé de corrélation entre le phénomène ENSO et le changement climatique. [GT I TRE RiD; GT I 10.3.5.4]

Une étude portant sur des données expérimentales dans le monde entier laisse à penser qu'un faible réchauffement augmente généralement la productivité des pâturages, les réponses positives les plus nettes correspondant aux latitudes élevées, et que la productivité et la composition des espèces végétales dans les parcours sont en corrélation étroite avec les précipitations. De surcroît, des résultats récents (voir figure 4.1) laissent envisager une diminution des précipitations dans certaines des principales régions de pâturage et de parcours (notamment l'Amérique du Sud, le sud et le nord de l'Afrique, l'ouest de l'Asie, l'Australie et le sud de l'Europe). [GT II 5.4.3.2]

Un CO_2 atmosphérique élevé peut réduire l'appauvrissement en eau des sols dans divers pâturages indigènes et semi-indigènes méditerranéens et tempérés. Cependant, si elles viennent s'ajouter au changement climatique, l'augmentation de la variabilité des précipitations et la

hausse de la température pourraient engendrer des restrictions d'humidité du sol plus sévères, et donc une réduction de la productivité qui viendrait compenser les avantages du CO_2. D'autres incidences sur le bétail agissent directement via l'augmentation de la charge thermique. [GT II 5.4.3.2]

4.2.3.3 Pêcheries

Les incidences négatives du changement climatique sur l'aquaculture et les pêcheries d'eau douce sont, entre autres: le stress dû à une augmentation de la température et de la demande en oxygène et à une diminution du pH, les incertitudes quant à la qualité et au volume de l'eau dans l'avenir, les phénomènes météorologiques extrêmes, l'augmentation de la fréquence des maladies et des épisodes toxiques, l'élévation du niveau de la mer et les conflits d'intérêts avec la protection du littoral, l'incertitude quant à l'approvisionnement futur en farines et huiles de poisson issues des pêches de capture. Une étude de cas des divers stress pouvant affecter les pêcheries dans les pays en développement est présentée dans l'encadré 4.1. [GT II 5.4.6.1]

Les incidences positives incluent une augmentation de la vitesse de croissance et de l'efficacité de conversion de la nourriture, un allongement de la période de croissance, l'extension des territoires et l'utilisation de nouvelles zones du fait de la réduction de la couche de glace. [GT II 5.4.6.1]

4.2.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

La gestion de l'eau est un volet critique qui doit s'adapter en vue des contraintes climatiques et socioéconomiques des décennies à venir. Les changements de la consommation d'eau découleront des effets combinés des changements de

Encadré 4.1: Changement climatique et pêcheries dans la partie inférieure du Mékong: un exemple des multiples stress dus à l'activité humaine dans un système de pêcheries de mégadelta [GT II encadré 5.3]

Les pêcheries sont essentielles pour la vie des personnes, en particulier pour les populations pauvres des zones rurales qui habitent dans les pays de la partie inférieure du Mékong. Deux tiers des 60 millions de personnes vivant dans ce bassin participent de près ou de loin aux pêcheries, qui représentent près de 10 % du PIB du Cambodge et de la République démocratique populaire lao. On dénombre environ 1 000 espèces de poissons dans ce fleuve, en sus des nombreuses espèces marines vagabondes, ce qui en fait l'une des faunes les plus prolifiques et variées du monde (MRC, 2003). Les estimations récentes des prises annuelles effectuées par les pêches de capture uniquement dépassent les 2,5 millions de tonnes (Hortle et Bush, 2003), dont 30 % provenant du delta.

Les effets directs du changement climatique auront pour origine le changement de la configuration des précipitations, de la fonte des neiges et de l'élévation du niveau de la mer, qui affecteront l'hydrologie et la qualité de l'eau. Les effets indirects résulteront d'un changement de la configuration végétale qui pourrait altérer la chaîne alimentaire et augmenter l'érosion des sols. Il est probable que les incidences humaines sur les pêcheries (provoquées par la croissance démographique, l'atténuation des crues, l'augmentation des prélèvements d'eau, les changements d'affectation des terres et la surexploitation de la pêche) seront plus importantes que les effets climatiques, mais les contraintes sont étroitement liées.

Une analyse de l'incidence des scénarios du changement climatique sur le débit du Mékong (Hoanh *et al.*, 2004) a estimé que le débit mensuel maximal augmenterait de 35 à 41 % dans le bassin et de 16 à 19 % dans le delta (la valeur la plus basse correspondant aux années 2010 à 2038 et la valeur la plus élevée aux années 2070 à 2099, par rapport aux niveaux de 1961 à 1990). Le débit mensuel minimum devrait diminuer entre 17 et 24 % dans le bassin et entre 26 et 29 % dans le delta. Une augmentation des inondations serait bénéfique pour les rendements des pêcheries, mais une diminution des habitats en saison sèche pourrait diminuer le recrutement de certaines espèces. Cependant, les interventions de gestion planifiée de l'eau, principalement sous forme de barrages, devraient avoir des effets opposés sur l'hydrologie, à savoir diminuer légèrement les débits de saison humide et augmenter considérablement les débits de la saison sèche (Banque mondiale, 2004b).

Les modèles indiquent que même une légère élévation du niveau de la mer de 20 cm entraînerait un décalage des lignes de contour des niveaux d'eau dans le delta du Mékong de 25 km vers l'intérieur des terres pendant la saison des crues, et la remontée de l'eau de mer vers l'amont des rivières (même si elle est confinée dans des canaux) pendant la saison sèche (Wassmann *et al.*, 2004). Le déplacement de l'eau de mer vers l'intérieur des terres modifierait significativement la composition des espèces des pêcheries, mais ne nuirait pas à leurs rendements globaux.

la disponibilité en eau, des changements de la demande en eau des terres, ainsi que d'autres secteurs concurrents, notamment les zones urbaines, et des changements de gestion de l'eau.

Les pratiques qui augmentent la productivité de l'utilisation d'eau pour l'irrigation, définie comme la production des cultures par unité d'utilisation de l'eau, peuvent fournir un potentiel d'adaptation significatif pour tous les systèmes de production des terres dans le cadre du changement climatique à venir. En même temps, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de l'irrigation pour garantir la disponibilité en eau pour la production alimentaire et pour les besoins concurrents de l'homme et de l'environnement. [GT II 3.5.1]

Plusieurs études de simulation permettent d'envisager la possibilité d'avantages d'adaptation relatifs dans le secteur des terres avec un réchauffement faible à modéré, bien que plusieurs stratégies de réponse risquent d'aggraver le stress relatif à l'eau et à d'autres ressources de l'environnement au fur et à mesure du réchauffement. Les actions d'*adaptation autonome* sont définies comme des réponses qui seront mises en œuvre par des agriculteurs individuels, des communautés rurales et/ou des organisations d'agriculteurs, en fonction du changement climatique réel ou perçu dans les décennies à venir, et sans intervention ni coordination des gouvernements régionaux et nationaux, ni sans accords internationaux. C'est ainsi qu'une mauvaise adaptation, par exemple, la décision de cultiver des terres marginales ou l'adoption de pratiques culturales non durables lorsque les rendements chutent, peut augmenter la dégradation des terres et mettre en danger la biodiversité des espèces sauvages et domes tiques, et éventuellement mettre en péril la capacité future à répondre à un risque climatique croissant ultérieurement au cours du siècle. Une *adaptation planifiée*, incluant des changements de politiques, d'institutions et d'infrastructures dédiées, sera par conséquent nécessaire pour faciliter et maximiser les bénéfices à long terme des réponses d'adaptation au changement climatique. [GT II 5.5]

4.2.4.1 Adaptation autonome

Les solutions pour une adaptation autonome sont essentiellement des extensions ou des intensifications des activités existantes de gestion des risques et d'amélioration de la production, et sont donc déjà disponibles pour les agriculteurs et les communautés. En ce qui concerne l'eau, ces solutions comprennent:

- L'adoption de variétés ou d'espèces plus résistantes au choc thermique et à la sécheresse;
- La modification des techniques d'irrigation, y compris le volume, la périodicité ou la technologie;
- L'adoption de techniques d'utilisation rationnelle de l'eau pour la «capture» de l'eau, la conservation de l'humidité du sol (par exemple, la rétention des résidus de culture), et la diminution de l'envasement et de l'intrusion d'eau salée;
- L'amélioration de la gestion de l'eau pour éviter l'engorgement, l'érosion et le lessivage;
- La modification des calendriers culturaux, c'est-à-dire le calendrier ou le lieu des activités culturales;
- La mise en œuvre de prévisions climatiques saisonnières.

D'autres stratégies d'adaptation peuvent impliquer des changements d'affectation des terres, pour profiter de conditions agroclimatiques modifiées. [GT II 5.5.1]

Quelques études de simulation montrent l'importance de l'eau d'irrigation en tant que technique d'adaptation destinée à réduire les incidences du changement climatique. Cependant, en général, les projections suggèrent que le plus grand avantage relatif de l'adaptation devrait intervenir dans un contexte de réchauffement faible à modéré, et que les pratiques d'adaptation qui impliquent une augmentation de la consommation d'eau d'irrigation peuvent en réalité faire peser des contraintes supplémentaires sur les ressources aquatiques et environnementales au fur et à mesure de l'augmentation du réchauffement et de la demande d'évaporation. [GT II 5.8.1]

De nombreuses stratégies d'adaptation dans des secteurs essentiels de la production autres que l'agriculture ont également été explorées, bien qu'elles ne soient pas centrées directement sur des problèmes liés à l'eau. Les stratégies d'adaptation qui peuvent néanmoins influencer la consommation d'eau incluent, pour les systèmes d'élevage, un changement de la rotation des pâturages, une modification des périodes de pâture, une altération des espèces ou des races fourragères et animales, un changement de l'intégration dans les systèmes mixtes de cultures ou d'élevage, notamment l'utilisation de cultures fourragères adaptées, la garantie d'un approvisionnement en eau adéquat, ainsi que l'utilisation d'aliments complémentaires et de concentrats. Les stratégies d'adaptation des éleveurs des régions semi-arides et arides du Kenya et du sud de l'Éthiopie, sont abordées dans l'encadré 4.2. [GT II 5.4.7]

Les stratégies d'adaptation dans la sylviculture peuvent inclure des changements dans l'intensité de la gestion, le mélange des espèces, les périodes de rotation, l'adaptation à une modification de la dimension et de la qualité du bois, ainsi que l'adaptation des systèmes de gestion des incendies. [GT II 5.5.1]

En ce qui concerne les écosystèmes marins, hormis l'aquiculture et certaines pêcheries d'eau douce, l'exploitation des populations naturelles de poissons empêche une adaptation de la gestion au changement climatique recommandée pour les secteurs de l'agriculture, de l'élevage et de la sylviculture. Les solutions d'adaptation sont donc centrées sur la modification de l'étendue et de l'effort de capture. L'étendue des mesures d'adaptation autonome est de plus en plus restreinte du fait de l'application de nouvelles réglementations qui régissent l'exploitation des écosystèmes marins et des pêcheries. [GT II 5.5.1]

Si elles sont largement adoptées, les stratégies d'adaptation des systèmes de production ont un potentiel important pour contrecarrer les incidences négatives du changement

climatique et profiter des incidences positives. Cependant, peu d'évaluations ont porté sur l'efficacité et l'étendue de l'adoption de ces adaptations, étant donné la nature complexe de la prise de décisions, la diversité des réponses d'une région à l'autre, les délais de mise en œuvre et les éventuelles barrières économiques, institutionnelles et culturelles à surmonter. Par exemple, la capacité d'adaptation réalisable des communautés d'agriculteurs ou d'éleveurs à faibles moyens de subsistance est généralement considérée comme très faible. De même, de vastes superficies de forêt sont soumises à une gestion humaine directe minime, ce qui limite les opportunités d'adaptation. Même dans les forêts plus intensivement gérées, où les activités d'adaptation sont plus réalisables, des délais importants entre la plantation et la récolte peuvent compliquer l'adoption de stratégies d'adaptation efficaces. [GT II 5.1.1]

4.2.4.2 Adaptation planifiée

Les solutions d'adaptation planifiée devraient se concentrer sur le développement de nouvelles infrastructures, politiques et institutions qui soutiennent, facilitent, coordonnent et maximisent les avantages de nouvelles mesures de gestion et d'utilisation des terres. Cela peut être obtenu en général via une meilleure gouvernance, y compris la prise en compte du changement climatique dans des programmes de développement, l'augmentation des investissements dans des infrastructures d'irrigation et des techniques d'utilisation rationnelle de l'eau, la garantie d'infrastructures adéquates pour le transport et le stockage, la révision du régime foncier (notamment des droits de propriétés bien définis) et l'établissement de marchés accessibles et performants pour les produits, les apports (notamment des stratégies de tarification de l'eau) et les services financiers (dont l'assurance). [GT II 5.5]

Une adaptation planifiée et la coordination des politiques entre diverses institutions peuvent être nécessaires pour faciliter l'adaptation au changement climatique, en particulier lorsque la chute des rendements entraîne des contraintes qui poussent à cultiver des terres marginales ou à adopter des pratiques culturales non durables qui augmentent la dégradation des terres et l'utilisation des ressources, dont l'eau. [GT II 5.4.7]

Un certain nombre d'évaluations d'adaptation à l'échelle mondiale, nationale et du bassin montrent que, en général, les bassins semi-arides et arides sont les plus vulnérables au stress hydrique. Si les précipitations diminuent, la demande en eau d'irrigation ne permettra pas de satisfaire toutes les autres demandes. Les changements prévus pour l'écoulement fluvial dans les bassins du Sacramento-Joaquin et du fleuve Colorado indiquent que la demande en eau actuelle ne pourra pas être satisfaite à l'horizon 2020, même avec des pratiques de gestion adaptatives. Une utilisation accrue de

Encadré 4.2: Stratégies d'adaptation adoptées par les éleveurs du nord du Kenya et du sud de l'Éthiopie [GT II encadré 5.5]

En Afrique, l'élevage s'est adapté aux environnements rudes avec une très grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations (Ellis, 1995). Plusieurs études récentes (Ndikumana *et al.*, 2000; Hendy et Morton, 2001; Oba, 2001; McPeak et Barrett, 2001; Morton, 2006) ont été dédiées aux stratégies d'adaptation utilisées par les éleveurs lors des récentes sécheresses dans le nord du Kenya et le sud de l'Éthiopie, et aux adaptations à long terme sous-jacentes.

- La *mobilité* reste l'adaptation aux variations temporelles et spatiales des précipitations la plus importante adoptée par les éleveurs. Pendant les années de sécheresse, de nombreuses communautés utilisent des zones de pâturage de repli qui sont inutilisées lors des saisons sèches «normales» du fait de la distance, de contraintes liées au régime foncier et de problèmes de maladies animales ou de conflits. Cependant, l'invasion et l'individualisation des terres communales de pâturage, ainsi que le souhait de s'établir pour accéder aux services humains et à l'aide alimentaire, ont sévèrement limité la mobilité des éleveurs.
- Les éleveurs procèdent au *regroupement des troupeaux,* et de très nombreux indices laissent maintenant à penser qu'il s'agit là d'une forme rationnelle d'assurance contre la sécheresse.
- Une petite proportion d'éleveurs placent désormais une partie de leurs richesses sur des comptes en banque et d'autres utilisent des mécanismes d'épargne et de crédit officieux via des commerçants.
- Les éleveurs utilisent également des *compléments alimentaires* pour le bétail, achetés ou issus de l'ébranchage des arbres, en tant que stratégie d'adaptation. Ils intensifient leur *gestion des maladies animales* via des techniques indigènes et scientifiques. Ils paient pour *accéder à l'eau* via des forages électriques.
- La *diversification des moyens de subsistanc*e dans cette région s'oriente principalement vers des activités à bas revenus ou non durables vis-à-vis de l'environnement, telle la production de charbon, plutôt que vers des stratégies d'adaptation visant à réduire la vulnérabilité préalablement.
- Un certain nombre de *mécanismes intracommunautaires* assurent aux populations démunies un accès aux produits de l'élevage et à l'exploitation d'animaux vivants. Ces mécanismes semblent cependant se dégrader du fait de risques covariables élevés au sein des communautés.

l'irrigation réduirait à la fois le ruissellement et l'écoulement vers l'aval (Eheart et Tornil, 1999). [GT II 3.5.1]

Les politiques visant à récompenser les améliorations de l'efficacité de l'irrigation, via des mécanismes de marché ou un développement de la réglementation et une meilleure gouvernance, représentent un outil important pour améliorer la capacité d'adaptation à l'échelle régionale. Les conséquences involontaires pourraient être une augmentation de la consommation d'eau en amont, les utilisateurs en aval étant privés d'une eau qui serait retournée au cours d'eau sous forme de restitution (Huffaker, 2005). [GT II 3.5.1]

En sus des techniques déjà disponibles actuellement pour les agriculteurs et les gestionnaires des terres, il est nécessaire de proposer de nouvelles solutions techniques via une recherche dédiée et des efforts de développement. Ces solutions doivent être planifiées et mises en œuvre dès à présent, afin d'augmenter la capacité globale à répondre au changement climatique dans les décennies à venir. Les solutions techniques visant à étendre la recherche-développement incluent la sélection traditionnelle et la biotechnologie pour améliorer la résistance des espèces cultivées et fourragères, du bétail, des forêts et des poissons des pêcheries aux stress climatiques, tels que la sécheresse et les inondations (encadré 4.3).

Encadré 4.3: La biotechnologie facilitera-t-elle l'adaptation agricole et forestière? [GT II encadré 5.6]

La biotechnologie et la sélection traditionnelle peuvent permettre de développer de nouveaux cultivars dotés de qualités améliorées et mieux adaptés aux conditions du changement climatique. Ces qualités sont la résistance au stress dû à la sécheresse et aux températures, ainsi que la résistance aux parasites, à la salinité et à l'engorgement. Des adaptations supplémentaires recherchées dans les nouveaux cultivars sont des changements de phénologie ou des réponses améliorées à une concentration élevée en CO_2. En ce qui concerne l'eau, un certain nombre d'études se sont penchées sur les modifications génétiques des principales espèces cultivées (notamment, le maïs et le soja), qui augmentent la tolérance au déficit en eau (telles qu'examinées par Drennen *et al*., 1993; Kishor *et al*., 1995; Pilon-Smits *et al*., 1995; Cheikh *et al*., 2000) même si cette propriété ne s'étend pas à l'ensemble des plantes cultivées. En général, on n'en sait actuellement pas assez sur la manière dont les qualités désirées obtenues par modification génétique se réalisent dans les applications agricoles et forestières réelles (Sinclair et Purcell, 2005).

4.2.4.3 Sécurité alimentaire et vulnérabilité

Les quatre dimensions de la sécurité alimentaire, à savoir, la disponibilité alimentaire (production et commerce), l'accès aux aliments, la stabilité des approvisionnements alimentaires et l'utilisation des aliments (processus réels impliqués dans la préparation et la consommation d'aliments) seront *probablement* affectées par le changement climatique. Fait important, la sécurité alimentaire dépendra non seulement des incidences climatiques et socioéconomiques sur la production alimentaire, mais également (et de manière critique) sur les changements des flux commerciaux, des stocks et de la politique de l'aide alimentaire. En particulier, le changement climatique entraînera des incidences mixtes et géographiquement variables sur la production des aliments, et donc sur l'accès aux aliments. Les pays tropicaux en développement, dont beaucoup disposent de faibles ressources en terres et en eau et qui sont déjà confrontés à une grave insécurité alimentaire, pourraient être particulièrement vulnérables au changement climatique. [GT II 5.6.5]

Les changements de fréquence et d'intensité des sécheresses et des inondations affecteront la stabilité des approvisionnements alimentaires critiques et leur accès. Les déficits de pluie peuvent réduire considérablement les rendements des cultures et le nombre de têtes de bétail dans les régions tropicales semi-arides. L'insécurité alimentaire et la perte de moyens de subsistance seraient aggravées par la perte de terres cultivées et de nourriceries littorales suite à l'inondation et à l'érosion du littoral dans les régions basses. [GT II 5.6.5]

Le changement climatique peut également affecter l'utilisation des aliments via des incidences sur les ressources environnementales, avec des conséquences supplémentaires importantes pour la santé. [GT II chapitre 8] Par exemple, une diminution de la disponibilité en eau dans les régions déjà pauvres en eau, en particulier les régions subtropicales, a des répercussions négatives directes sur la transformation et la consommation des aliments. En revanche, le risque accru d'inondation des établissements humains dans les régions côtières dû à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation des fortes précipitations peut augmenter la contamination des aliments et les maladies, et restreindre les habitudes de consommation. [GT II 5.6.5]

4.2.4.4 Problèmes liés à la qualité de l'eau

Dans les pays en développement, la qualité microbiologique de l'eau est médiocre du fait du manque d'assainissement, de l'absence de procédés de traitement adéquats et de conditions sanitaires médiocres (Lipp *et al*., 2001; Jiménez, 2003; Maya *et al*., 2003; OMS, 2004). Le changement climatique pourrait imposer des contraintes supplémentaires sur la qualité de l'eau, en particulier dans les pays en développement (Magadza, 2000; Kashyap, 2004; Pachauri, 2004). À l'heure actuelle, aucune étude ne s'est encore

penchée sur les cycles de vie des micro-organismes dans les pays en développement dans un contexte de changement climatique, notamment sur les effets de la consommation d'eaux usées mal traitées pour l'irrigation et ses liens avec les épidémies endémiques d'helminthiase (OMS/UNICEF, 2000). [GT II 3.4.4]

Environ 10 % de la population mondiale consomme des cultures irriguées avec des eaux usées non traitées ou mal traitées, surtout dans les pays en développement d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. Ce nombre devrait augmenter avec la croissance démographique et la demande alimentaire. [GT II 8.2.5] L'utilisation accrue d'eaux usées correctement traitées pour l'irrigation est donc une stratégie pour combattre tant la rareté de l'eau que certains problèmes de santé connexes. [GT II 3.4.4]

4.2.4.5 Communautés rurales, développement durable et conflits pour l'eau

La coopération transfrontalière dans le domaine de l'eau est reconnue comme une politique efficace et un outil de gestion qui permettrait d'améliorer la gestion de l'eau dans de vastes régions qui partagent des ressources communes. Le changement climatique et une demande en eau accrue dans les décennies à venir représenteront un défi supplémentaire pour de tels accords-cadres, en augmentant la probabilité de conflits au niveau local. Par exemple, des mesures unilatérales qui visent à s'adapter aux pénuries d'eau dues au changement climatique peuvent mener à une concurrence accrue pour les ressources en eau. De plus, des décalages dans la productivité des terres pourraient déboucher sur la mise en place d'un éventail de systèmes agricoles nouveaux ou modifiés nécessaires pour maintenir la production, et notamment des pratiques d'intensification. Ces dernières pourraient, à leur tour, entraîner des contraintes environnementales supplémentaires et provoquer une perte d'habitat, une réduction de la biodiversité, l'envasement, l'érosion et la dégradation des sols. [GT II 5.7]

Des incidences sur le commerce, sur le développement économique et environnemental et sur l'utilisation des terres pourraient également découler de mesures mises en œuvre pour remplacer les combustibles fossiles par des biocarburants, par exemple via le Plan d'action européen pour la biomasse. La production de biocarburants à grande échelle pose divers problèmes, concernant en particulier les besoins en engrais et en pesticides, le cycle des éléments nutritifs, le bilan énergétique, les incidences sur la biodiversité, l'hydrologie et l'érosion, les conflits avec la production d'aliments et le montant des subventions financières indispensables. En fait, les décennies à venir obligeront notamment à équilibrer la concurrence autour des terres et des matières premières nécessaires pour l'alimentation et pour les secteurs forestiers et énergétiques, par exemple en trouvant des solutions qui garantissent l'alimentation et le droit au développement rural à l'échelle locale tout en optimisant les besoins en matière d'énergie et d'atténuation des effets climatiques. [LULUCF 4.5.1]

En Amérique du Nord, les sécheresses pourraient augmenter à l'intérieur du continent et les zones de production pourraient se décaler vers le nord (Mills, 1994), en particulier en ce qui concerne la production de maïs et de soja (Brklacich *et al*., 1997). [GT II TRE 15.2.3.1] Au Mexique, des pertes de production pourraient être entraînées par les sécheresses, au fur et à mesure de la diminution des zones agroécologiques propices à la culture du maïs (Conde *et al*., 1997). [GT II TRE 14.2.2.1] Pour des raisons sociales, politiques, géographiques et environnementales, la sécheresse est un problème important dans toute l'Australie. Un changement climatique vers des conditions plus sèches dues à une diminution des précipitations et à une augmentation de la demande d'évaporation, pourrait conduire à déclarer un état de sécheresse plus fréquemment ou pour une durée plus longue dans le cadre de la politique australienne actuelle de lutte contre la sécheresse. [GT II TRE 12.5.6]

Les ressources en eau pour une consommation domestique, agricole et industrielle font partie des principales vulnérabilités de l'Afrique. Dans des bassins fluviaux communs, des protocoles de coopération régionale sont nécessaires pour réduire le plus possible les incidences négatives et le risque de conflit. Par exemple, la superficie du lac Tchad varie de 20 000 km^2 pendant la saison sèche à 50 000 km^2 pendant la saison des pluies. Tandis que des frontières précises ont été définies entre le Tchad, le Nigéria, le Cameroun et le Niger, des secteurs de ces frontières qui sont situés dans les rivières qui se déversent dans le lac Tchad n'ont jamais été définis et des complications supplémentaires surviennent lors des inondations et des décrues. Des problèmes similaires entre le Botswana et la Namibie autour du fleuve Kovango ont provoqué une confrontation militaire. [GT II TRE 10.2.1.2]

La rareté croissante de l'eau, l'augmentation de la population, la dégradation des écosystèmes d'eau douce partagés et des demandes concurrentes pour des ressources naturelles en diminution, réparties dans une région si vaste qui concerne de nombreux pays, sont susceptibles de générer des conflits bilatéraux et multilatéraux. En Afrique semi-aride, l'élevage est la principale activité économique, les communautés d'éleveurs incluant des migrants transnationaux à la recherche de nouveaux pâturages saisonniers. Dans des conditions de sécheresse, ces éleveurs pourraient entrer en conflit avec les systèmes agraires sédentaires. [GT II TRE 10.2.1.2]

L'Asie domine l'aquiculture mondiale, la Chine produisant à elle seule près de 70 % des poissons, crevettes et crustacés d'élevage (FAO, 2006). Le poisson, importante source de protéines alimentaires, est indispensable pour la sécurité alimentaire dans de nombreux pays d'Asie, en particulier pour les communautés pauvres des régions côtières. L'élevage de

poissons nécessite des terres et de l'eau, deux ressources qui sont déjà rares dans de nombreux pays d'Asie. La dérivation des eaux vers des bassins d'élevage de crevettes a nettement abaissé les niveaux des eaux souterraines dans les régions côtières de la Thaïlande. [GT II TRE 11.2.4.4]

L'Asie abrite au moins 14 grands bassins versants de fleuves internationaux. La gestion des bassins versants est problématique dans les pays à forte densité démographique, qui sont souvent responsables de l'utilisation des zones même les plus fragiles et inadaptées des bassins versants à des fins de culture, d'habitation et d'autres activités intensives. Par conséquent, dans de nombreux pays, notamment le Bangladesh, le Népal, les Philippines, l'Indonésie et le Viet Nam, un grand nombre de bassins souffrent énormément du déboisement, d'une conversion inconsidérée des terres, d'une érosion excessive des sols et du déclin de la productivité des terres. En l'absence de stratégies d'adaptation adéquates, ces bassins versants sont très vulnérables au changement climatique. [GT II TRE 11. 2.3.2]

4.2.4.6 Atténuation

Les mesures d'adaptation et d'atténuation peuvent intervenir simultanément dans le secteur agricole et forestier; leur efficacité dépendra de la configuration réelle du changement climatique dans les décennies à venir. Les interactions entre ces facteurs (changement climatique, adaptation et atténuation) impliqueront fréquemment les ressources en eau. [GT III 8.5, tableau 8.9]

Les stratégies d'adaptation et d'atténuation peuvent créer des synergies, dans lesquelles chaque action renforce l'autre, ou s'annuler mutuellement. En ce qui concerne l'eau, des exemples de stratégies d'adaptation qui limitent l'efficacité des solutions d'atténuation impliquent grandement l'irrigation, en termes de coûts énergétiques de la fourniture de l'eau et d'émissions supplémentaires de gaz à effet de serre pouvant être liées à des pratiques culturales modifiées. L'utilisation d'énergie renouvelable pour l'extraction et la distribution de l'eau pourrait cependant résoudre ce conflit. De même, certaines stratégies d'atténuation pourraient avoir des conséquences négatives pour l'adaptation, par exemple l'augmentation de la dépendance aux cultures dédiées à l'énergie, qui peuvent entrer en concurrence pour les ressources en eau, réduire la biodiversité et donc augmenter la vulnérabilité aux extrêmes climatiques. [GT III 12.1.4, 12.1.4]

D'un autre côté, de nombreuses pratiques de piégeage du carbone impliquant une réduction du labour, une augmentation de la superficie cultivée et l'utilisation de systèmes de rotation améliorés, constituent en soi de bonnes pratiques en agrosylviculture (et elles ont été initialement développées en tant que telles) qui rendent les systèmes de production plus résilients à la variabilité climatique, et donc permettent une bonne adaptation dans un contexte d'augmentation des contraintes sur l'eau et les ressources du sol (Rosenzweig et Tubiello, 2007). [GT II 5.4.2; GT III 8.5]

4.3 Santé humaine

4.3.1 Contexte

La santé humaine, qui englobe le bien-être physique, social et psychologique, dépend d'un approvisionnement adéquat en eau potable et d'un environnement sûr. Les êtres humains sont directement exposés au changement climatique via des configurations météorologiques (phénomènes extrêmes plus intenses et plus fréquents), et indirectement via des changements de l'eau, de l'air, de la qualité et de la quantité des aliments, des écosystèmes, de l'agriculture, des moyens de subsistance et des infrastructures. [GT II 8.1.1] En raison du très grand nombre de personnes risquant d'être touchées, la malnutrition et la rareté de l'eau pourraient être les conséquences les plus importantes du changement climatique sur la santé (voir paragraphes 4.2 et 4.4). [GT II 8.4.2.3]

La santé des populations s'est remarquablement améliorée au fil des 50 dernières années, mais il persiste des inégalités substantielles d'un pays à l'autre et au sein même des pays. Il est *improbable* que les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) visant à réduire de deux tiers le taux de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans d'ici 2015 ne soient atteints dans certains pays en développement. Une santé médiocre augmente la vulnérabilité et réduit la capacité des individus et des groupes à s'adapter au changement climatique. Les populations aux taux élevés d'occurrence des maladies et de handicaps résistent moins bien aux stress de toutes sortes, y compris ceux liés au changement climatique. [GT II 8.1.1]

Le Programme conjoint de surveillance de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et du Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF) estime actuellement à 1,1 milliard de personnes (17 % de la population mondiale) la population dépourvue d'un accès aux ressources en eau, l'accès étant défini comme la disponibilité d'au moins 20 litres d'eau par personne et par jour à partir d'une source d'eau améliorée, dans un rayon d'un kilomètre. Une source d'eau améliorée est une source d'eau «sûre», telle un raccordement domestique ou un trou de forage. Près des deux tiers des personnes dépourvues d'accès à l'eau vivent en Asie. En Afrique subsaharienne, 42 % de la population n'a pas accès à de l'eau améliorée. L'OMS estime qu'au total, les maladies dues à un approvisionnement en eau inadéquat, ainsi qu'à un assainissement et une hygiène médiocres tuent 1,7 million de personnes par an. Les résultats sanitaires liés à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement sont un point essentiel des préoccupations en matière de changement climatique dans de nombreux pays. Dans les

régions vulnérables, la concentration des risques concernant l'insécurité alimentaire et hydrique peut rendre l'incidence d'un phénomène météorologique extrême (par exemple, les crues et la sécheresse) particulièrement grave pour les foyers touchés. [GT II 9.2.2]

Les changements des extrêmes climatiques sont susceptibles d'entraîner des incidences graves sur la santé humaine. Les inondations devraient devenir de plus en plus importantes avec le changement climatique, ce qui aura des répercussions sur la santé humaine. La vulnérabilité aux inondations est réduite lorsqu'il existe des infrastructures permettant de supprimer les déchets solides, de gérer les eaux usées et de fournir de l'eau potable. [GT II 8.2.2]

Le manque d'eau pour l'hygiène est actuellement responsable d'une morbidité significative dans le monde entier. Une petite partie non quantifiée de cette morbidité peut être attribuée à la variabilité ou aux extrêmes climatiques. La «pénurie d'eau» est liée à de multiples résultats sanitaires négatifs, notamment les maladies associées à l'eau contaminée par des matières fécales et d'autres substances dangereuses (par exemple, des parasites).

La mortalité et la morbidité infantiles imputables à la diarrhée restent élevées dans les pays à faibles revenus, en particulier en Afrique subsaharienne, malgré les améliorations apportées aux soins et le traitement de réhydratation par voie orale. Le changement climatique devrait aggraver la pénurie d'eau, mais il est difficile d'évaluer ce que cela représente au niveau du foyer pour ce qui est de la disponibilité en eau, et donc pour la santé et l'hygiène. Il n'existe pas d'informations liant la modélisation à grande échelle du changement climatique à des incidences à petite échelle, au niveau de la population ou du foyer. De plus, toute évaluation des incidences futures sur la santé via des changements de disponibilité en eau doit tenir compte des améliorations futures de l'accès à de l'eau «sûre». [GT II 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.1.1 Implications pour la qualité de l'eau potable

La relation qui existe entre les précipitations, l'écoulement fluvial et la contamination de l'approvisionnement en eau est très complexe, comme indiqué ci-après en ce qui concerne les approvisionnements en eau courante et le contact direct avec les eaux de surface. Si l'écoulement fluvial diminue du fait de précipitations réduites, sa capacité à diluer les effluents est également réduite, ce qui entraîne donc une augmentation de la charge en agents pathogènes ou en substances chimiques. Cela pourrait augmenter le risque humain ou, dans le cas d'approvisionnements en eau courante, la charge des stations de traitement de l'eau. Au cours de l'été sec de 2003, les faibles débits aux Pays-Bas ont entraîné une modification apparente de la qualité de l'eau (Senhorst et Zwolsman, 2005). La saisonnalité marquée des épidémies de choléra en Amazonie est associée à un faible écoulement fluvial pendant la saison sèche (Gerolomo et Penna, 1999), probablement du fait d'une grande concentration d'agents pathogènes dans les bassins. [GT II 8.2.5]

La gestion des eaux du drainage et d'orage est importante dans les communautés urbaines à faibles revenus, car les canalisations bouchées peuvent entraîner des inondations et une augmentation de la transmission de maladies à vecteur (Parkinson et Butler, 2005). Les villes disposant de déversoirs d'orage peuvent subir une plus grande contamination des systèmes d'assainissement pendant les épisodes de crues. [GT II 8.2.5]

Dans les pays à revenus élevés, les épisodes de chutes de pluie et de ruissellement peuvent augmenter la charge microbienne totale dans les cours d'eau et les réservoirs d'eau potable, bien que le lien avec des cas de maladies humaines soit incertain du fait que la concentration de contaminants est diluée. La contamination saisonnière de l'eau de surface au début du printemps en Amérique du Nord et en Europe peut, en partie, expliquer la saisonnalité des cas sporadiques de maladies à transmission hydrique telles la cryptosporidiose et la campylobactériose. Une proportion importante des épidémies de maladies d'origine hydrique rapportées est liée à des épisodes de précipitations intenses, souvent concomitants avec des échecs de traitement. [GT II 14.2.5, 8.2.5]

Les fleurs d'eau toxiques des eaux douces génèrent des toxines susceptibles de provoquer des maladies humaines. La survenue de telles fleurs d'eau à la surface de l'eau (rivières et lacs) peut augmenter avec une hausse de la température. Cependant, le risque pour la santé humaine est très faible car le contact direct avec les fleurs d'eau est généralement limité. Les toxines des algues risquent peu de contaminer les approvisionnements en eau, mais les implications pour la santé humaine sont incertaines. [GT II 8.2.4, 3.4.4]

Dans les régions où les infrastructures d'approvisionnement en eau sont médiocres, la transmission d'entéropathogènes est plus élevée pendant la saison des pluies. De plus, on a découvert que des températures plus élevées sont liées à une augmentation des épisodes de maladies diarrhéiques (Checkley *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2001; Vasilev, 2003; Lama *et al.*, 2004). L'incidence sous-jacente de ces maladies est associée à une mauvaise hygiène et au manque d'accès à une eau sûre. [GT II 8.2.5]

4.3.1.2 Catastrophes naturelles, y compris les tempêtes de vent et les crues

Les sections précédentes ont décrit comment le changement climatique influencera le risque des catastrophes liées à l'eau, y compris les crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF), l'augmentation de l'intensité des ondes de tempête et les changements du risque de crues (voir paragraphe 3.2), notamment les crues soudaines et les inondations urbaines,

avec quelques réductions du risque de crues liées à la fonte de la neige au printemps. [GT II 3.4.3] Les crues ont une incidence considérable sur la santé, qu'il s'agisse du nombre de décès, du poids des maladies ou des dommages aux infrastructures sanitaires. [GT II 8.2.2] Tandis que le risque de maladies infectieuses suite à des inondations est généralement faible dans les pays à revenus élevés, les populations dotées d'infrastructures médiocres et qui connaissent une morbidité élevée due aux maladies infectieuses voient souvent augmenter les cas de maladies diarrhéiques après des épisodes de crues. Les preuves de l'incidence des catastrophes liées au climat sur la santé mentale sont de plus en plus nombreuses, les personnes ayant subi les effets de crues souffrant durablement d'anxiété et dépression. [GT II 8.2.2, 16.4.5]

Les inondations et les chutes de pluie intenses peuvent entraîner la contamination de l'eau par des produits chimiques, des métaux lourds ou d'autres substances dangereuses, provenant de stocks ou de substances chimiques déjà présentes dans l'environnement (notamment, les pesticides). L'augmentation de la densité démographique et du développement industriel dans des régions sujettes à des catastrophes naturelles entraîne l'augmentation de la probabilité de catastrophes futures et le risque d'une exposition humaine massive à des matériaux dangereux au cours de ces épisodes. [GT II 8.2.2]

4.3.1.3 Sécheresse et maladies infectieuses

Quelques maladies infectieuses ont un lien reconnu avec la pluie, mais pas avec la consommation d'eau potable (qualité ou quantité) ni avec des vecteurs arthropodes. La répartition spatiale, l'intensité et la saisonnalité de la méningite à méningocoques (épidémique) dans la région du Sahel, en Afrique, sont liées à des facteurs climatiques et environnementaux, en particulier la sécheresse, bien que le mécanisme causal ne soit pas bien compris. La distribution géographique de la méningite s'est étendue en Afrique de l'Ouest au cours des dernières années, ce qui peut être attribué à un changement environnemental dû à des changements d'affectation des terres et à un changement climatique régional. [GT II 8.2.3.1]

4.3.1.4 Tempêtes de poussière

La poussière portée par le vent provenant des régions désertiques d'Afrique, de la péninsule Arabique, du centre de l'Asie et de la Chine, peut affecter la qualité de l'air et la santé publique dans des régions éloignées. La poussière peut charrier une concentration élevée de particules respirables, d'éléments à l'état de traces qui peuvent affecter la santé humaine, des spores de champignons et des bactéries. [GT II 8.2.6.4]

4.3.1.5 Maladies à vecteur

Le climat influence la répartition dans l'espace, l'intensité de la transmission et la saisonnalité des maladies transmises par des vecteurs (notamment le paludisme) et des maladies dont l'hôte intermédiaire est un mollusque aquatique (notamment la schistosomiase). [GT II 8.2.8] Pendant les sécheresses, l'activité du moustique est réduite, mais si la transmission chute significativement, le nombre d'individus non immunisés peut alors augmenter. Sur le long terme, l'incidence des maladies transmises par les moustiques telles que le paludisme diminue par suite de la diminution de l'abondance des moustiques, même si des épidémies peuvent survenir encore lorsque les conditions climatiques sont propices. [GT II 8.2.3.1]

La distribution de la schistosomiase, maladie parasitaire liée à l'eau dont l'hôte intermédiaire est un mollusque aquatique, est influencée en certains endroits par des facteurs climatiques. Par exemple, le changement observé dans la distribution de cette maladie en Chine au cours de la dernière décennie peut refléter, en partie, la tendance récente au réchauffement. Les programmes d'irrigation augmentent également l'incidence de cette maladie, lorsque les mesures de contrôle adéquates ne sont pas mises en place. [GT II 8.2.8.3]

4.3.2 Observations

L'éventail des éléments moteurs pouvant influencer et modifier l'incidence du changement climatique sur la santé humaine est vaste. Étant donné la complexité de l'association qui existe entre les facteurs climatiques et les maladies, il n'est souvent pas possible d'attribuer des changements de configuration d'une maladie spécifique à des changements climatiques observés. De plus, les séries de données sanitaires d'une qualité et d'une durée suffisantes sont rarement disponibles pour de telles analyses. Aucune étude publiée sur les incidences liées à l'eau sur la santé ne décrit des configurations de maladies solidement attribuées à un changement climatique observé. Cependant, il existe plusieurs rapports sur les réponses adaptatives visant à réduire les incidences du changement climatique dans le secteur de l'eau. [GT II chapitre 7]

Les tendances observées des catastrophes liées à l'eau (crues, tempêtes de vent) et le rôle du changement climatique sont abordés ailleurs. [GT II 1.3]

4.3.3 Projections

Il est prévu que le changement climatique ait un éventail d'effets négatifs sur les populations dans les régions où les infrastructures d'approvisionnement en eau et d'assainissement ne peuvent pas satisfaire les besoins locaux. L'accès à une eau sûre reste un problème sanitaire extrêmement important à l'échelle mondiale. Plus de deux milliards de personnes vivent dans les régions sèches du monde, et ces personnes souffrent plus que les autres de malnutrition, de mortalité infantile et de maladies liées à de l'eau

contaminée ou insuffisante. La rareté de l'eau représente une contrainte sérieuse pour le développement durable (Rockstrom, 2003). [GT II 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Des systèmes médiocres de santé publique et un accès limité à des soins de santé primaires contribuent à la grande vulnérabilité et la faible capacité d'adaptation de centaines de millions de personnes. [GT II 8.6] Il existe des contraintes fondamentales dans des pays à faibles revenus, où la santé publique dépend d'améliorations dans les secteurs de la santé, de l'eau, de l'agriculture, des transports, de l'énergie et du logement. La pauvreté et une gouvernance faible sont les obstacles les plus importants pour une adaptation efficace. Malgré la croissance économique, les pays à faibles revenus resteront *probablement* vulnérables à moyen terme, car ils disposent de moins de solutions que les pays à hauts revenus pour s'adapter au changement climatique. C'est pourquoi, pour qu'elles soient efficaces, les stratégies d'adaptation doivent être conçues dans le contexte des politiques de développement, d'environnement et de santé publique mises en œuvre dans les régions concernées. De nombreuses solutions utilisables pour réduire une vulnérabilité future sont utiles pour s'adapter au climat actuel et peuvent être mises à profit pour atteindre d'autres objectifs environnementaux et sociaux. [GT II 8.6.3]

Les éventuels effets négatifs pour la santé d'une quelconque stratégie d'adaptation doivent être évalués avant son application. Par exemple, on a montré que la construction d'un micro-barrage et la mise en place de programmes d'irrigation peuvent augmenter la mortalité locale liée au paludisme. [GT II 8.6.4] Les mesures prévues pour lutter contre la pénurie d'eau, telles que la réutilisation d'eaux usées non traitées ou partiellement traitées pour l'irrigation, peuvent également avoir des conséquences sur la santé humaine. L'irrigation est actuellement déterminante pour la propagation de maladies infectieuses telles que le paludisme et la schistosomiase (Sutherst, 2004). Des directives strictes de qualité pour l'irrigation avec des eaux usées sont prévues pour limiter les risques sanitaires venant des organismes pathogènes, et pour garantir la qualité des cultures (Steenvoorden et Endreny, 2004). Certaines maladies, telles que l'helminthiase, sont transmises par la consommation des cultures irriguées avec des eaux polluées ou usées et, dans les zones rurales et périurbaines de la plupart des pays à faibles revenus, l'utilisation d'eaux d'égouts ou d'eaux usées pour l'irrigation (une pratique commune) est une source de transmission de maladies par voie féco-orale. Actuellement, au moins un dixième de la population mondiale consomme des cultures irriguées avec des eaux usées. Cependant, l'augmentation de la pénurie d'eau et de la demande alimentaire, couplée à un assainissement médiocre, va encourager l'utilisation d'une eau de mauvaise qualité. Afin de contrôler de tels problèmes, il est nécessaire de développer des programmes de traitement des eaux usées et de réutilisation planifiée de celles-ci. [GT II 8.6.4, 3.4.4]

4.4 Alimentation en eau et assainissement

Les effets observés du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources en eau ont été abordés en détail dans les paragraphes 4.2 et 4.3. Le présent paragraphe résume les principaux points et décrit leurs implications pour les services d'alimentation en eau et d'assainissement.

4.4.1 Contexte

Les statistiques sur l'accès actuel à une eau sûre ont déjà été indiquées dans le paragraphe 4.3.1. L'accès à une eau sûre est actuellement considéré comme un droit de l'homme universel. Cependant, le monde est confronté à une augmentation des problèmes liés à la fourniture de services hydrologiques, en particulier dans les pays en développement. Les raisons sont diverses et ne sont pas nécessairement liées au changement climatique. Un manque de disponibilité en eau, une demande en eau accrue et plus irrégulière résultant de la croissance démographique dans des zones concentrées, une augmentation de l'urbanisation, une utilisation plus intensive de l'eau pour améliorer le bien-être général, et le défi d'améliorer la gouvernance de l'eau sont déjà autant d'obstacles majeurs à la fourniture satisfaisante de services hydrologiques. Dans ce contexte, le changement climatique représente tout simplement une charge supplémentaire pour les services d'approvisionnement en eau ou pour tout organisme fournisseur de services hydrologiques souhaitant satisfaire la demande des clients. Il est difficile d'identifier localement les effets du changement climatique, mais les effets observés combinés à des projections fournissent une base utile pour préparer le futur.

4.4.2 Observations

Le tableau 4.1 résume les éventuels liens existant entre le changement climatique et les services hydrologiques.

4.4.3 Projections

Une *réduction de la disponibilité en eau* peut être causée par:

a) Une diminution de l'écoulement dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent et une augmentation de la durée et de la fréquence des saisons sèches;
b) Une diminution des précipitations en été qui entraîne une réduction de l'eau stockée dans les réservoirs alimentés par des rivières saisonnières (du Plessis *et al.*, 2003);

Tableau 4.1: *Effets observés du changement climatique et incidences observées/possibles sur les services hydrologiques. [GT II chapitre 3]*

Effet observé	Incidences observées/possibles
Augmentation de la température atmosphérique	• Réduction de la disponibilité en eau dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent, comme observé dans des villes dans les Andes en Amérique du Sud (Ames, 1998; Kaser et Osmaston, 2002)
Augmentation de la température de l'eau de surface	• Réductions de la teneur en oxygène dissous, des configurations de mélange et de la capacité d'auto-épuration • Augmentation des fleurs d'eau
Élévation du niveau de la mer	• Salinisation des aquifères côtiers
Décalage du régime des précipitations	• Changement de la disponibilité en eau dû aux changements des précipitations et à d'autres phénomènes apparentés (notamment, l'alimentation des nappes souterraines et l'évapotranspiration)
Augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations	• Augmentation de la difficulté de la maîtrise des crues et de l'utilisation des réservoirs pendant la période des inondations
Augmentation de l'évapotranspiration	• Réduction de la disponibilité en eau • Salinisation des ressources en eau • Diminution du niveau des eaux souterraines
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes	• Les crues influencent la qualité de l'eau et l'intégrité des infrastructures de l'eau et augmentent l'érosion fluviale, ce qui introduit différentes sortes de polluants dans les ressources en eau • Les sécheresses influencent la disponibilité et la qualité de l'eau

c) Une variabilité interannuelle des précipitations et un décalage saisonnier de l'écoulement fluvial;
d) Une réduction du niveau des eaux souterraines à l'intérieur des terres;
e) Une augmentation de l'évapotranspiration suite à l'augmentation de la température de l'air, au prolongement de la période de croissance et à l'augmentation de la consommation d'eau pour l'irrigation;
f) La salinisation (Chen *et al*., 2004).

Selon les projections, le nombre de personnes risquant de souffrir d'une augmentation du stress hydrique sera compris entre 0,4 et 1,7 milliard à l'horizon 2020, entre 1,0 et 2,0 milliards à l'horizon 2050 et entre 1,1 et 3,2 milliards à l'horizon 2080 (Arnell, 2004), l'intervalle étant le résultat des différents scénarios SRES considérés. [GT II 3.2, 3.5.1]

Dans certaines régions, la faible disponibilité en eau entraînera une surexploitation des eaux souterraines qui s'accompagnera d'une augmentation des coûts de l'approvisionnement en eau quelle que soit l'utilisation, du fait de la nécessité de pomper l'eau de plus en plus profondément et loin. De surcroît, la surexploitation des eaux souterraines peut entraîner, dans certains cas, une dégradation de la qualité de l'eau. Dans certaines régions de l'Inde, du Bangladesh, de la Chine, du nord de l'Afrique, du Mexique et de l'Argentine, plus de 100 millions de personnes souffrent d'un empoisonnement à l'arsenic et de fluorose (maladie des dents ou des os consécutive à une consommation excessive de fluorure dans l'eau potable) (NU, 2003). Ce phénomène peut aggraver la situation si les personnes sont obligées d'utiliser davantage d'eau des nappes souterraines du fait que les sources d'eau de surface ne sont pas fiables. [GT II 3.4.4]

L'augmentation de la pénurie d'eau, combinée à la hausse de la demande alimentaire ou de la consommation d'eau pour l'irrigation du fait de la hausse de la température, entraînera *probablement* une augmentation de la réutilisation de l'eau. Les régions mal desservies par les infrastructures d'assainissement pourraient recourir à des pratiques (en tant que nouvelle activité ou à un degré plus important) de réutilisation incontrôlée de l'eau (réutilisation d'eau polluée ou même d'eaux usées). [GT II 3.3.2, 8.6.4]

Dégradation de la qualité de l'eau suite à la variation des débits. Lorsqu'une réduction des ressources en eau est prévue, la concentration en polluants de l'eau augmente du fait de la diminution de la capacité de dilution. [GT II 3.4.4, 14.4.1] En même temps, l'augmentation du débit déplace et transporte divers composés du sol vers les ressources en eau via l'érosion fluviale. [GT II 3.4]

De même, une augmentation des taux de morbidité et de mortalité par des maladies d'origine hydrique est attendue selon les scénarios qui prévoient davantage d'humidité et de sécheresse, du fait d'un approvisionnement insuffisant en eau potable (Kovats *et al*., 2005; Ebi *et al*., 2006), et la présence accrue d'agents pathogènes transportés par les débits accrus lors des extrêmes de précipitations. L'augmentation des précipitations peut également entraîner une plus grande turbidité et une hausse de la charge en éléments nutritifs de l'eau. Les services de l'eau de la ville de New York ont identifié des épisodes de chutes de pluie intenses comme étant l'une des plus grandes préoccupations liées au changement climatique, car ils peuvent augmenter la turbidité de certains des principaux réservoirs de la ville jusqu'à 100 fois la limite légale pour la qualité d'une source au niveau de l'admission, et ils nécessitent un traitement et des coûts de suivi supplémentaires conséquents (Miller et Yates, 2006). [GT II 3.5.1]

Augmentation du ruissellement. Dans certaines régions, la disponibilité en eau augmentera, ce qui sera généralement

avantageux compte tenu de la situation mondiale actuelle dans ce domaine. Cependant, il est nécessaire de prendre des dispositions pour que cela reste avantageux à l'échelle mondiale. Par exemple, tandis qu'une augmentation du ruissellement dans l'est et le sud de l'Asie devrait résulter du changement climatique, les pénuries d'eau dans ces régions pourraient ne pas être résolues du fait du manque de ressources pour l'investissement dans les nouvelles capacités de stockage nécessaires pour capturer l'eau supplémentaire et permettre son utilisation pendant la saison sèche. [GT II 3.5.1]

Une augmentation des précipitations dans les villes pourrait compromettre la performance des réseaux d'égouts; des surcharges incontrôlées pourraient introduire des polluants microbiens et chimiques dans les ressources en eau qui sont difficiles à traiter par les processus classiques de traitement de l'eau potable. Plusieurs études ont montré que la transmission d'entéropathogènes résistants à la chloration, notamment le *Cryptosporidium*, est plus élevée pendant la saison des pluies (Nchito *et al*., 1998; Kang *et al*., 2001). Cette situation pourrait être aggravée dans les pays en développement, où les niveaux de santé sont inférieurs et la teneur des eaux usées en agents pathogènes est supérieure (Jiménez, 2003). De plus, les précipitations extrêmes génératrices de crues représentent un risque pour les infrastructures de l'eau. Pendant les crues, les installations de traitement de l'eau et des eaux usées sont souvent hors service, laissant la population sans protection sanitaire. [GT II 3.2, 3.4.4, 8.2.5]

Dégradation de la qualité de l'eau du fait de l'augmentation de la température. Des températures plus élevées, combinées à des concentrations en phosphore accrues dans les lacs et les réservoirs, favorisent les fleurs d'eau qui compromettent la qualité de l'eau en modifiant la couleur, l'odeur et le goût et en engendrant une éventuelle toxicité pour l'homme, le bétail, la faune et la flore. Le traitement de ces eaux polluées est coûteux avec les technologies disponibles, même pour les installations des pays développés (Environnement Canada, 2001). Des températures plus élevées de l'eau favorisent également le transfert de polluants volatils et semi-volatils (ammoniac, mercure, PCB (biphényles polychlorés), dioxines et pesticides) de l'eau et des eaux usées vers l'atmosphère. [GT II 3.4.4]

Augmentation de la salinisation. La salinisation des approvisionnements en eau à partir des aquifères côtiers en raison de l'élévation du niveau de la mer est un problème important, étant donné que près d'un quart de la population mondiale vit dans des régions côtières qui sont généralement pauvres en eau et dont la croissance démographique est rapide (Small et Nicholls, 2003; Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). La salinisation peut également concerner les aquifères à l'intérieur des terres en raison d'une réduction de l'alimentation des nappes souterraines (Chen *et al*., 2004). [GT II 3.2, 3.4.2]

Les populations les plus touchées par le changement climatique au regard des services hydrologiques sont situées dans les bassins souffrant déjà de stress hydrique en Afrique, dans la région méditerranéenne, au Proche-Orient, en Asie du Sud, au nord de la Chine, en Australie, aux États-Unis, au centre et au nord du Mexique, au nord-est du Brésil et sur la côte ouest de l'Amérique du Sud. Les populations les plus à risque sont les populations vivant dans les mégalopoles, les zones rurales très dépendantes des eaux souterraines, les petites îles et les bassins alimentés par la fonte des glaciers ou des neiges (plus d'un sixième de la population mondiale réside dans les bassins alimentés par la fonte des neiges). Les problèmes seront plus critiques dans les régions économiquement déprimées, où le stress hydrique sera aggravé par des facteurs socioéconomiques (Alcamo et Henrichs, 2002; Ragab et Prudhomme, 2002). [GT II 3.3.2, 3.5.1]

4.4.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Dans le contexte des problèmes évoqués ci-dessus, il est important que les services hydrologiques situés dans les régions à risque planifient en conséquence. La plupart des réseaux d'alimentation en eau sont capables de faire face aux changements relativement petits des températures et des précipitations moyennes qui devraient intervenir dans les prochaines décennies, sauf lorsque les variations des moyennes requièrent la modification de la conception du réseau ou de la technologie utilisée; c'est par exemple le cas lorsque la réduction des précipitations nécessite des réservoirs supplémentaires (Harman *et al*., 2005), entraîne l'intrusion d'eau salée dans le cours inférieur d'une rivière, ou nécessite de nouveaux réseaux de traitement de l'eau pour opérer le dessalement. Un exemple récent de l'adaptation se situe dans le sud de l'Afrique (Ruosteenoja *et al.,* 2003), où la ville de Beira, au Mozambique, étend déjà de 5 km de plus ses conduites de pompage de 50 km pour être sûre d'avoir de l'eau douce. [GT II 7.4.2.3.1]

Les services hydrologiques sont généralement fournis via des réseaux aménagés. Ces réseaux sont conçus avec des facteurs de sécurité et ont une espérance de vie de 20 à 50 ans (cette durée peut être plus longue pour les réservoirs de stockage). Les examens de la résilience des approvisionnements en eau et de la performance des infrastructures de l'eau ont généralement été réalisés d'après les conditions observées uniquement. L'utilisation de projections climatiques devrait également être envisagée, en particulier dans des cas qui impliquent des réseaux qui sont confrontés à des crues et à des sécheresses.

Diminution de la disponibilité en eau. Hormis quelques pays industrialisés, la consommation d'eau augmente dans le monde entier du fait de la croissance démographique et économique, des changements de mode de vie et de l'extension des réseaux d'approvisionnement en eau.

[GT II 3.3] Il est important de mettre en œuvre des programmes efficaces d'utilisation de l'eau dans les régions où la disponibilité en eau diminuera *probablement*, étant donné qu'il sera peut-être nécessaire de faire de gros investissements pour garantir l'approvisionnement adéquat, soit par la construction de nouveaux réservoirs de stockage, soit en utilisant des sources d'eau alternatives. Les réductions de consommation d'eau peuvent retarder, voire éliminer le besoin d'infrastructures supplémentaires. L'une des manières les plus rapides d'augmenter la disponibilité en eau est de réduire au minimum les pertes d'eau dans les réseaux urbains et les réseaux d'irrigation. D'autres solutions pour réduire le besoin de nouveaux approvisionnements en eau sont notamment la récupération des eaux de pluie et la réutilisation contrôlée. [GT II 3.5, 3.6]

Dégradation de la qualité de l'eau suite à des variations de débit. La protection des ressources en eau est une stratégie rentable et importante pour faire face aux problèmes futurs relatifs à la qualité de l'eau. Tandis que ces pratiques sont courantes dans certains pays, de nouvelles approches pour la gestion de la qualité de l'eau sont nécessaires dans le monde entier. Une telle approche est la mise en œuvre de plans pour la sécurité de l'eau permettant de réaliser une évaluation détaillée ainsi que la gestion des risques depuis le bassin hydrographique jusqu'au consommateur, telle que proposée par l'OMS (2005). De même, la conception et l'exploitation des usines de traitement des eaux et des eaux usées doivent être régulièrement revues, en particulier dans les zones vulnérables, pour garantir ou augmenter leur fiabilité et leur capacité à faire face à des variations de débit incertaines.

Dessalement. Les procédés de traitement de l'eau sont une solution pour traiter une concentration en sel accrue dans les lieux à risque, telles des zones côtières fortement urbanisées qui dépendent d'aquifères sensibles à l'intrusion d'eau salée. Actuellement, les technologies disponibles se fondent principalement sur les membranes et sont plus coûteuses que les procédés classiques de traitement des approvisionnements en eau douce. Le coût du dessalement est estimé à environ un dollar des États-Unis/m^3 pour l'eau de mer et 0,60 dollar des États-Unis/m^3 pour l'eau saumâtre (Zhou et Tol, 2005), tandis que la chloration de l'eau douce coûte 0,02 dollar des États-Unis/m^3. Fort heureusement, le coût du dessalement diminue, même si sa demande énergétique est élevée. Il est nécessaire de comparer les coûts du dessalement aux coûts de l'extension des conduites et de la réimplantation éventuelle des installations de traitement de l'eau pour assurer l'accès à l'eau douce. À titre indicatif, le coût de la construction des installations de captage et de traitement et des canalisations de pompage pour l'approvisionnement en eau d'un établissement urbain représente environ la moitié du coût de la totalité du réseau. [GT II 7.5] Cependant, dans les régions côtières à forte densité de population de l'Égypte, de la Chine, du Bangladesh, de l'Inde et du sud-est de l'Asie, les coûts du dessalement peuvent être encore prohibitifs. [GT II 3.5.1] Si le recours au dessalement vient à augmenter dans l'avenir, il sera nécessaire de tenir compte des effets secondaires pour l'environnement tels que l'incidence sur les organismes marins et leur entraînement par les usines de dessalement de l'eau de mer, et de l'évacuation sûre des saumures très concentrées qui peuvent également contenir d'autres substances chimiques. [GT II 3.3.2]

Approches complémentaires et approches différentes pour traiter les eaux usées. Des stratégies seront nécessaires pour faire face à des débits supérieurs et plus variables dans les systèmes d'assainissement et les usines de traitement des eaux usées. Ces stratégies devront inclure de nouvelles approches telles que l'utilisation de réseaux décentralisés, la construction de réseaux d'égouts distincts, le traitement de déversoirs d'orage (c'est-à-dire le mélange des eaux usées et du ruissellement dans les villes) et l'injection d'eau de pluie dans le sous-sol. Étant donné le coût élevé impliqué dans l'augmentation de la capacité des usines de traitement des eaux usées urbaines, il est nécessaire de mettre en œuvre des programmes adéquatement financés pour tenir compte des conditions locales. En ce qui concerne les zones rurales, l'étendue de l'assainissement est généralement trop faible, et il est nécessaire de formuler des plans d'action locaux utilisant des technologies à bas coût, dépendant de la localité et impliquant la communauté. [GT II 7.4.2.3]

Gestion améliorée des ressources en eau. Tout en tenant compte des mesures d'adaptation déjà abordées, il convient d'envisager la gestion intégrée de l'eau comme un outil efficace, en prenant le changement climatique comme variable supplémentaire. La réduction ou l'augmentation de la variabilité de la disponibilité en eau entraîneront des conflits entre les divers utilisateurs de l'eau (agriculture, industries, écosystèmes et établissements humains). Les institutions qui gèrent l'affectation de l'eau joueront un rôle prépondérant dans la détermination de l'incidence sociale globale d'un changement de la disponibilité en eau, ainsi que de la distribution des gains et des pertes pour les différents secteurs de la société. Les cadres institutionnels doivent trouver de meilleures manières d'affecter l'eau, à l'aide de principes (tels que l'équité et l'efficacité) qui, d'un point de vue politique, pourraient être difficiles à mettre en pratique. Ces cadres doivent également envisager la gestion des bassins internationaux, ainsi que des bassins d'eaux de surface et d'eaux souterraines. [GT II 3.5.1]

Pour faire face au stress supplémentaire causé par le changement climatique, il sera nécessaire que le public participe à la planification de l'eau, en particulier pour changer le point de vue concernant la valeur de l'eau, l'importance et le rôle que jouera la réutilisation de l'eau dans le futur et la contribution que la société veut bien apporter à l'atténuation des incidences liées à l'eau.

Pour mettre en œuvre les politiques fondées sur les principes d'une gestion intégrée de l'eau, il faut rechercher une plus grande coordination entre les différentes entités

gouvernementales, et réviser les cadres institutionnels et juridiques pour faciliter l'application de mesures d'adaptation. Le changement climatique sera ressenti par toutes les parties prenantes impliquées dans le processus de gestion de l'eau, y compris les utilisateurs. Par conséquent, tous doivent être conscients des éventuelles incidences sur le réseau afin de prendre les décisions opportunes et d'être prêts à payer les coûts impliqués. Dans le cas des normes d'évacuation des eaux usées, par exemple, la stratégie globale utilisée devra sans doute être réétudiée, dans la mesure où elle est fondée sur la capacité d'auto-épuration des eaux de surface, qui sera réduite avec une augmentation de la température. [GT II 3.4.4]

Pays développés. Dans les pays développés, l'eau potable fait l'objet d'un traitement poussé avant d'être distribuée au consommateur, et le niveau de traitement des eaux usées est élevé. De tels avantages, ainsi qu'une protection adéquate des sources d'eau, doivent être conservés avec le changement climatique futur, même si des coûts supplémentaires doivent être supportés, en incluant par exemple des besoins supplémentaires de traitement de l'eau. En ce qui concerne les petites communautés ou les zones rurales, les mesures à envisager incluent la protection des sources d'eau, qui présente le meilleur rapport coûts-avantages.

Pays en développement. Malheureusement, certains pays ne disposent pas forcément de ressources économiques suffisantes pour faire face aux problèmes posés par le changement climatique. Les pays pauvres ont déjà besoin de ressources supplémentaires pour résoudre des problèmes avec des infrastructures inadaptées, et ils deviendront donc plus vulnérables aux incidences prévues sur la quantité et la qualité de l'eau, à moins que ne soient disponibles des solutions à moindre coût et des options de financement réalistes.

Étant donné que plusieurs des solutions d'adaptation et d'atténuation déjà identifiées ne sont tout simplement pas viables, on s'attend à ce que les pays en développement doivent s'adapter via des pratiques non durables, telles que l'augmentation de la surexploitation des eaux souterraines ou la réutilisation de plus gros volumes d'eaux usées non traitées. Ces «solutions» sont attractives car elles peuvent facilement être appliquées à un niveau individuel et personnel. Par conséquent, il est nécessaire de développer des solutions sûres et à bas coût, qui n'impliquent pas nécessairement les voies classiques, en particulier pour la fourniture de services hydrologiques aux communautés pauvres qui, dans bien des cas, ne disposent pas de véritables services dans le domaine de l'eau. Malheureusement, peu d'études sont disponibles sur cette question. [GT II 3.4.3, 8.6.4]

En résumé, le changement climatique peut avoir des incidences positives et négatives sur les services hydrologiques. Il est, par conséquent, important d'avoir conscience de ses répercussions au niveau local et de dresser des plans en conséquence. Actuellement, seuls certains services d'eau de quelques pays, y compris les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Canada et les États-Unis, ont commencé à envisager les implications d'un changement climatique dans le contexte de la maîtrise des crues et de la gestion de l'approvisionnement en eau. [GT II 3.6]

4.5 Établissements humains et infrastructures

Les changements de la disponibilité en eau, de la qualité de l'eau, et des caractéristiques des précipitations, ainsi que la probabilité et l'ampleur des épisodes d'inondations devraient jouer un rôle important dans les incidences du changement climatique sur les établissements humains et les infrastructures (Shepherd *et al.*, 2002; Klein *et al.*, 2003; London Climate Change Partnership, 2004; Sherbinin *et al.*, 2006). Ces incidences varieront d'une région à l'autre. De plus, les incidences dépendront en grande partie du cadre géophysique, du niveau de développement socioéconomique, des institutions d'affectation de l'eau, de la nature de la base économique locale, des caractéristiques des infrastructures et d'autres facteurs sources de stress. Ces derniers englobent la pollution, la dégradation des écosystèmes, l'affaissement des terres (dû à la perte de pergélisol, à des processus isostatiques naturels ou à des activités humaines telles que la consommation des eaux souterraines) et la croissance démographique (UNWWAP, 2003, 2006; Faruqui *et al.*, 2001; PNUD, 2006). Au niveau mondial, les lieux les plus exposés aux problèmes d'approvisionnement en eau douce dans le contexte du changement climatique sont les petites îles, les pays en développement dans les régions arides et semi-arides, les régions dont l'eau douce est fournie par les rivières alimentées par la fonte des glaciers ou une fonte des neiges saisonnière, et les pays avec une grande proportion de basses terres côtières et de mégalopoles côtières, en particulier dans la région Asie-Pacifique (Alcamo et Henrichs, 2002; Ragab et Prudhomme, 2002). [GT II 6.4.2, 20.3]

Une augmentation de la densité de population dans des lieux à haut risque, telles régions côtières ou riveraines, augmentera *très probablement* la vulnérabilité aux incidences du changement climatique liées à l'eau, y compris les dommages occasionnés par les crues et les tempêtes et la dégradation de la qualité de l'eau suite à une intrusion d'eau salée. [GT II 6.4.2, 7.4.2.4] Les établissements humains dont les économies sont étroitement liées à une activité dépendante de l'eau et sensible au climat, telle que l'agriculture irriguée, le tourisme lié à l'eau et le ski sur neige, seront *probablement* particulièrement vulnérables aux incidences du changement climatique sur les ressources en eau (Elsasser et Burki, 2002; Hayhoe *et al.*, 2004). [GT II 7.4.3, 12.4.9]

Les infrastructures associées aux établissements humains sont les bâtiments, les réseaux de transport, les installations côtières, les infrastructures d'approvisionnement en eau et de traitement des eaux usées et les installations énergétiques. Les incidences sur les infrastructures englobent des dommages directs, par exemple, suite à des épisodes de crues ou à des instabilités structurelles provoquées par l'érosion pluviale ou des changements de la nappe phréatique, ainsi que des incidences sur la performance, le coût et l'adéquation des installations qui n'ont pas été conçues pour les conditions climatiques prévues comme dominantes dans l'avenir. [GT II 3.4.3, 3.5, 7.4.2.3]

4.5.1 Établissements humains

De nombreux établissements humains sont actuellement dépourvus d'un approvisionnement en eau sûr et adapté. L'Organisation mondiale de la santé estime que 1,1 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à une eau potable sûre, et que 2,4 milliards n'ont pas accès à un assainissement adéquat (OMS/UNICEF, 2000). Les foyers urbains pauvres n'ont souvent pas accès à un approvisionnement en eau canalisée, et sont donc particulièrement vulnérables à l'augmentation des coûts de l'eau potable (NU-HABITAT, 2003; CNUEH, 2003, 2006; PNUD, 2006). Par exemple, à Jakarta, certains foyers dépourvus de services hydrologiques réguliers dépensent jusqu'à 25 % de leurs revenus pour l'eau et, pendant l'été chaud de 1998 à Amman, en Jordanie, les résidents du camp de réfugiés qui n'étaient pas raccordés au réseau municipal des eaux ont payé pour l'eau des prix bien plus élevés que d'autres foyers (Faruqui *et al.*, 2001). Les incidences du changement climatique sur la disponibilité en eau et la qualité de l'eau de source augmenteront *très probablement* les difficultés rencontrées pour résoudre ces problèmes, en particulier dans les régions où le stress hydrique devrait augmenter du fait d'une diminution du ruissellement, couplée à une augmentation de la population. [GT II 3.5.1] Les établissements humains à croissance rapide dans les régions semi-arides des pays en développement, en particulier les communautés pauvres qui ont une capacité d'adaptation limitée, sont particulièrement vulnérables à la diminution de la disponibilité en eau et à l'augmentation correspondante du coût de sécurisation d'un approvisionnement fiable (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 7.4]

Tant dans les pays développés que dans les pays en développement, le maintien de la croissance démographique rapide dans les villes côtières augmentera le risque d'exposition des populations aux inondations et aux dommages liés aux ouragans et à d'autres tempêtes côtières. [GT II 7.4.2.4] Ce même développement contribue à la perte des zones humides des deltas qui pourraient amortir les incidences des tempêtes. [GT II 6.4.1.2] De plus, une grande partie de la croissance se situe dans les régions côtières relativement pauvres en eau, ce qui aggrave le déséquilibre entre la demande en eau et la disponibilité de celle-ci (Small et Nicholls, 2003; Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b).

4.5.2 Infrastructures

4.5.2.1 Réseaux de transport

Les inondations dues à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes (tels les tempêtes et les ouragans) représentent un danger pour les réseaux de transport dans certaines régions. Ces dangers sont l'inondation localisée des rues, des réseaux de transports souterrains et les dommages subis par les ponts, les routes et les voies ferrées liés aux crues et aux glissements de terrain. Par exemple, à Londres, qui possède le réseau de transport souterrain le plus vieux du monde, on prévoit que des épisodes de chutes de pluie plus intenses accroîtront le risque d'inondation du métro et des autoroutes. Ces réseaux auraient besoin d'améliorer leur système de drainage (Arkell et Darch, 2006). De même, des recherches récentes sur le réseau de transport en surface de la région métropolitaine de Boston ont prévu qu'une augmentation des inondations entraînerait une augmentation des retards et des annulations de voyages, ce qui provoquerait une perte de journées de travail ainsi qu'une diminution des ventes et de la production (Suarez *et al.*, 2005). Cependant, ces coûts seraient minimes, comparés aux dommages aux infrastructures de transport de Boston liés aux inondations (Kirshen *et al.*, 2006). [GT II 7.4.2.3.3] Un exemple de la vulnérabilité actuelle qui pourrait être aggravée par une augmentation de l'intensité des précipitations est celui de la compagnie de chemin de fer Konkan Railway, en Inde, qui enregistre chaque année près d'un million de dollars des États-Unis de dommages dus à des glissements de terrain pendant la saison des pluies (Shukla *et al.*, 2005). [GT II 7.4.2.3.3]

4.5.2.2 Environnement bâti

Les inondations, les glissements de terrain et les fortes tempêtes (telles que les ouragans) représentent les risques de dommages aux bâtiments les plus grands dans les pays développés et en développement, car les logements et autres biens sont de plus en plus souvent situés dans les régions côtières, sur des versants, dans des ravins et dans d'autres lieux à risque (Bigio, 2003; NU-HABITAT, 2003). Les établissements humains non officiellement autorisés dans les zones urbaines des pays en développement sont particulièrement vulnérables étant donné qu'ils sont souvent situés dans des lieux relativement dangereux qui sont exposés aux crues, aux glissements de terrains et à d'autres catastrophes liées au climat (Cross, 2001; NU-HABITAT, 2003). [GT II 7.4.2.4]

D'autres incidences sur les bâtiments incluent le risque de vieillissement climatique accéléré du fait de l'augmentation de l'intensité des précipitations et de la fréquence des tempêtes (par exemple, Graves et Phillipson, 2000), et des dommages structuraux accrus du fait de la diminution de la nappe phréatique et de la subsidence (par exemple, Sanders et Phillipson, 2003), ou du fait des incidences de la montée de la nappe phréatique (Kharkina, 2004). [GT II 3.5]

Une autre préoccupation concerne la performance future des réseaux de drainage des eaux d'orage. Dans les régions touchées par une augmentation de l'intensité des tempêtes, la capacité de ces réseaux devra être augmentée pour éviter des inondations locales et les dommages consécutifs qui touchent les bâtiments et les autres infrastructures (UK Water Industry Research, 2004). [GT II 7.6.4]

4.5.2.3 Infrastructures côtières

Dans les régions de basses terres côtières, les infrastructures sont vulnérables aux dommages occasionnés par l'élévation du niveau de la mer, les inondations, les ouragans et les autres tempêtes. Le nombre d'infrastructures à risque augmente rapidement suite à la croissance continue des villes côtières et au développement du tourisme dans des régions telles que les Caraïbes (par exemple, Hareau *et al*., 1999; Lewsey *et al*., 2004; Kumar, 2006). Dans certaines régions, les coûts des dommages consécutifs à l'élévation du niveau de la mer ont été estimés et sont souvent conséquents. Par exemple, en Pologne, les coûts des dommages consécutifs à une éventuelle élévation du niveau de la mer d'un mètre à l'horizon 2100 sont estimés à 30 milliards de dollars des États-Unis, en raison des incidences sur les zones urbaines, les égouts, les ports et d'autres infrastructures (Zeidler, 1997). La même étude a évalué que l'élévation prévue d'un mètre du niveau de la mer au Viet Nam pourrait exposer 17 millions de personnes à des inondations et entraîner des dommages pouvant se chiffrer à 17 milliards de dollars des États-Unis, avec des incidences importantes à l'intérieur des terres au-delà des régions côtières. [GT II 6.3, 6.4, 6.5]

4.5.2.4 Infrastructures énergétiques

Les changements hydrologiques affecteront directement la production potentielle des installations hydroélectriques (celles qui existent actuellement et les projets prévus pour le futur). Il existe de grandes différences régionales dans l'étendue du développement de l'énergie hydraulique. En Afrique, où une faible partie du potentiel hydroélectrique du continent a été développée, les simulations du changement climatique pour le projet hydroélectrique de Batoka Gorge sur le fleuve Zambèze prévoient une réduction significative du régime fluvial (soit, une diminution du débit mensuel moyen de $3{,}21 \times 10^9$ m^3 à $2{,}07 \times 10^9$ m^3) et une réduction de la génération d'énergie (soit, une diminution de la production mensuelle moyenne de 780 GWh à 613 GWh) (Harrison et Whittington, 2002). Une diminution de l'énergie hydraulique est également prévue ailleurs, lorsque les régimes fluviaux devraient diminuer (par exemple, Whittington et Gundry, 1998; Magadza, 2000). Dans d'autres régions, la génération d'énergie hydraulique devrait augmenter. Par exemple, les estimations pour les années 2070, selon le scénario d'émissions IS92a, indiquent que le potentiel de production d'énergie des centrales hydroélectriques existant à la fin du XXe siècle augmentera de 15 à 30 % en Scandinavie et dans le nord de la Russie, où 19 % (Finlande) à près de 100 % (Norvège) de l'électricité est d'origine hydroélectrique (Lehner *et al*., 2005). [GT II 3.5] D'autres infrastructures énergétiques, telles que les lignes de distribution électrique, les installations de forage et les canalisations en mer, peuvent être vulnérables aux dommages résultant d'inondations et d'épisodes de tempête plus intenses. [GT II 7.5] De plus, des problèmes liés à la disponibilité en eau de refroidissement (du fait de la diminution du volume ou de l'augmentation de la température de l'eau) pourraient perturber l'approvisionnement énergétique en nuisant à la production énergétique dans les centrales thermiques et nucléaires (AEE, 2005).

4.5.3 Adaptation

Les incidences des changements de la fréquence des crues et des sécheresses ou dans la quantité, la qualité ou la saisonnalité de la disponibilité en eau pourraient être tempérées par des investissements dans des infrastructures adéquates et par des changements de gestion de l'eau et de l'utilisation des terres. Une coordination de la planification serait un atout car il existe de nombreux points où les incidences sur les différentes infrastructures interagissent. Par exemple, la défaillance des ouvrages de protection contre les crues pourrait interrompre l'approvisionnement énergétique, ce qui pourrait alors empêcher le fonctionnement des stations de pompage d'eau et d'eaux usées.

Une amélioration de la prise en compte de la variabilité climatique actuelle dans la gestion liée à l'eau faciliterait l'adaptation aux changements climatiques à venir (*degré de confiance très élevé*). [GT II 3.6] Par exemple, la gestion des risques de crues actuels par le maintien de zones vertes et de zones tampon naturelles le long des cours d'eau dans des zones urbaines aiderait également à réduire les incidences négatives d'un ruissellement plus intense pendant les tempêtes dans l'avenir. Cependant, l'une ou l'autre de ces réponses représente un coût, non seulement en termes d'argent mais également en termes d'incidences sociétales, y compris le besoin de gérer les éventuels conflits entre les différents groupes d'intérêt. [GT II 3.5]

4.6 Économie: assurance, tourisme, industrie et transport

4.6.1 Contexte

Le climat et les ressources en eau ont une influence sur plusieurs secteurs secondaires et tertiaires de l'économie tels que les assurances, l'industrie, le tourisme et les transports. Les effets du changement climatique liés à l'eau dans ces secteurs peuvent être positifs ou négatifs, mais les phénomènes climatiques extrêmes et d'autres changements brusques ont tendance à affecter les systèmes humains plus sévèrement que le changement progressif, en partie car ils laissent moins de temps pour l'adaptation. [GT II 7.1.3]

Les pertes mondiales révèlent une augmentation rapide des coûts du fait d'épisodes météorologiques extrêmes depuis les années 1970. Une étude a révélé que, tandis que la tendance dominante reste celle d'une augmentation significative des valeurs d'une exposition aux risques, une fois les pertes normalisées pour l'exposition, il reste encore une tendance sous-jacente à l'augmentation. Il existe des preuves d'une augmentation de l'occurrence pour des régions et des dan-gers spécifiques, y compris les crues les plus extrêmes de certains des fleuves les plus grands. [GT II 1.3.8.5]

Pour démontrer la grande incidence de la variabilité climatique sur les pertes des assurances, on peut indiquer que les inondations sont responsables de 10 % des pertes des assurances liées aux phénomènes météorologiques à l'échelle planétaire. La sécheresse a également une incidence: les données du Royaume-Uni indiquent une relation décalée entre le coût des déclarations de sinistres liés à la subsidence et aux (faibles) précipitations d'été. Cependant, dans les pays en développement, les pertes résultant de phénomènes extrêmes sont mesurées plus en termes de vies humaines qu'en termes d'assurances. Par exemple, malgré sa grande intensité, la sécheresse du Sahel n'a eu qu'une faible incidence sur le secteur financier formel, en raison de la faible pénétration des assurances. [GT II TRE 8.2.3]

4.6.2 Coûts socioéconomiques, atténuation, adaptation, vulnérabilité, développement durable

De toutes les éventuelles incidences liées à l'eau sur les transports, le coût le plus élevé est imputable aux inondations. Le coût des retards et des annulations de voyages est relativement faible comparé aux dommages subis par les infrastructures et les autres biens (Kirshen *et al.*, 2006). Au cours des 10 dernières années, on a dénombré quatre cas où l'inondation des systèmes de transport urbain souterrain a entraîné des dommages de plus de 10 millions d'euros (13 millions de dollars des États-Unis) et de nombreux cas où les dommages ont été inférieurs (Compton *et al.*, 2002). [GT II 7.4.2.3.3]

Les secteurs industriels sont souvent considérés comme étant moins vulnérables aux incidences du changement climatique que des secteurs tels celui de l'agriculture. Parmi les principales exceptions, on trouve les installations industrielles situées dans des régions sensibles au climat (telles que des plaines inondables) (Ruth *et al.*, 2004) et celles dépendant de produits de base sensibles au climat, telles que les installations de transformation des aliments. [GT II 7.4.2.1]

La couverture par les assurances actuellement disponible dans un pays pour les risques spécifiques devra être adaptée à l'incidence des catastrophes passées. En raison de la concentration élevée de pertes dues aux crues catastrophiques, l'assurance du secteur privé contre ces phénomènes est généralement restreinte (voire non disponible), de telle sorte que dans plusieurs pays, les gouvernements ont mis en place des plans alternatifs d'assurance contre les crues garantis par l'état (Swiss Re, 1998). [GT II 7.4.2.2.4]

En ce qui concerne le secteur financier, les risques liés au changement climatique sont de plus en plus souvent pris en compte pour des secteurs spécifiques susceptibles d'être touchés tels que les projets hydroélectriques, l'irrigation et l'agriculture, ainsi que le tourisme (PNUE/GRID-Arendal, 2002). [GT II 7.4.2.2]

Les effets du changement climatique sur le tourisme incluent des changements de disponibilité en eau, qui pourraient être positifs ou négatifs (Braun *et al.*, 1999; Uyarra *et al.*, 2005). Des climats plus chauds ouvrent la possibilité d'extension des environnements exotiques (par exemple, avec la présence de palmiers en Europe occidentale), ce qui pourrait sembler positif à des touristes, mais pourrait entraîner l'extension spatiale et l'amplification de maladies d'origine hydrique et de maladies à vecteur. Les sécheresses et l'extension des environnements arides (et les effets des épisodes météorologiques extrêmes) pourraient décourager les touristes, bien que l'on ne puisse pas encore déterminer clairement ce qu'ils jugeraient inacceptable dans ce domaine. [GT II 7.4.2.2.3] Les régions qui dépendent de la disponibilité de la neige (notamment pour le tourisme hivernal) font parties des régions les plus vulnérables au changement climatique. [GT II 11.4.9, 12.4.9, 14.4.7]

Le fret en vrac par des voies d'eau intérieures, telles que le Rhin, pourrait être perturbé pendant les crues et les sécheresses (Parry, 2000). [GT II 7.4.2.2.2]

Les assurances étendent les risques et contribuent à l'adaptation, et la gestion de fonds d'assurance a des implications pour l'atténuation. [GT II 18.5] Les coûts et les avantages de l'adaptation ont été évalués d'une manière plus restreinte pour les infrastructures de transport (par exemple, Dore et Burton, 2001). [GT II 17.2.3]

5

Analyse des aspects régionaux du changement climatique et des ressources en eau

5.1 Afrique

5.1.1 Contexte

L'eau est l'un des principaux problèmes actuels et futurs auxquels est confrontée l'Afrique. L'approvisionnement en eau à partir des cours d'eau, des lacs et des chutes de pluie n'est pas également accessible, sa répartition géographique naturelle est irrégulière et la consommation d'eau ne peut y être qualifiée de durable. Le changement climatique est susceptible d'imposer des contraintes supplémentaires sur la disponibilité et l'accessibilité de l'eau. Arnell (2004) a décrit les implications des scénarios SRES du GIEC pour la projection de l'écoulement fluvial à l'horizon 2050 à l'aide du modèle climatique HadCM3[20]. Ces expériences démontrent une diminution significative du ruissellement dans les régions septentrionales et australes de l'Afrique, mais prévoient une augmentation dans les régions orientales et dans certaines parties semi-arides de l'Afrique subsaharienne. Cependant, les résultats de plusieurs modèles (figures 2.8 et 2.9) indiquent une variation considérable d'un modèle à l'autre, avec une diminution en Afrique du Nord et une augmentation en Afrique de l'Est parmi les réponses les plus robustes. Il existe un large éventail de projections pour les précipitations en Afrique subsa-harienne, certains modèles prévoyant des hausses, d'autres des baisses. Les incidences prévues doivent être considérées dans le contexte de cette grande incertitude. [GT I 11.2, tableau 11.1; GT II 9.4.1]

D'ici 2025, la disponibilité en eau de neuf pays,[21] principalement en Afrique de l'Est et du Sud, devrait être inférieure à 1 000 m^3/personne/an. Dans douze pays,[22] elle serait limitée à entre 1 000 et 1 700 m^3/personne/an, et la population susceptible de subir un stress hydrique pourrait atteindre 460 millions de personnes, principalement en Afrique occidentale (PNUE/GRID-Arendal, 2002).[23] Ces estimations sont fondées uniquement sur les taux de croissance démographique et ne tiennent pas compte de la variation des ressources en eau due au changement climatique. De plus, une estimation indique une augmentation de la proportion de la population africaine qui pourrait être confrontée à un stress hydrique et à une hausse de la pénurie d'eau de 47 % en 2000 à 65 % en 2025 (Ashton, 2002). Cela pourrait engendrer des conflits liés à l'eau, en particulier dans les régions arides et semi-arides. [GT II 9.2, 9.4]

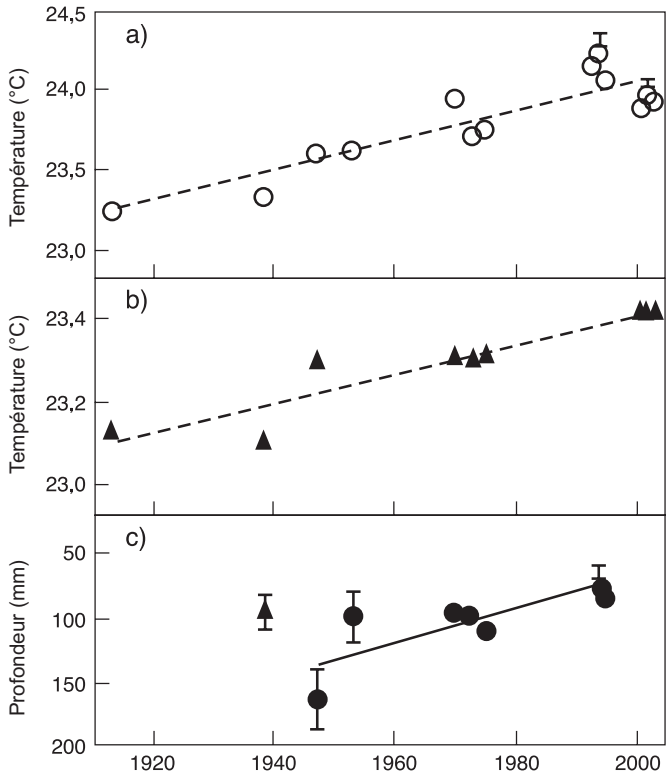


Figure 5.1: *Mesures anciennes et récentes du lac Tanganyika, en Afrique orientale: a) températures de la couche de mélange supérieure (eaux de surface); b) températures des eaux profondes (600 m); c) profondeur de la couche de mélange supérieure. Les triangles représentent les données recueillies selon un procédé différent. Les barres d'erreur représentent les écarts types. Réimpression avec l'aimable autorisation de Macmillan Publishers Ltd. [*Nature*] (O'Reilly* et al.*, 2003), copyright 2003. [GT II figure 1.2]*

Un exemple particulier est la région sud-ouest du Cap, en Afrique du Sud, où une étude montre une diminution de la capacité d'approvisionnement en eau parallèle à une diminution des précipitations ou à une éventuelle augmentation de l'évaporation. Il s'en suivrait une réduction de l'approvisionnement en eau de 0,32 % par an à l'horizon 2020, tandis qu'il est prévu que le changement climatique lié au réchauffement mondial entraîne une augmentation de la demande en eau de 0,6 % par an dans la région métropolitaine du Cap (New, 2002).

En ce qui concerne le bassin du Nil, Conway (2005) n'a trouvé aucune indication nette sur la manière dont le régime de ce fleuve serait affecté par le changement climatique, du fait de l'incertitude relative à la configuration prévue des chutes de pluie dans le bassin et de l'influence de structures complexes de gestion et de gouvernance de l'eau. [GT II 9.4.2]

Des réponses aux écarts de précipitations sont déjà observées dans un grand nombre de sources d'eaux terrestres et elles pourraient servir d'éventuels indicateurs d'un stress

[20] Voir l'appendice I pour la description des modèles.

[21] Djibouti, Cap-Vert, Kenya, Burundi, Rwanda, Malawi, Somalie, Égypte et Afrique du Sud.

[22] Maurice, Lesotho, Éthiopie, Zimbabwe, Tanzanie, Burkina Faso, Mozambique, Ghana, Togo, Nigéria, Ouganda et Madagascar.

[23] Seuls cinq pays d'Afrique ont actuellement (données de 1990) accès à un volume inférieur à 1 000 m^3/personne/an: Rwanda, Burundi, Kenya, Cap-Vert et Djibouti.

hydrique futur lié à la variabilité du climat. Dans les régions orientales du continent, on a observé des fluctuations interannuelles du niveau des lacs, avec des niveaux bas en 1993-1997 et des niveaux plus élevés (notamment pour les lacs Tanganyika, Victoria et Turkana) en 1997-1998, ces derniers étant liés à un excès de précipitations à la fin de l'année 1997, auquel viennent s'ajouter des perturbations à grande échelle dans l'océan Indien (Mercier *et al.*, 2002). Des températures de l'eau plus élevées ont également été observées dans les lacs en réponse à des conditions plus chaudes (voir figure 5.1). [GT II 9.2.1.1, 1.3.2.3]

5.1.2 Observations actuelles

5.1.2.1 Variabilité du climat

La région du Sahel en Afrique occidentale est confrontée à une nette variabilité multidécennale des précipitations (par exemple, Dai *et al.*, 2004a), liée à des changements dans la circulation atmosphérique et aux changements connexes dans la configuration des températures de la mer en surface dans les régions tropicales des bassins Pacifique, Indien et Atlantique (à savoir l'ENSO et l'OAM). Des conditions de grande sécheresse se sont produites des années 1970 aux années 1990, après une période plus humide pendant les années 1950 et 1960. Le déficit de pluie était principalement lié à une réduction du nombre d'épisodes pluvieux significatifs pendant la période de pointe de la mousson (juillet à septembre) et au cours de la première saison des pluies au sud d'environ 9°N. La diminution des chutes de pluie et les sécheresses dévastatrices dans la région du Sahel au cours des trois dernières décennies du XXe siècle (figure 5.2) font partie des changements climatiques les plus prononcés, toutes régions confondues. Au Sahel, les précipitations ont atteint un minimum après l'épisode *El Niño* de 1982/83. [GT I 3.7.4] Les études de modélisation laissent à penser que les précipitations au Sahel ont été davantage influencées par les variations climatiques à grande échelle (probablement liées aux changements des aérosols anthropiques), que par des changements locaux d'affectation des terres. [GT I 9.5.4]

5.1.2.2 Ressources en eau

Environ 25 % de la population africaine contemporaine est soumise à un stress hydrique, tandis que 69 % vit dans des conditions d'abondance relative de l'eau (Vörösmarty *et al.*, 2005). Cependant, cette abondance relative ne tient pas compte d'autres facteurs tels que la potabilité et l'accessibilité de l'eau, ainsi que la disponibilité d'un assainissement. Malgré des améliorations considérables de l'accès dans les années 1990, en 2000, seulement 62 % environ des Africains avaient accès à un approvisionnement en eau amélioré (OMS/UNICEF, 2000). [GT II 9.2.1]

Un tiers de la population africaine vit dans des régions exposées à la sécheresse et est vulnérable à ses incidences (Forum mondial de l'eau, 2000). Cet état de fait a contribué

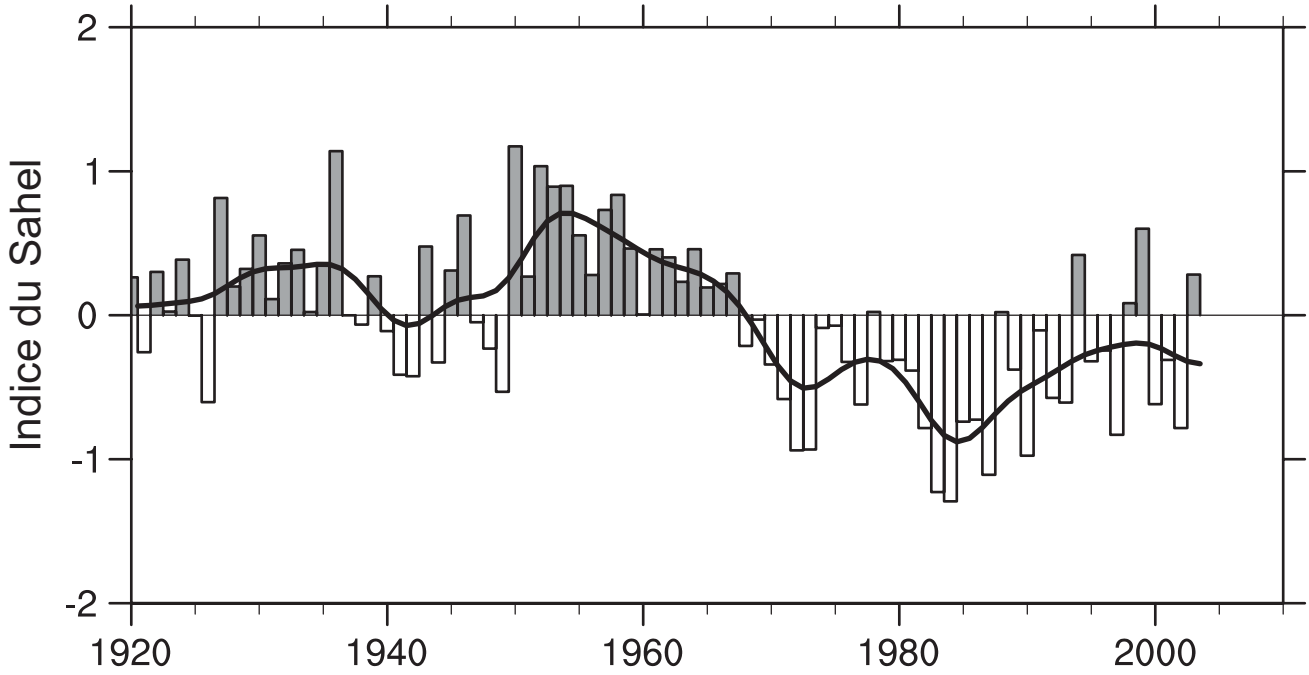


Figure 5.2: *Série chronologique (avril à octobre) des chutes de pluie régionales au Sahel (10°N-20°N, 18°O-20°E) de 1920 à 2003, dérivée du maillage d'anomalies de stations normalisées, suivi du calcul de la moyenne avec pondération par région (adapté de Dai* et al.*, 2004a). Les valeurs positives (barres ombrées) indiquent des conditions plus humides que la moyenne à long terme, et les valeurs négatives (barres blanches) indiquent des conditions plus sèches que la moyenne à long terme. La courbe noire indique les variations décennales. [GT I figure 3.37]*

à la migration, à la séparation culturelle, au déplacement des populations et à l'effondrement de cultures anciennes. Les sécheresses ont surtout touché le Sahel, la corne de l'Afrique et le sud de l'Afrique, en particulier depuis la fin des années 1960, avec des incidences graves sur la sécurité alimentaire et, pour finir, la survenue de la famine. En Afrique occidentale, une diminution des précipitations annuelles a été observée depuis la fin des années 1960, avec une diminution de 20 à 40 % pendant la période allant de 1968 à 1990, par comparaison à la période 1931-1960 (Nicholson *et al.*, 2000; Chappell et Agnew, 2004; Dai *et al.*, 2004a). L'influence des variations décennales de l'ENSO a également été reconnue dans le sud-ouest de l'Afrique, affectée en partie par l'oscillation nord-atlantique (NAO) (Nicholson et Selato, 2000). [GT II 9.2.1]

5.1.2.3 Énergie

Dans la plupart des pays d'Afrique, l'électricité est issue de l'énergie hydroélectrique. Peu d'études sont disponibles sur les incidences du changement climatique sur la consommation d'énergie en Afrique (Warren *et al.*, 2006). [GT II 9.4.2] Cependant, le continent se caractérise par une très forte dépendance au bois de chauffage, principale source d'énergie dans les zones rurales (environ 70 % de la consommation totale d'énergie du continent). Toute incidence du changement climatique sur la production de la biomasse aurait également un impact sur la disponibilité en énergie provenant du bois de chauffage. L'accès à l'énergie est fortement restreint en Afrique subsaharienne. On estime que 51 % de la population urbaine et seulement 8 % de la population rurale a accès à l'électricité. Ces chiffres peuvent être comparés aux 99 % de la population urbaine et 80 % de la population rurale qui y a accès en Afrique du Nord. D'autres questions, notamment l'urbanisation, l'augmentation des demandes en énergie et la volatilité des prix du pétrole viennent compliquer les problèmes énergétiques de l'Afrique. [GT II 9.2.2.8]

5.1.2.4 Santé

Paludisme

En Afrique subsaharienne, la distribution spatiale, l'intensité de la transmission et la saisonnalité du paludisme sont influencées par le climat. Le développement socioéconomique n'a eu qu'une incidence limitée sur le ralentissement de la distribution de la maladie (Hay *et al.*, 2002a; Craig *et al.*, 2004). [GT II 8.2.8.2]

Les chutes de pluie peuvent représenter un facteur limitant pour les populations de moustiques et il existe des preuves de réduction de la transmission associée aux diminutions de précipitations décennales. Des preuves de la prévisibilité des anomalies anormalement hautes ou basses de paludisme à partir de la température de la mer en surface (Thomson *et al.*, 2005b) et des projections climatiques saisonnières d'un ensemble multi-modèles au Botswana (Thomson *et al.*, 2006) encouragent l'utilisation pratique et régulière de projections saisonnières pour le contrôle du paludisme dans le sud de l'Afrique (DaSilva *et al.*, 2004). [GT II 8.2.8.2]

Les effets du changement climatique observé sur la distribution géographique du paludisme et son intensité de transmission dans les régions des hauts plateaux prêtent à controverse. Les analyses des données chronologiques de certains sites de l'est de l'Afrique montrent que l'incidence du paludisme a augmenté en l'absence apparente de tendances climatiques (Hay *et al.*, 2002a, b; Shanks *et al.*, 2002). Les éléments moteurs mis en avant pour expliquer la résurgence du paludisme incluent la résistance du parasite aux médicaments et une diminution des activités de lutte contre le vecteur. Cependant, la validité de cette conclusion a été remise en question car elle pourrait être le résultat d'une utilisation incorrecte des données climatiques (Patz, 2002). L'analyse des données de température actualisées pour ces régions a mis en évidence une tendance significative au réchauffement depuis la fin des années 1970, l'étendue du changement influençant le potentiel de transmission (Pascual *et al.*, 2006). Dans le sud de l'Afrique, les tendances à long terme pour le paludisme n'ont pas été associées au climat de manière significative, même si des changements saisonniers du nombre de cas ont été significativement liés à un nombre de variables climatiques (Craig *et al.*, 2004). La résistance aux médicaments et l'infection par le VIH ont été associées aux tendances du paludisme à long terme dans la même région (Craig *et al.*, 2004). [GT II 8.2.8.2]

Certaines autres études ont fait état de liens entre la variabilité interannuelle de la température et la transmission du paludisme dans les hautes terres africaines. Une analyse des données chronologiques filtrées concernant le paludisme à Madagascar a indiqué qu'une température minimale au début de la période de transmission (correspondant aux mois de plus fort contact entre les personnes et le vecteur) est responsable en grande partie de la variabilité interannuelle (Bouma, 2003). Dans les régions de hautes terres du Kenya, les admissions pour paludisme ont été associées aux chutes de pluie et à des températures maximales inhabituellement élevées au cours des trois à quatre mois précédents (Githeko et Ndegwa, 2001). Une analyse des données de morbidité paludéenne pour la période allant de la fin des années 1980 jusqu'au début des années 1990, provenant de 50 sites dans toute l'Éthiopie, a montré que les épidémies étaient associées à des températures minimales élevées au cours des mois précédents (Abeku *et al.*, 2003). Une analyse des données de sept sites des hauts plateaux en Afrique orientale a montré que la variabilité du climat à court terme jouait un rôle plus important dans le déclenchement des épidémies de paludisme que les tendances à long terme (Zhou *et al.*, 2004, 2005), même si la méthode utilisée pour tester cette hypothèse a été remise en cause (Hay *et al.*, 2005). [GT II 8.2.8.2]

Autres maladies liées à l'eau

Alors que des maladies infectieuses telles que le choléra sont en cours d'éradication dans d'autres parties du monde, elles font leur réapparition en Afrique. La mortalité infantile imputable à la diarrhée reste élevée dans les pays à faibles revenus, en particulier en Afrique subsaharienne,

malgré les améliorations apportées aux soins et aux thérapies par réhydratation orale (Kosek *et al.*, 2003). Les enfants survivent éventuellement à l'épisode aigu mais peuvent mourir ensuite du fait d'une diarrhée persistante ou de malnutrition. Plusieurs études ont montré que la transmission d'entéropathogènes est plus élevée pendant la saison des pluies (Nchito *et al.*, 1998; Kang *et al.*, 2001). [GT II 8.2.5, 9.2.2.6]

5.1.2.5 Secteur agricole

Le secteur agricole est le principal soutien des économies locales de subsistance et du produit intérieur brut (PIB) national dans certains pays d'Afrique. Les contributions de l'agriculture au PIB varient d'un pays à l'autre, mais des évaluations indiquent une contribution moyenne de 21 % (pour une fourchette de 10 à 70 %) (Mendelsohn *et al.*, 2000b). Même lorsque cette contribution est faible, le sec-teur peut toujours soutenir les moyens de subsistance de très larges tranches de la population, de sorte que toute réduction de la production aurait des incidences sur la pauvreté et la sécurité alimentaire. Ce secteur est particulièrement sensible au climat, y compris aux périodes de variabilité climatique. Dans bien des régions d'Afrique, les agriculteurs et les éleveurs doivent également faire face à d'autres problèmes extrêmes liés aux ressources naturelles tels qu'une fertilité médiocre du sol, la présence de parasites, des maladies des cultures et un manque d'accès aux engrais et aux semences améliorées. Ces problèmes sont généralement aggravés par les périodes de sécheresse prolongée et par les crues (Mendelsohn *et al.*, 2000a, b; Stige *et al.*, 2006). [GT II 9.2.1.3]

5.1.2.6 Écosystèmes et biodiversité

Les écosystèmes et leur biodiversité contribuent énormément au bien-être de l'homme en Afrique. [GT II chapitre 9] La riche biodiversité de l'Afrique, qui se manifeste principalement en dehors des régions officiellement conservées, est menacée par la variabilité du climat, par le changement climatique et par d'autres contraintes (par exemple, encadré 5.1). Le développement social et économique de l'Afrique est limité par le changement climatique, la perte d'habitats, la surexploitation de certaines espèces, la dissémination d'espèces non indigènes et les activités telles que la chasse et le déboisement, qui menacent l'intégrité des écosystèmes riches, mais fragiles, du continent (PNUE/GRID-Arendal, 2002). Par exemple, près de la moitié des régions subhumides et semi-arides du sud de l'Afrique présentent un risque de désertification modéré à élevé. En Afrique occidentale, la diminution des précipitations à long terme des années 1970 aux années 1990 a entraîné un décalage de 25 à 35 km vers le sud des régions écologiques du Sahel, du Soudan et de la Guinée, pendant la deuxième moitié du XXe siècle (Gonzalez, 2001). Il en a résulté une perte de pâturages et d'acacias, de flore et de faune et un déplacement des dunes au Sahel, des effets qui sont déjà observés de nos jours (ECF et Institut de Postdam, 2004). [GT II 9.2.1.4]

5.1.3 Changements prévus

5.1.3.1 Ressources en eau

En Afrique, il est prévu qu'un nombre accru de personnes soit soumis à un stress hydrique avant 2025, c'est-à-dire moins de deux décennies après la publication du présent document technique. La principale raison est l'augmentation de la demande en eau. [GT II 9.4.1] Le changement climatique devrait aggraver cette situation. Certaines évaluations prévoient que le nombre de personnes qui devront faire face à une augmentation du stress hydrique en Afrique sera respectivement de 75 à 250 millions, et de 350 à 600 millions (dans tous les scénarios du SRES) d'ici les années 2020 et 2050 (Arnell, 2004). Cependant, l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau n'est pas uniforme dans tout le continent. Une analyse de six modèles climatiques (Arnell, 2004) montre une augmentation *probable* du nombre de personnes susceptibles de subir un stress hydrique d'ici 2055 dans le nord et le sud de l'Afrique (figure 5.4). En revanche, en Afrique orientale et occidentale, un nombre plus important de personnes subira *probablement* une réduction du stress hydrique plutôt qu'une augmentation (Arnell, 2006a). [GT II 3.2, figure 3.2, figure 3.4, 9.4.1, figure 9.3]

Les eaux souterraines sont le plus souvent la principale source d'eau potable en Afrique, en particulier dans les zones rurales qui dépendent de puits creusés et de puits de forage peu onéreux. Leur alimentation devrait diminuer avec la réduction des précipitations et du ruissellement, entraînant une augmentation du stress hydrique dans les régions où ces nappes souterraines viennent pallier les demandes en eau à usage agricole et domestique pendant la saison sèche. [GT II 3.4.2, figure 3.5]

Une étude sur les incidences d'une augmentation de la température de 1 °C sur un bassin versant de la région du Maghreb prévoit un déficit du ruissellement de 10 % environ (Agoumi, 2003), en supposant que les précipitations restent constantes. [GT II 9.4.1, 3.2, 3.4.2]

5.1.3.2 Énergie

Bien que peu d'études aient été réalisées sur l'énergie en Afrique, une étude sur la génération d'énergie hydraulique réalisée dans le bassin fluvial du Zambèze, en conjonction avec des projections sur le ruissellement futur, indique que la génération d'énergie hydraulique serait désavantagée par le changement climatique, en particulier dans les bassins fluviaux situés dans les régions subhumides (Riebsame *et al.*, 1995; Salewicz, 1995). [GT II TRE 10.2.11, tableau 10.1]

5.1.3.3 Santé

Un nombre considérable d'études a associé le changement climatique aux problèmes de santé du continent. Par exemple, les résultats du projet MARA/ARMA, qui vise à établir un atlas du risque de paludisme en Afrique, indiquent des changements dans la distribution des régions

Encadré 5.1: Changements environnementaux au mont Kilimandjaro [Adapté du GT II encadré 9.1]

Il existe des preuves de l'influence du changement climatique sur les écosystèmes naturels d'altitude du Kilimandjaro. Par exemple, en raison de conditions climatiques sèches, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies sur les pentes du Kilimandjaro a entraîné un abaissement de la limite supérieure de la forêt de plusieurs centaines de mètres au cours du XXe siècle (figure 5.3, tableau 5.1) La diminution consécutive de 150 km² de la couverture de la forêt de nuages depuis 1976 a eu une grande incidence sur la rétention du brouillard et sur le stockage temporaire de la pluie, et donc sur le bilan hydrique de la montagne (Hemp, 2005).

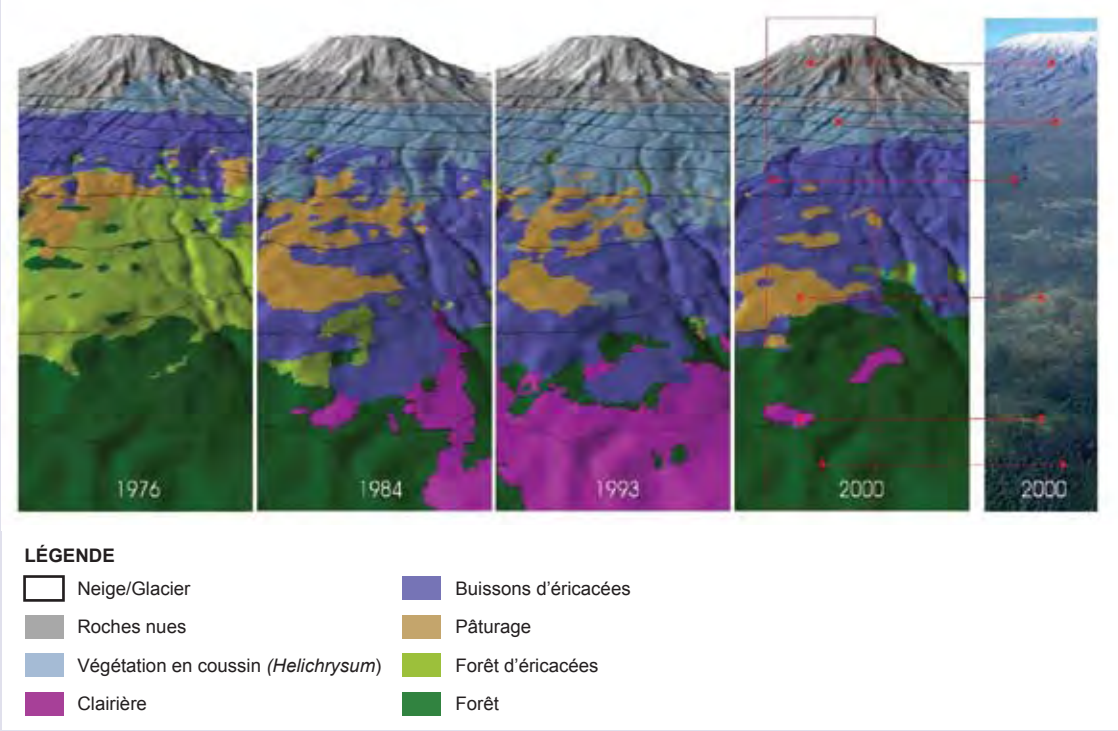


Figure 5.3: *Changements dans la couverture terrestre du Kilimandjaro causés par des interactions complexes entre l'utilisation des terres et le climat (Hemp, 2005). Réimpression avec l'aimable autorisation de Blackwell Publishing Ltd.*

Tableau 5.1: *Changements dans la couverture terrestre des régions supérieures du Kilimandjaro (Hemp, 2005)*

Type de végétation	Superficie en 1976 (km²)	Superficie en 2000 (km²)	Changement (%)
Forêt d'altitude	1066	974	-9
Forêt subalpine d'éricacées	187	32	-83
Buissons d'éricacées	202	257	+27
Végétation en coussin (*Helichrysum*)	69	218	+216
Pâturage	90	44	-51

dont le climat est propice au paludisme d'ici 2020, 2050 et 2080 (Thomas *et al.*, 2004). À l'horizon 2050, puis ensuite 2080, il est probable qu'une grande partie de l'ouest du Sahel et du centre-sud de l'Afrique ne soit plus propice à la transmission du paludisme. D'autres évaluations (par exemple, Hartmann *et al.*, 2002), utilisant seize scénarios de changement climatique, montrent que d'ici 2100, des changements survenant dans la température et les

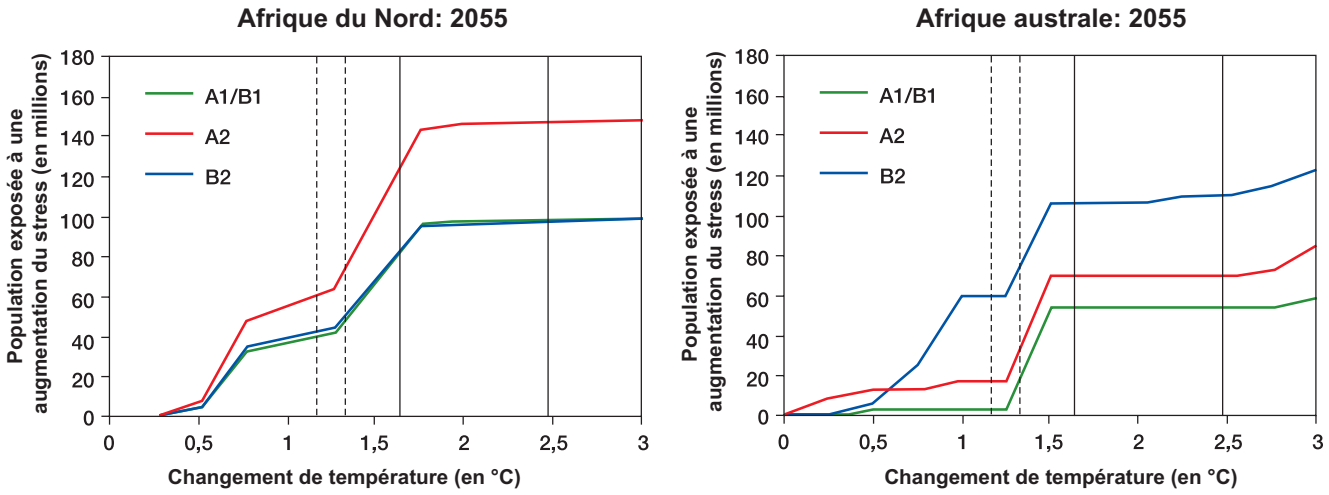


Figure 5.4: *Nombre de personnes (en millions) vivant dans des bassins versants exposées à une augmentation du stress hydrique, par rapport à la période de 1961 à 1990 (Arnell, 2006b). Les bassins versants soumis à un stress hydrique ont un ruissellement inférieur à 1 000 m³/personne/an, et les populations sont exposées à une augmentation du stress hydrique lorsque le ruissellement diminue significativement en raison du changement climatique. Les scénarios sont issus du modèle HadCM3 et les courbes rouges, vertes et bleues correspondent aux différentes projections de populations; il convient de remarquer que, dans certaines régions, les changements hydrologiques prévus varient sensiblement d'un modèle climatique à l'autre. Les marches qui apparaissent sur la fonction se produisent lorsque davantage de bassins versants sont soumis à une diminution importante du ruissellement. [GT II figure 9.3]*

précipitations sont susceptibles de modifier la distribution géographique du paludisme au Zimbabwe, les régions densément peuplées, auparavant inadaptées, devenant propices à la transmission. [GT II 9.4.3]

Relativement peu d'évaluations ont été réalisées sur les changements futurs possibles dans le domaine de la santé animale et imputables à la variabilité et au changement climatiques. Des changements dans la distribution, l'étendue, la prévalence, l'incidence et la saisonnalité des maladies sont à prévoir. Cependant, il existe peu de certitudes quant à l'ampleur du changement. Les épidémies de fièvre de la vallée du Rift, notables pendant l'épisode *El Niño* de 1997/98 en Afrique orientale et associées aux inondations, pourraient augmenter dans les régions sujettes à une augmentation des inondations (paragraphe 3.2.1.2). Le nombre de saisons extrêmement humides devrait augmenter en Afrique orientale. Finalement, il est probable que le stress thermique et la sécheresse aient une incidence négative supplémentaire sur la santé animale et la production de produits laitiers (ce phénomène a déjà été observé aux États-Unis; voir Warren *et al.*, 2006). [GT I tableau 11.1, 11.2.3; GT II 9.4.3, 5.4.3.1]

5.1.3.4 Agriculture

Les incidences du changement climatique sur les périodes culturales et les systèmes agricoles, et leurs éventuelles implications sur les moyens de subsistance ont été étudiées (par exemple, Thornton *et al.*, 2006). Une étude récente, fondée sur trois scénarios, montre une diminution probable des revenus nets des cultures de jusqu'à 90 % d'ici 2100, les petites exploitations étant les plus touchées. Cependant, l'adaptation serait peut-être susceptible de réduire ces effets négatifs (Benhin, 2006). [GT II 9.4.4]

L'encadré 5.2 décrit une étude de cas portant sur le changement climatique, la disponibilité en eau et l'agriculture en Égypte.

Toutefois, tous les changements du climat et de la variabilité du climat ne seraient pas négatifs pour l'agriculture. Les périodes culturales dans certaines régions, notamment autour des hautes terres de l'Éthiopie, pourraient être prolongées du fait du changement climatique. Une augmentation de la température combinée à des changements dans les chutes de pluie pourrait entraîner une prolongation de la période culturale, par exemple dans certaines régions de hauts plateaux (Thornton et al., 2006). La réduction du gel dans les régions des hautes terres des monts Kenya et Kilimandjaro, par exemple, pourrait permettre de cultiver des cultures plus tempérées, comme des pommes, des poires, de l'orge, du blé, etc. (Parry *et al.*, 2004). [GT II 9.4.4]

Les pêcheries sont une autre source importante de revenus, d'emplois et de protéines. Dans les régions côtières qui abritent de vastes systèmes lagunaires ou lacustres, des changements dans les débits d'eau douce et une intrusion d'eaux salées dans les lagons toucheraient les espèces qui sont les piliers des pêcheries continentales ou de l'aquiculture (Cury et Shannon, 2004). [GT II 9.4.4]

On a étudié l'incidence du changement climatique sur le bétail en Afrique (Seo et Mendelsohn, 2006). Une diminution

Encadré 5.2: Climat, disponibilité en eau et agriculture en Égypte [GT II encadré 9.2]

L'Égypte fait partie des pays africains qui pourraient être vulnérables au stress hydrique consécutif au changement climatique. Selon les estimations, en 2000, le volume d'eau consommée s'élevait à environ 70 km^3, ce qui dépassait déjà largement les ressources disponibles (Gueye *et al.*, 2005). Un défi majeur consiste à combler l'écart qui se creuse rapidement entre la disponibilité limitée en eau et la demande en eau croissante des différents secteurs économiques. Dans ce pays, le taux de consommation d'eau a déjà atteint son maximum et le changement climatique accentuera cette vulnérabilité.

L'agriculture consomme environ 85 % des ressources en eau annuelles totales et joue un rôle important dans l'économie nationale égyptienne, avec une contribution de 20 % environ au PIB. Plus de 70 % des superficies cultivées dépendent de systèmes d'irrigation en surface peu efficaces, ce qui entraîne des pertes d'eau élevées, une diminution de la productivité des terres et des problèmes d'engorgement des sols et de salinité (El-Gindy *et al.*, 2001). De surcroît, des pratiques agricoles non durables et une mauvaise gestion de l'irrigation nuisent à la qualité des ressources en eau du pays. Une réduction de la qualité de l'eau d'irrigation est également néfaste pour les sols et les cultures irrigués.

Les institutions responsables de l'eau en Égypte œuvrent pour atteindre les objectifs suivants d'ici 2017, via le Plan national d'amélioration (EPIQ, 2002; CIID, 2005):

- L'extension de l'assainissement de l'eau dans les zones urbaines et rurales;
- La gestion des eaux usées;
- L'optimisation de l'utilisation des ressources en eau via une amélioration de l'efficacité de l'irrigation et une réutilisation des eaux de drainage de l'agriculture.

Cependant, le changement climatique met en évidence un éventail de menaces graves:

- Une élévation du niveau de la mer pourrait avoir une incidence sur le delta du Nil et les habitants de cette région et d'autres régions côtières (Wahab, 2005).
- Une élévation de la température réduira *probablement* la productivité des principales cultures, augmentera leurs besoins en eau et diminuera donc directement l'efficacité de l'utilisation de l'eau de ces cultures. (Abou-Hadid, 2006; Eid *et al.*, 2006).
- On assistera probablement à une augmentation généralisée de la demande en irrigation (Attaher *et al.*, 2006).
- De grandes incertitudes verront également le jour quant au débit du Nil.
- D'après les scénarios SRES, l'Égypte sera *probablement* confrontée à une augmentation du stress hydrique, avec une diminution prévue des précipitations et des projections démographiques allant de 115 à 179 millions d'habitants à l'horizon 2050, phénomènes qui participeront à un stress hydrique accru dans tous les secteurs.
- La poursuite de l'extension des zones irriguées réduira la capacité de l'Égypte à faire face aux futures fluctuations de débit (Conway, 2005).

de 14 % des précipitations réduirait probablement les revenus des grands élevages de 9 % environ (soit de cinq milliards de dollars des États-Unis) en raison tant de la diminution du nombre de têtes de bétail que de celle du revenu net par tête possédée. [GT II 9.4.4]

5.1.3.5 Biodiversité

La diminution de l'humidité du sol consécutive aux changements des précipitations pourrait affecter les systèmes naturels de plusieurs manières. On a prévu l'extinction d'un grand nombre d'espèces animales et végétales. Plus de 5 000 espèces végétales pourraient être affectées par le changement climatique, surtout du fait de la perte d'habitats appropriés. À l'horizon 2050, il est prévu que l'étendue du biome du *Fynbos* (écosystème d'Afrique du Sud dominé par les éricacées, qui est un «point chaud» de l'UICN) diminue de 51 à 61 % en raison de la diminution des précipitations hivernales. Le «succulent karoo», biome qui renferme 2 800 espèces végétales à risque d'extinction élevé, devrait s'étendre vers le sud-est et 2 % environ des espèces de la famille des *Proteaceae* sont menacées de disparition. Ces plantes sont étroitement liées aux oiseaux qui les consomment. Certaines espèces de mammifères, notamment les zèbres et les nyalas, dont il a été démontré qu'elles sont vulnérables aux changements dans la disponibilité en nourriture provoqués par la sécheresse, devraient subir de grandes pertes. Dans quelques régions d'aménagement de la faune, tels les parcs nationaux Kruger et Hwange, les populations sauvages dépendent déjà d'un apport supplémentaire d'eau via des puits de forage (encadré 5.3). [GT II 4.4, 9.4.5, tableau 9.1]

Un grand nombre d'espèces d'oiseaux migrateurs viennent de l'Europe et de la région paléoarctique. Certaines espèces

Encadré 5.3: Extinctions prévues dans le parc national Kruger, en Afrique du Sud [GT II tableau 4.1]

Dans le parc national Kruger, en Afrique du Sud, en cas d'augmentation de la température moyenne mondiale de 2,5 à 3,0 °C au-dessus des niveaux de 1990, sont voués à disparaître:

- 24 à 59 % des mammifères;
- 28 à 40 % des oiseaux;
- 3 à 70 % des papillons;
- 18 à 80 % d'autres invertébrés;
- 1 à 45 % des reptiles.

Au total, 66 % des espèces animales auront potentiellement disparu.

font une étape dans le sud du Sahel avant de traverser le désert du Sahara. Dans la région, la pénurie d'aliments due à la sécheresse pourrait compromettre la réussite de la migration de ces oiseaux. Comme indiqué, les modèles de précipitations pour le Sahel sont ambigus. [GT II 9.3.1] Si les scénarios humides viennent à se matérialiser, la biodiversité de la région subsaharienne ou du Sahel ne court aucun risque imminent du fait des incidences liées au stress hydrique. En revanche, le scénario plus sec pourrait, en fin de compte, mener à de nombreuses extinctions, en particulier du fait de l'intensification de la concurrence entre les systèmes naturels et les besoins humains. [GT II 9.4.5]

Pour les rapaces dans le sud de l'Afrique, des résultats de simulations utilisant les précipitations comme principal paramètre environnemental permettent d'envisager des réductions significatives de leur territoire du fait de son assèchement. [GT II 4.4.3] Au total, les projections laissent envisager que 25 à 40 % des espèces animales en Afrique subsaharienne seraient menacées dans les zones protégées. [GT II 9.4.5]

5.1.4 Adaptation et vulnérabilité

Des études récentes en Afrique soulignent la vulnérabilité de populations locales qui dépendent principalement des ressources naturelles pour leur subsistance; elles indiquent que leur base de ressources, qui subit déjà des contraintes lourdes et qui s'est dégradée du fait d'une exploitation excessive, devrait être encore plus affectée par le changement climatique (Leary *et al.*, 2006). [GT II 17.1]

Le changement et la variabilité climatiques sont susceptibles d'imposer des contraintes supplémentaires sur la disponibilité, l'accessibilité, l'approvisionnement et la demande en eau en Afrique. [GT II 9.4.1] On estime que près de 25 % de la population africaine (200 millions d'habitants) est actuellement soumise à un stress hydrique, le nombre de pays susceptibles d'être confrontés à un risque élevé dans l'avenir étant en progression (voir paragraphe 5.1.3.1). [GT II 9.RE] De surcroît, il a été envisagé que, même en l'absence de changement climatique, plusieurs pays (en particulier en Afrique du Nord) atteindraient le seuil de ressources en eaux terrestres économiquement utilisables avant 2025. [GT II 9.4.1] De fréquentes catastrophes naturelles telles des sécheresses et des crues ont largement limité le développement de l'agriculture en Afrique, qui est fortement lié aux chutes de pluie. Cette situation génère une insécurité alimentaire en sus des problèmes d'ordre macro et microstructurel. [GT II 9.5.2]

Le phénomène ENSO a, en Afrique, une grande influence sur les précipitations interannuelles et peut agir sur la variabilité future du climat. [GT I 3.7.4, 3.6.4, 11.2] Cependant, un certain nombre de barrières viennent contrarier l'adaptation efficace aux variations du phénomène ENSO, notamment les incertitudes spatiales et temporelles liées aux prévisions du climat régional, la faible connaissance des décideurs sur les incidences locales et régionales du phénomène *El Niño*, les capacités nationales limitées pour la surveillance et la prévision du climat, et le manque de coordination dans la formulation des réponses (Glantz, 2001). [GT II 17.2.2]

En ce qui concerne les incidences de la variabilité et du changement climatiques sur les eaux souterraines, peu d'informations sont disponibles malgré le fait qu'un grand nombre de pays (en particulier en Afrique du Nord) dépendent de telles sources d'eau. [GT II 9.2.1]

Des évaluations antérieures sur les incidences liées à l'eau n'ont traité adéquatement ni les multiples utilisations de l'eau dans l'avenir, ni le stress hydrique futur (par exemple, Agoumi, 2003; Conway, 2005). Des recherches plus approfondies sur l'hydrologie, le drainage et le changement climatique sont donc nécessaires. Dans les zones rurales, l'accès futur à l'eau via de petites rivières de surface doit également être évalué dans les pays qui partagent des bassins fluviaux (par exemple de Wit et Stankiewicz, 2006). [GT II 9.4.1]

On considère que la capacité d'adaptation et l'adaptation liées aux ressources en eau sont d'une importance capitale pour le continent africain. Historiquement, l'une des solutions d'adaptation possibles face à la sécheresse et aux crues a été la migration. La migration représente également une source de revenus pour les migrants qui sont employés en tant que main-d'œuvre saisonnière. Les techniques traditionnelles et modernes de récupération, de conservation et de stockage de l'eau, ainsi que la culture de variétés précoces et résistantes à la sécheresse constituent des pratiques alternatives qui contribuent à l'adaptation. L'importance de la prise en compte du savoir-faire en matière de récupération et d'utilisation de l'eau a été soulignée comme l'une des exigences les plus importantes pour

l'adaptation (Osman-Elasha *et al.*, 2006), ce qui implique de l'intégrer dans les politiques relatives au changement climatique pour garantir le développement de stratégies d'adaptation efficaces qui soient rentables, participatives et durables.[GT II 9.5.1, tableau 17.1]

Il existe très peu d'informations sur le coût des incidences et de l'adaptation au changement climatique pour les ressources en eau en Afrique. Toutefois, une évaluation initiale des coûts des mesures d'adaptation, dans le bassin de la rivière Berg en Afrique du Sud, montre que les coûts d'une non-adaptation au changement climatique peuvent être bien supérieurs à ceux susceptibles de survenir si des approches efficaces et souples font partie des solutions de gestion (voir Stern, 2007). [GT II 9.5.2]

5.2 Asie

5.2.1 Contexte

En Asie, la distribution de l'eau est inégale et une grande partie de sa superficie est soumise à un stress hydrique. Parmi les 43 pays que compte l'Asie, 20 ont un volume annuel par habitant de ressources en eau renouvelables supérieur à 3 000 m^3, 11 ont un volume compris entre 1 000 et 3 000 m^3 et 6 ont un volume inférieur à 1 000 m^3 (il n'existe pas de données pour les six derniers pays) (FAO, 2004a, b, c). [GT II tableau 10.1] Il existe de grandes superficies de terres arides et semi-arides de la Chine occidentale et de la Mongolie jusqu'en Asie occidentale. [GT II 10.2] Même dans les zones humides et subhumides de l'Asie, la rareté de l'eau ou le stress hydrique représentent l'une des barrières au développement durable. En revanche, en Asie, la population est nombreuse et croît rapidement, et les niveaux de développement ainsi que les capacités d'adaptation sont faibles. Le changement climatique devrait aggraver la rareté de l'eau en Asie, ainsi que de nombreuses contraintes socioéconomiques. [GT II 10.2]

5.2.2 Incidences observées du changement climatique sur l'eau

5.2.2.1 Ressources en eau douce

La variabilité spatiale, intersaisonnière et interannuelle des précipitations a été observée au cours des dernières décennies dans toute l'Asie. On a relevé des tendances à la diminution des précipitations annuelles moyennes en Russie, dans le nord-est et le nord de la Chine, dans les ceintures côtières et les plaines arides du Pakistan, dans les régions du nord-est de l'Inde, en Indonésie, aux Philippines et dans certaines régions du Japon. La tendance est en revanche à l'augmentation en Chine occidentale, dans le bassin du fleuve Chang Jiang et sur la côte sud-est de la Chine, dans la péninsule Arabique, au Bangladesh et le long des côtes occidentales des Philippines. En Asie du Sud-Est, on a rapporté que les phénomènes météorologiques extrêmes associés au phénomène *El Niño* ont été plus fréquents et intenses au cours des 20 dernières années (Trenberth et Hoar, 1997; Aldhous, 2004). Il est important de noter qu'il existe une grande variabilité interdécennale en ce qui concerne les moussons de l'Inde et de l'Asie orientale. [GT I 3.3.2, 3.7.1; GT II 10.2.2, 10.2.3]

En général, la fréquence des épisodes pluvieux plus intenses a augmenté dans de nombreuses régions d'sAsie, provoquant des inondations, des glissements de terrain ainsi que des coulées de boue et de débris importants, alors que le nombre de jours de pluie et le volume total annuel des précipitations ont diminué (Zhai *et al.*, 1999; Khan *et al.*, 2000; Shrestha *et al.*, 2000; Izrael et Anokhin, 2001; Mirza, 2002; Kajiwara *et al.*, 2003; Lal, 2003; Min *et al.*, 2003; Ruosteenoja *et al.*, 2003; Zhai et Pan, 2003; Gruza et Rankova, 2004; Zhai, 2004). Cependant, certains rapports font état d'une tendance à la baisse de la fréquence des pluies extrêmes dans certains pays (Manton *et al.*, 2001; Kanai *et al.*, 2004). [GT II 10.2.3]

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans de nombreuses régions d'Asie est attribuée en grande partie à l'élévation des températures, en particulier pendant les mois d'été, normalement plus secs, et pendant les épisodes ENSO (Webster *et al.*1998; Duong, 2000; PAGASA, 2001; Lal, 2002, 2003; Batima, 2003; Gruza et Rankova, 2004; Natsagdorj *et al.*, 2005). [GT I encadré 3.6; GT II 10.2.3]

Le dégel rapide du pergélisol et la diminution de l'épaisseur des sols gelés [GT I 4.7.2], en grande partie dus au réchauffement, ont menacé un grand nombre de villes et d'établissements humains et ont été à l'origine de glissements de terrain plus fréquents et de la dégénérescence de certains écosystèmes forestiers. Ils ont également entraîné une augmentation du niveau d'eau des lacs dans la région de pergélisol en Asie (Osterkamp *et al.*, 2000; Guo *et al.*, 2001; Izrael et Anokhin, 2001; Jorgenson *et al.*, 2001; Izrael *et al.*, 2002; Fedorov et Konstantinov, 2003; Gavriliev et Efremov, 2003; Melnikov et Revson, 2003; Nelson, 2003; Tumerbaatar, 2003; ACIA, 2005). [GT II 10.2.4.2]

En moyenne, les glaciers asiatiques fondent à une vitesse constante depuis les années 1960 au moins (figure 2.6). [GT I 4.5.2] Cependant, certains glaciers peuvent s'écarter de ce schéma: certains d'entre eux progressent ou voient augmenter leur épaisseur, probablement en raison d'une augmentation des précipitations (par exemple, dans le centre du Karakorum) (Hewitt, 2005). [GT I 4.5.3] Du fait de la fonte continue des glaciers, le ruissellement et la fréquence des débâcles glaciaires des lacs ont augmenté, occasionnant des coulées de boue et des avalanches (Bhadra, 2002; WWF, 2005). [GT II 10.2.4.2]

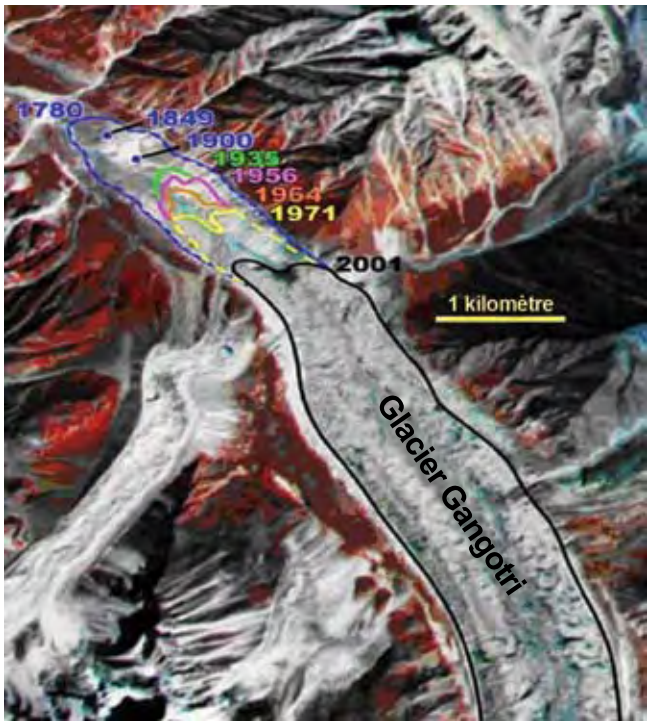


Figure 5.5: *Image satellite composite montrant le recul du front du glacier Gangotri (source du Gange, située en Uttarakhand, en Inde) depuis 1780 (avec la permission du centre de données EROS de la NASA, 9 septembre 2001). [GT II figure 10.6]*

La figure 5.5 montre le recul (depuis 1780) du glacier Gangotri, source du Gange, situé en Uttarakhand, en Inde. Bien que ce recul ait été lié à un changement climatique anthropique, aucune étude formelle d'attribution n'a été réalisée. Il convient de noter que la langue de ce glacier particulier est plutôt plate et couverte de débris. Il est difficile de lier le recul de telles langues à un signal climatique particulier, étant donné que la présence de débris retarde le signal. Les langues plates ont tendance à s'écrouler subitement, avec un changement de surface consécutif, après un amincissement de plusieurs décennies caractérisé par une modification relativement limitée de leur étendue. [GT II 10.6.2]

Dans des régions de Chine, l'augmentation de la température et la diminution des précipitations, ainsi que l'augmentation de la consommation d'eau ont entraîné des pénuries d'eau qui ont occasionné l'assèchement de lacs et de rivières. En Inde, au Pakistan, au Népal et au Bangladesh, on a attribué des pénuries d'eau à des problèmes tels que l'urbanisation et l'industrialisation rapides, la croissance démographique et l'inefficacité de la consommation d'eau. Tous ces problèmes sont aggravés du fait du changement climatique et de ses incidences néfastes sur la demande et la qualité de l'eau, ainsi que sur l'approvisionnement en eau. Dans les pays situés dans les bassins du Brahmapoutre-Gange-Meghna et de l'Indus, des pénuries d'eau ont également été la conséquence du stockage d'eau de la part des riverains en amont. Dans les régions arides et semi-arides de l'Asie centrale et occidentale, les changements du climat et sa variabilité continuent de défier la capacité des pays à faire face à l'augmentation croissante de la demande en eau (Abu-Taleb, 2000; Ragab et Prudhomme, 2002; Bou-Zeid et El-Fadel, 2002; PNUE/GRID-Arendal, 2002). Selon les rapports, la diminution des précipitations et l'augmentation de la température couramment associées au phénomène ENSO ont augmenté les pénuries d'eau, en particulier dans les régions d'Asie où les ressources en eau subissent déjà des contraintes du fait des demandes croissantes en eau et de sa consommation inefficace (Manton *et al.*, 2001). [GT II 10.2.4.2]

5.2.2.2 Agriculture

La production de riz, de maïs et de blé a diminué au cours des dernières décennies dans de nombreuses régions d'Asie à cause de l'augmentation du stress hydrique, dû en partie à l'augmentation de la température, de la fréquence des épisodes *El Niño* et à la réduction du nombre de jours de pluie (Wijeratne, 1996; Agarwal *et al.*, 2000; Jin *et al.*, 2001; Fischer *et al.*, 2002a; Tao *et al.*, 2003a, 2004). [GT II 10.2.4.1]

5.2.2.3 Biodiversité

Avec la diminution progressive des chutes de pluie pendant la période de croissance des graminées, le centre et l'ouest de l'Asie sont devenus plus arides ces dernières années, avec une réduction du développement des pâturages et une augmentation de la nudité de la surface du sol (Bou-Zeid et El-Fadel, 2002). Cette nudité accrue a entraîné une augmentation du réfléchissement du rayonnement solaire et, ainsi, une augmentation de l'évaporation de l'humidité et un assèchement croissant du sol dans un processus de rétroaction, ce qui vient participer à l'accélération de la dégradation des pâturages (Zhang *et al.*, 2003). [GT II 10.2.4.4]

La diminution des précipitations et les sécheresses dans la plupart des régions de delta au Pakistan, au Bangladesh, en Inde et en Chine ont entraîné un assèchement des zones humides et une dégradation importante des écosystèmes. Les sécheresses récurrentes de 1999 à 2001, ainsi que la construction de réservoirs en amont et l'utilisation inadéquate des eaux souterraines, ont mené à l'assèchement de la zone de Momoge, située dans la plaine de Songnen, au nord-est de la Chine (Pan *et al.*, 2003). [GT II 10.2.4.4]

5.2.3 Incidence prévue du changement climatique sur l'eau et principales vulnérabilités

5.2.3.1 Ressources en eau douce

Des changements dans la saisonnalité et l'ampleur du débit des systèmes fluviaux sont attendus suite au changement

climatique. Dans certaines régions de Russie, le changement climatique pourrait altérer significativement la variabilité du ruissellement fluvial, de telle manière que des épisodes de ruissellement extrêmement faible pourraient survenir bien plus fréquemment dans les régions cultivées du sud-ouest (Peterson *et al.*, 2002). La disponibilité en eau de surface des principaux fleuves tels que l'Euphrate et le Tigre pourrait être affectée par l'altération de l'écoulement fluvial. Au Liban, les ressources annuelles nettes en eau utilisable diminueraient de 15 % suite à une augmentation moyenne de la température estimée par le MCG de 1,2 °C dans des conditions où la concentration en CO_2 aurait doublé, alors que les débits des fleuves augmenteraient en hiver et diminueraient au printemps (Bou-Zeid et El-Fadel, 2002). Le débit mensuel maximal du Mékong devrait augmenter de 35 à 41 % dans le bassin et de 16 à 19 % dans le delta; la valeur estimée la plus basse correspondrait aux années 2010 à 2038 et la valeur la plus élevée aux années 2070 à 2099, par rapport aux niveaux de 1961 à 1990. En revanche, on estime que les débits mensuels minimaux diminueraient de 17 à 24 % dans le bassin et de 26 à 29 % dans le delta (Hoanh *et al.*, 2004) [GT II encadré 5.3], ce qui laisse à penser qu'il pourrait y avoir un risque d'inondation plus élevé pendant la saison humide et un risque accru de pénurie d'eau pendant la saison sèche. [GT II 10.4.2.1]

Les inondations pourraient étendre l'habitat des pêcheries d'eau saumâtre, mais pourraient également nuire gravement à l'industrie et aux infrastructures d'aquiculture, en particulier dans les mégadeltas démographiquement denses. Une réduction des débits de saison sèche pourrait réduire le recrutement chez certaines espèces. Dans certaines régions d'Asie centrale, des augmentations régionales de la température devraient entraîner un risque accru d'épisodes tels que des coulées de boue et des avalanches, qui pourraient être néfastes aux établissements humains (Iaiazova, 1997). [GT II 10.4.2.1]

Une intrusion d'eau salée dans les estuaires causée par la diminution du débit des cours d'eau peut pénétrer de 10 à 20 km à l'intérieur des terres, suite à l'élévation du niveau de la mer (Shen *et al.*, 2003; Yin *et al.*, 2003; Thanh *et al.*, 2004). Une augmentation de la température de l'eau et l'eutrophisation des estuaires des fleuves Zhuj Jiang et Chang Jiang ont entraîné la formation d'un horizon profond déficient en oxygène et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de «marées rouges» (Hu *et al.*, 2001). Une élévation du niveau de la mer de 0,4 à 1,0 m peut provoquer une intrusion d'eau salée de 1 à 3 km vers l'intérieur des terres dans l'estuaire du fleuve Zhuj Jiang (Huang et Xie, 2000). Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans la région du bassin hydrographique aggraverait cette intrusion et la rendrait plus fréquente (Xu, 2003; Thanh *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2005) et, ainsi, nuirait à la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. [GT II 10.4.2.1, 10.4.3.2]

Les conséquences d'une fonte accrue des neiges et des glaciers, ainsi que de l'élévation de la limite des neiges éternelles seraient défavorables à l'agriculture en aval dans plusieurs pays du sud et du centre de l'Asie. Le volume et la vitesse de fonte de la neige au printemps devraient augmenter dans le nord-ouest de la Chine et l'ouest de la Mongolie. Le dégel pourrait être également plus précoce, ce qui augmenterait certaines sources d'eau et pourrait entraîner des crues au printemps. Par contre, d'importantes pénuries d'eau disponible pour le bétail sont prévues pour la fin du siècle (Batima *et al.*, 2004, 2005). [GT II 10.4.2, 10.6]

D'après les projections à moyen terme, la fonte accrue des neiges et des glaciers provoquée par le changement climatique devrait entraîner des crues. Ces types de crues sont souvent le résultat de l'élévation du niveau de l'eau due à l'obstruction des cours d'eau par les glaces dérivantes. [GT II 10.4.2, 10.6]

L'extrapolation linéaire des changements observés permet de prévoir une augmentation de la température de l'air en surface dans le nord-ouest de la Chine, ce qui entraînerait une réduction de 27 % de la superficie des glaciers, une diminution de 10 à 15 % de la superficie des sols gelés, une augmentation des crues et des coulées de débris, ainsi qu'une aggravation des pénuries d'eau à l'horizon 2050, par rapport à la période de 1961 à 1990 (Qin, 2002). La durée du manteau neigeux saisonnier dans les régions alpines, à savoir le plateau du Tibet, le Xinjiang et la Mongolie-Intérieure, devrait raccourcir et entraîner une diminution du volume et d'importantes sécheresses de printemps. Une réduction de 20 à 40 % du ruissellement par habitant est *probable* dans les provinces de Ningxia, Xinjiang et Qinghai d'ici la fin du XXIe siècle (Tao *et al.*, 2005). Par ailleurs, les contraintes pesant sur les ressources en eau consécutives à la croissance démographique et au développement socioéconomique vont *probablement* augmenter. Higashi *et al.* (2006) prévoient que le risque de crues à Tokyo (Japon) entre 2050 et 2300, d'après le scénario A1B du SRES, sera *probablement* multiplié par 1,1 à 1,2 par rapport à la situation actuelle. [GT II 10.4.2.3]

La disponibilité en eau brute par habitant en Inde devrait diminuer de 1 820 m^3/an environ en 2001 à seulement 1 140 m^3/an en 2050, en raison de la croissance démographique (Gupta et Deshpande, 2004). Une autre étude indique que l'Inde atteindra un état de stress hydrique avant 2025, quand la disponibilité pourrait descendre en dessous de 1 000 m^3 par habitant (CWC, 2001). Ces changements sont dus à des facteurs climatiques et démographiques, dont la contribution relative est méconnue. La diminution prévue des précipitations hivernales dans le sous-continent indien entraînerait un stockage diminué et un stress hydrique accru pendant la période de mousson pauvre en pluies. Des pluies intenses étalées sur moins de jours, ce qui implique une augmentation de la fréquence des crues pendant la mousson, pourraient également entraîner

une réduction du potentiel d'alimentation des nappes souterraines. L'extension des zones souffrant d'un important stress hydrique sera l'un des problèmes environnementaux les plus importants dans le sud et le sud-est de l'Asie dans le futur, du fait que le nombre absolu de personnes subissant un important stress hydrique augmentera *probablement* considérablement. Tous les scénarios du SRES prévoient des chiffres de 120 millions à 1,2 milliard et de 185 à 981 millions pour le nombre de personnes qui devront faire face à une augmentation du stress hydrique à l'horizon 2020 et 2050, respectivement (Arnell, 2004). Une diminution de 13 à 19 % du débit annuel du fleuve Rouge, et de 16 à 24 % du fleuve Mékong est prévue pour la fin du XXIe siècle, ce qui contribuerait à augmenter le stress hydrique (BAsD, 1994). [GT II 10.4.2]

5.2.3.2 Énergie

Des changements dans le ruissellement pourraient avoir un effet significatif sur la génération d'énergie des pays producteurs d'énergie hydraulique tels que le Tadjikistan, qui est le troisième producteur d'hydroélectricité dans le monde (Banque mondiale, 2002). [GT II 10.4.2]

5.2.3.3 Agriculture

La demande en irrigation agricole dans les régions arides et semi-arides de l'Asie devrait augmenter d'au moins 10 % pour une augmentation de 1 °C de la température (Fischer *et al*., 2002a; Liu, 2002). D'après l'étude de Tao *et al*. (2003b), les cultures pluviales des plaines du nord et du nord-est de la Chine pourraient être confrontées à des problèmes liés à l'eau au cours des décennies à venir, causés par une augmentation de la demande en eau et par le déficit en humidité du sol lié à la diminution prévue des précipitations. Cependant, il convient de noter que plus des deux tiers des modèles regroupés dans les figures 2.8 et 2.10 indiquent une augmentation des précipitations et du ruissellement pour cette région. Dans le nord de la Chine, l'irrigation provenant des eaux de surface et des eaux souterraines ne devrait satisfaire que 70 % des besoins en eau de la production agricole, en raison des effets du changement climatique et de la demande croissante (Liu *et al*., 2001; Qin, 2002). [GT II 10.4.1] La variabilité accrue des caractéristiques hydrologiques continuera *probablement* d'affecter les approvisionnements en céréales et la sécurité alimentaire dans de nombreux pays d'Asie. [GT II 10.4.1.2]

5.2.4 Adaptation et vulnérabilité

Actuellement, la vulnérabilité face à l'eau n'est pas la même pour tous les pays asiatiques. Certains pays qui ne sont pas actuellement confrontés à un risque élevé devraient subir un stress hydrique à l'avenir, avec des capacités d'adaptation diverses. Les régions côtières, en particulier les régions fortement peuplées des mégadeltas du sud, de l'est et du sud-est de l'Asie, seraient les plus exposées à un risque d'inondations fluviales et côtières. Dans le sud et l'est de l'Asie, l'interaction entre les incidences du changement climatique et la rapide croissance économique et démographique, ainsi que la migration des zones rurales vers les zones urbaines, devraient affecter le développement. [GT II 10.2.4, 10.4, 10.6]

La vulnérabilité de la société est influencée par son mode de développement, son exposition physique, la distribution des ressources, les contraintes antérieures, ainsi que par les institutions sociales et gouvernementales. Toutes les sociétés ont des aptitudes inhérentes à faire face à certaines variations climatiques, mais les capacités d'adaptation sont inégalement distribuées, tant d'un pays à l'autre qu'au sein des sociétés. Les populations pauvres et marginalisées ont été davantage menacées dans le passé et sont les plus vulnérables aux incidences du changement climatique. Des analyses récentes en Asie montrent que les groupes marginalisés qui dépendent de ressources primaires pour leur subsistance sont particulièrement vulnérables aux incidences du changement climatique si leur base de ressources subit des contraintes lourdes et est dégradée du fait d'une exploitation excessive, ou si leurs systèmes de gouvernance ne sont pas capables de réagir efficacement (Leary *et al*., 2006). [GT II 17.1] Les preuves d'une adaptation en réponse au changement climatique observé et prévu sont de plus en plus nombreuses. Par exemple, le changement climatique est pris en compte dans la conception des projets d'infrastructure, comme le projet de protection du littoral aux Maldives et la prévention des inondations dues aux débâcles glaciaires des lacs au Népal (voir encadré 5.4). [GT II 17.2, 17.5, 16.5]

Dans certaines régions d'Asie, la conversion de terres cultivées (pâturages) en forêt, la restauration et le rétablissement de la végétation, l'amélioration des variétés d'arbres et d'herbacées, ainsi que la sélection et la culture de nouvelles variétés résistant à la sécheresse pourraient être des mesures efficaces pour prévenir la pénurie d'eau due au changement climatique. Des stratégies d'économie d'eau pour l'irrigation pourraient être mises en place pour prévenir la pénurie d'eau dans des régions déjà soumises à un stress hydrique (Wang, 2003). Dans le nord de l'Asie, le recyclage et la réutilisation des eaux usées municipales (Frolov *et al*., 2004) et l'augmentation de l'efficacité de la consommation d'eau pour l'irrigation et à d'autres fins (Alcamo *et al*., 2004) permettraient *probablement* d'éviter la pénurie d'eau. [GT II 10.5.2]

Dans plusieurs régions d'Asie, de nombreuses mesures d'adaptation pourraient être appliquées pour réduire le plus possible les incidences du changement climatique sur les ressources en eau. Certaines d'entre elles concernent l'utilisation inefficace de l'eau actuelle, à savoir:

- La modernisation des schémas d'irrigation existants et la gestion de la demande visant à optimiser l'efficacité physique et économique de l'utilisation des ressources en eau et de l'eau recyclée, dans les pays soumis à un stress hydrique;

Encadré 5.4: Projet de réduction des risques pour le lac Tsho Rolpa (Népal) en tant que mesure d'adaptation anticipative observée [GT II encadré 17.1]

Le lac Tsho Rolpa est un lac glaciaire situé au Népal, à une altitude d'environ 4 580 m. Le recul du glacier a augmenté la superficie du lac, qui est passée de 0,23 km^2 en 1957/58 à 1,65 km^2 en 1997 (figure 5.6). Les 90 à 100 millions de m^3 d'eau contenus dans le lac à cette époque n'étaient retenus que par un barrage de moraine, situation qui exigeait une action urgente pour réduire le risque d'une crue catastrophique de rupture du lac glaciaire.

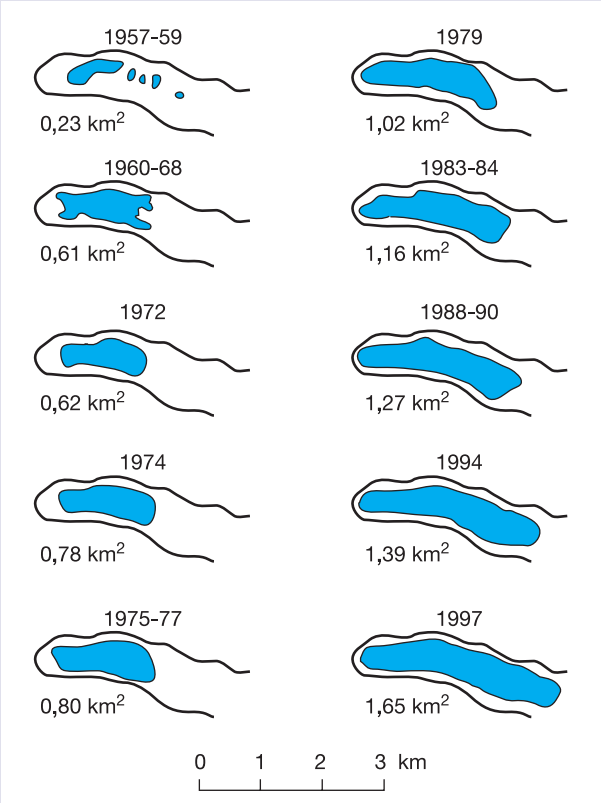


Figure 5.6: *Changements dans la région du lac Tsho Rolpa au fil du temps*

Si le barrage venait à céder, un tiers de l'eau au moins s'écoulerait en aval. Cette situation représentait, entre autres, un risque important pour la centrale hydroélectrique de Khimti, qui était en cours de construction en aval. Ces dangers ont décidé le Gouvernement du Népal à démarrer un projet en 1998, avec l'aide de donateurs internationaux, pour abaisser le niveau d'eau du lac par drainage. Pour réduire le risque d'une débâcle glaciaire, un groupe d'experts a recommandé que le niveau du lac soit abaissé de trois mètres par creusement d'un canal dans la moraine. Une vanne a été construite pour contrôler la libération de l'eau. Pendant ce temps, un système d'alerte précoce a été mis en place dans 19 villages en aval, pour le cas où une débâcle glaciaire du Tsho Rolpa viendrait à se produire malgré ces efforts. Les habitants des villages locaux ont été activement associés à la conception du système et des exercices d'évacuation sont réalisés périodiquement. L'année 2002 a vu l'aboutissement du projet de construction dont le coût s'est élevé à 3,2 millions de dollars des États-Unis. Il est clair que la réduction des risques de crues de rupture des lacs glaciaires nécessite des investissements importants et prend du temps, car la prévention complète d'une crue de cette nature exigerait un drainage supplémentaire pour abaisser le niveau du lac.

Le cas du lac Tsho Rolpa doit être examiné dans un contexte plus large. La fréquence des crues de rupture de lacs glaciaires dans la chaîne de l'Himalaya, au Népal, au Bhoutan et au Tibet a augmenté de 0,38 épisode/an dans les années 1950 à 0,54 épisode/an dans les années 1990. [GT II 1.3.1.1]

Sources: Mool *et al.* (2001), OCDE (2003), Shrestha et Shrestha (2004).

- Les politiques d'investissement public pour améliorer l'accès aux ressources en eau disponibles, encourager la gestion intégrée de l'eau et le respect de l'environnement, et préconiser de meilleures pratiques, pour une utilisation sensée de l'eau dans l'agriculture;
- L'utilisation de l'eau destinée à satisfaire les demandes en eau non potable. Après traitement, l'eau recyclée peut également être utilisée pour créer ou améliorer les zones humides et les habitats riverains. [GT II 10.5.2]

L'adaptation efficace et la capacité d'adaptation, en particulier dans les pays asiatiques en développement, continueront d'être limitées par diverses contraintes d'ordre écologique, social, économique, technique, institutionnel et politique. Le recyclage de l'eau constitue une approche durable de l'adaptation au changement climatique et pourrait s'avérer rentable sur le long terme. Cependant, le traitement des eaux usées en vue d'une réutilisation (ce qui est pratiqué actuellement à Singapour), et l'installation de systèmes de distribution, peuvent s'avérer initialement onéreux par rapport aux autres solutions d'approvisionnement en eau, notamment l'utilisation d'eau importée ou des eaux souterraines. Toutefois, il s'agit de solutions d'adaptation potentiellement importantes dans de nombreux pays d'Asie. La diminution du gaspillage et des fuites d'eau pourrait être mise en pratique afin d'amortir les diminutions d'approvisionnement en eau dues à la réduction des précipitations et à la hausse des températures. Des approches axées sur le marché dans un but de réduire le gaspillage d'eau pourraient également être efficaces pour diminuer les impacts négatifs du changement climatique sur les ressources en eau. Dans des fleuves tels que le Mékong, où les débits devraient augmenter pendant la saison humide et diminuer pendant la saison sèche, des interventions planifiées de gestion de l'eau via des barrages et des réservoirs pourraient diminuer en partie les débits des saisons humides et augmenter sensiblement ceux des saisons sèches. [GT II 10.5.2, 10.5.7]

5.3 Australie et Nouvelle-Zélande

5.3.1 Contexte

Bien que l'Australie et la Nouvelle-Zélande soient très différentes du point de vue hydrologique et géologique, ces deux pays subissent déjà des incidences du récent changement climatique sur l'approvisionnement en eau, en raison de la variabilité naturelle et de l'activité humaine. Le moteur régional le plus important de la variabilité naturelle du climat est le cycle *El Niño*-oscillation australe (paragraphe 2.1.7). Depuis 2002, la sécheresse sévit dans pratiquement tous les états orientaux et dans la région sud-ouest de l'Australie. Cette sécheresse est au moins comparable aux épisodes de «Federation droughts» (sécheresses de la Fédération) de 1895 et de 1902, et elle a suscité un grand débat sur le changement climatique et son incidence sur les ressources en eau, ainsi que sur la gestion durable de l'eau. [GT II 11.2.1, 11.2.4]

Des augmentations de la demande en eau ont fait peser des contraintes sur la capacité d'approvisionnement pour l'irrigation, les villes, l'industrie et les flux environnementaux. La demande accrue observée depuis les années 1980 en Nouvelle-Zélande est due à une intensification de l'agriculture (Woods et Howard-Williams, 2004). La superficie irriguée dans ce pays a augmenté d'environ 55 % par décennie depuis les années 1960 (Lincoln Environmental, 2000). De 1985 à 1996, la demande en eau a augmenté de 65 % en Australie (NLWRA, 2001), où la salinité des terres arides, la modification du régime fluvial, la suraffectation et l'utilisation inefficace des ressources en eau, le défrichement, l'intensification de l'agriculture et la fragmentation des écosystèmes sont des sources majeures de stress environnemental (SOE, 2001; Cullen, 2002). Dans le contexte du changement climatique prévu, l'approvisionnement en eau est l'un des secteurs les plus vulnérables en Australie et il devrait représenter un problème critique dans certaines régions de la Nouvelle-Zélande. [GT II 11.RE, 11.2.4, 11.7]

5.3.2 Changements observés

La région du sud-ouest de l'Australie-Occidentale, caractérisée par des chutes de pluie hivernales, a subi une importante diminution des chutes de pluie de mai à juillet depuis le milieu du XXe siècle. Les effets de cette diminution sur le ruissellement naturel ont été très sensibles, comme le montre la chute de 50 % des apports annuels aux réservoirs alimentant la ville de Perth (figure 5.7). Des contraintes semblables ont pesé sur les ressources locales en eaux souterraines et sur les zones humides. Ces faits ont été accompagnés d'une augmentation de 20 % de la consommation domestique en 20 ans et d'une croissance démographique de 1,7 % par an (IOCI, 2002). Bien qu'aucune étude d'attribution n'ait été disponible au moment de l'élaboration du quatrième Rapport d'évaluation, des simulations du climat ont indiqué qu'au moins une partie de l'assèchement observé était liée à une augmentation de l'effet de serre (IOCI, 2002). Ces dernières années, une sécheresse intense de plusieurs années a sévi dans les régions orientales et dans d'autres régions du sud de l'Australie. À titre d'exemple, le débit entrant total du fleuve Murray au cours des cinq années antérieures à 2006 a été le plus bas enregistré pour une séquence de cinq années. [GT II 11.6]

5.3.3 Changements prévus

5.3.3.1 Eau

Les problèmes actuels liés à la sécurité hydrique vont *très probablement* augmenter d'ici 2030 dans les régions du sud et de l'est de l'Australie, ainsi que dans certaines régions de l'est de la Nouvelle-Zélande éloignées des principaux fleuves. [GT II 11.RE] Le bassin du Murray-Darling est le plus vaste bassin fluvial de l'Australie et fournit de l'eau à environ 70 % des cultures et des pâturages irrigués (MDBC, 2006). D'après les scénarios d'émissions A1 et B1 du SRES

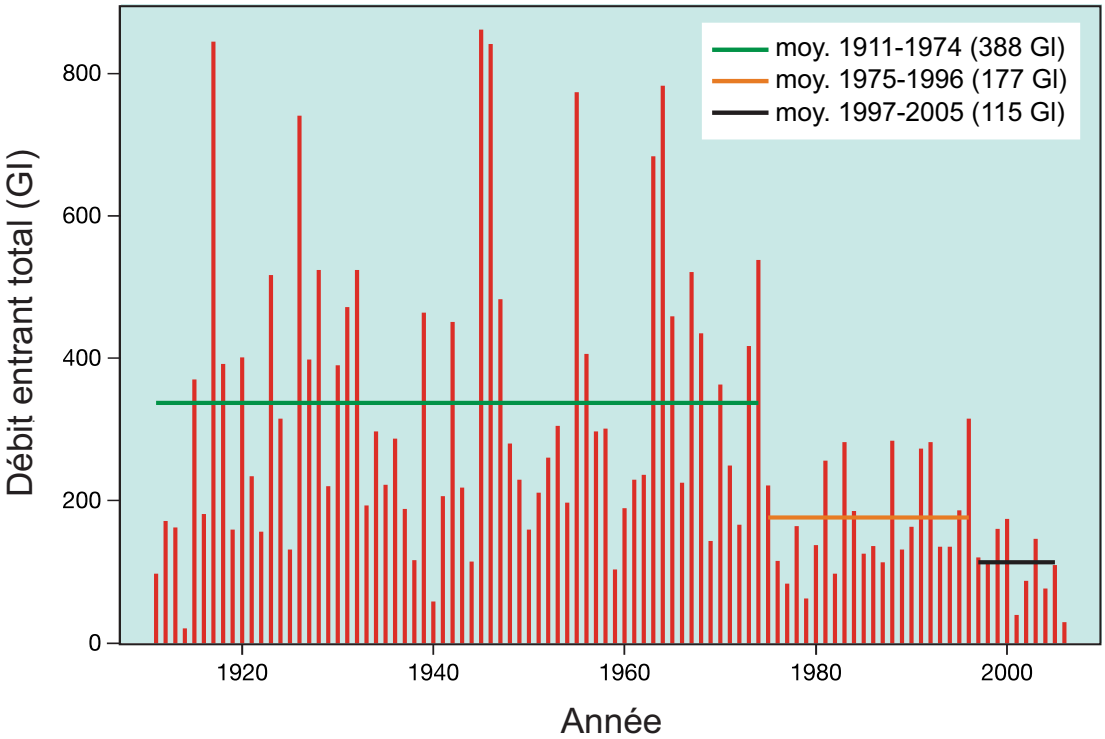


Figure 5.7: *Débit entrant du système d'approvisionnement en eau de Perth de 1911 à 2006. Les lignes horizontales indiquent les moyennes. Source: http://www.watercorporation.com.au/D/dams_streamflow.cfm (avec la permission de Water Corporation, Australie-Occidentale). [GT II figure 11.3]*

et une large gamme de MCG, l'écoulement fluvial annuel dans ce bassin devrait chuter de 10 à 25 % d'ici 2050 et de 16 à 48 % d'ici 2100, avec des changements de salinité de -8 à +19 % et de -25 à +72 % respectivement (Beare et Heaney, 2002). [GT II tableau 11.5] Quant au ruissellement, il devrait diminuer de 0 à 45 % dans 29 bassins hydrographiques de l'État Victoria (Jones et Durack, 2005). D'après le scénario A2, les projections indiquent une chute de 6 à 8 % du ruissellement annuel dans la plus grande partie de l'est de l'Australie, et de 14 % dans le sud-ouest, au cours de la période 2021-2050, par rapport à celle de 1961 à 1990 (Chiew *et al.*, 2003). Une évaluation des risques pour la ville de Melbourne, fondée sur 10 modèles climatiques (d'après les scénarios B1, A1B et A1F du SRES) prévoit des chutes de l'écoulement fluvial moyen de 3 à 11 % d'ici 2020 et de 7 à 35 % d'ici 2050; toutefois, des actions planifiées côté demande et côté offre pourraient éviter les pénuries d'eau jusqu'en 2020 (Howe *et al.*, 2005). Il existe peu de données concernant les incidences futures sur les eaux souterraines en Australie. [GT II 11.4.1]

En Nouvelle-Zélande, les fleuves de l'Île du Sud connaîtront *très probablement* un ruissellement proportionnellement plus abondant en hiver et moins abondant en été (Woods et Howard-Williams, 2004). Ils fourniront *très probablement* davantage d'eau à des fins de génération hydroélectrique durant la période de pointe, en hiver, et réduiront la dépendance vis-à-vis des lacs de stockage de l'eau destinés au transfert de la capacité de production à l'hiver suivant. Cependant, les industries dépendantes de l'irrigation (notamment les industries laitière, céréalière, horticole) subiront *probablement* des effets négatifs dus à une plus faible disponibilité en eau au printemps et en été, leur période de pointe de demande. La fréquence des sécheresses augmentera *très probablement* dans les régions orientales, avec d'éventuelles pertes de la production agricole des terres non irriguées (Mullan *et al.*, 2005). Il est *pratiquement certain* que les effets du changement climatique sur la fréquence des crues et des sécheresses seront modulés par les phases des phénomènes ENSO et OIP (McKerchar et Henderson, 2003). Selon tous les scénarios examinés, l'aquifère d'eaux souterraines pour la ville d'Auckland dispose d'une capacité de réserve pour la recharge (Namjou *et al.*, 2006). Il est *très improbable* que les débits de base des principaux cours d'eau et des sources soient compromis, à moins que ne sévisse une sécheresse pendant de nombreuses années consécutives. [GT II 11.4.1.1]

5.3.3.2 Énergie

En Australie et en Nouvelle-Zélande, le changement climatique pourrait affecter la production d'énergie dans les régions où les réductions de l'approvisionnement en eau liées au climat entraînent des réductions du volume d'eau d'alimentation pour les turbines hydroélectriques et le refroidissement des centrales thermiques. En Nouvelle-Zélande, l'augmentation de la vitesse des vents d'ouest

augmentera *très probablement* la génération éolienne et le déversement des précipitations dans les principaux bassins hydrographiques de l'Île du Sud, et augmentera le volume des précipitations hivernales dans le bassin hydrographique du Waikato (Ministère de l'environnement, 2004). Il est *pratiquement certain* que le réchauffement augmentera la fonte des neiges, le rapport pluviométrie sur neige, ainsi que les débits fluviaux en hiver et au début du printemps. Cela sera *très probablement* utile pour la génération hydroélectrique au moment de la période de pointe de la demande d'énergie pour le chauffage. [GT II 11.4.10]

5.3.3.3 Santé

L'étendue géographique et la saisonnalité de certaines maladies infectieuses transmises par les moustiques seront *probablement* modifiées, notamment en ce qui concerne la maladie de la Ross River, la dengue et le paludisme. Des épisodes pluvieux moins nombreux mais plus intenses influenceront *probablement* la reproduction du moustique et augmenteront la variabilité des taux annuels d'incidence de la maladie de la Ross River, en particulier dans les régions tempérées et semi-arides (Woodruff *et al*., 2002, 2006). La dengue représente un grand danger en Australie; le climat de l'extrême nord est déjà propice à l'*Aedes aegypti* (principal moustique vecteur du virus de la dengue), et la fréquence et l'ampleur des épidémies de cette maladie ont augmenté dans l'extrême nord de l'Australie au cours de la dernière décennie. Il est peu *probable* que le paludisme s'installe, à moins que les stratégies de parade des autorités sanitaires ne se dégradent considérablement (McMichael *et al*., 2003). [GT II 11.4.11]

L'eutrophisation est un problème majeur pour la qualité de l'eau (Davis, 1997; SOE, 2001). La fréquence et la durée des fleurs d'eau toxiques augmenteront *probablement* en raison du changement climatique. Elles peuvent représenter un danger pour la santé humaine dans les eaux de loisirs et de consommation et peuvent tuer les poissons et le bétail (Falconer, 1997). Des stratégies adaptatives de gestion simples et neutres vis-à-vis des ressources, telles que des chasses, peuvent réduire sensiblement leur survenue et leur installation dans des masses d'eau riches en éléments nutritifs et thermiquement stratifiées (Viney *et al*., 2003). [GT II 11.4.1]

5.3.3.4 Agriculture

De grands décalages dans la distribution géographique de l'agriculture et de ses services sont *très probables*. Il ne sera *probablement* plus possible d'exploiter les terres marginales dans les régions les plus sèches en raison des pénuries d'eau, de nouveaux risques liés à la biosécurité, d'une dégradation de l'environnement et d'une perturbation sociale. [GT II 11.7] Les cultures et les autres industries agricoles dépendant de l'irrigation seront *probablement* menacées lorsque la disponibilité en eau pour l'irrigation sera réduite. Pour le maïs en Nouvelle-Zélande, une diminution de la durée de la croissance réduit les besoins en eau des cultures et permet une synchronisation plus étroite du développement et des conditions climatiques saisonnières (Sorensen *et al*., 2000). La distribution de la viticulture dans les deux pays sera probablement modifiée en fonction de l'adéquation par rapport à des pâturages à haut rendement et à la sylviculture, et de la disponibilité en eau pour l'irrigation ainsi que de son coût (Hood *et al*., 2002; Miller et Veltman, 2004; Jenkins, 2006). [GT II 11.4.3]

5.3.3.5 Biodiversité

Les incidences sur la structure, la fonction et la composition des espèces de nombreux écosystèmes naturels seront *probablement* importantes à l'horizon 2020, et il est *pratiquement certain* qu'elles aggraveront les contraintes existantes telles que les espèces envahissantes et la perte de l'habitat (notamment pour les oiseaux migrateurs), qu'elles augmenteront le risque d'extinction d'espèces, qu'elles dégraderont un grand nombre de systèmes naturels et qu'elles entraîneront une diminution des écoservices pour l'approvisionnement en eau. L'incidence du changement climatique sur les ressources en eau interagira également avec d'autres sources de stress telles que les espèces envahissantes et la fragmentation de l'habitat. L'intrusion d'eau salée consécutive à l'élévation du niveau de la mer, à la diminution du débit des rivières et à l'augmentation de la fréquence des sécheresses viendra *très probablement* perturber la composition des espèces des habitats d'eau douce, et aura donc des incidences sur les pêcheries dans les estuaires et les régions côtières (Bunn et Arthington, 2002; Hall et Burns, 2002; Herron *et al*., 2002; Schallenberg *et al*., 2003). [GT II 11.RE, 11.4.2]

5.3.4 Adaptation et vulnérabilité

Une adaptation planifiée peut grandement réduire la vulnérabilité, et la prise en compte des risques dus au changement climatique tant du côté de la demande que de celui de l'approvisionnement ouvre des possibilités (Allen Consulting Group, 2005). Dans les grandes villes telles que Perth, Brisbane, Sydney, Melbourne, Adélaïde, Canberra et Auckland, les préoccupations concernant les contraintes démographiques, la sécheresse persistante dans le sud et l'est de l'Australie, et l'incidence du changement climatique conduisent les planificateurs à envisager un large éventail de solutions d'adaptation concernant les ressources en eau. Tandis qu'un certain nombre d'options ont déjà été mises en œuvre en réponse au changement climatique observé (par exemple, des restrictions d'eau permanentes, le recyclage de l'eau, le dessalement de l'eau de mer) (voir tableau 5.2) [GT II tableaux 11.2, 11.6], les deux pays ont pris des mesures notables pour augmenter la capacité d'adaptation via une intensification de la recherche et de l'acquisition de connaissances, l'extension des évaluations des risques du changement climatique

pour les décideurs, l'intégration du changement climatique dans les politiques et les programmes, la sensibilisation et le traitement plus efficace des problèmes liés au climat. Cependant, il reste des barrières environnementales, économiques, informationnelles, sociales, comportementales et politiques à la mise en œuvre de l'adaptation. [GT II 11.5]

Dans les bassins hydrographiques urbains, les eaux d'orage et les eaux recyclées pourraient être utilisées pour augmenter l'approvisionnement, bien que les dispositifs institutionnels existants et les systèmes techniques mis en place pour la distribution de l'eau limitent la mise en œuvre de cette solution. De surcroît, la communauté montre une certaine réticence à l'utilisation d'eau recyclée pour la consommation humaine (notamment dans les villes comme Toowoomba dans le Queensland, et Goulburn en Nouvelle-Galles-du-Sud). L'installation de réservoirs d'eau de pluie peut être une autre réponse adaptative qui est actuellement activement encouragée via des politiques d'incitation et de rabais. En ce qui concerne les activités rurales, des aménagements plus souples sont nécessaires pour les affectations, via l'extension des marchés de l'eau où les échanges peuvent augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Beare et Heaney, 2002). Des progrès considérables sont en cours dans ce domaine. Dans le cadre de l'initiative nationale sur l'eau, les États, les Territoires et le Gouvernement australien se sont actuellement engagés à poursuivre les meilleures pratiques en termes de tarification de l'eau et à mettre en œuvre des dispositions institutionnelles pour obtenir une facturation de l'eau cohérente. [GT II 11.5]

Lorsque les incidences du changement climatique sont combinées à d'autres tendances non climatiques, on constate des implications graves pour la durabilité en Australie et en Nouvelle-Zélande. Dans certains bassins versants, où une augmentation de la demande en eau urbaine et rurale a déjà dépassé les niveaux d'approvisionnement durables, les stratégies d'adaptation proposées et en

Tableau 5.2: *Exemples de stratégies d'adaptation du gouvernement pour faire face aux pénuries d'eau en Australie. [GT II tableau 11.2] Il convient de noter que les chiffres relatifs aux investissements étaient corrects en 2007, au moment où le quatrième Rapport d'évaluation était sous presse, et qu'ils ne tiennent pas compte des développements ultérieurs.*

Gouvernement	Stratégie	Investissement	Source
Australie	Aide financière contre la sécheresse pour les communautés rurales	0,7 milliard de dollars des États-Unis de 2001 à 2006	DAFF, 2006b
Australie	Initiative nationale sur l'eau, soutenue par le Fonds australien pour l'eau	1,5 milliard de dollars des États-Unis de 2004 à 2009	DAFF, 2006a
Australie	Accord relatif aux eaux du bassin du Murray-Darling	0,4 milliard de dollars des États-Unis de 2004 à 2009	DPMC, 2004
Victoria	Station de traitement de l'est de Melbourne pour la fourniture d'eau recyclée	225 millions de dollars des États-Unis à l'horizon 2012	Melbourne Water, 2006
Victoria	Nouvelles canalisations de Bendigo à Ballarat, recyclage de l'eau, interconnexions entre les barrages, réduction des infiltrations dans les canaux, mesures de conservation	153 millions de dollars des États-Unis à l'horizon 2015	Premier of Victoria, 2006
Victoria	Canalisation de Wimmera Mallee pour remplacer les canaux d'irrigation	376 millions de dollars des États-Unis à l'horizon 2010	Vic DSE, 2006
Nouvelle-Galles-du-Sud	Le Fonds pour l'eau de la Nouvelle-Galles-du-Sud soutient les projets qui économisent ou recyclent l'eau à Sydney	98 millions de dollars des États-Unis pour le 3e volet, et plus de 25 millions de dollars des États-Unis à 68 autres projets	DEUS, 2006
Queensland	Plan pour l'eau 2005-2010 visant à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et sa qualité, recyclage, préparation aux sécheresses, nouvelle tarification de l'eau	Inclut 182 millions de dollars des États-Unis pour les infrastructures d'eau dans le sud-est du Queensland et 302 millions pour d'autres programmes d'infrastructure	Gouvernement du Queensland, 2005
Australie-Méridionale	Le projet «Water Proofing Adelaide» est un projet directeur pour la gestion, la conservation et le développement des ressources en eau d'Adélaïde jusqu'en 2025	N.d.	Gouvernement d'Australie-Méridionale 2005
Australie-Occidentale	Stratégie fédérale sur l'eau (2003) et Plan fédéral sur l'eau (proposé) La Water Corporation (société de gestion de l'eau) a doublé l'approvisionnement de 1996 à 2006	500 millions de dollars des États-Unis dépensés par la Water Corporation de 1996 à 2006, et 290 millions pour l'usine de dessalement de Perth	Gouvernement d'Australie-Occidentale, 2003, 2006; Water Corporation, 2006

cours [GT II 11.2.5] pourront probablement faire gagner du temps. Le maintien du développement côtier exigera probablement une planification et des réglementations plus strictes pour rester durable. [GT II 11.7]

5.4 Europe

5.4.1 Contexte

L'Europe est bien desservie, avec de nombreux cours d'eau permanents, dont beaucoup s'écoulent depuis le centre du continent. Elle possède en outre de nombreuses zones peu accidentées. Les principaux climats présents en Europe sont de type maritime, transitoire, continental, polaire et méditerranéen; les principaux types de végétation sont la toundra, la taïga à conifères (forêt boréale), la forêt mixte décidue, la steppe et la végétation méditerranéenne. Une partie relativement vaste de l'Europe est cultivée; environ un tiers de cette superficie est qualifié d'arable et les céréales représentent la culture prédominante. [GT II TRE 13.1.2.1]

La sensibilité de l'Europe au changement climatique suit un net gradient nord-sud, et bien des études indiquent que le sud de l'Europe sera plus fortement affecté (AEE, 2004). Le climat déjà chaud et semi-aride du sud de l'Europe devrait encore se réchauffer et s'assécher et menacer les cours d'eau, la production hydroélectrique et agricole et la récolte du bois. Dans le centre et l'est de l'Europe, les précipitations devraient diminuer en été et aggraver le stress hydrique. Les pays nordiques sont également vulnérables au changement climatique, même si les premières étapes du réchauffement pourraient apporter certains avantages, par exemple, en termes d'augmentation du rendement des cultures et de croissance forestière. [GT II 12.2.3, RiD]

Les principales contraintes environnementales sont liées à la biodiversité, au paysage, à la dégradation des sols et des forêts, aux risques naturels, à la gestion de l'eau et aux environnements de loisirs. En Europe, la plupart des écosystèmes sont gérés ou semi-gérés; ils sont souvent fragmentés et soumis à des stress du fait de la pollution et d'autres incidences d'origine humaine. [GT II TRE 13.1.2.1]

5.4.2 Changements observés

Les précipitations hivernales moyennes ont augmenté pendant la période de 1946 à 1999 dans la plus grande partie de l'Europe Atlantique et septentrionale (Klein Tank *et al.*, 2002). Il convient d'interpréter ce phénomène en partie dans le contexte des changements de la NAO hivernale (Scaife *et al.*, 2005). Dans la région méditerranéenne, les tendances des précipitations annuelles pendant la période de 1950 à 2000 ont été négatives dans les régions orientales (Norrant et Douguédroit, 2006). On observe une augmentation des précipitations moyennes par jour de pluie dans la plupart des régions du continent, même dans certaines zones qui deviennent plus sèches (Frich *et al.*, 2002; Klein Tank *et al.*, 2002; Alexander *et al.*, 2006). Suite à ces changements et à d'autres changements dans les régimes hydrologiques et thermiques (voir Auer *et al.*, 2007), on a rapporté des incidences observées dans d'autres secteurs. Certaines d'entre elles sont indiquées dans le tableau 5.3. [GT I chapitre 3; GT II 12.2.1]

Tableau 5.3: *Attribution des changements récents des écosystèmes naturels et gérés aux tendances récentes de température et de précipitations. [Extrait du GT II tableau 12.1]*

Région	Changement observé	Référence
Écosystèmes terrestres		
Montagnes fennoscandiennes et subarctique	Disparition de certains types de zones humides (tourbières à palses) en Laponie; augmentation de la richesse et de la fréquence des espèces au niveau de la limite d'altitude de la vie végétale	Klanderud et Birks, 2003; Luoto *et al.*, 2004
Agriculture		
Régions du nord de l'Europe	Augmentation du stress des cultures pendant les étés plus chauds et plus secs; augmentation du risque de grêle pour les cultures	Viner *et al.*, 2006
Cryosphère		
Russie	Diminution de l'épaisseur et de l'étendue du pergélisol et dommages aux infrastructures	Frauenfeld *et al.*, 2004; Mazhitova *et al.*, 2004
Alpes	Diminution de la couverture neigeuse saisonnière (à faible altitude)	Laternser et Schneebeli, 2003; Martin et Etchevers, 2005
Europe	Diminution du volume et de la surface des glaciers (hormis certains glaciers en Norvège)	Hoelzle *et al.*, 2003

5.4.3 Changements prévus

5.4.3.1 Eau

En général, quel que soit le scénario, les précipitations moyennes annuelles prévues augmentent dans le nord de l'Europe et diminuent plus au sud. Cependant, le changement des précipitations varie sensiblement d'une saison à l'autre et d'une région à l'autre en réponse aux changements de la circulation à grande échelle et au chargement en vapeur d'eau. Räisänen *et al*. (2004) prévoient que les précipitations vont sensiblement diminuer en été (jusqu'à 70 % dans certaines régions d'après le scénario A2 du SRES) dans le sud et le centre de l'Europe et, dans une plus faible mesure, dans le centre de la Scandinavie. Giorgi *et al*. (2004) ont identifié une augmentation de la circulation anticyclonique en été sur le nord-est de l'Atlantique, ce qui crée une dorsale sur l'Europe de l'Ouest et un thalweg en Europe de l'Est. Cette structure de blocage dévie les orages vers le nord, et de ce fait diminue sensiblement les précipitations (jusqu'à 30 à 45 %) sur une large partie du bassin méditerranéen, ainsi que sur l'ouest et le centre de l'Europe. [GT I tableau 11.1; GT II 12.3.1.1]

On prévoit que le changement climatique aura un éventail d'incidences sur les ressources en eau (tableau 5.3). Des augmentations du ruissellement annuel sont prévues en Europe atlantique et septentrionale (Werritty, 2001; Andréasson *et al*., 2004), alors que des diminutions sont prévues, elles, en Europe centrale, méditerranéenne et orientale (Chang *et al*., 2002; Etchevers *et al*., 2002; Menzel et Bürger, 2002; Iglesias *et al*., 2005). Le ruissellement annuel moyen devrait augmenter en Europe septentrionale (au nord de 47°N) d'environ 5 à 15 % d'ici aux années 2020, et de 9 à 22 % d'ici aux années 2070, d'après les scénarios A2 et B2 et les scénarios climatiques de deux modèles climatiques différents (Alcamo *et al*., 2007). Entre-temps, en Europe méridionale (au sud de 47°N), le ruissellement devrait diminuer de 0 à 23 % d'ici aux années 2020 et de 6 à 36 % d'ici aux années 2070 (d'après le même ensemble d'hypothèses). L'alimentation des nappes souterraines diminuera *probablement* en Europe centrale et en Europe de l'Est (Eitzinger *et al*., 2003), avec une diminution supérieure dans les vallées (Krüger *et al*., 2002) et les basses terres, notamment dans les steppes hongroises (Somlyódy, 2002). [GT II 12.4.1, figure 12.1]

La saisonnalité des débits augmentera, avec des débits plus élevés pendant la saison de débit de pointe, et plus bas pendant la saison de basses eaux ou les périodes de sécheresse prolongée (Arnell, 2003, 2004). [GT II 3.4.1] Des études montrent une augmentation des débits d'hiver et une diminution des débits d'été pour le Rhin (Middelkoop et Kwadijk, 2001), les fleuves slovaques (Szolgay *et al*., 2004), la Volga, et les fleuves du centre et de l'est de l'Europe (Oltchev *et al*., 2002). À court terme, le recul des glaciers devrait augmenter le débit d'été des rivières dans les Alpes. Cependant, à long terme, ce recul devrait entraîner une diminution du débit d'été (Hock *et al*., 2005) jusqu'à 50 % (Zierl et Bugmann, 2005). Les basses eaux d'été devraient diminuer jusqu'à 50 % en Europe centrale (Eckhardt et Ulbrich, 2003), et jusqu'à 80 % dans certains fleuves du sud de l'Europe (Santos *et al*., 2002). [GT II 12.4.1]

Les régions les plus exposées à un risque de sécheresse accru sont la Méditerranée et certaines régions du centre et de l'est de l'Europe, régions qui devraient assister à la plus forte augmentation dans la demande en eau d'irrigation (Döll, 2002; Donevska et Dodeva, 2004). Pour remédier à cette situation, il sera nécessaire d'élaborer une planification durable de l'utilisation des terres. Les besoins en irrigation vont *probablement* devenir importants dans des pays (notamment l'Irlande) où ils sont quasi inexistants actuellement (Holden *et al*., 2003). Le changement climatique et des prélèvements d'eau accrus vont *probablement* provoquer une augmentation de la superficie des terres subissant un stress hydrique prononcé (rapport prélèvement/disponibilité supérieur à 40 %) et une intensification de la concurrence autour des ressources en eau disponibles (Alcamo *et al*., 2003b; Schröter *et al*., 2005). [GT II 12.4.1]

Risque de crues et de sécheresses dans l'avenir (voir tableau 5.4). Le risque de crues devrait augmenter à l'échelle du continent. Les régions les plus susceptibles de voir augmenter la fréquence des crues sont l'Europe de l'Est, puis l'Europe du Nord, la côte atlantique et l'Europe centrale, tandis que les projections pour le sud et le sud-est de l'Europe indiquent une augmentation significative de la fréquence des sécheresses. Dans certaines régions, les risques de crues et de sécheresses devraient augmenter simultanément. [GT II tableau 12.4]

Christensen et Christensen (2003), Giorgi *et al*. (2004), Kjellström (2004) et Kundzewicz *et al*. (2006) ont tous évoqué une hausse sensible de l'intensité des épisodes de précipitations journalières. Ces conclusions concernent même les régions où les précipitations moyennes diminuent, telles que l'Europe centrale et la Méditerranée. L'incidence de ce changement sur la région méditerranéenne en été n'est pas claire en raison de la forte composante des pluies de convection et de sa grande variabilité spatiale (Llasat, 2001). [GT II 12.3.1.2]

Les effets combinés de la hausse des températures et de la diminution des précipitations moyennes d'été devraient augmenter la survenue de vagues de chaleur et de sécheresses. Schär *et al*. (2004) ont conclu que dans l'avenir, le climat d'été en Europe subira une augmentation prononcée de la variabilité d'une année à l'autre, et donc une plus grande incidence de vagues de chaleur et de sécheresses. La Méditerranée, voire une grande partie de l'est de l'Europe, pourrait subir une augmentation des périodes sèches d'ici la fin du XXIe siècle (Polemio et Casarano, 2004). Selon

Tableau 5.4: *Incidence du changement climatique sur la survenue de sécheresses et de crues en Europe pour plusieurs périodes et selon plusieurs scénarios fondés sur les modèles ECHAM4 et HadCM3. [GT II tableau 12.2]*

Période	Disponibilité en eau et sécheresses	Crues
Années 2020	Augmentation de jusqu'à 15 % du ruissellement annuel dans le nord de l'Europe et diminution dans le sud de jusqu'à 23 %[a] Chute du débit d'été[d]	Augmentation du risque des crues d'hiver dans le nord de l'Europe et des crues soudaines dans toute l'Europe Risque de décalage des crues de fonte des neiges du printemps vers l'hiver[c]
Années 2050	Diminution de jusqu'à 20 à 30 % du ruissellement annuel dans le sud-est de l'Europe[b]	
Années 2070	Augmentation du ruissellement annuel dans le nord de jusqu'à 30 % et diminution de jusqu'à 36 % dans le sud[a] Diminution des basses eaux d'été de jusqu'à 80 %[b], [d] Diminution du risque de sécheresse dans le nord de l'Europe et augmentation dans l'ouest et le sud. D'ici les années 2070, les sécheresses centennales actuelles devraient réapparaître, tous les 10 ans (ou moins) en moyenne dans certaines régions de l'Espagne et du Portugal, dans l'ouest de la France, le bassin de la Vistule en Pologne et l'ouest de la Turquie[c]	Les crues centennales actuelles devraient se produire plus souvent dans le nord et le nord-est de l'Europe (Suède, Finlande et nord de la Russie), en Irlande, dans le centre et l'est de l'Europe (Pologne, rivières des Alpes), sur la façade atlantique du sud de l'Europe (Espagne et Portugal), et moins souvent dans une grande partie du sud de l'Europe[c]

[a] Alcamo *et al*., 2007; [b] Arnell, 2004; [c] Lehner *et al*., 2006; [d] Santos *et al*., 2002.

Good *et al*. (2006), la période de sécheresse annuelle la plus longue augmenterait de jusqu'à 50 %, en particulier en France et dans le centre de l'Europe. Cependant, certaines preuves récentes (Lenderink *et al*., 2007) laissent à penser que plusieurs de ces projections de sécheresses et de vagues de chaleur pourraient être légèrement surestimées en raison du paramètre de l'humidité du sol dans les modèles climatiques régionaux. Une diminution des précipitations d'été dans le sud de l'Europe, accompagnée d'une hausse des températures (qui accentue la demande d'évaporation), entraînerait inévitablement une diminution de l'humidité du sol en été (voir Douville *et al*., 2002) et des sécheresses plus fréquentes et plus intenses. [GT II 3.4.3, 12.3.1]

Des études font état d'une diminution des crues rivales de pointe d'ici 2080 dans certaines parties du Royaume-Uni (Kay *et al*., 2006b), mais l'incidence du changement climatique sur le régime des crues peut s'avérer positive ou négative, soulignant l'incertitude qui entoure encore ce phénomène (Reynard *et al*., 2004). Palmer et Räisänen (2002) ont analysé les différences modélisées des précipitations d'hiver entre le passage de contrôle et un ensemble produit par augmentation transitoire du CO_2, et les calculs étant effectués pour une période correspondant approximativement au doublement du CO_2. Les résultats ont indiqué une augmentation considérable du risque d'un hiver très humide dans toute l'Europe. La probabilité de survenue de précipitations hivernales boréales totales supérieures à la normale de plus de deux écarts types a considérablement augmenté (elle est parfois 5 à 7 fois plus importante) pour de grandes régions de l'Europe, avec des conséquences *probables* sur le risque de crues en hiver. [GT II 3.4.3]

5.4.3.2 Énergie

L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie renouvelable capitale en Europe (19,8 % de l'électricité produite). D'ici aux années 2070, le potentiel d'énergie hydraulique devrait diminuer de 6 % dans toute l'Europe, avec une diminution de 20 à 50 % dans les régions méditerranéennes, une augmentation de 15 à 30 % dans le nord et l'est de l'Europe, et des conditions stables dans l'ouest et le centre de l'Europe (Lehner *et al*., 2005). La production de biocarburant est grandement déterminée par la présence d'humidité et la durée de la période culturale (Olesen et Bindi, 2002). [GT II 12.4.8.1]

5.4.3.3 Santé

Le changement climatique influencera aussi *probablement* la qualité et la quantité de l'eau en Europe, et donc le risque de contamination des approvisionnements en eau publics et privés (Miettinen *et al*., 2001; Hunter, 2003; Elpiner, 2004; Kovats et Tirado, 2006). Tant les chutes de pluie que les sécheresses extrêmes peuvent augmenter la population microbienne totale présente dans les eaux douces, ce qui est susceptible d'influer sur la survenue de maladies et sur le suivi de la qualité de l'eau (Howe *et al*., 2002; Kistemann *et al*., 2002; Opopol *et al*. 2003; Knight *et al*., 2004; Schijven et de Roda Husman, 2005). [GT II 12.4.11]

5.4.3.4 Agriculture

L'augmentation prévue des phénomènes météorologiques extrêmes (notamment des périodes de températures élevées et de sécheresse) (Meehl et Tebaldi, 2004; Schär *et al*., 2004; Beniston *et al*., 2007) devrait accroître la variabilité du rendement (Jones *et al*., 2003b) et réduire le rendement moyen (Trnka *et al*., 2004). En particulier,

dans la région méditerranéenne de l'Europe, une augmentation de la fréquence des épisodes climatiques extrêmes au cours d'étapes spécifiques du développement des cultures (notamment un stress thermique pendant la floraison, des pluies pendant les semis) ainsi qu'une intensité accrue des chutes de pluie et des périodes sèches prolongées, entraîneront *probablement* une diminution du rendement des cultures d'été (par exemple, le tournesol). [GT II 12.4.7.1]

5.4.3.5 Biodiversité

Les projections annoncent la disparition de nombreux systèmes, tels les régions de pergélisol de l'Arctique et des écosystèmes aquatiques éphémères dans la région méditerranéenne. [GT II 12.4.3]

La disparition du pergélisol dans l'Arctique (ACIA, 2004) entraînera *probablement* la réduction de certains types de zones humides dans la région actuelle de pergélisol (Ivanov et Maximov, 2003). Une conséquence du réchauffement pourrait être une augmentation du risque des fleurs d'eau et un développement prononcé des cyanobactéries toxiques dans les lacs (Moss *et al*., 2003; Straile *et al*., 2003; Briers *et al*., 2004; Eisenreich, 2005). Des précipitations accrues et un gel réduit pourraient accélérer la perte d'éléments nutritifs des terres cultivées et engendrer une augmentation de la charge en nutriments (Bouraoui *et al*., 2004; Kaste *et al*., 2004; Eisenreich, 2005), ce qui entraînerait une eutrophisation intensive des lacs et des zones humides (Jeppesen *et al*., 2003). Une augmentation des températures diminuera également les niveaux de saturation en oxygène dissous et augmentera le risque d'appauvrissement en oxygène (Sand-Jensen et Pedersen, 2005). [GT II 12.4.5]

Une hausse des températures entraînera *probablement* une augmentation de la diversité des espèces dans les écosystèmes d'eau douce du nord de l'Europe, et sa diminution dans des régions du sud-ouest de l'Europe (Gutiérrez Teira, 2003). [GT II 12.4.6]

5.4.4 Adaptation et vulnérabilité

Le changement climatique posera deux problèmes majeurs liés à la gestion de l'eau en Europe: l'augmentation du stress hydrique dans le sud-est de l'Europe pour l'essentiel, et l'accroissement du risque de crues dans la plus grande partie du continent. Les mesures d'adaptation prises pour faire face à ces problèmes sont bien documentées (GIEC, 2001b). Les réservoirs et les digues resteront *probablement* les principales mesures structurelles pour la protection contre les crues dans les régions de haute et basse altitude, respectivement (Hooijer *et al*., 2004). Cependant, d'autres solutions d'adaptation planifiée deviennent de plus en plus populaires, telles que l'extension des plaines inondables (Helms *et al*., 2002), les réservoirs de maîtrise des crues (Somlyódy, 2002), l'aménagement de zones destinées à recevoir les eaux de crue (Silander *et al*., 2006) et les systèmes de prévision et d'alerte concernant les crues, en particulier les crues subites. Les réservoirs multifonctions peuvent représenter une mesure d'adaptation tant pour les crues que pour les sécheresses. [GT II 12.5.1]

Pour s'adapter à une augmentation du stress hydrique, les stratégies planifiées et les plus courantes restent des mesures côté offre, telles que les retenues sur les rivières pour former des réservoirs (Santos *et al*., 2002; Iglesias *et al*., 2005). Cependant, en Europe, la construction de nouveaux réservoirs est de plus en plus limitée par les réglementations environnementales (Barreira, 2004) et les coûts d'investissement élevés (Schröter *et. al*., 2005*)*. D'autres approches concernant l'approvisionnement, telles que la réutilisation des eaux usées et le dessalement, sont plus largement prises en compte, mais leur popularité est modérée par les problèmes sanitaires liés à l'utilisation des eaux usées (Geres, 2004) et par les coûts énergétiques élevés du dessalement (Iglesias *et al*., 2005). Certaines stratégies planifiées concernant la demande sont également réalisables (AEMA, 2002), telles la conservation des eaux domestiques, industrielles et agricoles, la réduction des fuites des réseaux municipaux et d'irrigation (Donevska et Dodeva, 2004; Geres, 2004) et la tarification de l'eau (Iglesias *et al*., 2005). La demande en eau d'irrigation peut être réduite par l'introduction de cultures qui sont mieux adaptées à un climat changeant. Un exemple d'approche européenne unique pour l'adaptation au stress hydrique consiste à prendre en compte, dans les plans de gestion intégrée des ressources en eau, des stratégies d'adaptation au changement climatique au niveau régional et au niveau du bassin versant (Kabat *et al*., 2002; Cosgrove *et al*., 2004; Kashyap, 2004), alors que des stratégies nationales sont en cours de développement pour s'adapter aux structures de gouvernance existantes (Donevska et Dodeva, 2004). [GT II 12.5.1]

Des procédures d'adaptation et des pratiques de gestion des risques pour le domaine hydrologique sont développées dans certains pays et régions (par exemple aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Allemagne) et elles tiennent compte de l'incertitude des changements hydrologiques prévus.[GT II 3.RE, 3.2, 3.6]

5.5 Amérique latine

5.5.1 Contexte

La croissance démographique se poursuit, avec ses conséquences sur la demande alimentaire. Étant donné que la plupart des pays d'Amérique latine sont dépendants de leur productivité agricole, la variation régionale des

rendements des cultures est un problème capital. Du fait de sa configuration géographique, l'Amérique latine dispose de climats très variés. Elle comporte également de vastes régions arides et semi-arides. Le spectre climatique s'étend du climat froid et glacé des hautes altitudes jusqu'aux climats tempéré et tropical. Au cours des dernières décennies, les glaciers ont généralement reculé et certains très petits glaciers ont déjà disparu.

Les fleuves Amazone, Paraná-Plata et Orénoque déversent plus de 30 % des eaux douces renouvelables du monde dans l'océan Atlantique. Cependant, ces ressources en eau sont mal réparties, et des zones étendues ont une disponibilité en eau très limitée (Mata *et al*., 2001). Lorsque les précipitations diminuent ou que les températures augmentent, des contraintes s'appliquent sur la disponibilité et sur la qualité de l'eau. Les sécheresses qui sont statistiquement liées aux épisodes ENSO limitent sévèrement les ressources en eau de vastes régions de l'Amérique latine.

5.5.2 Changements observés

5.5.2.1 Eau

Au cours des trois dernières décennies, l'Amérique latine a subi les incidences liées au climat, dont certaines sont associées aux épisodes ENSO.

- Un accroissement des extrêmes climatiques tels que les crues, les sécheresses et les glissements de terrain

Tableau 5.5: *Quelques tendances récentes des variables hydrologiques. [GT II tableau 13.1, tableau 13.2, tableau 13.3]*

Tendances actuelles pour les précipitations (GT II tableau 3.2)		
Précipitations (changement en % sauf indication contraire)	**Période**	**Changement**
Amazonie – nord et sud (Marengo, 2004)	1949 à 1999	-11 à -17/-23 à +18
Amazonie bolivienne (Ronchail *et al*., 2005)	Depuis 1970	+15
Argentine – centre et nord-est (Penalba et Vargas, 2004)	1900 à 2000	+1 à +2 écarts types
Uruguay (Bidegain *et al*., 2005)	1961 à 2002	+ 20
Chili-centre (Camilloni, 2005)	50 dernières années	-50
Colombie (Pabón, 2003)	1961 à 1990	-4 à +6
Extrêmes hydrologiques sélectionnés et leurs incidences, 2004 à 2006 (GT II tableau 13.1)		
Pluies intenses sept. 2005	Colombie: 70 morts, 86 blessés, 6 portés disparus et 140 000 victimes de crues (NOAA, 2005).	
Pluies intenses févr. 2005	Venezuela: pluies intenses (principalement dans la région côtière centrale et dans les Andes), crues sévères et glissements de terrain importants. Pertes de 52 millions de dollars des États-Unis; 63 morts et 175 000 blessés (UCV, 2005; DNPC, 2005/2006).	
Sécheresses 2004 à 2006	Argentine – Chaco: pertes estimées à 360 millions de dollars des États-Unis; 120 000 têtes de bétail disparues, 10 000 personnes évacuées en 2004 (SRA, 2005). Également en Bolivie et au Paraguay: 2004/2005. Brésil – Amazonie: une forte sécheresse a touché le centre et le sud-ouest de l'Amazonie, probablement liée à des températures chaudes de la mer en surface dans l'Atlantique Nord tropical (http://www.cptec.inpe.br/). Brésil – Rio Grande do Sul: réduction de 65 % et 56 % de la production de soja et de maïs (http://www.ibge.gov.br/home/ ; en anglais: http://www.ibge.gov.br/english/).	
Tendances au recul des glaciers (GT II tableau 13.3)		
Glaciers/Période	*Changements/Incidences*	
Pérou[a], [b] 35 dernières années	Réduction de 22 % de la superficie totale des glaciers (voir figure 5.9); réduction de 12 % des eaux douces dans la zone côtière (où résident 60 % de la population). Perte d'eau estimée à presque 7 000 x 10^6 m^3.	
Pérou[c] 30 dernières années	Réduction jusqu'à 80 % de la superficie des très petits glaciers; perte de 188 x 10^6 m^3 des réserves d'eau au cours des 50 dernières années.	
Colombie[d] 1990 à 2000	Réduction de 82 % des glaciers; avec les tendances climatiques actuelles, les glaciers de la Colombie devraient entièrement disparaître au cours des 100 prochaines années.	
Équateur[e] 1956 à 1998	Recul progressif de l'étendue des glaciers; réduction de l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et de l'approvisionnement en eau propre pour la ville de Quito.	
Bolivie[f] depuis le milieu des années 1990	Le recul prévu des glaciers en Bolivie laisse entrevoir des conséquences négatives pour l'alimentation en eau et la génération d'énergie hydroélectrique pour la ville de La Paz. Voir également encadré 5.5.	

[a] Vásquez, 2004; [b] Mark et Seltzer, 2003; [c] NC-Pérou, 2001; [d] NC-Colombie, 2001; [e] NC-Équateur, 2000; [f] Francou *et al*., 2003.

(notamment les pluies diluviennes au Venezuela en 1999 et 2005), les inondations des pampas argentines (2000 et 2002), la sécheresse amazonienne (2005), les tempêtes de grêle destructrices en Bolivie (2002) et à Buenos Aires (2006), le cyclone *Catarina* dans le sud de l'Atlantique (2004) et la saison d'ouragans records de 2005 dans la région des Caraïbes. Le nombre des catastrophes liées au climat a été multiplié par 2,4 entre les périodes 1970-1999 et 2000-2005, en continuité de la tendance observée pendant les années 1990. Seulement 19 % des épisodes observés entre 2000 et 2005 ont été quantifiés du point de vue économique; ils ont représenté des pertes de presque 20 milliards de dollars des États-Unis (Nagy *et al.*, 2006). [GT II 13.2.2]

- Des contraintes pesant sur la disponibilité en eau: les sécheresses liées au phénomène *La Niña* ont engendré des restrictions sévères sur l'approvisionnement en eau et sur les demandes d'irrigation dans le centre-ouest de l'Argentine et au centre du Chili. Les sécheresses liées au phénomène *El Niño* ont diminué le débit du fleuve Cauca en Colombie. [GT II 13.2.2]
- Une augmentation des précipitations a été observée dans le sud du Brésil, au Paraguay, en Uruguay, dans le nord-est de l'Argentine (Pampa), ainsi que dans certaines régions de Bolivie, le nord-ouest du Pérou, en Équateur et dans le nord-ouest du Mexique. La hausse des précipitations a entraîné une augmentation de 10 % de la fréquence des crues de l'Amazone à Obidos, une augmentation de 50 % de l'écoulement fluvial en Uruguay, au Paraná et au Paraguay ainsi qu'une augmentation du nombre de crues dans le bassin du Mamoré en Amazonie bolivienne. Une augmentation des épisodes de pluie intense et du nombre de jours secs consécutifs a également été observée dans toute la région. En revanche, on a observé une tendance à la diminution des précipitations au Chili, dans le sud-ouest de l'Argentine, le nord-est du Brésil, le sud du Pérou et l'ouest de l'Amérique centrale (notamment au Nicaragua). [GT II 13.2.4.1]
- Une élévation du niveau de la mer de 2 à 3 mm/an au cours des 10 à 20 dernières années dans le sud-est de l'Amérique du Sud. [GT II 13.2.4.1]
- La superficie des glaciers qui a diminué dans les Andes tropicales de Bolivie, du Pérou, de l'Équateur et de la Colombie dans une proportion comparable à celle des autres glaciers du monde depuis la fin du petit âge glaciaire (voir figure 5.9). Ce sont les plus petits glaciers qui sont le plus touchés (voir encadré 5.5). Les raisons de ces changements ne sont pas les mêmes que pour ceux observés aux latitudes moyennes et élevées: elles sont liées à des combinaisons complexes et variables dans l'espace de températures élevées et de modifications dans la teneur en humidité de l'atmosphère. [GT I 4.5.3]

D'autres informations sur les tendances observées des variables hydrologiques sont présentées dans le tableau 5.5 et la figure 5.8.

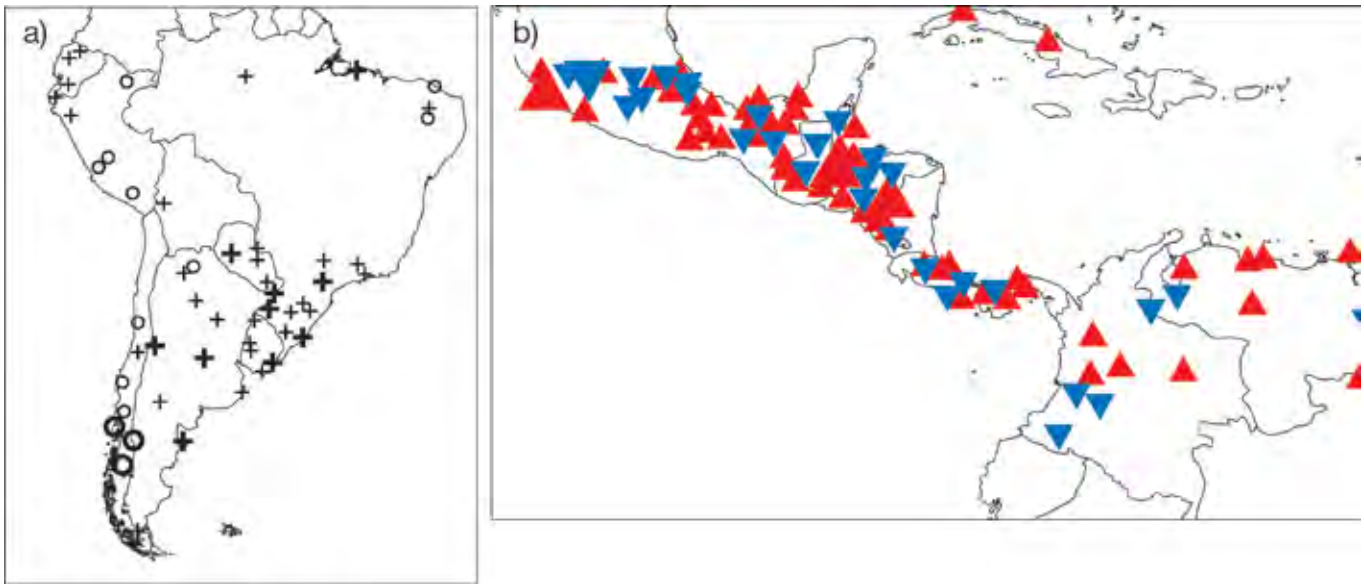


Figure 5.8: *Tendances relatives aux précipitations annuelles a) en Amérique du Sud (1960 à 2000). Une augmentation est représentée par un signe +, une diminution par un cercle. Les valeurs en gras indiquent une signification à P ≤0,05 (reproduit de Haylock* et al. *(2006) avec l'aimable autorisation de l'American Meteorological Society); b) en Amérique centrale et au nord de l'Amérique du sud (1961-2003). Les grands triangles rouges indiquent des tendances positives significatives, les petits triangles rouges indiquent des tendances positives non significatives, les grands triangles bleus indiquent des tendances négatives significatives et les petits triangles bleus des tendances négatives non significatives (reproduit d'Aguilar* et al. *(2005) avec l'aimable autorisation de l'American Geophysical Union). [GT II figure 13.1]*

Encadré 5.5: Changements relatifs aux glaciers sud-américains [GT II encadré 1.1]

Un recul général des glaciers dans les Andes tropicales a été observé et, comme pour d'autres chaînes montagneuses, les glaciers les plus petits sont ceux qui sont les plus affectés [GT I 4.5.3], bon nombre d'entre eux ayant déjà disparu au cours du siècle dernier. En ce qui concerne les chaînes montagneuses en grande partie couvertes de glaciers, telles que la *Cordillère blanche* au Pérou et la *Cordillère royale* en Bolivie, la superficie totale des glaciers a diminué d'environ un tiers par rapport à la superficie du petit âge glaciaire (figure 5.9).

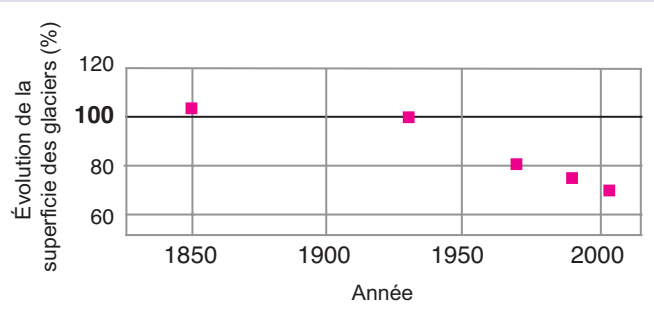


Figure 5.9: *Étendue (en %) de la superficie totale des glaciers tropicaux de la Cordillère blanche, au Pérou, par rapport à son étendue aux alentours de 1925 (= 100) (Georges, 2004). En 1990, la superficie du glacier de la Cordillère blanche était de 620 km². [Extrait du GT I figure 4.16]*

Le glacier Chacaltaya en Bolivie (16°S) est un exemple typique de petit glacier en cours de désintégration et, sans doute, en voie de disparition. En 1940, sa superficie était de 0,22 km², et elle est actuellement (en 2005) réduite à moins de 0,01 km² (figure 5.10) (Ramírez *et al.*, 2001; Francou *et al.*, 2003; Berger *et al.*, 2005). Au cours de la période allant de 1992 à 2005, le glacier a perdu 90 % de sa superficie et 97 % de son volume de glace (Berger *et al.*, 2005). Une extrapolation linéaire de ces valeurs observées indique qu'il pourrait disparaître totalement avant 2010 (Coudrain *et al.*, 2005). Malgré le fait que, sous les tropiques, le bilan de masse du glacier soit sensible aux changements de précipitations et d'humidité [GT I 4.5.3], le recul du Chacaltaya suit l'ascension de l'isotherme 0 °C d'environ 50 m/décennie dans les Andes tropicales depuis les années 1980 (Vuille *et al.*, 2003).

Avec une altitude moyenne de 5 260 m au-dessus du niveau de la mer, le glacier accueillait la station de ski la plus haute du monde jusqu'à ces dernières années. Le recul continu du glacier pendant les années 1990 l'a conduit à sa quasi-disparition, de sorte que la Bolivie a perdu son unique station de ski (figure 5.10).

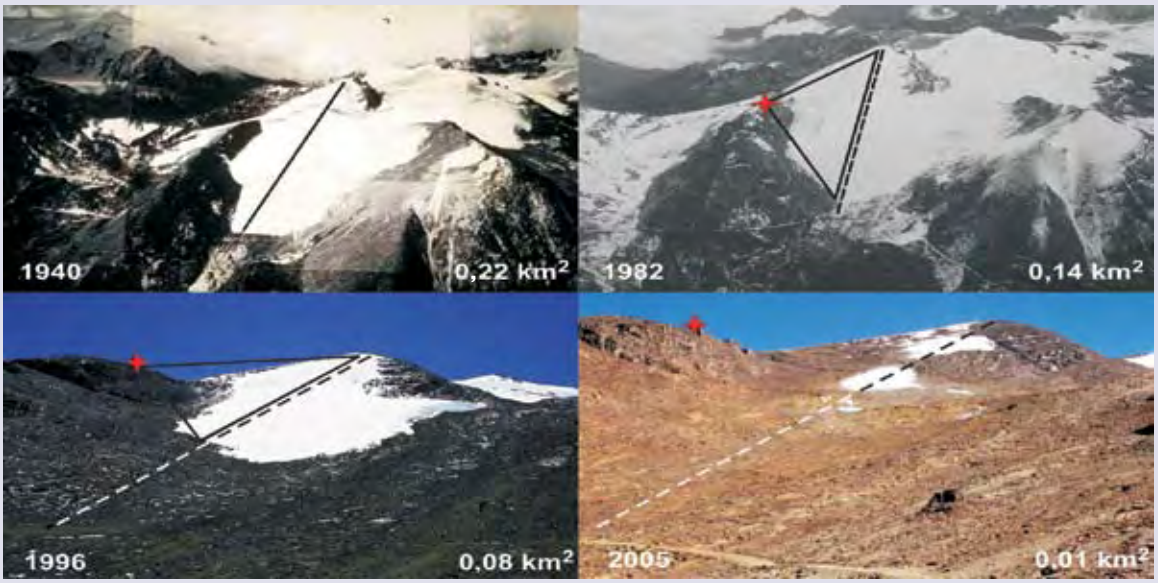


Figure 5.10: *Superficie du glacier Chacaltaya en Bolivie de 1940 à 2005. En 2005, le glacier s'était déjà divisé en trois petites parties distinctes. L'emplacement du refuge de ski, qui n'existait pas en 1940, est indiqué par une croix rouge. La longueur de la remontée mécanique était d'environ 800 m en 1940 et d'environ 600 m en 1996 (indiquée par une ligne continue pour 1940 et par des pointillés sur les autres photographies). Elle était généralement installée pendant la saison des précipitations. Après 2004, il n'était plus possible de skier. Crédit photographique: Francou et Vincent (2006) et Jordan (1991). [GT II figure 1.1]*

5.5.2.2 Énergie

L'énergie hydroélectrique est la principale source d'énergie électrique dans la plupart des pays d'Amérique latine. Elle est vulnérable aux anomalies de pluviométrie persistantes et à grande échelle dues aux phénomènes *El Niño* et *La Niña*, comme on a pu l'observer en Argentine, en Colombie, au Brésil, au Chili, au Pérou, en Uruguay et au Venezuela. Une demande accrue en énergie combinée aux sécheresses a entraîné un quasi-effondrement du secteur de l'hydroélectricité dans la plus grande partie du Brésil en 2001 et a participé à la réduction du PIB (Kane, 2002). Le recul des glaciers affecte également la production d'énergie hydroélectrique, comme en sont témoins les villes de La Paz et de Lima. [GT II 13.2.2, 13.2.4]

5.5.2.3 Santé

Des liens existent en Amérique latine entre les phénomènes climatiques extrêmes et la santé. Les sécheresses favorisent les épidémies en Colombie et en Guyane, tandis que les crues engendrent des épidémies dans la région côtière septentrionale sèche du Pérou (Gagnon *et al.*, 2002). Les variations annuelles de la dengue et de la dengue hémorragique au Honduras et au Nicaragua semblent liées aux fluctuations de densité du vecteur associées au climat (température, humidité, rayonnement solaire et pluviométrie) (Patz *et al.*, 2005). Les inondations ont entraîné des épidémies de leptospirose au Brésil, en particulier dans les régions à forte densité démographique, dépourvues d'un drainage adéquat (Ko *et al.*, 1999; Kupek *et al.*, 2000). La distribution de la schistosomiase est probablement liée aux facteurs climatiques. En ce qui concerne les maladies transmises par les rongeurs, il semblerait que certaines augmentations d'occurrence soient observées pendant ou après des chutes de pluie intenses et des inondations, du fait d'une altération du contact entre l'homme, l'agent pathogène et le rongeur. Dans certaines régions côtières du golfe du Mexique, une augmentation de la température de la mer en surface et des précipitations a été liée à une augmentation des cycles de transmission de la dengue (Hurtado-Díaz *et al.*, 2006). [GT II 13.2.2, 8.2.8.3]

5.5.2.4 Agriculture

En raison des chutes de pluie abondantes et de l'humidité provoquées par le phénomène *El Niño*, des maladies cryptogamiques ont été observées sur le maïs, les pommes de terre, le blé et les haricots au Pérou. Quelques incidences positives ont été signalées pour la région de la Pampa en Argentine, où l'augmentation des précipitations a entraîné une augmentation du rendement des récoltes de près de 38 % pour le soja, 18 % pour le maïs, 13 % pour le blé et 12 % pour le tournesol. La productivité des pâturages a égale-ment augmenté de 7 % en Argentine et en Uruguay. [GT II 13.2.2, 13.2.4]

5.5.2.5 Biodiversité

Peu d'études ont évalué les effets du changement climatique sur la biodiversité; elles font toutes état de la difficulté de différencier les effets causés par le changement climatique de ceux provenant d'autres facteurs. Les forêts tropicales en Amérique latine, et en particulier celles de l'Amazonie, sont de plus en plus exposées aux incendies en raison de l'augmentation des sécheresses liées au phénomène *El Niño* et au changement d'affectation des terres (déboisement, exploitation forestière sélective et morcellement forestier). [GT II 13.2.2]

En ce qui concerne la biodiversité, les populations de crapauds et de grenouilles des forêts de nuages ont été affectées après plusieurs années de faible pluviométrie. En Amérique centrale et en Amérique du Sud, on a trouvé des liens entre les températures accrues et l'extinction des grenouilles due à une maladie cutanée (*Batrachochytrium dendrobatidis*). Une étude évaluant les données de 1977 à 2001 a montré que la couverture corallienne dans les récifs des Caraïbes a diminué de 17 % en moyenne les années suivant un ouragan, sans indice de récupération dans les huit années au moins consécutives à une occurrence. [GT II 13.2.2]

5.5.3 Changements prévus

5.5.3.1 Eau et climat

Selon les différents modèles climatiques et avec un *degré de confiance moyen*, le réchauffement moyen prévu pour l'Amérique latine à l'horizon 2100 serait de 1 à 4 °C pour le scénario d'émissions B2, et de 2 à 6 °C pour le scénario A2. La plupart des projections des MCG indiquent des anomalies des précipitations (positives ou négatives) supérieures pour la région tropicale, et inférieures pour la région extratropicale de l'Amérique du Sud. De plus, les projections annoncent une augmentation de la fréquence des saisons très sèches en Amérique centrale, quelle que soit la saison. Au-delà de ces résultats, les modèles s'accordent peu sur les changements de la fréquence des saisons extrêmes en ce qui concerne les précipitations. En ce qui concerne les extrêmes de précipitations journalières, une étude fondée sur deux MCGAO envisage une augmentation du nombre de jours humides pour les régions du sud-est de l'Amérique du Sud et du centre de l'Amazonie, et une diminution des extrêmes de précipitations journalières pour la région côtière du nord-est du Brésil. [GT I tableau 11.1, 11.6; GT II 13.RE, 13.3.1]

Le nombre de personnes vivant dans des bassins versants déjà soumis à un stress hydrique (c'est-à-dire dont l'approvisionnement est inférieur à 1 000 m^3/habitant/an) en l'absence de changement climatique a été estimé à 22,2 millions en 1995. D'après les scénarios SRES, ce nombre devrait augmenter entre 12 et 81 millions d'ici aux années 2020, et entre 79 et 178 millions d'ici aux années 2050 (Arnell, 2004). Ces estimations ne tiennent pas compte du nombre de personnes échappant au stress hydrique, indiqué dans le tableau 5.6. Les vulnérabilités actuelles observées dans de nombreuses régions de pays

Tableau 5.6: *Augmentation du nombre d'habitants en millions dans les bassins versants soumis à un stress hydrique en Amérique latine, d'après le MCG HadCM3 (Arnell, 2004). [GT II tableau 13.6]*

Scénario et MCG	1995	2025		2055	
		Sans changement climatique	Avec changement climatique	Sans changement climatique	Avec changement climatique
A1	22,2	35,7	21,0	54,0	60,0
A2	22,2	55,9	37,0-66,0	149,3	60,0-150,0
B1	22,2	35,7	22,0	54,0	74,0
B2	22,2	47,3	7,0-77,0	59,4	62,0

d'Amérique latine augmenteront du fait de l'effet négatif conjugué d'une augmentation de la demande d'approvisionnement en eau et d'irrigation consécutive à un taux de croissance démographique accru, et des conditions plus sèches attendues dans un grand nombre de bassins. Par conséquent, en tenant compte du nombre de personnes soumises à une diminution du stress hydrique, on observe tout de même une augmentation nette du nombre de personnes soumises à un stress hydrique. [GT II 13.4.3]

5.5.3.2 Énergie

D'après les prévisions, le recul des glaciers devrait se poursuivre et influencer la production d'énergie hydroélectrique dans les pays tels que la Colombie et le Pérou (UNMSM, 2004). Certains petits glaciers tropicaux ont d'ores et déjà disparu; d'autres disparaîtront *probablement* au cours des prochaines décennies, avec des effets potentiels sur la production d'énergie hydroélectrique (Ramírez *et al.*, 2001). [GT I 4.5.3; GT II 13.2.4]

5.5.3.3 Santé

Environ 262 millions de personnes, soit 31 % de la population d'Amérique latine, vivent dans des zones à risque de paludisme (c'est-à-dire dans les régions tropicales et subtropicales) (PAHO, 2003). D'après les scénarios d'émissions du SRES et les scénarios socioéconomiques, certaines projections indiquent une diminution de la durée de la période de transmission du paludisme dans un grand nombre de régions où sont prévues des diminutions des précipitations, comme l'Amazonie et l'Amérique centrale. Les résultats indiquent un nombre supplémentaire de personnes à risque dans les zones situées autour de la limite méridionale de la distribution de la maladie en Amérique du Sud (van Lieshout *et al.*, 2004). Le Nicaragua et la Bolivie ont prévu une augmentation possible de l'incidence du paludisme en 2010, avec des variations saisonnières (Aparicio, 2000; NC-Nicaragua, 2001). L'augmentation du paludisme et de la population à risque pourrait influencer les coûts des services de santé, y compris celui du traitement et des prestations de la sécurité sociale. [GT II 13.4.5]

D'autres modèles prévoient une augmentation sensible du nombre de personnes confrontées au risque de la dengue en raison des changements des limites géographiques de transmission au Mexique, au Brésil, au Pérou et en Équateur (Hales *et al.*, 2002). Certains modèles prévoient des changements de la distribution spatiale (dispersion) du vecteur de la leishmaniose cutanée au Pérou, au Brésil, au Paraguay, en Uruguay, en Argentine et en Bolivie (Aparicio, 2000; Peterson et Shaw, 2003), ainsi que de la distribution mensuelle du vecteur de la dengue (Peterson *et al.*, 2005). [GT II 13.4.5]

5.5.3.4 Agriculture

Plusieurs études fondées sur des modèles de simulation de cultures, tenant compte d'un changement climatique ont été réalisées pour des cultures commerciales en Amérique latine. Le nombre de personnes risquant de souffrir de la faim d'après le scénario d'émissions A2 du SRES devrait augmenter d'un million en 2020, rester stable jusqu'en 2050, puis diminuer de quatre millions en 2080. [GT II tableau 13.5, 13.4.2]

5.5.3.5 Biodiversité

En raison d'un ensemble complexe de modifications, dont celles des précipitations et du ruissellement, on prévoit le remplacement de la forêt tropicale par de la savane dans l'est de l'Amazonie et dans les forêts tropicales du centre et du sud du Mexique, ainsi que le remplacement de la végétation semi-aride par de la végétation aride dans des régions du nord-est du Brésil et dans la plus grande partie du centre et du nord du Mexique, suite aux effets synergiques des changements d'affectation des terres et des changements climatiques. À l'horizon 2050, 50 % des terres agricoles seront *très probablement* soumises à la désertification et à la salinisation dans certaines régions. [GT II 13.RE, 13.4.1, 13.4.2]

5.5.4 Adaptation et vulnérabilité

5.5.4.1 Adaptation passée et actuelle

L'absence de stratégies d'adaptation adéquates pour faire face aux dangers et aux risques de crues et de sécheresses dans les pays d'Amérique latine est due à un faible produit national brut (PNB), à l'augmentation de la population qui s'installe dans des zones vulnérables (sujettes aux inondations, aux glissements de terrain ou aux sécheresses) et à l'absence de cadres politiques, institutionnels et

Encadré 5.6: Capacité d'adaptation des communautés précolombiennes des hauts plateaux d'Amérique du Sud [GT II encadré 13.2]

La subsistance des civilisations autochtones des Amériques dépendait des ressources cultivées dans les conditions climatiques régnant autour de leurs établissements. Dans les hauts plateaux de l'Amérique latine actuelle, l'un des facteurs limitants les plus critiques qui agissent sur le développement reste l'irrégularité de la distribution de l'eau. La situation reflète les particularités des processus et des extrêmes atmosphériques, le ruissellement rapide vers les vallées profondes et des conditions du sol évolutives. La fonte des glaciers était (et est encore) une source d'eau fiable pendant les saisons sèches. Cependant, les rivières s'écoulent dans les vallées dans des lits délimités et n'approvisionnent que certains lieux. Étant donné que la saisonnalité des chutes de pluie est importante, le ruissellement des glaciers est la principale source d'eau fiable pendant la saison sèche. En conséquence, les communautés précolombiennes ont développé différentes adaptations pour satisfaire leurs besoins. De nos jours, le problème de l'équilibre entre la disponibilité de l'eau et la demande en eau est quasiment le même, bien que l'échelle puisse différer.

Dans ce contexte, les civilisations précolombiennes, du Mexique actuel jusqu'au nord du Chili et de l'Argentine, ont développé les capacités nécessaires pour s'adapter aux conditions environnementales locales. Ces capacités impliquaient une aptitude à résoudre des problèmes hydrauliques et à prévoir les variations climatiques et les périodes de chutes de pluie saisonnières. Du côté de l'ingénierie, leurs développements ont inclus l'utilisation de l'eau de pluie captée pour la récupération, la filtration et le stockage, ainsi que la construction de canaux d'irrigation superficiels et souterrains, notamment des dispositifs pour mesurer la quantité d'eau stockée (figure 5.11) (Treacy, 1994; Wright et Valencia Zegarra, 2000; Caran et Nelly, 2006). Les civilisations précolombiennes ont également réussi à relier des bassins fluviaux de bassins versants du Pacifique et de l'Atlantique, dans la vallée de Cumbe et à Cajamarca (Burger, 1992).

Figure 5.11: *Système de récupération de l'eau destinée aux aqueducs souterrains et à l'alimentation des nappes phréatiques à Nazca (côte sud du Pérou)*

D'autres capacités ont été développées pour prévoir les variations climatiques et les périodes de chutes de pluie saisonnières, pour organiser les calendriers des semis et planifier les rendements (Orlove *et al.*, 2000). Ces efforts ont permis aux communautés composées de quelque 10 millions de personnes à l'apogée de la civilisation inca de subsister dans la zone qui constitue actuellement le Pérou et l'Équateur.

Leurs capacités techniques ont également permis de rectifier des cours d'eau, comme dans le cas de l'Urubamba, et de construire des ponts suspendus ou sur piliers coulés dans le lit de la rivière. Ils utilisaient également l'eau courante à des fins de loisirs et religieuses, comme on peut le voir de nos jours dans le Baño del Inca (les bains des Incas) alimenté par des sources géothermiques, et dans les ruines du jardin musical de Tampumacchay, aux alentours de Cuzco (Cortazar, 1968). Les prêtres de la culture de Chavín utilisaient l'eau courante qui circulait dans des tubes forés dans la structure des temples pour produire un son semblable au rugissement d'un jaguar, ce dernier étant l'une de leurs divinités (Burger, 1992). L'eau servait également à découper des blocs de pierre de construction. Comme on peut le voir à Ollantaytambo, sur le chemin qui mène au Machu Picchu, on donnait à ces pierres des formes géométriques régulières en faisant couler de l'eau dans des interstices judicieusement placés et en la laissant geler au froid de la nuit de l'Altiplano. Les anciens ont également acquis la faculté de prévoir les variations climatiques, comme celles du phénomène *El Niño* (Canziani et Mata, 2004), ce qui leur permettait d'organiser au mieux leur production d'aliments. Ils ont donc fait de grands efforts d'innovation pour s'adapter aux conditions locales difficiles et pour définir des modes de développement durables.

De nos jours, étant donné les caprices du temps et du climat, aggravés par l'augmentation de l'effet de serre et par le recul des glaciers (Carey, 2005; Bradley *et al.*, 2006), il serait extrêmement utile de s'inspirer de telles mesures d'adaptation et de les remettre au goût du jour. L'éducation et la formation des membres des communautés actuelles aux connaissances et au savoir-faire technique de leurs ancêtres permettraient de faire un pas en avant. Les procédures de la Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC) relatives à la gestion du développement durable (Dourojeanni, 2000) font référence aux stratégies d'irrigation précolombiennes lorsqu'elles examinent la nécessité de gérer les conditions climatiques extrêmes dans les hauts plateaux.

technologiques adéquats (Solanes et Jouravlev, 2006). Cependant, certaines communautés et villes se sont organisées pour prendre une part active dans la prévention des catastrophes (Fay *et al.*, 2003b). Un grand nombre de personnes pauvres ont été invitées à partir des zones sujettes aux inondations pour s'installer dans des zones plus sûres. À l'aide de prêts de l'IRDB et de l'IDFB, ils ont construit de nouvelles habitations, par exemple les réinstallations dans le bassin du fleuve Paraná en Argentine, après la crue de 1992 (IRDB, 2000). Dans certains cas, un changement des conditions environnementales touchant l'économie typique des Pampas a entraîné l'introduction de nouvelles activités de production via l'aquiculture, exploitant les espèces de poissons naturelles régionales telles que le pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) (La Nación, 2002). Un autre exemple, lié dans ce cas à la capacité d'adaptation des personnes au stress hydrique, est celui des programmes d'«auto-organisation» destinés à améliorer les réseaux d'approvisionnement en eau dans les communautés très pauvres. Le «*Business Partners for Development Water and Sanitation Clusters*», réseau de partenaires œuvrant pour le développement de l'accès à l'eau et l'assainissement, travaille sur quatre programmes spécifiques en Amérique latine: Cartagena (Colombie), La Paz et El Alto (Bolivie) et certains districts défavorisés du Gran Buenos Aires (Argentine) (The Water Page, 2001; Water 21, 2002). Les systèmes de récupération et de stockage des eaux de pluie sont des structures importantes du développement durable dans les régions tropicales semi-arides. Il existe, en particulier, un projet conjoint appelé projet P1MC mis au point au Brésil par le réseau d'organisations non gouvernementales Articulação no Semi-Árido (ASA). Ce projet a pour objectif de faire installer un million de citernes de manière décentralisée par la société civile. Le plan consiste à approvisionner en eau potable un million de foyers ruraux dans les régions de sécheresse persistante du Brésil tropical semi-aride. Au cours de la première étape, 12 400 citernes ont été fabriquées par l'ASA et par le Ministère de l'environnement du Brésil, et 21 000 autres citernes étaient prévues pour la fin de l'année 2004 (Gnadlinger, 2003). En Argentine, des programmes nationaux pour garantir la sûreté de l'eau aux communautés locales dans les régions arides de la province de l'Estero ont permis l'installation de dix bassins de récupération et de stockage d'eau de pluie entre 2000 et 2002 (Basán Nickisch, 2002). [GT II 13.2.5]

5.5.4.2 Adaptation: pratiques, options et contraintes

En Amérique latine, les politiques de gestion de l'eau doivent être pertinentes et incluses comme points capitaux pour les critères d'adaptation. Cela permettra d'augmenter les capacités de la région à améliorer sa gestion de la disponibilité en eau. Dans environ 60 % de l'Amérique latine, l'adaptation à des conditions plus sèches nécessitera de gros investissements dans les réseaux d'approvisionnement en eau. La gestion de dérivations transbassin a été la solution adoptée dans un grand nombre de régions (notamment le bassin du Yacambu au Venezuela, l'Alto Piura et le bassin du Mantaro au Pérou). Les pratiques de conservation de l'eau, le recyclage de l'eau et l'optimisation de la consommation d'eau ont été recommandés pendant les périodes de stress hydrique (COHIFE, 2003) (voir encadré 5.6). [GT II 13.5]

Les problèmes liés à l'éducation et aux services de santé publique sont des barrières fondamentales à l'adaptation, par exemple, dans le cas des phénomènes extrêmes (les crues et les sécheresses) principalement dans les zones rurales pauvres (Villagrán de León *et al.*, 2003). [GT II 13.5]

5.6 Amérique du Nord

5.6.1 Contexte et changements observés

En Amérique du Nord, le changement climatique va restreindre les ressources en eau déjà surexploitées et donc augmenter la concurrence entre les utilisateurs – agriculture, industrie, municipalités et secteur de l'environnement (*degré de confiance très élevé*). Certaines des incidences sociétales et écologiques du changement climatique les plus importantes prévues dans cette région sont causées par les changements dans les ressources en eau superficielles et souterraines. Le tableau 5.7 décrit les changements observés en Amérique du Nord au cours du siècle dernier, qui illustrent le large éventail d'effets du réchauffement climatique sur les ressources en eau. [GT II 14.RE]

Étant donné que la vitesse du réchauffement pourrait augmenter dans les décennies à venir, il est possible de prévoir des changements de répartition dans le temps, de volume, de qualité et de distribution spatiale de l'eau douce disponible pour les utilisateurs à des fins domestiques, agricoles et industrielles dans la plupart des régions en Amérique du nord. Alors que certains des changements des ressources en eau indiqués précédemment sont vrais pour une grande partie de l'Amérique du Nord, les tendances du XXe siècle permettent d'envisager une grande variabilité régionale pour les incidences du changement climatique sur le ruissellement, l'écoulement fluvial et l'alimentation des nappes souterraines. Des variations des richesses et de nature géographique contribuent aussi à l'inégalité de la distribution des incidences *probables*, des vulnérabilités et des capacités d'adaptation au Canada et aux États-Unis. [GT II 14.RE, 14.1]

5.6.2 Changements prévus et conséquences

5.6.2.1 Ressources en eau douce

Le ruissellement annuel futur simulé dans les bassins hydrographiques nord-américains varie selon la région, le modèle de circulation générale (MCG) et le scénario d'émissions. Les précipitations annuelles moyennes devraient diminuer dans le sud-ouest des États-Unis, mais augmenter dans la majeure partie du reste de l'Amérique

Tableau 5.7: *Changements observés des ressources en eau de l'Amérique du Nord au cours du siècle dernier (↑ = augmentation, ↓ = diminution)*

Changement des ressources en eau	Exemples du quatrième Rapport d'évaluation
Pointe de débit des cours d'eau avancée de 1 à 4 semaines en raison de la fonte précoce des neiges associée au réchauffement	Régions de l'ouest des États-Unis et de la Nouvelle-Angleterre américaine, Canada [GT II 1.3, 14.2]
↓ Proportion des précipitations sous forme de neige	Ouest du Canada et prairies, ouest des États-Unis [GT II 14.2, GT I 4.2]
↓ Durée et étendue de la couverture neigeuse	Majorité de l'Amérique du Nord [GT I 4.2]
↑ Précipitations annuelles	Majorité de l'Amérique du Nord [GT I 3.3]
↓ Équivalent en eau de la neige des montagnes	Ouest de l'Amérique du Nord [GT I 4.2]
↓ Précipitations annuelles	Centre des montagnes Rocheuses, sud-ouest des États-Unis, prairies canadiennes et est de l'Arctique [GT II 14.2]
↑ Fréquence des épisodes de fortes pluies	Majorité des États-Unis [GT II 14.2]
↓ Ruissellement et écoulement fluvial	Bassins des fleuves Colorado et Columbia [GT II 14.2]
Dégel généralisé du pergélisol	Majorité du nord du Canada et Alaska [GT II 14.4, 15.7]
↑ Température de l'eau des lacs (0,1 à 1,5 °C)	Majorité de l'Amérique du Nord [GT II 1.3]
↑ Écoulement fluvial	Majorité de l'est des États-Unis [GT II 14.2]
Recul des glaciers	Montagnes de l'ouest des États-Unis, Alaska et Canada [GT I 4.RE, 4.5]
↓ Couverture de glace	Grands Lacs, golfe du Saint-Laurent [GT II 4.4, 14.2]
Salinisation des eaux de surface côtières	Floride, Louisiane [GT II 6.4]]
↑ Périodes de sécheresse	Ouest des États-Unis, sud du Canada [GT II 14.2]

du Nord jusqu'en 2010. [GT I 11.5.3.2; GT II 14.3.1]. Au Canada, selon le scénario A1B, les précipitations annuelles moyennes devraient augmenter d'environ 20 %, et les précipitations hivernales de 30 %. Certaines études prévoient une augmentation généralisée des précipitations extrêmes [GT I 11.5.3.3; GT II 14.3.1], mais aussi des sécheresses associées à une plus grande variabilité temporelle des précipitations. En général, les changements prévus des extrêmes des précipitations sont supérieurs à ceux des précipitations moyennes. [GT I 10.3.6.1; GT II 14.3.1]

Le réchauffement et les changements de forme, de périodicité et de volume des précipitations entraîneront *très probablement* une fonte précoce et une réduction du manteau neigeux dans les montagnes de l'ouest vers le milieu du XXIe siècle. Selon les projections concernant les bassins versants de montagne où la fonte des neiges est prépondérante, le ruissellement d'eau de fonte sera plus précoce, les débits d'hiver et du début du printemps augmenteront (potentiel d'inondation accru) et les débits d'été diminueront largement. [GT II 14.4] Ainsi, les réseaux d'eau surexploités de l'ouest des États-Unis et du Canada dépendant de la récupération du ruissellement de neige fondue pourraient devenir particulièrement vulnérables, tout comme les réseaux qui dépendent du ruissellement des glaciers. [GT II 14.2, 15.2]

En Colombie britannique, les incidences prévues incluent une augmentation des précipitations hivernales, des crues de printemps plus intenses sur les côtes et à l'intérieur des terres et une augmentation des sécheresses en été le long de la côte méridionale et au sud du continent. Ces incidences entraîneraient une diminution de l'écoulement fluvial dans ces régions et compromettraient la survie des poissons et l'approvisionnement en eau pendant l'été, lorsque la demande est la plus forte. Dans la région des Grands Lacs, les incidences prévues associées aux niveaux d'eau plus bas vont *probablement* aggraver les problèmes liés à la qualité de l'eau, à la navigation, aux loisirs, à la génération d'énergie hydroélectrique, aux transferts de l'eau et aux relations binationales. [GT II 14.2, 14.4] Un grand nombre d'évaluations (mais pas la totalité) prévoient une diminution de l'approvisionnement nette des bassins et des niveaux d'eau pour le bassin des Grands Lacs et du Saint-Laurent. [GT II 14.RE, 14.2]

En raison du changement climatique, la disponibilité des eaux souterraines sera *probablement* influencée par trois facteurs principaux: les *prélèvements* (reflétant le développement, la demande et la disponibilité d'autres sources), l'*évapotranspiration* (qui augmente avec la température) et *l'alimentation* (déterminée par la température, la répartition dans le temps et le volume des précipitations, ainsi que les interactions des eaux de surface). Les débits de base annuels simulés des eaux souterraines et les niveaux des aquifères dépendent de la température, des précipitations et du pompage: ils diminuent selon les scénarios plus secs ou dont le pompage est supérieur, et ils augmentent dans les scénarios plus humides. Dans certains cas, on observe des décalages des débits de base: augmentation en hiver et diminution au printemps et au début de l'été. [GT II 14.4.1] Dans les régions semi-arides et arides de l'Amérique du Nord, une augmentation de l'évapotranspiration ou du pompage des eaux souterraines pourrait entraîner une salinisation des aquifères peu profonds. [GT II 3.4] De plus, le changement climatique augmentera *probablement* l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers au fur et à mesure de l'élévation du niveau de la mer. [GT II 3.4.2]

5.6.2.2 Énergie

On sait que la production d'énergie hydroélectrique est sensible au ruissellement total, au moment où il se produit et au niveau des réservoirs. Par exemple, pendant les années 1990, le niveau des Grands Lacs a diminué suite à une longue sécheresse et, en 1999, la production d'énergie hydroélectrique a considérablement chuté sur le Niagara et au Saut Sainte-Marie (CCME, 2003). [GT II 4.2] En cas de réchauffement de 2 à 3 °C dans le bassin du fleuve Columbia et dans les zones d'activité du Service hydrologique de Colombie britannique, l'approvisionnement en hydroélectricité augmentera *probablement* (degré de confiance élevé) dans les conditions les plus défavorables pour la pointe de demande de l'hiver. De même, les rendements hydroélectriques du fleuve Colorado diminueront *probablement* de manière significative (Christensen *et al.*, 2004), ainsi que ceux des Grands Lacs (Moulton et Cuthbert, 2000; Lofgren *et al.*, 2002; Mirza, 2004). Une diminution des niveaux d'eau des Grands Lacs entraînerait de grosses pertes économiques (437 à 660 millions de dollars canadiens/an), et une augmentation entraînerait de faibles bénéfices (28 à 42 millions de dollars canadiens/an) (Buttle *et al.*, 2004; Ouranos, 2004). Au nord du Québec, la production d'énergie hydroélectrique profiterait *probablement* d'une augmentation des précipitations et de davantage de conditions d'eau libre, mais les centrales hydroélectriques du sud du Québec seraient *probablement* affectées par des niveaux d'eau inférieurs. Les conséquences des changements de la distribution saisonnière des débits et du moment de formation des glaces sont incertaines (Ouranos, 2004). [GT II 3.5, 14.4.8]

Les ressources solaires pourraient être influencées par les changements futurs de la nébulosité, qui pourrait légèrement augmenter le potentiel d'énergie solaire en Amérique du Nord, au sud de 60°N (d'après plusieurs modèles et d'après le scénario d'émissions A1B pour la période de 2080 à 2099 par rapport à celle de 1980 à 1999). [GT I figure 10.10] Cependant, Pan *et al.* (2004) ont prévu l'inverse, c'est-à-dire qu'une augmentation de la nébulosité diminuerait de 0 à 20 % le rendement potentiel d'énergie photovoltaïque (d'après les modèles HadCM2 et RegCM2[24] avec un scénario d'augmentation du CO_2 idéalisé). [GT II 14.4.8] Le potentiel bioénergétique est sensible au climat via des incidences directes sur la croissance des cultures et sur la disponibilité en eau d'irrigation. Les cultures bioénergétiques devraient remporter des surfaces agricoles à un prix de 33 dollars des États-Unis/10^6 g, ou environ 1,83 dollar des États-Unis /10^9 joules (Walsh *et al.*, 2003). Le réchauffement et l'augmentation des précipitations devraient permettre à la culture bioénergétique (panic érigé) d'entrer efficacement en concurrence avec les cultures classiques dans le centre des États-Unis (d'après le modèle RegCM2 et le doublement de la concentration en CO_2) (Brown *et al.*, 2000). [GT II 14.4.8]

[24] Voir appendice I pour la description des modèles.

5.6.2.3 Santé

Les épidémies de maladies d'origine hydrique dues à diverses causes sont nettement saisonnières en Amérique du Nord, regroupées dans certains bassins versants, et elles sont associées aux chutes de pluie importantes (aux États-Unis: Curriero *et al.*, 2001) ou à des précipitations extrêmes et aux températures plus élevées (au Canada: Thomas *et al.*, 2006). Un ruissellement important suite à des chutes de pluie intenses peut également polluer des eaux de loisirs et augmenter le risque de maladies humaines (Schuster *et al.*, 2005) via une concentration bactérienne plus élevée. Cette association est souvent plus prononcée au niveau des plages proches de cours d'eau (Dwight *et al.*, 2002). Les maladies à transmission hydrique et la dégradation de la qualité de l'eau augmenteront *très probablement* en cas d'accroissement des précipitations. Les maladies d'origine alimentaire sont également associées aux tendances de la température. En Alberta, la température ambiante est étroitement liée (mais pas de manière linéaire) à l'incidence des entéropathogènes (Fleury *et al.*, 2006). [GT II 14.RE, 14.2.5]

L'augmentation de l'activité cyclonique tropicale intense est *probable*. [GT I RiD] Les inondations par onde de tempête constituent déjà un problème le long du golfe du Mexique et des côtes atlantiques sud de l'Amérique du Nord. Le bilan de l'ouragan *Katrina* de 2005 est estimé à 1 800 morts [GT II 6.4.2]; certains décès et un grand nombre de cas de maladies diarrhéiques ont été liés à la pollution de l'approvisionnement en eau (CDC, 2005; Manuel, 2006). [GT II 8.2.2; voir également le paragraphe 4.5 concernant les inondations fluviales]

5.6.2.4 Agriculture

Depuis le troisième Rapport d'évaluation, la recherche favorise la conclusion de l'augmentation *probable* des rendements de l'agriculture pluviale en Amérique du Nord suite à un changement climatique modéré, mais avec une augmentation plus faible et une variabilité spatiale plus prononcée qu'avec les estimations précédentes (*degré de confiance élevé*) (Reilly, 2002). Un grand nombre des cultures qui approchent actuellement des seuils climatiques devraient cependant voir leurs rendements et leur qualité (voire les deux) diminuer même si le réchauffement est modeste (*degré de confiance moyen*) (Hayhoe *et al.*, 2004; White *et al.*, 2006). [GT II 14.4.4]

La vulnérabilité de l'agriculture nord-américaine vis-à-vis du changement climatique est multidimensionnelle et déterminée par les interactions entre les conditions préalables, les contraintes indirectes issues du changement climatique (par exemple, les changements dans la concurrence entre les parasites, la disponibilité en eau) et la capacité du secteur à faire face à de multiples facteurs interdépendants, notamment la concurrence économique avec d'autres régions ainsi que les améliorations des cultivars et de la gestion des exploitations (Parson *et al.*, 2003).

La disponibilité en eau est le principal facteur limitant pour l'agriculture dans le sud-est de l'Arizona, mais les agriculteurs de cette région pensent que les technologies et les adaptations telles que l'assurance récolte ont récemment diminué la vulnérabilité (Vasquez-Leon *et al.*, 2003). Les régions aux faibles dotations financières et de ressources (par exemple, les plaines du nord des États-Unis) sont particulièrement vulnérables au changement climatique (Antle *et al.*, 2004). Les pratiques d'utilisation non durable des terres auront tendance à augmenter la vulnérabilité de l'agriculture au changement climatique dans les Grandes Plaines des États-Unis (Polsky et Easterling, 2001). [GT II 14.4.4; voir également le paragraphe 4.2.2] Les réseaux à base d'eaux souterraines fortement utilisés dans le sud-ouest des États-Unis subiront *probablement* des contraintes supplémentaires du fait du changement climatique qui entraînera une diminution de l'alimentation (*degré de confiance élevé*), ce qui nuira à la productivité agricole. [GT II 14.4.1]

La diminution de la couverture neigeuse et une augmentation des chutes de pluie sur un sol nu en hiver prolongeront *probablement* la période d'érosion (qui augmentera donc) et augmenteront les incidences éventuelles sur la qualité de l'eau dans les régions agricoles. Les pratiques de gestion des terres (notamment, les résidus des cultures, l'absence de labour) dans la ceinture céréalière de l'Amérique du Nord peuvent ne pas fournir une protection suffisante contre l'érosion suite à de futures précipitations intenses et au ruissellement consécutif (Hatfield et Pruger, 2004; Nearing *et al.*, 2004). [GT II 14.4.1]

5.6.2.5 Biodiversité

Au cours des prochaines décennies, un large éventail d'espèces et de biomes pourraient être affectés par les changements prévus de précipitations, d'humidité du sol, des niveaux des eaux de surface et de l'écoulement fluvial en Amérique du Nord.

La diminution des niveaux d'eau des lacs et des étangs, par exemple, peut entraîner un échec de la reproduction des amphibiens et des poissons. Les différentes réponses d'une espèce à l'autre peuvent modifier la composition de la communauté aquatique et le flux d'éléments nutritifs. Des modifications de configuration des précipitations et des régimes de sécheresse peuvent susciter d'autres perturbations dans les écosystèmes, notamment les incendies (Smith *et al.*, 2000) et les invasions biologiques (Zavaleta et Hulvey, 2004). [GT II 14.4.2] Côté continent, le remplacement des marais herbeux d'eau douce par des mangroves plus tolérantes vis-à-vis du sel, par exemple dans la région des Everglades, au sud-est de la Floride depuis les années 1940, a été attribué aux effets combinés de l'élévation du niveau de la mer et de la gestion de l'eau, ce qui a abaissé les nappes phréatiques (Ross *et al.*, 2000). [GT II 1.3.3.2] Les changements du ruissellement d'eau douce vers la côte peuvent altérer la salinité, la turbidité et d'autres paramètres de qualité de l'eau qui déterminent la productivité et la distribution des communautés végétales et animales. [GT II 6.4]

Aux latitudes élevées, plusieurs modèles simulent une augmentation de la productivité primaire nette des écosystèmes en Amérique du Nord, suite à l'extension des forêts vers la toundra et à l'allongement des saisons de croissance (Berthelot *et al.*, 2002). Cette augmentation ne sera en grande partie possible que si l'augmentation des précipitations est suffisante pour compenser l'augmentation de l'évapotranspiration dans un climat plus chaud. La croissance de la forêt semble s'accélérer lentement dans les régions où la croissance des arbres a été limitée dans le passé par des températures basses et par des saisons de croissance courtes. La croissance se ralentit cependant dans les régions soumises à la sécheresse. La croissance radiale de l'épinette blanche sur les pentes sèches orientées vers le sud en Alaska a diminué au cours des dernières 90 années, en raison d'un stress accru causé par la sécheresse (Barber *et al.*, 2000). Les expériences de modélisation de Bachelet *et al.* (2001) prévoient une extension de 11 % de la superficie des écosystèmes limités par la sécheresse pour un réchauffement de 1 °C dans la partie continentale des États-Unis. [GT II 14.4] Dans la région de la Prairie, en Amérique du Nord, des modèles ont prévu une augmentation de la sécheresse suite à une augmentation de la température de 3 °C dans la région et aux changements variables de précipitations entraînant de grosses pertes de zones humides et des réductions des populations d'oiseaux d'eau qui s'y reproduisent (Johnson *et al.*, 2005). [GT II 4.4.10]

La viabilité écologique des poissons et la productivité des pêcheries sont étroitement liées à l'approvisionnement en eau et à la température de l'eau. Le changement climatique va *probablement* nuire aux pêcheries des eaux froides, tandis que celles des eaux chaudes devraient généralement en profiter; les résultats des pêcheries des eaux tempérées seront mitigés, avec des gains dans le nord et des pertes dans les parties méridionales de leur distribution. Les salmonidés, qui préfèrent les eaux froides et claires, pâtiront *probablement* le plus des incidences négatives (Gallagher et Wood, 2003). Les pêcheries des eaux douces de l'Arctique seront *probablement* les plus affectées, étant donné qu'à cet endroit, le réchauffement sera le plus important (Wrona *et al.*, 2005). Dans le lac Érié, le recrutement des larves du doré jaune qui fraie dans les rivières dépendra des changements de température et de débit; en revanche, les cheptels frayant dans les lacs seront *probablement* amenés à diminuer en raison des effets du réchauffement et de la diminution du niveau des lacs (Jones *et al.*, 2006). Les distributions des espèces d'eaux chaudes auront tendance à se décaler vers le nord ou vers des altitudes plus élevées (Clark *et al.*, 2001; Mohseni *et al.*, 2003) suite aux changements de température de l'eau. [GT II 14.4]

Encadré 5.7: Sécheresse et changements climatiques dans le bassin du fleuve Colorado

Le fleuve Colorado fournit une grande partie de l'eau nécessaire à sept États des États-Unis d'Amérique, deux États du Mexique et 34 tribus d'Amérindiens (Pulwarty *et al.*, 2005), à savoir une population de 25 millions d'habitants, qui devrait atteindre 38 millions de personnes à l'horizon 2020. Au cours des cent dernières années, la superficie totale affectée par une sécheresse climatologique sévère ou extrême aux États-Unis a été d'environ 14 % en moyenne chaque année, ce chiffre ayant atteint 65 % en 1934.

L'extension de la population et des activités économiques vers l'ouest et les réactions aux épisodes de sécheresse ont entraîné la mise en place d'adaptations structurelles significatives dans les environnements semi-arides, notamment la création de centaines de réservoirs, de projets d'irrigation et le recours à des prélèvements d'eaux souterraines. Comme la littérature en atteste largement, c'est pendant la période la plus humide des 400 dernières années (à savoir 1905-1925) que les eaux du Colorado ont été attribuées aux États du bassin, aux États-Unis. Récemment, l'ouest du pays a subi une longue sécheresse: 30 à 40 % de la région a été soumise à une sécheresse intense depuis 1999, et le Colorado a enregistré son débit quinquennal le plus bas entre 2000 et 2004. Au même moment, les États du sud-ouest des États-Unis ont enregistré un taux de la croissance démographique parmi les plus rapides du pays, avec les demandes de ressources en eau des secteurs social, économique et environnemental que cette croissance implique et les conflits juridiques correspondants (Pulwarty *et al.*, 2005).

Seule une petite partie (environ 15 %) de la région du bassin du Colorado fournit la plus grande partie (85 %) de son débit. Les estimations indiquent que, du fait de l'augmentation du réchauffement climatique et de l'évaporation, la diminution correspondante du ruissellement pourrait atteindre 30 % au cours du XXIe siècle (Milly *et al.*, 2005). Dans de telles conditions, et avec les prélèvements prévus, les critères de l'accord sur la gestion des eaux du Colorado (Colorado River Compact) ne pourraient être satisfaits que pendant 60 à 75 % du temps à l'horizon 2025 (Christensen *et al.*, 2004). Quelques études prévoient que, à l'horizon 2050, les conditions d'humidité moyennes, dans le sud-ouest des États-Unis, pourraient égaler celles observées dans les années 1950. Ces changements pourraient survenir suite à une augmentation des températures (via une augmentation de la sublimation et de l'évaporation et une réduction de l'humidité), même si les précipitations restent pratiquement constantes. Quelques chercheurs pensent que ces évaluations, du fait du choix du modèle, pourraient en fait sous-estimer les diminutions futures.

La plupart des scénarios concernant le débit du fleuve Colorado à hauteur de Lees Ferry (qui sépare le bassin supérieur du bassin inférieur) prévoient que, d'ici 20 ans, il pourrait ne pas suffire pour satisfaire les demandes actuelles en eau de consommation. L'expérience récente indique que des conditions critiques existent déjà dans le bassin (Pulwarty *et al.*, 2005). La variabilité et le changement climatiques, ainsi que des contraintes de développement accrues, entraîneront des incidences de sécheresse bien au-delà des expériences institutionnelles dans la région et aggraveront les conflits entre les utilisateurs des ressources en eau.

5.6.2.6 Études de cas des incidences du changement climatique dans les grands bassins versants d'Amérique du Nord

Les encadrés 5.7 et 5.8 décrivent deux cas illustrant les éventuelles incidences du changement climatique et les problèmes de gestion occasionnés par ce phénomène dans des environnements respectivement pauvres et riches en eau dans l'ouest de l'Amérique du Nord: les bassins des fleuves Colorado et Columbia.

5.6.3 Adaptation

Bien que l'Amérique du Nord fasse preuve d'une énorme capacité d'adaptation aux aspects du changement climatique liés à l'eau, les pratiques actuelles n'ont pas toujours protégé les personnes et les biens des incidences négatives des crues, sécheresses, orages et autres phé-nomènes météorologiques extrêmes. Sont particulièrement vulnérables les populations autochtones et les personnes socialement ou économiquement défavorisées. En Amérique du Nord, les traditions et les institutions ont encouragé un cadre de réponses décentralisé dans lequel l'adaptation est souvent réactive, inégalement répartie et centrée sur la résolution plutôt que sur la prévention des problèmes. Des exemples de comportement adaptatif exclusivement ou principalement influencé par des projections sur le changement climatique et ses effets sur les ressources en eau sont peu présents dans la littérature. [GT II 14.5.2] Une condition préalable décisive pour la durabilité en Amérique du Nord est l'intégration des questions climatiques dans la prise de décisions. [GT II 14.7]

La vulnérabilité de l'Amérique du Nord dépend de l'efficacité de l'adaptation et de la répartition de la capacité de faire face; ces deux qualités sont actuellement mal réparties

Encadré 5.8: Le changement climatique complique la gestion du bassin du fleuve Columbia [GT II encadré 14.2]

La gestion actuelle de l'eau du bassin de la Columbia implique de trouver l'équilibre entre des demandes complexes et souvent concurrentes d'utilisations pour l'énergie hydroélectrique, la navigation, le contrôle des crues, l'irrigation, les municipalités et la conservation de plusieurs populations d'espèces menacées d'extinction (par exemple, le saumon). Les besoins actuels et prévus pour ces utilisations dépassent l'approvisionnement existant. La gestion de l'eau dans le bassin est réalisée dans un cadre institutionnel complexe, impliquant deux États souverains (*Traité du fleuve Columbia*, ratifié en 1964), des populations autochtones ayant des droits conventionnels définis (décision du juge Boldt dans l'affaire opposant les États-Unis à l'État de Washington, en 1974) et un grand nombre d'agences gouvernementales fédérales, étatiques, provinciales et locales (Miles *et al.*, 2000; Hamlet, 2003). La pollution (principalement via des sources diffuses) est un problème important dans un grand nombre d'affluents. Les dispositions de la loi occidentale sur l'eau qui suivent le principe du «premier arrivé, premier servi», dans la partie américaine du bassin compliquent la gestion de l'eau et réduisent le volume d'eau disponible pour les utilisateurs d'eau secondaires (Gray, 1999; Scott *et al.*, 2004). Les complexités s'étendent aux différentes responsabilités juridictionnelles lorsque les débits sont élevés et quand ils sont bas, ou lorsque les affluents, le cours principal ou l'océan abritent des espèces protégées (Miles *et al.*, 2000; Mote *et al.*, 2003).

Avec le changement climatique, le débit annuel prévu de la Columbia ne devrait pas beaucoup changer, mais les débits saisonniers pourraient se décaler nettement pour donner des débits d'hiver et de printemps plus élevés et des débits d'été et d'automne plus faibles (Hamlet et Lettenmaier, 1999; Mote *et al.*, 1999). Ces changements de débit coïncideront *probablement* avec une demande en eau accrue, surtout du fait de la croissance régionale, mais également du fait du changement climatique. La perte de disponibilité en eau en été aggraverait les conflits autour de l'eau, déjà présents les années de faible débit (Miles *et al.* 2000). Le changement climatique devrait aussi influencer les approvisionnements des villes en eau dans le bassin. Par exemple, un réchauffement de 2 °C prévu pour les années 2040 pourrait augmenter la demande en eau de Portland, dans l'Oregon, de 5,7 millions m^3/an, avec une demande supplémentaire de 20,8 millions m^3/an due à la croissance démographique, tout en diminuant l'approvisionnement de 4,9 millions m^3/an (Mote *et al.*, 2003). Les prévisions climatiques sur le long terme sont de plus en plus prises en compte pour la gestion du fleuve, mais de manière limitée (Hamlet *et al.*, 2002; Lettenmaier et Hamlet, 2003; Gamble *et al.*, 2004; Payne *et al.*, 2004). Chacun des 43 sous-bassins du réseau possède son propre plan de gestion en ce qui concerne les poissons, la faune et la flore, mais aucun ne traite globalement des débits d'été réduits du fait du changement climatique (ISRP/ISAB, 2004).

Les problèmes de gestion de l'eau dans le bassin de la Columbia vont *probablement* s'aggraver avec le changement climatique, du fait des changements dans le manteau neigeux et les débits saisonniers (Miles *et al.*, 2000; Parson *et al.*, 2001; Cohen *et al.*, 2003). La capacité des gestionnaires à atteindre les objectifs d'exploitation (fiabilité) diminuera *probablement* de manière importante avec le changement climatique (tel que prévu par les MCGAO HadCM2 et ECHAM4/OPYC3 selon le scénario d'émissions IS92a du GIEC pour les années 2020 et 2090) (Hamlet et Lettenmaier, 1999). Les pertes de fiabilité devraient atteindre 25 % d'ici la fin du XXIe siècle (Mote *et al.*, 1999) et interagir avec les exigences en matière de règles de fonctionnement. Par exemple, certaines règles dénommées *fishfirst* devraient réduire la fiabilité des ressources énergétiques des entreprises de 10 % dans les conditions climatiques actuelles et de 17 % durant les années marquées par la phase chaude de l'oscillation décennale du Pacifique (ODP). Les mesures adaptatives pourraient modérer l'impact de la diminution du manteau neigeux en avril, mais elles pourraient entraîner de 10 à 20 % de pertes de l'énergie hydroélectrique pour les entreprises et diminuer les débits d'été actuels pour les poissons (Payne *et al.*, 2004). L'intégration dans les processus de planification régionaux de l'adaptation au changement climatique en est aux premières étapes de son développement (Cohen *et al.*, 2006).

et n'ont pas toujours protégé les populations vulnérables des incidences négatives de la variabilité du climat et des phénomènes météorologiques extrêmes. [GT II 14.7] Les États-Unis et le Canada ont développé des économies dotées d'infrastructures étendues et d'institutions évoluées, avec une grande variation régionale et socioéconomique (NAST, 2000; Lemmen et Warren, 2004). Ces capacités ont permis l'élaboration de stratégies d'adaptation et de parade dans un large éventail de conditions historiques, avec des succès et des échecs. La plupart des études sur les stratégies adaptatives tiennent compte de la mise en œuvre basée sur des expériences antérieures (Paavola et Adger, 2002). [GT II 14.5]

Au cours de la dernière décennie, l'agriculture nord-américaine a été exposée à un grand nombre de phénomènes météorologiques violents. Un temps plus variable, auquel s'ajoute une émigration des zones rurales et des contraintes économiques, a augmenté la vulnérabilité du secteur agricole dans son ensemble, ce qui suscite des préoccupations sur

sa capacité future à faire face à un climat plus variable (Sénat du Canada, 2003; Wheaton *et al.*, 2005). Cependant, l'agriculture nord-américaine est dynamique. L'adaptation aux multiples contraintes et opportunités, notamment des changements de marché et de temps, fait partie du processus normal de ce secteur. On utilise souvent la diversification des cultures et des entreprises, ainsi que la conservation du sol et de l'eau pour réduire les risques liés au temps (Wall et Smit, 2005). [GT II 14.2.4]

Un grand nombre de villes d'Amérique du Nord ont initié des actions «sans regrets» fondées sur l'expérience historique (MWD, 2005). [GT II encadré 14.3] En outre, des entreprises du Canada et des États-Unis investissent dans des mesures d'adaptation pertinentes pour faire face à l'évolution des ressources en eau, bien que peu de ces mesures semblent s'appuyer sur des projections des changements climatiques futurs. [GT II 14.5.1] Des exemples de ces types d'adaptations sont les suivants:

- Les compagnies d'assurance investissent dans la recherche, afin de prévenir les dommages causés aux biens assurés par les catastrophes futures et d'ajuster les modèles de tarification (Munich Re, 2004; Mills et Lecompte, 2006). [GT II 14.2.4]
- Les exploitants de stations de ski investissent dans les remontées pour atteindre des altitudes plus élevées et dans les équipements destinés à compenser la diminution de la couverture neigeuse (Elsasser *et al.*, 2003; Census Bureau, 2004; Scott, 2005; Jones et Scott, 2006; Scott et Jones, 2006). [GT II 14.2.4]
- Depuis le début des années 1980, New York a réduit sa consommation totale d'eau de 27 % et sa consommation par habitant de 34 % (ville de New York, 2005). [GT II 14.2.4]
- Dans la région de Los Angeles, des programmes d'information et d'incitation des organismes locaux de gestion de l'eau encouragent la conservation de l'eau (MWD, 2005). [GT II encadré 14.3]
- Les agriculteurs adaptent les cultures et la sélection des variétés, les stratégies d'irrigation et l'application de pesticides grâce aux informations très détaillées sur les conditions météorologiques (Smit et Wall, 2003). [GT II 14.2.4]
- La ville de Peterborough, au Canada, a subi deux épisodes de crues centennales en 3 ans. Elle a réagi par le curage des réseaux de drainage et le remplacement du réseau d'égout principal pour satisfaire des critères de crues quinquennales plus extrêmes (Hunt, 2005). [GT II 14.5.1]
- Les sécheresses ayant touché récemment six villes importantes des États-Unis, dont New York et Los Angeles, ont entraîné des mesures adaptatives impliquant des investissements dans des systèmes de conservation de l'eau et de nouvelles installations d'approvisionnement en eau et de distribution d'eau (Changnon et Changnon, 2000). [GT II 14.5.1]
- Pour faire face à une augmentation de 15 % des fortes pluies, Burlington et Ottawa, en Ontario, ont pris des mesures structurelles et non structurelles, notamment l'orientation des tuyaux d'évacuation des eaux des pluies vers les pelouses, pour favoriser l'infiltration ainsi que l'augmentation du stockage temporaire dans les dépressions du sol et les rues (Waters *et al.*, 2003). [GT II 14.5.1]
- Une augmentation de la population de plus de 35 % (près d'un million de personnes) depuis les années 1970 a augmenté la consommation d'eau à Los Angeles de seulement 7 % (California Regional Assessment Group, 2002), en grande partie grâce aux pratiques de conservation. [GT II encadré 14.3]
- Le district régional de Central Okanagan en Colombie britannique a élaboré en 2004 un plan de gestion de l'eau pour une région connue sous le nom de Trepanier Landscape Unit; ce plan traite explicitement des scénarios climatiques, des changements prévus dans l'approvisionnement en eau et la demande d'eau, et des solutions d'adaptation (Cohen *et al.*, 2004; Summit Environmental Consultants, 2004). [GT II encadré 3.1, 20.8.2]

5.7 Régions polaires

5.7.1 Contexte

Les régions polaires sont celles qui devraient subir les changements liés au climat les plus précoces et les plus profonds, en grande partie du fait de leur grande composante cryosphérique qui domine également leurs processus hydrologiques et leurs ressources en eau. La préoccupation la plus grande quant à l'effet du changement climatique sur les ressources en eau des régions polaires concerne l'Arctique. En ce qui concerne l'Antarctique, l'accent a été mis sur le bilan de masse des principales nappes glaciaires et sur leur influence sur le niveau de la mer, et dans un moindre degré, sur les changements provoqués dans certains systèmes aquatiques. L'Arctique comprend une énorme diversité de ressources en eau, notamment un grand nombre des plus grands fleuves du monde (Lena, Ob, Mackenzie et Ienisseï), des mégadeltas (Lena et Mackenzie), de grands lacs (notamment le Grand lac de l'Ours), des glaciers et des calottes glaciaires étendus, ainsi que de grandes étendues de zones humides. En raison de sa population relativement peu nombreuse (quatre millions de personnes: Bogoyavlenskiy et Siggner, 2004) et de son climat rigoureux, les industries dépendant des ressources en eau telles que l'agriculture et la sylviculture sont d'assez petite envergure, alors que les pêcheries commerciales et de subsistance sont nombreuses. Bien que quelques peuples nomades soient encore importants dans certains pays arctiques, les populations se concentrent de plus en plus dans

des établissements humains plus grands (les deux tiers de la population vivent actuellement dans des agglomérations de plus de 5 000 habitants), même si la plupart d'entre eux se situent à proximité des principaux cours d'eau et en dépendent pour leur transport. Le départ vers des communautés plus grandes a notamment augmenté l'accès à un approvisionnement en eau traitée et à des systèmes modernes d'évacuation de l'eau par les égouts (Hild et Stordhal, 2004). [GT I 10.6.4; GT II 15.2.1]

Une partie significative des ressources en eau de l'Arctique provient des bassins d'eau en amont des grands fleuves qui transportent l'eau à travers les régions septentrionales vers l'océan Arctique. Ces fleuves ont fait l'objet d'un développement hydroélectrique important et restent l'un des potentiels d'énergie hydroélectrique non exploités les plus élevés du monde (par exemple, Shiklomanov *et al.*, 2000; Prowse *et al.*, 2004). Étant donné le rôle joué par ces fleuves dans le transport de chaleur, de sédiments, d'éléments nutritifs, de polluants et de biotes vers le nord, les changements liés au climat se produisant à de plus basses latitudes exercent un effet puissant sur l'Arctique. De plus, les changements touchant le débit combiné de tous les bassins hydrographiques de l'Arctique ont été identifiés comme étant d'une importance capitale pour le bilan d'eau douce de l'océan Arctique, la production de glace de mer et, finalement, les effets potentiels sur la circulation thermohaline et sur le climat mondial. [GT I 10.3.4; GT II 15.4.1]

5.7.2 Changements observés

Le changement observé le plus significatif dans les ressources en eau de l'Arctique est l'augmentation, depuis les années 1930, du débit combiné des six fleuves eurasiatiques les plus importants (environ 7 %: Peterson *et al.*, 2002). L'augmentation du ruissellement des glaciers circumpolaires, des calottes glaciaires et de la nappe glaciaire du Groenland dans l'océan Arctique a également été remarquée à la fin du XXe siècle, elle était alors comparable à l'augmentation de l'apport combiné des plus grandes rivières panarctiques (Dyurgerov et Carter, 2004). Les changements de bilan de masse des masses de glace sont liés à une réponse complexe à des changements de précipitations et de température, entraînant des tendances régionales opposées telles que celles qui se trouvent aux bords et dans certaines parties intérieures de la nappe glaciaire du Groenland (Abdalati et Steffen, 2001; Johannessen *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 2005). En ce qui concerne l'augmentation du débit des fleuves eurasiens, d'éventuels facteurs de contrôle, tels que la fonte des glaces du pergélisol, les effets des feux de forêt et les variations des retenues de barrages ne sont plus considérés comme les responsables (McClelland *et al.*, 2004). Une étude de modélisation envisage que les facteurs anthropiques du forçage climatique aient pu jouer un rôle. L'évaluation des effets du climat et d'autres facteurs sur le fleuve le plus grand de l'Arctique en Amérique du Nord, le fleuve Mackenzie, s'est avérée particulièrement difficile du fait des grands effets amortisseurs du débit créés par les effets naturels de stockage et déstockage des principaux lacs et réservoirs (par exemple, Gibson *et al.*, 2006; Peters *et al.*, 2006). [GT I 9.5.4; GT II 15.4.1.1]

Les effets des précipitations sur le ruissellement sont difficiles à évaluer, en grande partie à cause de l'insuffisance et de la faible densité du réseau de nivo-pluviomètres de l'Arctique, mais il semblerait qu'ils aient lentement augmenté, au rythme d'environ 1 % par décennie (McBean *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 2005). Les changements ont également été observés dans le volume des débits hivernaux des principales rivières de l'Arctique et ils ont été liés au réchauffement et à l'augmentation des précipitations hivernales dans le cas de la Lena (Yang *et al.*, 2002; Berezovskaya *et al.*, 2005). Cependant, même si ces changements semblaient être liés au climat, on les attribue tout simplement à la régulation hydroélectrique pour les fleuves Ob et Ienisseï (Yang *et al.*, 2004a, b). Des changements se sont également produits dans le moment de la crue du printemps, épisode dominant du débit des fleuves arctiques, mais ils n'ont pas été spatialement cohérents au cours des 60 dernières années, les rivières sibériennes adjacentes tendant à l'avancement de la crue (Lena: Yang *et al.*, 2002) ou à son retardement (Ienisseï: Yang *et al.*, 2004b). La glace d'eau douce flottante contrôle également la dynamique saisonnière des fleuves et des lacs de l'Arctique, en particulier les régimes d'inondation, et bien qu'aucun changement n'ait été rapporté en ce qui concerne la fréquence ou l'ampleur des crues liées à la glace, la durée de la couverture de glace a diminué dans une grande partie de la région subarctique (Walsh *et al.*, 2005). [GT II 15.2.1, 15.4.1.1]

Des changements significatifs se sont produits dans le pergélisol en Arctique au cours de la dernière moitié du siècle (Walsh *et al.*, 2005) et, étant donné le rôle du gélisol dans le contrôle des trajets d'écoulement de l'eau, le dégel du pergélisol pourrait être influencé par des réponses saisonnières en termes de précipitations et de ruissellement (Serreze *et al.*, 2003; Berezovskaya *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005). Le dégel du pergélisol, et l'augmentation correspondante de la perméabilité du substrat, ont également été soupçonnés de causer des changements dans l'abondance des lacs dans certaines régions de Sibérie au cours d'une période de trois décennies à la fin du XXe siècle (Smith *et al.*, 2005; voir figure 5.12). Aux latitudes plus élevées, le dégel initial aurait pu augmenter la formation d'étangs en surface et l'abondance des lacs. Cependant, aux latitudes plus basses, le nombre de lacs a diminué car le dégel plus étendu et plus profond a permis à l'eau accumulée de s'écouler vers les systèmes d'écoulement souterrain. Dans des régions plus vastes de l'Arctique, la composition biologique des communautés aquatiques des lacs et des étangs répond à des décalages de l'augmentation de la température annuelle moyenne de l'air et des températures estivales, et aux changements correspondants dans la

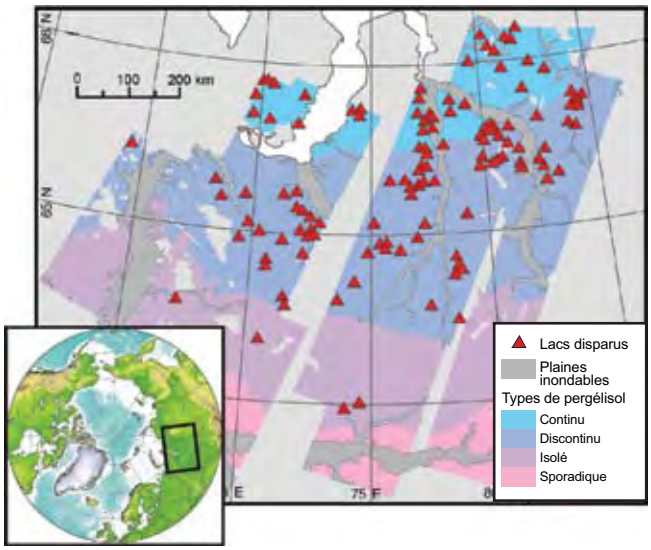


Figure 5.12: *Emplacements de lacs sibériens disparus après une période de trois décennies d'augmentation de la température du sol et de l'air (changements observés par imagerie satellitaire depuis le début des années 1970 jusqu'en 1997 à 2004), superposés à divers types de pergélisol. La configuration spatiale de la disparition des lacs laisse à penser que le dégel du pergélisol a entraîné les pertes observées. D'après Smith* et al. *(2005). Réimprimé avec l'autorisation d'AAAS. [GT II figure 15.4]*

stratification et la stabilité thermiques, ainsi que dans la durée de la couverture de glace (Korhola *et al*. 2002; Ruhland *et al*., 2003; Pienitz *et al*., 2004; Smol *et al*., 2005; Prowse *et al*., 2006). [GT I chapitre 4; GT II 15.4.1.1]

Les écosystèmes aquatiques d'eau douce de l'Antarctique semblent également être très réactifs vis-à-vis des variations climatiques, en particulier de la température de l'air, bien que plusieurs tendances soient observées dans tout le continent. On a observé que la productivité des lacs dans les vallées sèches, par exemple, avait diminué avec une diminution de la température de l'air (par exemple, Doran *et al*., 2002). En revanche, l'augmentation de la température de l'air dans l'île maritime subantarctique de Signy a entraîné certaines des réponses les plus rapides et les plus importantes des températures lacustres à être documentées dans l'hémisphère Sud (Quayle *et al*., 2002). De plus, les effets du réchauffement sur le manteau neigeux et la couche de glace ont généré un vaste ensemble de perturbations des écosystèmes (Quayle *et al*., 2003). [GT II 15.2.2.2]

5.7.3 Changements prévus

La projection des changements relatifs à l'hydrologie (donc aux ressources en eau) de l'Arctique est problématique du fait de la grande variabilité de la saisonnalité et des configurations spatiales de précipitations d'un modèle MCG à l'autre. Bien que la plupart de ces modèles prévoient une augmentation, la projection du ruissellement dû aux précipitations est rendue complexe par des problèmes liés à la répartition de la pluie et de la neige au fur et à mesure du réchauffement de la région, ou de la disponibilité de sources d'humidité supplémentaires du fait du recul des glaces de la mer. Cependant, en général, les dernières projections pour le ruissellement des principaux bassins hydrographiques de l'Arctique indiquent une augmentation globale de l'ordre de 10 à 30 %. Cependant, un facteur dont il n'est pas tenu compte dans ces projections est l'augmentation de l'évapotranspiration qui se produira à mesure que la végétation terrestre dominante passera des lichens non transpirants de la toundra à diverses espèces ligneuses (par exemple, Callaghan *et al*., 2005), même si elle peut être compensée par les réductions de la transpiration liées au CO_2 (par exemple, Gedney *et al*., 2006). De même, les projections du ruissellement actuel ne tiennent pas compte des effets du futur dégel du pergélisol et de l'approfondissement des couches actives (Anisimov et Belolutskaia, 2004; Instanes *et al*., 2005), ce qui reliera davantage les régimes d'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines, avec pour résultat des changements majeurs dans les hydrogrammes saisonniers. Une humidification ou un assèchement correspondant de la toundra, couplé au réchauffement et à l'approfondissement de la couche active déterminera son statut de source ou de puits pour les flux de carbone et de méthane. Le dégel du pergélisol et l'augmentation du débit devraient également causer une augmentation des charges en sédiments des rivières (Syvitski, 2002) et d'éventuelles transformations majeures sur les réseaux de canaux (Bogaart et van Balen, 2000; Vandenberghe, 2002). [GT I chapitre 10; GT II 15.4.2.3, 15.4.1.2]

Dans les deux régions polaires, le ruissellement augmentera du fait de l'ablation des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, bien que la majeure partie de l'eau de la fonte de certaines calottes glaciaires et nappes glaciaires soit directement déversée dans les océans avoisinants. Les divers glaciers dispersés dans tout l'Arctique, qui devraient connaître un net recul avec le temps, sont plus importants pour les ressources en eau. La disparition progressive des glaciers ou, dans un moindre degré, un nouveau bilan de masse, bien qu'augmentant initialement l'écoulement fluvial, entraînera finalement des conditions de débit plus faible, en particulier à la fin de l'été où le climat est plus sec et qui est une période critique pour le biote aquatique de l'Arctique. [GT I chapitre 10; GT II 15.4.1.3]

Le réchauffement prévu implique également la poursuite des tendances récentes vers un embâcle plus tardif, une débâcle plus précoce des rivières et des lacs (Walsh *et al*., 2005) et des réductions de l'épaisseur de la couche de glace, ce qui provoquera des changements dans la structure thermique des lacs, la qualité et la quantité d'habitats sous la glace, et les effets sur les embâcles dans les rivières et sur les inondations subséquentes (Beltaos *et al*., 2006; Prowse *et al*., 2006). Ces derniers phénomènes sont importants car

ils représentent un risque pour un grand nombre d'établissements riverains septentrionaux, mais ils sont également cruciaux pour la conservation de la santé écologique des écosystèmes riverains qui dépendent de l'inondation du printemps qui apporte eau, sédiments et éléments nutritifs (Prowse *et al.*, 2006). [GT II 15.4.1.2, 15.6.2]

Les perturbations majeures, décrites précédemment, de l'hydrologie des régions froides de l'Arctique modifieront la biodiversité, la productivité, la disponibilité saisonnière d'habitats et la répartition géographique des espèces aquatiques, notamment les populations des principales pêcheries (Prowse *et al.*, 2006; Reist *et al.* 2006a, b, c; Wrona *et al.*, 2006). Les peuplades de l'Arctique, dont le mode de vie repose sur des économies de subsistance et des économies commerciales, obtiennent un grand nombre de services des écosystèmes d'eau douce (par exemple, biote exploitable), et des changements dans l'abondance, le réapprovisionnement, la disponibilité et l'accessibilité de telles ressources modifieront l'utilisation des ressources locales et les modes de vie traditionnels (Nuttall *et al.*, 2005; Reist *et al.*, 2006a). [GT II 15.4.1.3]

Étant donné que les projections annoncent que l'Arctique sera généralement plus humide, un certain nombre de processus hydrologiques viendront affecter les trajets d'écoulements et augmenter la charge en polluants (notamment les polluants organiques persistants et le mercure) dans les systèmes aquatiques de l'Arctique (MacDonald *et al.*, 2003). Les changements intervenant dans la structure trophique aquatique et les réseaux alimentaires (Wrona *et al.*, 2006) sont susceptibles de modifier l'accumulation de produits chimiques à bioamplification. Cela est particulièrement préoccupant pour la santé des habitants du nord qui dépendent des sources traditionnelles d'aliments locaux. Des modifications dans la répartition saisonnière et l'ampleur des débits et de l'eau de surface disponible seront également inquiétantes pour un grand nombre de communautés septentrionales qui dépendent des eaux de surface ou des eaux souterraines (souvent non traitées) pour l'eau potable (United States Environmental Protection Agency, 1997; Martin *et al.*, 2005). Les risques de contamination peuvent également augmenter avec le déplacement vers le nord d'espèces et des maladies correspondantes, et via la contamination par l'eau de mer des réserves souterraines, provoquée par l'élévation du niveau de la mer dans les communautés côtières (Warren *et al.*, 2005). [GT II 15.4.1]

Le nombre conséquent d'exploitations et d'infrastructures qui se concentrent de plus en plus à proximité des réseaux d'eau douce de l'Arctique sera fortement concerné par les changements touchant les régimes hydrologiques septentrionaux. Des exemples importants incluent la diminution de l'accès aux routes de glace pour les équipements de transport et les communautés septentrionales, la modification de la disponibilité des eaux de surface et des eaux souterraines pour les communautés et l'industrie, la perte de sûreté de confinement des déchets miniers dans les lacs septentrionaux surmontant le pergélisol, et une augmentation des débits et des risques liés à la glace pour les plateformes de forage et les réservoirs hydroélectriques (Commission internationale des grands barrages, 2000; Prowse *et al.*, 2004; Instanes *et al.*, 2005). Bien que la production d'électricité future n'ait pas encore été évaluée pour la totalité de l'Arctique, on estime que, d'après le scénario d'émissions IS92a, le potentiel d'énergie hydroélectrique des centrales existant à la fin du XXe siècle augmentera de 15 à 30 % en Scandinavie et dans le nord de la Russie. [GT I 3.5.1; GT II 15.4.1.4]

5.7.4 Adaptation et vulnérabilité

Dans un grand nombre de systèmes hydrologiques cryosphériques, une grande partie de la vulnérabilité globale vis-à-vis du changement climatique des ressources en eaux douces de l'Arctique est liée aux futurs changements soudains associés aux changements de phase de l'eau passant de l'état solide à l'état liquide. Les écosystèmes d'eau douce de l'Arctique ont dans le passé pu s'adapter à de grandes variations climatiques, mais sur des périodes de plusieurs années (par exemple, Ruhland *et al.*, 2003). La vitesse des changements pour le siècle à venir devrait cependant être trop rapide pour permettre l'adaptation de certains biotes (Wrona *et al.*, 2006), et elle entraînera des incidences plus négatives que positives dans les écosystèmes d'eau douce (Wrona *et al.*, 2005). [GT II 15.2.2.2]

Du point de vue de l'utilisation humaine, les mesures potentielles d'adaptation sont extrêmement diverses, allant de mesures visant à faciliter l'utilisation des ressources en eau (notamment des changements de pratique pour la construction de routes de glace, une augmentation du transport en eau libre, la régulation du débit pour la génération d'énergie hydroélectrique, des stratégies d'exploitation et des méthodes pour l'accès à l'eau potable) jusqu'aux stratégies d'adaptation destinées à faire face aux risques liés à une augmentation ou à une diminution des eaux douces (notamment des structures de protection pour réduire les risques de crue ou une augmentation des débits pour les systèmes aquatiques; Prowse et Beltaos, 2002). De forts attachements culturels ou sociaux aux utilisations traditionnelles des ressources en eau de certaines peuplades septentrionales pourraient cependant compliquer l'adoption de certaines stratégies d'adaptation (McBean *et al.*, 2005; Nuttall *et al.*, 2005). [GT II 15.2.2.2]

5.8 Petites îles

5.8.1 Contexte

Le troisième Rapport d'évaluation (chapitre 17; GIEC, 2001b) a indiqué que les petits États insulaires partagent un

nombre important de similitudes (par exemple, la taille, la vulnérabilité aux catastrophes naturelles et aux extrêmes climatiques, la grande transparence de leur économie, la faible répartition des risques et la capacité d'adaptation limitée) qui augmentent leur vulnérabilité et réduisent leur résilience vis-à-vis de la variabilité et du changement climatiques. Malgré les différences dans les priorités sectorielles de différentes îles, trois thèmes communs ressortent.

1) Toutes les communications nationales des petits États insulaires[25] insistent sur l'urgence d'une action d'adaptation et sur le besoin de ressources financières pour appuyer une telle action.

2) L'eau douce est un facteur critique dans les petits États insulaires, tant en termes de qualité que de quantité.

3) Un grand nombre de petits États insulaires, notamment l'ensemble des petits États insulaires en développement (PEID), ressentent le besoin d'une planification et d'une gestion des bassins versants mieux intégrées.

[GT II TRE chapitre 17]

L'eau est une ressource multisectorielle qui intervient dans tous les volets de la vie et de la subsistance, y compris la sécurité. La fiabilité de l'approvisionnement en eau est un problème critique dans un grand nombre d'îles de nos jours, qui ne cessera de s'aggraver dans l'avenir. Il est clairement avéré que, dans la plupart des scénarios de changement climatique, les ressources en eau des petites îles vont *probablement* être sérieusement compromises [*degré de confiance très élevé*]. La plupart des petites îles disposent d'un approvisionnement en eau limité, et les ressources hydrologiques de ces îles sont particulièrement exposées aux futurs changements des régimes de pluie et de leur distribution. L'éventail des mesures adaptatives considérées et les priorités qui leur sont attribuées, sont étroitement liés aux principaux secteurs socioéconomiques de chaque pays, à leurs principales préoccupations environnementales et aux régions les plus vulnérables aux incidences du changement climatique telles que l'élévation du niveau de la mer. [GT II 16.RE, 16.5.2]

5.8.2 Tendances climatiques observées et projections pour les régions insulaires

Les conditions hydrologiques, l'approvisionnement en eau et l'utilisation de l'eau dans les petites îles posent des problèmes de recherche et d'adaptation assez différents de ceux qui se posent aux continents. Il est nécessaire de les étudier et de les modéliser pour un éventail de types d'îles, avec des géologies, des topographies et des couvertures terrestres distinctes, en tenant compte des tous derniers scénarios et projections du changement climatique. [GT II 16.7.1] Depuis le troisième Rapport d'évaluation, de nouvelles observations et analyses des températures moyennes à la surface des terres et des océans mettent en évidence des tendances constantes au réchauffement dans toutes les régions de petites îles pour la période de 1901 à 2004. Cependant, ces tendances ne sont pas linéaires et les analyses sont fortement entravées par le manque de relevés historiques. [GT II 16.2.2.2]

Des études récentes montrent que les températures annuelles et saisonnières à la surface des océans et dans les îles ont augmenté de 0,6 à 1,0 °C depuis 1910, dans une grande partie du Pacifique Sud, au sud-ouest de la zone de convergence du Pacifique Sud (ZCPS)[26], tandis que les augmentations décennales de 0,3 à 0,5 °C des températures annuelles ne sont largement observées que depuis les années 1970, précédées d'un certain refroidissement après les années 1940, date du début des relevés, dans le nord-est de la ZCPS (Salinger, 2001; Folland *et al*., 2003). En ce qui concerne les Caraïbes, l'océan Indien et la région méditerranéenne, les analyses montrent que le réchauffement était de 0,24 à 0,5 °C par décennie pendant la période de 1971 à 2004. Certaines régions de latitude élevée, y compris l'ouest de l'archipel de l'Arctique canadien, ont subi un réchauffement plus rapide que la moyenne mondiale (McBean *et al*., 2005). [GT II 16.2.2.2]

Les tendances des chutes de pluie journalières et de températures extrêmes dans le Pacifique Sud pour la période de 1961 à 2003 indiquent une augmentation du nombre de journées et de nuits chaudes par an, avec une diminution du nombre de journées et de nuits froides par an, en particulier les années consécutives au phénomène *El Niño*, les tendances de chutes de pluie extrêmes étant généralement moins régulières spatialement que celles des températures extrêmes (Manton *et al*., 2001; Griffths *et al*., 2003). Dans les Caraïbes, le pourcentage de journées avec un minimum ou un maximum très chaud a fortement augmenté depuis les années 1950, tandis que le pourcentage des journées à températures basses a diminué (Petersen *et al*., 2002). [GT II 16.2.2.2]

En ce qui concerne les Caraïbes, une augmentation de 1,5 à 2 °C de la température globale de l'air devrait affecter la région [GT II TRE chapitre 17] via:

- Une augmentation des pertes par évaporation;
- Une diminution des précipitations (suite d'une tendance à la diminution des chutes de pluie observée dans certaines parties de la région);
- Une diminution de la durée de la saison des pluies de 7 à 8 % à l'horizon 2050;

[25] Dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les pays doivent fournir des communications nationales périodiques indiquant leurs progrès accomplis dans la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES), les politiques et les mesures adoptées et les évaluations des besoins.

[26] La ZCPS fait partie de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), et est une bande de convergence, de nébulosité et de précipitations limitées qui s'étend du réservoir d'eaux chaudes du Pacifique Ouest à la Polynésie française, au sud-est.

- Une augmentation de la durée de la saison sèche de 6 à 8 % à l'horizon 2050;
- Une augmentation de la fréquence des chutes de pluie intenses de 20 % à l'horizon 2050;
- Une augmentation de l'érosion et de la pollution des régions côtières.

Dans un grand nombre de régions de petites îles, les variations des cyclones, ouragans et typhons tropicaux et extratropicaux sont dominées par l'ENSO et par la variabilité décennale. Il en résulte une redistribution des tempêtes tropicales et de leurs trajectoires, de telle sorte que les augmentations dans un bassin sont souvent compensées par des diminutions dans d'autres. Par exemple, lors d'un épisode *El Niño*, l'incidence des ouragans diminue généralement dans l'Atlantique et l'extrême ouest des régions du Pacifique et de l'Australasie, tandis qu'elle augmente dans le centre, le nord et le sud du Pacifique, en particulier dans la région des typhons de l'ouest du Pacifique Nord. Des preuves tirées d'observations indiquent une augmentation de l'activité cyclonique tropicale intense dans l'Atlantique Nord depuis 1970 environ, corrélée à des augmentations des températures de la mer en surface dans les tropiques. Il existe également des suggestions d'augmentation de l'activité cyclonique tropicale intense dans d'autres régions où les préoccupations liées à la qualité des données sont plus importantes. La variabilité multidécennale et la qualité des relevés avant 1970 compliquent la détection de tendances sur le long terme. Des estimations sur la capacité destructrice des cyclones tropicaux laissent entrevoir une tendance nette à la hausse depuis le milieu des années 1970. [GT I RT, 3.8.3; GT II 16.2.2.2]

Des analyses des relevés du niveau de la mer comportant au moins 25 ans de données horaires de stations installées autour du bassin du Pacifique indiquent une élévation relativement moyenne globale du niveau de la mer de 0,7 mm/an (Mitchell *et al.*, 2001). En se concentrant uniquement sur les stations insulaires comportant plus de 50 ans de données (quatre sites seulement), on constate que la vitesse moyenne de l'élévation du niveau de la mer (par rapport à la croûte terrestre) est de 1,6 mm/an. [GT I 5.5.2]

5.8.2.1 Eau

Le tableau 5.8, fondé sur sept MCG et différents scénarios d'émissions du SRES, compare les changements prévus des précipitations pour les petites îles par région. Dans les Caraïbes, un grand nombre d'îles devraient subir une augmentation du stress hydrique suite au changement climatique, tous les scénarios SRES prévoyant une diminution des précipitations en été dans toute la région. Il est peu probable que la demande soit satisfaite pendant les périodes de faibles pluies. Il est peu probable que les pluies hivernales plus importantes dans l'hémisphère Nord assurent une compensation, du fait du manque de capacités de stockage et du ruissellement important lors des tempêtes. [GT II 16.3.1]

Tableau 5.8: *Changements prévus dans les précipitations des petites îles, par région (en %). Les fourchettes sont issues de sept MCGAO réalisés selon les scénarios B1, B2, A2 et A1FI du SRES. [GT II tableau 16.2]*

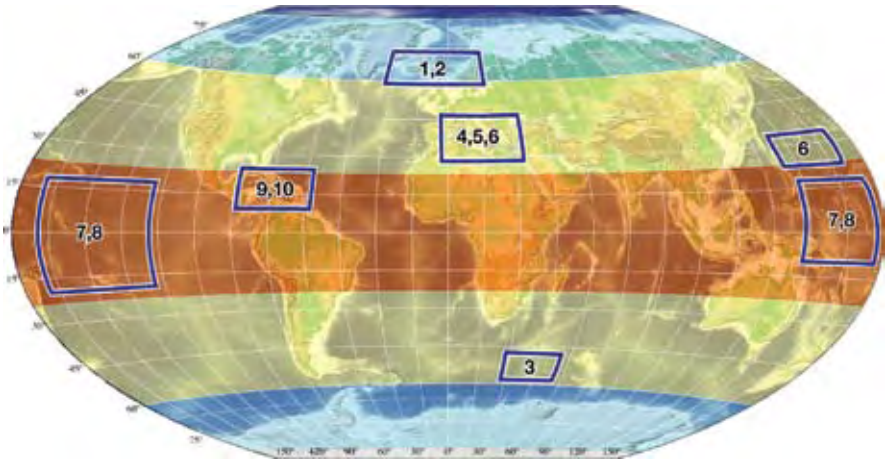
Régions	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Méditerranée	-35,6 à +55,1	-52,6 à +38,3	-61,0 à +6,2
Caraïbes	-14,2 à +13,7	-36,3 à +34,2	-49,3 à +28,9
Océan Indien	-5,4 à +6,0	-6,9 à +12,4	-9,8 à +14,7
Pacifique Nord	-6,3 à +9,1	-19,2 à +21,3	-2,7 à +25,8
Pacifique Sud	-3,9 à + 3,4	-8,23 à +6,7	-14,0 à +14,6

Dans le Pacifique, une réduction de 10 % du volume moyen des pluies (d'ici à 2050) entraînerait une réduction de 20 % de la taille des lentilles d'eau douce sur l'atoll de Tarawa (Kiribati). Des chutes de pluie moindres, couplées à l'élévation du niveau de la mer, accentueraient les risques concernant la fiabilité de l'approvisionnement en eau. [GT II 16.4.1]

De nombreux petits États insulaires ont commencé à investir dans la mise en œuvre de stratégies d'adaptation, notamment le dessalement, pour compenser les pénuries d'eau actuelles et à venir. Cependant, les impacts des usines de dessalement elles-mêmes sur les agréments de l'environnement et la nécessité de traiter en profondeur les besoins en eau des écosystèmes n'ont pas encore été entièrement pris en compte. [GT II 16.4.1]

Étant donné la grande visibilité et les impacts des ouragans, les sécheresses ont moins attiré l'attention des chercheurs et des planificateurs, et pourtant elles peuvent entraîner une augmentation des prélèvements et l'éventualité d'une intrusion d'eau salée dans les aquifères situés près des côtes. Aux Bahamas, par exemple, les lentilles d'eau douce sont les seules ressources d'eaux souterraines exploitables. Ces lentilles sont périodiquement affectées par des intrusions d'eau salée provoquées par un excès de pompage et d'évapotranspiration. Dans la plupart des cas, les eaux souterraines se déplacent lentement et, par conséquent, les diminutions importantes des réserves d'eaux souterraines sont longues à compenser et peuvent ne pas être réversibles. La variabilité des volumes annuels d'eau disponible est généralement moins extrême que celle des ressources en eaux de surface. De plus, la dégradation de la qualité de l'eau et la pollution ont des effets durables et l'on ne peut pas y remédier rapidement. [GT II 16.4.1]

Certains États insulaires tels que Malte (MRAE, 2004) insistent sur les éventuels secteurs économiques qui nécessiteront une adaptation, notamment la génération d'énergie, le transport et la gestion des déchets, tandis que pour les Comores (GDE, 2002), Vanuatu (République de Vanuatu, 1999), ainsi que Saint-Vincent-et-les Grenadines (NEAB, 2000), ce sont les secteurs de l'agriculture et de



* Les chiffres en gras correspondent aux régions définies sur la carte.

Tableau 5.9: *Éventail des incidences futures et des vulnérabilités des petites îles [GT II encadré 16.1]*

Région* et système menacés	Scénario et référence	Paramètres modifiés	Impacts et vulnérabilité
1. Islande, îles arctiques isolées du Svalbard et îles Féroé: écosystèmes marins et espèces végétales	Scénarios A1 et B2 du SRES ACIA (2005) Scénarios A1 et B2 du SRES	Augmentation prévue de la température	• Le déséquilibre entre la perte et le remplacement des espèces entraîne une perte initiale de diversité. L'extension vers le nord de la végétation dominée par les arbustes nains et les arbres vers des régions riches en espèces endémiques rares entraîne leur perte. • La grande diminution, voire la disparition totale du cheptel de capelan islandais entraîne des incidences négatives considérables sur la plupart des cheptels de poissons commerciaux, sur les baleines et les oiseaux de mer.
2. Îles des latitudes élevées (Îles Féroé): espèces végétales	Scénario I/II: augmentation/ diminution de la température de 2 °C Fosaa *et al.* (2004)	Changements de la température du sol, de la couverture neigeuse et du degré-jour de croissance	• Scénario I: les espèces les plus touchées par le réchauffement sont confinées dans les zones les plus élevées des montagnes. En ce qui concerne les autres espèces, l'effet se manifestera surtout par une migration vers les hauteurs. • Scénario II: les espèces touchées par le refroidissement sont celles qui vivent à des altitudes plus basses.
3. Île Marion dans la zone subantarctique: écosystème	Scénarios propres Smith (2002)	Changements prévus de la température et des précipitations	• Les changements affecteront directement le biote indigène. Une plus grande menace est qu'un climat plus chaud augmentera la vulnérabilité des îles aux espèces invasives.
4. Cinq îles du bassin méditerranéen: écosystèmes	Scénarios A1FI et B1 du SRES Gritti *et al.* (2006)	Invasion de plantes non indigènes selon des scénarios climatiques et de perturbation	• Les incidences du changement climatique sont négligeables dans un grand nombre d'écosystèmes marins simulés. • L'invasion des écosystèmes insulaires devient un problème de plus en plus sérieux. À long terme, les écosystèmes seront dominés par des plantes exotiques, indépendamment des taux de perturbation.
5. Région méditerranéenne: oiseaux migrateurs (gobemouche noir - Ficedula hypoleuca)	Aucun (modèle GLM/ STATISTICA) Sanz *et al.* (2003)	Augmentation de la température, modification des niveaux d'eau et indice de végétation	• Certaines composantes de la valeur adaptative du gobe-mouche noir souffrent du changement climatique dans deux des populations européennes d'oiseaux nicheurs les plus méridionales, avec des incidences négatives sur l'efficacité de la reproduction des gobe-mouches noirs.
6. Pacifique et Méditerranée: herbe du Laos (Chromolaena odorata)	Aucun (modèle CLIMEX) Kriticos *et al.* (2005)	Augmentation du stress lié à l'humidité, au froid, à la chaleur et à la sécheresse	• Îles du Pacifique menacées par l'invasion de l'herbe du Laos. • Les climats méditerranéens semi-arides et tempérés ne devraient pas convenir à l'invasion.
7. Petites îles du Pacifique: érosion côtière, ressources en eau et établissements humains	Scénarios A2 et B2 du SRES Banque mondiale (2000)	Changements de la température et des précipitations, élévation du niveau de la mer	• L'accélération de l'érosion côtière, l'intrusion d'eau salée dans les lentilles d'eau douce et l'augmentation des inondations marines entraînent des effets conséquents sur les établissements humains. • Une diminution des chutes de pluie couplée à une accélération de l'élévation du niveau de la mer aggravent la menace qui pèse sur les ressources en eau; une réduction de 10 % des précipitations moyennes à l'horizon 2050 correspondra probablement à une réduction de 20 % de la taille des lentilles d'eau douce dans l'atoll de Tarawa, aux Kiribati.

Région* et système menacés	Scénario et référence	Paramètres modifiés	Impacts et vulnérabilité
8. Samoa américaines et 15 autres îles du Pacifique: mangroves	Élévation du niveau de la mer de 0,88 m d'ici 2100 Gilman *et al.* (2006)	Élévation prévue du niveau de la mer	• Perte de 50 % de la superficie des mangroves aux Samoa américaines; réduction de 12 % de la superficie des mangroves dans 15 autres îles du Pacifique.
9. Caraïbes (Bonaire, Antilles néerlandaises): érosion de la plage et des habitats de nidification de la tortue marine	Scénarios A1, A1FI, B1, A2, B2 du SRES Fish *et al.* (2005)	Élévation prévue du niveau de la mer	• En moyenne, jusqu'à 38 % (écart type de ±24 %) de la totalité des plages actuelles pourraient disparaître suite à une élévation de 0,5 m du niveau de la mer, les plages basses et étroites étant les plus vulnérables, réduisant ainsi l'habitat de nidification des tortues d'un tiers.
10. Caraïbes (Bonaire, Barbade): tourisme	Aucun Uyarra *et al.* (2005)	Changements sur la faune marine, la santé, les particularités terrestres et les conditions marines	• L'industrie touristique fondée sur les plages à la Barbade et l'industrie écotouristique fondée sur la plongée sous-marine à Bonaire sont toutes les deux négativement affectées par le changement climatique via l'érosion des plages à la Barbade et le blanchissement du corail à Bonaire.

la santé humaine qui figurent le plus dans les communications. Dans ces cas, l'élévation du niveau de la mer ne semble pas être le principal problème, bien qu'elle le soit dans les États atolls peu élevés tels que Kiribati, Tuvalu, les îles Marshall et les Maldives. [GT II 16.4.2]

5.8.2.2 Énergie

L'accès à une énergie fiable et abordable est un élément vital dans la plupart des petites îles, où le coût élevé de l'énergie est considéré comme une barrière au développement durable. Certaines îles, telles que la Dominique dans les Caraïbes, dépendent en grande partie de l'énergie hydroélectrique pour leur approvisionnement énergétique. La recherche et le développement dans le domaine du rendement énergétique et les solutions adaptées aux petites îles, notamment les énergies solaire et éolienne, pourraient aider à mettre en place des stratégies d'adaptation et d'atténuation, tout en améliorant la perspective de réussir une croissance durable. [GT II 16.4.6, 16.4.7]

5.8.2.3 Santé

Un grand nombre de petites îles se trouvent dans des zones tropicales ou subtropicales où le temps est propice à la transmission de maladies, telles que le paludisme, la dengue, la filariose, la schistosomiase et des maladies d'origine hydrique ou alimentaire. Le taux d'occurrence de bon nombre de ces maladies est en augmentation dans les petites îles pour diverses raisons, dont des pratiques de santé publique médiocres, des infrastructures inadéquates, des pratiques de gestion des déchets inefficaces, une augmentation des voyages dans le monde et des conditions climatiques changeantes (OMS, 2003). Dans les Caraïbes, l'incidence de la dengue augmente pendant les années chaudes des cycles de l'ENSO (Rawlins *et al.*, 2005). Sachant que le risque de transmission de la dengue atteint un pic pendant les saisons humides annuelles, les programmes de contrôle du vecteur devraient cibler ces périodes afin de réduire les charges pathologiques. L'incidence de maladies diarrhéiques est liée à la température annuelle moyenne (Singh *et al.*, 2001) [GT II 8.2, 8.4], et inversement proportionnelle à la disponibilité en eau dans le Pacifique (Singh *et al.*, 2001). De ce fait, l'augmentation des températures et la diminution de la disponibilité en eau dues au changement climatique peuvent augmenter les charges des maladies diarrhéiques et d'autres maladies infectieuses dans certains petits États insulaires. [GT II 16.4.5]

5.8.2.4 Agriculture

Les incidences prévues du changement climatique incluent des périodes prolongées de sécheresse, et par ailleurs, une perte de fertilité et une dégradation du sol du fait de précipitations accrues; ces deux phénomènes auront des incidences négatives sur l'agriculture et la sécurité alimentaire. Dans son étude sur les implications économiques et sociales du changement climatique et de la variabilité du climat, pour quelques îles sélectionnées du Pacifique, la Banque mondiale (2000) a mis en évidence que, en l'absence d'adaptation, une île haute telle que Viti Levu (Fidji) pourrait subir des dommages de 23 à 52 millions de dollars des États-Unis par an d'ici 2050 (l'équivalent de 2 à 3 % du PIB de l'archipel en 2002), tandis qu'un groupe d'îles basses telles que Tarawa (Kiribati) pourrait subir des dommages de plus de 8 à 16 millions de dollars des États-Unis par an (l'équivalent de 17 à 18 % du PIB de l'archipel en 2002) selon les scénarios A2 et B2 du SRES. Dans un grand nombre d'îles des Caraïbes, la dépendance vis-à-vis des importations agricoles, qui incluent elles-mêmes l'eau qui sert à la production dans les pays d'origine, constitue jusqu'à 50 % des approvisionnements alimentaires. [GT II 16.4.3]

5.8.2.5 Biodiversité

Burke *et al.* (2002) et Burke et Maidens (2004) indiquent que près de 50 % des récifs du sud-est de l'Asie et 45 % dans les Caraïbes se trouvent dans la catégorie de risque élevé, voire de risque très élevé (voir également Graham *et al.*, 2006). Il existe cependant des différences locales et régionales importantes du point de vue de l'échelle et du type de menace pesant sur les récifs de corail dans des situations tant continentales que de petites îles. [GT II 16.4.4]

Les écosystèmes terrestres des îles plus grandes et les écosystèmes côtiers de la plupart des îles ont subi une dégradation et une destruction accrues au cours des dernières décennies. Par exemple, l'analyse des études sur le récif de corail sur trois décennies a révélé que la couverture du corail dans les récifs des Caraïbes a diminué de 80 % en 30 ans seulement, principalement du fait de la pollution, de la sédimentation, des maladies marines et de la surexploitation de la pêche (Gardner *et al.*, 2003). Le ruissellement des régions terrestres, avec l'apport direct d'eau douce via des épisodes de chutes de pluie intenses, peut avoir des incidences importantes sur la qualité du récif et sa vulnérabilité aux maladies. [GT II 16.4.4]

5.8.3 Adaptation, vulnérabilité et viabilité

Le développement durable est souvent cité comme un objectif des stratégies de gestion pour les petites îles. Relativement peu d'études ont explicitement tenu compte de ce que signifie le développement durable pour les îles dans le contexte du changement climatique (Kerr, 2005). On sait depuis longtemps que les problèmes liés aux petites échelles et à l'isolement, aux économies spécialisées et aux forces opposées que sont la mondialisation et la localisation, peuvent signifier que le développement actuel des petites îles n'est pas durable sur le long terme. [GT II 16.6]

Le danger vient de la limitation des solutions d'adaptation aux incidences prévues du changement climatique, avec l'incertitude des incidences physiques potentielles liées au climat. Le tableau 5.9 résume les résultats de plusieurs études d'impact fondées sur des scénarios pour les environnements insulaires, depuis la période actuelle jusqu'en 2100 (car certaines incidences se produisent déjà). Il fournit le contexte pour d'autres incidences climatiques potentielles qui pourraient aggraver les stress hydriques. Des seuils peuvent être déterminés par des processus sociaux et environnementaux. De plus, le défi consiste à comprendre les stratégies d'adaptation qui ont été adoptées dans le passé, ainsi que leurs avantages et leurs limites pour une planification et une mise en œuvre futures. [GT II 16.5]

Alors que des progrès considérables ont été réalisés dans les projections régionales du niveau de la mer depuis le troisième Rapport d'évaluation, ces projections n'ont pas été pleinement utilisées dans les petites îles, du fait de la grande incertitude liée à leurs manifestations locales, à l'inverse des projections mondiales. Des projections fiables et crédibles fondées sur des résultats dont la résolution est plus fine, ainsi que des données locales sont nécessaires pour le développement de scénarios fiables du changement climatique pour les petites îles. Ces approches pourraient mener à de meilleures évaluations de la vulnérabilité et à l'identification de solutions d'adaptation plus appropriées à l'échelle des îles et aux échelles de temps des incidences climatiques. [GT II 16.7.1]

Des études de vulnérabilité menées sur de petites îles sélectionnées (Nurse *et al.*, 2001) montrent que les coûts des infrastructures et de la protection des établissements humains représentent une partie significative du PIB, souvent supérieure aux moyens financiers de la plupart des petits États insulaires, problème qui n'est pas toujours partagé par les îles des pays continentaux. Des études plus récentes ont identifié les principaux domaines d'adaptation, y compris les ressources en eau et la gestion des bassins versants, la conservation des récifs, la gestion agricole et forestière, la conservation de la biodiversité, la sécurité énergétique, le développement accru de l'énergie renouvelable et la consommation d'énergie optimisée. Un cadre tenant compte de la vulnérabilité présente et à venir de la communauté et qui implique des méthodologies qui intègrent la climatologie, les sciences sociales et la communication, pourrait être une base sur laquelle asseoir les capacités d'adaptation. [GT II encadré 16.7] Cette approche nécessite que les membres des communautés identifient les conditions climatiques qui leur correspondent et qu'ils évaluent les stratégies adaptatives présentes et potentielles. Une telle méthodologie a été testée au Samoa et les résultats concernent un village (Saoluafata: voir Sutherland *et al.*, 2005). Dans ce cas, les habitants ont identifié plusieurs mesures adaptatives, notamment la construction d'un ouvrage longitudinal, d'un système d'écoulement des eaux et de citernes d'eau, l'interdiction de couper les arbres, des relocalisations et la rénovation des infrastructures existantes. [GT II 16.5]

Le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC a identifié plusieurs zones clés et des lacunes qui sont sous-représentées dans la recherche contemporaine concernant les impacts du changement climatique sur les petites îles, [GT II 16.7] à savoir:

- Le rôle des écosystèmes côtiers tels que les mangroves, les récifs de corail et les plages dans la fourniture de défenses naturelles contre l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes;
- L'établissement de la réponse des écosystèmes terrestres des hauts versants et de l'intérieur des terres aux changements de la température moyenne et des précipitations, ainsi que des extrêmes de température et de précipitations;
- L'évaluation de la manière dont l'agriculture, la sylviculture et les pêcheries commerciales, ainsi que l'agriculture de subsistance, la pêche artisanale et la sécurité alimentaire seront touchées par la combinaison du changement climatique et des forces non associées au climat;
- L'approfondissement des connaissances sur les maladies sensibles au climat dans les petites îles via la

recherche nationale et régionale, non seulement pour les maladies à vecteur mais également pour les maladies cutanées, respiratoires et d'origine hydrique;

- L'identification des systèmes et des secteurs les plus vulnérables, par type d'îles, compte tenu de la diversité des types d'îles et de leurs emplacements.

À la différence des autres régions étudiées dans la présente évaluation, il manque également des scénarios démographiques et socioéconomiques fiables, ainsi que des projections pour les petites îles. Le constat est que des changements futurs dans les conditions socioéconomiques des petites îles n'ont pas été suffisamment présentés dans les évaluations existantes. Par exemple, en l'absence d'adaptation ou d'atténuation, les impacts de l'élévation du niveau de la mer, des tempêtes plus intenses et d'autres changements climatiques [GT II 6.3.2] seront substantiels, ce qui laisse à supposer que certaines îles et régions de faible altitude pourront devenir invivables à l'horizon 2100. [GT II 16.5]

6

Mesures d’atténuation du changement climatique et eau

6.1 Introduction

La relation entre les mesures d'atténuation du changement climatique et l'eau est une relation réciproque. Les mesures d'atténuation peuvent influencer les ressources en eau et leur gestion, et il convient d'en tenir compte lors de la mise en place et de l'évaluation de solutions d'atténuation. Par ailleurs, les politiques et les mesures de gestion de l'eau peuvent influencer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et, par conséquent, les mesures d'atténuation sectorielles correspondantes; intervenir dans le système d'eau peut s'avérer inefficace en termes d'atténuation du changement climatique.

Le sujet de l'atténuation est abordé dans la contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC («Atténuation»), dans lequel sont évoqués les sept secteurs suivants: approvisionnement énergétique, transport et infrastructures de transport, bâtiments résidentiels et commerciaux, industrie, agriculture, sylviculture et gestion des déchets. Étant donné que les problèmes liés à l'eau ne constituaient pas le thème central de ce volume, seules y ont été mentionnées ses relations générales avec l'atténuation du changement climatique, essentiellement du point de vue qualitatif. Cependant, d'autres rapports du GIEC (notamment le troisième Rapport d'évaluation) contiennent également des informations sur la question.

Les mesures d'atténuation propres à un secteur peuvent avoir différentes répercussions sur l'eau. Ces répercussions sont indiquées dans les paragraphes ci-dessous (voir aussi le tableau 6.1). Les nombres entre parenthèses dans les titres des sous-sections correspondent aux pratiques ou aux solutions d'atténuation propres à un secteur décrites dans le tableau 6.1.

6.2 Atténuation par secteur

6.2.1 Piégeage et stockage du dioxyde de carbone (CCS) (voir [1], tableau 6.1)

Le piégeage et le stockage du dioxyde de carbone (CO_2) sont des procédés qui consistent à extraire le CO_2 provenant de sources industrielles et en rapport avec l'énergie, à le transporter vers un lieu de stockage et à l'isoler de l'atmosphère pendant une longue période. Le CO_2 introduit dans l'espace interstitiel et les fractures d'une formation perméable peut déplacer le fluide *in situ;* il peut également se dissoudre dans le fluide, se mélanger à lui ou réagir avec les particules minérales, voire intervenir dans une combinaison de ces processus. Au fur et à mesure que le CO_2 traverse la formation, il se dissout en partie dans l'eau qu'elle contient. Lorsqu'il est dissout, il est transporté dans les eaux souterraines régionales. La fuite de CO_2 des puits d'injection, des puits abandonnés, à travers les failles et les couches encaissantes non efficaces, pourrait détériorer la qualité des eaux souterraines, et la libération de CO_2 dans l'atmosphère pourrait également entraîner des problèmes de santé et de sécurité au niveau local. [CCS RID, 5.RE]

Il est important de noter que, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas d'indications suffisantes sur l'utilité, les conséquences, prévisibles ou non, de ce concept de piégeage du carbone. Pour éviter ou atténuer les incidences, il conviendrait de choisir soigneusement un site, d'assurer un suivi réglementaire efficace, d'élaborer un programme de surveillance adéquat et de mettre en œuvre des procédés de correction pour interrompre ou contrôler les émissions de CO_2. [CCS 5.RE, 5.2]

6.2.2 Cultures bioénergétiques [2]

La bioénergie contribue aux effets bénéfiques de l'atténuation en modifiant l'utilisation de combustibles fossiles. [LULUCF 4.5.1] Cependant, la production de carburant à grande échelle pose divers problèmes, concernant en particulier les besoins en engrais et pesticides, le cycle des éléments nutritifs, le bilan énergétique, les incidences sur la biodiversité, l'hydrologie et l'érosion, les conflits avec la production d'aliments et les subventions financières indispensables. [LULUCF 4.5.1] La production d'énergie et les potentiels d'atténuation des GES des cultures énergétiques spécifiques dépendent de la disponibilité de terres, mais doivent également répondre aux demandes de nourriture, à la volonté de protection de la nature, de gestion durable des terres et des réserves en eau, et à d'autres critères de durabilité. Plusieurs études ont abouti à des chiffres différents en ce qui concerne la contribution potentielle de la biomasse aux approvisionnements mondiaux en énergie dans l'avenir, la fourchette allant de moins de 10O EJ/an à plus de 400 EJ/an en 2050 (Hoogwijk, 2004; Hoogwijk *et al.*, 2005; Sims *et al.*, 2006). Smeets *et al.* (2007) indiquent que le potentiel technique ultime des cultures énergétiques sur les terres agricoles actuelles, compte tenu des progrès technologiques prévus dans les domaines de l'agriculture et de l'élevage, pourrait permettre d'atteindre plus de 800 EJ/an sans nuire à l'approvisionnement alimentaire mondial. Ces différences entre les études peuvent être en grande partie attribuées à l'incertitude quant à la disponibilité des terres, aux rendements énergétiques des cultures et aux hypothèses sur l'évolution de l'efficacité agricole. Les études qui ont prévu le potentiel le plus élevé se sont fondées sur une utilisation non seulement des terres dégradées ou excédentaires, mais également des terres actuellement cultivées pour la production d'aliments, y compris les pâturages (hypothèse partagée par Smeets *et al.*, 2007). [GT III 8.4.4.2]

Les pratiques agricoles favorisant l'atténuation des GES pourraient, dans certains cas, augmenter la consommation d'eau et ainsi réduire l'écoulement fluvial ou les réserves d'eaux souterraines (Unkovich, 2003; Dias de Oliveira

Tableau 6.1: *Influence (ou conséquences) des solutions d'atténuation par secteur sur la qualité, la quantité et le niveau des eaux. Les effets positifs sur l'eau sont indiqués par [+], les effets négatifs par [-] et les effets incertains par [?]. Les chiffres en exposant font référence aux notes qui figurent sous le tableau, ainsi qu'aux sous-sections correspondantes du paragraphe 6.2.*

Aspect de l'eau	Énergie	Bâtiments	Industrie	Agriculture	Forêts	Déchets
Qualité						
Chimique/ biologiques	CCS[1] [?] Biocarburants[2] [+/-] Énergie géothermique[5] [-] Pétrole non conventionnel[13] [-]		CCS[1] [?] Traitement des eaux usées[12] [-] Électricité issue de la biomasse[3] [-/?]	Changement d'affectation et gestion des terres [7] [+/-] Gestion des terres cultivées (eau)[8] [+/-]	Boisement (puits)[10] [+]	Gestion des déchets solides; Traitement des eaux usées[12] [+/-]
Température	Électricité issue de la biomasse[3] [+]			Gestion des terres cultivées (réduction du labour)[9] [+/-]		
Quantité						
Disponibilité/ demande	Énergie hydraulique[4] Pétrole non conventionnel[13] [-] Énergie géothermique[5] [-]	Utilisation de l'énergie dans les bâtiments[6] [+/-]		Changement d'affectation et gestion des terres [7] [+/-] Gestion des terres cultivées (eau)[8] [-]	Boisement[10] [+/-] Déboisement évité/réduit[11] [+]	Traitement des eaux usées[12] [+/-]
Traitement des eaux usées	Biocarburants[2] [+/-] Énergie hydraulique[4] [+/-]			Gestion des terres cultivées (réduction du labour)[9] [+]		
Niveau des eaux						
Eaux de surface	Énergie hydraulique[4] [+/-]			Changement d'affectation et gestion des terres[7] [+/-]		
Eaux souterraines	Énergie géothermique[5] [-]			Changement d'affectation et gestion des terres[7] [+/-]	Boisement[10] [-]	

Notes:
1) Le piégeage et le stockage (CCS) souterrain du carbone représentent des risques potentiels pour la qualité des eaux souterraines; le stockage en eaux profondes dans la mer (à une profondeur supérieure à 3 000 m et sous une couche de sédiments de plusieurs centaines de mètres) semble être la solution la plus sûre.
2) L'extension des cultures et des forêts bioénergétiques peut avoir des incidences négatives telles une augmentation de la demande en eau, la contamination des eaux souterraines et l'encouragement au changement d'affectation des terres, qui sont susceptibles d'avoir des effets indirects sur les ressources en eau, ou des incidences positives via une réduction du lessivage des éléments nutritifs, de l'érosion des sols, du ruissellement et de l'envasement en aval.
3) Électricité issue de la biomasse: en général, une augmentation de la quantité d'énergie renouvelable (par rapport aux centrales à combustibles fossiles) signifie une réduction du déversement d'eau de refroidissement vers les eaux de surface.
4) Les incidences (positives ou négatives) sur l'environnement et les avantages multiples de l'énergie hydroélectrique doivent être pris en considération dans tout projet de développement donné.
5) L'utilisation de l'énergie géothermique peut entraîner une pollution, une subsidence, et dans certains cas, une consommation des ressources en eau disponibles.
6) La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment peut être réduite via diverses approches et mesures, avec des incidences positives ou négatives.
7) Les changements d'affectation et la gestion des terres peuvent influencer la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines (notamment par l'augmentation ou la diminution du lessivage d'éléments nutritifs et de pesticides) et le cycle hydrologique (local) (par exemple, par une consommation d'eau accrue).
8) Les pratiques agricoles pour l'atténuation peuvent avoir des effets positifs et négatifs sur la conservation et la qualité de l'eau.
9) Une réduction du labour permet d'améliorer le rendement hydraulique.
10) Le boisement améliore généralement la qualité des eaux souterraines et réduit l'érosion des sols. Il influence tant le bassin hydrographique que les cycles hydrologiques régionaux (hydrogramme régulier avec une réduction du ruissellement et des inondations). Il permet généralement d'améliorer la protection des bassins versants, mais au détriment du rendement des eaux de surface et de la recharge de l'aquifère, ce qui peut être problématique dans les régions semi-arides et arides.
11) L'arrêt ou le ralentissement du déboisement et de la dégradation des forêts permettent de conserver les ressources en eau et de prévenir les crues, de réduire le ruissellement, de contrôler l'érosion et de diminuer l'envasement des rivières.
12) Les diverses technologies de gestion des déchets et de contrôle et de traitement des eaux usées peuvent permettre de réduire les émissions de GES et avoir des effets positifs sur l'environnement, mais elles peuvent entraîner une pollution aquatique si les installations ne sont pas correctement conçues ou gérées.
13) Au fur et à mesure de la raréfaction des réserves de pétrole conventionnel et de l'augmentation du coût d'extraction, les carburants liquides non conventionnels deviendront plus attractifs économiquement, mais les coûts pour l'environnement seront supérieurs (demande en eau et coûts d'assainissement élevés).

et al., 2005). Par exemple, les cultures à haut rendement, à feuillage persistant et à racines profondes consomment davantage d'eau que le couvert terrestre qu'elles viennent remplacer (Berndes et Börjesson, 2002; Jackson *et al.*, 2005). Certaines pratiques peuvent influencer la qualité de l'eau via un lessivage des pesticides et des éléments nutritifs (Machado et Silva, 2001; Freibauer *et al.*, 2004). [GT III 8.8]

Les pratiques agricoles d'atténuation qui détournent des produits pour d'autres utilisations (par exemple, les cultures bioénergétiques) peuvent par ailleurs favoriser la conversion de forêts en terres cultivées. À l'inverse, l'augmentation de la productivité des terres cultivées existantes peut permettre d'épargner quelques forêts ou pâturages (West et Marland, 2003; Balmford *et al.*, 2005; Mooney *et al.*, 2005). L'effet net de tels compromis sur la biodiversité et d'autres écoservices n'a pas encore été pleinement quantifié (Huston et Marland, 2003; Green *et al.*, 2005). [GT III 8.8]

Si les plantations bioénergétiques sont judicieusement placées, conçues et gérées, elles sont susceptibles de réduire le lessivage des éléments nutritifs et l'érosion des sols, et de générer des services environnementaux supplémentaires, tels que l'accumulation de carbone dans le sol, l'augmentation de la fertilité du sol et l'élimination du cadmium et d'autres métaux lourds du sol ou des déchets. Elles peuvent également favoriser la recirculation des éléments nutritifs et le traitement des eaux usées et des boues riches en éléments nutritifs, et fournir des habitats pour accroître la biodiversité dans le paysage agricole (Berndes et Börjesson, 2002; Berndes et *al.,* 2004; Börjesson et Berndes, 2006). [GT III 8.8] Dans le cas de plantations de forêts destinées aux biocarburants, il est possible d'éviter les incidences négatives sur l'environnement grâce à une bonne conception du projet. Les avantages environnementaux sont notamment la réduction de la dégradation des sols, du ruissellement de l'eau et de l'envasement en aval et le piégeage du ruissellement agricole polluant. [LULUCF fiche d'information 4.21]

6.2.3 Électricité issue de la biomasse[3)]

Les technologies d'approvisionnement en énergie renouvelable non hydroélectrique, en particulier l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie issue de la biomasse, contribuent actuellement peu au réchauffement mondial et à la fourniture d'électricité, mais elles progressent très rapidement. L'augmentation de l'électricité issue de la biomasse est limitée en raison de son coût et des barrières sociales et environnementales. [GT III 4.RE] Dans ce cas particulier de production d'électricité, toute biomasse nécessaire en sus des résidus de l'agriculture et des forêts [GT III chapitres 8 et 9] devra être cultivée dans ce but, et pourrait donc être limitée par la disponibilité des terres et de l'eau. L'incertitude est considérable, mais la production devrait être suffisante dans toutes les régions pour satisfaire cette génération de bioénergie supplémentaire de 432 TWh/an à l'horizon 2030, d'après les prévisions de cette analyse. [GT III 4.4.4] En général, la substitution de combustibles fossiles par la biomasse pour la production d'électricité permettra de réduire les déversements d'eau de refroidissement dans les cours d'eau de surface.

6.2.4 Énergie hydraulique[4)]

Les systèmes d'énergie renouvelable, comme l'énergie hydraulique peuvent contribuer à sécuriser l'approvisionnement en énergie et à protéger l'environnement. Cependant, la construction de centrales hydroélectriques peut également avoir une incidence écologique sur les pêcheries et les écosystèmes fluviaux existants, du fait des changements de débit (hydrogramme) et des pertes d'eau par évaporation (dans le cas de centrales sur des barrages). On peut également s'attendre à une perturbation sociale. Enfin, la disponibilité en eau pour le transport fluvial (profondeur d'eau) peut également poser problème. Les effets positifs sont la régulation de l'écoulement, la maîtrise des crues, ainsi que la disponibilité en eau pour l'irrigation pendant les saisons sèches. De plus, l'énergie hydraulique ne nécessite pas d'eau pour le refroidissement (à l'inverse des centrales thermiques) ni pour la production, comme dans le cas des biocarburants. Environ 75 % des réservoirs d'eau dans le monde ont été construits à des fins d'irrigation, de maîtrise des crues et d'approvisionnement des villes en eau, et bon nombre d'entre eux pourraient faire l'objet d'une remise à niveau en vue d'une génération d'énergie hydroélectrique, sans aucune augmentation des incidences environnementales. [GT III 4.3.3]

Les systèmes hydroélectriques de grande taille (>10 MW) ont généré plus de 2 800 TWh d'énergie de consommation en 2004 et ont fourni 16 % de l'électricité mondiale (90 % d'électricité renouvelable). Les projets hydroélectriques en cours de construction pourraient augmenter la part de l'hydroélectricité d'environ 4,5 % dès leur mise en service et de nouveaux projets pourraient voir le jour pour fournir 6 000 TWh/an supplémentaires ou plus d'électricité à bon marché, principalement dans les pays en développement. La rénovation des centrales existantes avec des turbines plus efficaces et plus puissantes peut être rentable, quelle que soit la taille de la centrale. [GT III 4.3.3.1]

Les systèmes hydroélectriques de petite (<10 MW) ou très petite (<1 MW) taille, généralement situés au fil de l'eau, fournissent de l'électricité à un grand nombre de communautés rurales dans les pays en développement tels que le Népal. Leur production actuelle est méconnue, mais les prévisions la situent approximativement de 4 à 250 TWh/an (soit 9 % de la génération totale d'énergie hydraulique). Le potentiel technique mondial des centrales de petite et de très petite taille se situe aux alentours de 150 à 200 GW, les ressources étant inexploitées dans une grande quantité de sites disponibles. [GT III 4.3.3.1]

Dans le cas d'un projet de développement donné, il est indispensable d'évaluer les principaux avantages de l'hydroélectricité, notamment l'irrigation et la création de ressources d'approvisionnement en eau, la réponse rapide aux fluctuations de demande dues à des pics ou à l'intermittence des sources d'énergie renouvelable, les plans d'eau de loisirs et la maîtrise des crues, ainsi que les inconvénients. [GT III 4.3.3.1]

6.2.5 Énergie géothermique[5)]

Les ressources géothermiques sont utilisées depuis longtemps pour l'extraction directe de chaleur à des fins de chauffage urbain, de traitement industriel, de chauffage de l'eau et des espaces domestiques, de loisirs et de balnéothérapie. [GT III 4.3.3.4]

Les champs géothermiques de vapeur naturelle sont rares et la plupart d'entre eux comportent un mélange de vapeur et d'eau chaude nécessitant des systèmes de vaporisation simples ou doubles pour isoler l'eau chaude, qui peut être alors utilisée dans des centrales binaires ou pour le chauffage direct. La réinjection des fluides maintient une pression constante dans le réservoir, et permet donc d'augmenter la durée de vie du champ et de réduire les incidences environnementales. [GT III 4.3.3.4]

Les problèmes de durabilité liés à l'affaissement des sols, aux taux d'extraction thermique supérieurs au réapprovisionnement naturel (Bromley et Currie, 2003), à la pollution chimique des cours d'eau (notamment par l'arsenic) et aux émissions de CO_2 associées ont entraîné le refus d'octroi d'une licence d'exploitation à plusieurs centrales géothermiques. Les techniques de réinjection permettraient de faire face à ces problèmes, du moins en partie. Une technologie de forage plus profond pourrait également permettre d'exploiter des roches chaudes et sèches très abondantes là où l'eau est injectée dans des roches artificiellement fracturées et où la chaleur est extraite sous forme de vapeur. Cependant, cela signifie aussi une consommation des ressources en eau disponibles. [GT III 4.3.3.4]

6.2.6 Consommation d'énergie dans les bâtiments[6)]

En tant que mesure d'atténuation, le refroidissement par évaporation permet de faire chaque année de grandes économies d'énergie pour la climatisation des résidences. Cependant, ce type de refroidissement exerce des contraintes supplémentaires sur les ressources en eau disponibles. Pour la climatisation des bâtiments, la consommation d'énergie peut être réduite de différentes manières, notamment par une conception et une orientation du bâtiment permettant de réduire sa charge calorifique. Lorsque le refroidissement implique l'utilisation d'eau, cette réduction de consommation d'énergie entraîne une diminution de la demande en eau. [GT III 6.4.4]

6.2.7 Changement d'affectation et gestion des terres[7)]

Selon les recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques pour le rapport spécial sur l'utilisation des terres, les changements d'affectation et la foresterie, il existe six grandes catégories d'affectation des terres possibles: forêts, cultures, pâturages, zones humides, établissements humains et autres. Les changements d'affectation des terres (notamment la conversion de cultures en pâturages) peuvent entraîner des changements nets dans les stocks de carbone et différentes incidences sur les ressources en eau. En ce qui concerne les changements de l'affectation des terres autres que la conversion de terres en forêts (sujet abordé au paragraphe 6.2.10), les documents antérieurs du GIEC contiennent très peu de références à leurs incidences sur les ressources en eau. Le rétablissement des zones humides, l'une des principales pratiques d'atténuation en agriculture [GT III 8.4.1.3], permet d'améliorer la qualité de l'eau et de diminuer les inondations. [LULUCF tableau 4.10] La mise en jachère, une autre pratique d'atténuation identifiée par le Groupe de travail III, peut avoir des incidences positives sur la conservation et la qualité des eaux. [GT III tableau 8.12]

Les pratiques de gestion des terres mises en œuvre pour l'atténuation du changement climatique peuvent également avoir diverses incidences sur les ressources en eau. Un grand nombre de pratiques préconisées pour la conservation du carbone du sol (réduction du labour, augmentation de la couverture végétale, plus grande utilisation de cultures vivaces) permettent également de prévenir l'érosion et d'améliorer la qualité de l'eau et de l'air (Cole *et al.*, 1993). Ces pratiques peuvent aussi avoir des effets indésirables, du moins dans certaines régions et dans certaines conditions. On peut trouver parmi ces effets possibles une augmentation de la pollution des eaux souterraines par des éléments nutritifs et des pesticides via le lessivage dans des conditions de réduction du labour (Cole *et al.*, 1993; Isensee et Sadeghi, 1996). Cependant, ces éventuels effets négatifs n'ont pas été largement confirmés ni quantifiés, et la mesure dans laquelle ils sont susceptibles de compenser les avantages environnementaux du piégeage du carbone est incertaine. [GT III TRE 4.4.2]

Le groupe de pratiques connu sous le nom d'intensification de l'agriculture (Lal *et al.*, 1999; Bationo *et al.*, 2000; Resck *et al.*, 2000; Swarup *et al.*, 2000), notamment les pratiques qui augmentent la production et l'apport de résidus d'origine végétale dans le sol (rotations des cultures, diminution des jachères nues, cultures de protection, variétés à haut rendement, gestion intégrée des parasites, fertilisation adéquate, engrais organiques, irrigation, gestion de la nappe phréatique, gestion adaptée aux sites et autres), présentent

de nombreux avantages accessoires, dont le plus important est l'augmentation et le maintien de la production d'aliments. Les avantages environnementaux peuvent être le contrôle de l'érosion, la conservation de l'eau, l'amélioration de la qualité des eaux et la réduction de l'envasement des réservoirs et des cours d'eau. La qualité des sols et de l'eau est diminuée du fait de l'utilisation indiscriminée d'apports agricoles et de l'eau d'irrigation. [LULUCF fiche d'information 4.1]

La gestion des éléments nutritifs pour l'utilisation efficace des fertilisants a des incidences positives sur la qualité des eaux. [GT III Tableau 8.12] De surcroît, les pratiques qui réduisent l'émission de N_2O améliorent souvent l'efficacité de l'utilisation de l'azote à partir de ces sources et d'autres (notamment le fumier), et permettent donc de réduire les émissions de GES provenant de la fabrication des fertilisants et d'éviter l'effet délétère des polluants azotés sur la qualité des eaux et de l'air (Dalal *et al.*, 2003; Paustian *et al.*, 2004; Oenema *et al.*, 2005; Olesen *et al.*, 2006). [GT III 8.8]

Les systèmes agroforestiers (plantation d'arbres dans les terres cultivées) peuvent présenter des avantages multiples, notamment la fourniture d'énergie aux communautés rurales, avec des synergies entre le développement durable et l'atténuation des GES. [LULUCF 4.5.1] Cependant, ces systèmes peuvent avoir des incidences négatives sur la conservation de l'eau. [GT III tableau 8.12]

6.2.8 Gestion des terres cultivées (eau)[8)]

Les pratiques agricoles qui préconisent l'atténuation des gaz à effet de serre sont susceptibles d'avoir des incidences positives et négatives sur la conservation et la qualité de l'eau. Lorsque les mesures mettent l'accent sur le rendement hydraulique (notamment grâce à la réduction du labour), elles sont potentiellement avantageuses. Mais dans certains cas, les pratiques peuvent intensifier la consommation d'eau et de ce fait réduire l'écoulement fluvial et les réserves d'eaux souterraines (Unkovich, 2003; Dias de Oliveira *et al.*, 2005). La gestion du riz a généralement des incidences positives sur la qualité des eaux via la réduction de la quantité de polluants chimiques dans l'eau de drainage. [GT III tableau 8.12]

6.2.9 Gestion des terres cultivées (réduction du labour)[9)]

Le travail de conservation du sol est un terme générique qui inclut une large gamme de pratiques de labour, notamment le travail au chisel, le travail sur billon, le labour en bandes, le paillis et l'absence de labour (CTIC, 1998). L'adoption du travail de conservation du sol présente de nombreux avantages accessoires. Parmi ces avantages, les plus importants sont le contrôle de l'érosion par l'eau et par le vent, la conservation de l'eau, l'augmentation de la capacité de rétention d'eau, la diminution de la compacité, l'augmentation de la résilience du sol aux apports chimiques, l'augmentation de la qualité du sol et de l'air, l'augmentation de la biodiversité du sol, la réduction de la consommation d'énergie, l'amélioration de la qualité de l'eau, la diminution de l'envasement des réservoirs et des cours d'eau et la possibilité de doubles cultures. Dans certaines régions (notamment en Australie), une augmentation du lessivage résultant d'une augmentation de la rétention d'eau due à un travail de conservation du sol peut faire diminuer la salinisation. [LULUCF fiche d'information 4.3] Certains des avantages secondaires importants de l'adoption de ces mesures sont la diminution de l'érosion des sols, l'amélioration de la qualité de l'eau et l'augmentation du rendement des carburants et de la production des récoltes. [LULUCF 4.4.2.4] La gestion de labour et des résidus ont des incidences positives sur la conservation de l'eau. [GT III tableau 8.12]

6.2.10 Boisement ou reboisement[10)]

Il est prévu que les forêts consomment généralement un volume d'eau plus important (somme de la transpiration et de l'évaporation de l'eau interceptée par le couvert d'arbres) que les cultures, les pâturages ou la végétation basse naturelle. Cet effet, qui se produit dans des terres sujettes au boisement ou au reboisement, peut être lié à une augmentation des pertes par interception, en particulier là où le couvert d'arbres est humide pendant une grande partie de l'année (Calder, 1990), ou, dans les régions plus sèches, au développement de systèmes radiculaires plus importants qui permettent l'extraction et l'utilisation de l'eau pendant les saisons sèches prolongées. [LULUCF 2.5.1.1.4]

Les pertes par interception sont plus élevées dans les forêts qui ont de grandes surfaces foliaires tout au long de l'année. Ainsi, de telles pertes ont tendance à être plus élevées dans les forêts sempervirentes que dans les forêts de feuillus (Hibbert, 1967; Schulze, 1982) et risquent d'être encore plus élevées dans les forêts à croissance rapide avec stockage de carbone élevé que dans les forêts à croissance lente. En conséquence, le boisement de terres non forestières avec des conifères à croissance rapide diminue généralement l'écoulement de l'eau des bassins hydrographiques et peut entraîner une pénurie d'eau pendant les périodes de sécheresse (Hibbert, 1967; Swank et Douglass, 1974). Par exemple, Vincent (1995) a démontré que la mise en place d'espèces de pins grands consommateurs d'eau pour rétablir les bassins versants thaïlandais dégradés a nettement réduit l'écoulement fluvial pendant la saison sèche, par rapport aux forêts de feuillus initiales. Bien que les forêts diminuent les débits moyens, elles sont susceptibles de réduire les débits de pointe et d'augmenter les débits des saisons sèches, car les terres forestières ont généralement une meilleure capacité d'infiltration et une grande capacité de rétention

d'eau (Jones et Grant, 1996). Les forêts jouent également un rôle important dans l'amélioration de la qualité des eaux. [LULUCF 2.5.1.1.4]

Dans un grand nombre de régions du monde où les forêts poussent au-dessus de nappes phréatiques salines de faible profondeur, la diminution de l'utilisation de l'eau suite à un déboisement peut entraîner une montée de la nappe phréatique et faire remonter le sel en surface (Morris et Thomson, 1983). Dans de tels cas, une grande consommation d'eau par les arbres (c'est-à-dire via le boisement ou le reboisement) peut s'avérer utile (Schoield, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.4]

Dans les régions tropicales sèches, les plantations de forêts consomment souvent plus d'eau que la végétation basse, car les arbres ont accès à de l'eau plus profonde et évaporent ainsi davantage d'eau interceptée. Des forêts nouvellement plantées peuvent consommer un volume d'eau (par transpiration et par interception) supérieur à celui des précipitations annuelles en pompant l'eau stockée (Greenwood *et al.*, 1985). Un boisement ou reboisement extensif dans les régions tropicales sèches peut alors avoir une incidence grave sur les réserves d'eaux souterraines et les débits des rivières. Toutefois, l'effet du remplacement des forêts naturelles par des plantations, même par des essences exotiques, sur l'augmentation de l'utilisation d'eau dans les régions tropicales, en l'absence d'une différence de la profondeur de l'enracinement ou du comportement stomatique des espèces d'arbres n'est pas aussi clair. Dans la région sèche de l'Inde, la consommation d'eau par les plantations d'eucalyptus est comparable à celle de la forêt sèche caduque indigène: les deux types de forêt consomment pratiquement la totalité du volume des précipitations annuelles (Calder, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.4]

Le boisement et le reboisement, tout comme la protection des forêts, peuvent présenter des avantages hydrologiques. Dans les régions humides, après le boisement, le ruissellement direct diminue rapidement, puis se stabilise progressivement et le débit de base augmente lentement avec l'âge du peuplement, jusqu'à maturité (Fukushima, 1987; Kobayashi, 1987), ce qui suggère que le reboisement et le boisement permettent de réduire les inondations et d'améliorer la conservation de l'eau. Dans les régions dont la quantité d'eau est limitée, le boisement, et en particulier la plantation d'espèces à forte demande en eau, peut entraîner une réduction significative de l'écoulement fluvial et influencer la population du bassin (Le Maitre et Versfeld, 1997), réduire l'écoulement de l'eau vers d'autres écosystèmes et rivières, et donc influencer les aquifères et leur alimentation (Jackson *et al.*, 2005). En outre, les propriétés du sol peuvent connaître certains changements causés pour l'essentiel par les changements hydrologiques. Il pourrait être utile d'évaluer individuellement les avantages hydrologiques du déboisement pour chaque site concerné. [GT III TRE 4.4.1]

Les avantages socioéconomiques tels que la création de richesses ou d'emplois doivent être compensés par la perte de bien-être résultant de la réduction de la disponibilité en eau, des pâturages, des ressources naturelles et de terres cultivées. Le boisement de terres auparavant érodées ou autrement dégradées peut avoir une incidence environnementale positive; dans les bassins hydrographiques où l'apport d'eau est important ou qui ne sont pas fortement exploités, la réduction de l'écoulement fluvial peut ne pas être critique. [LULUCF 4.7.2.4]

6.2.11 Déboisement évité ou réduit[11)]

L'arrêt ou le ralentissement du déboisement et de la dégradation des forêts (perte de densité de carbone) et la gestion durable des forêts peuvent contribuer significativement à éviter les émissions, à conserver les ressources en eau, à empêcher les inondations, à réduire le ruissellement, à contrôler l'érosion, à diminuer l'envasement des rivières, ainsi qu'à protéger les pêcheries et les investissements dans des centrales hydroélectriques, tout en préservant la biodiversité (Parrotta, 2002). [GT III 9.7.2]

La conservation des forêts permet de conserver les ressources en eau et d'empêcher les inondations. Par exemple, les dommages occasionnés par les crues en Amérique centrale suite au passage de l'ouragan *Mitch* ont apparemment été aggravés du fait de la perte de forêts. En réduisant le ruissellement, les forêts permettent de contrôler l'érosion et la salinité. Par conséquent, leur maintien permet de réduire l'envasement des rivières, de protéger les pêcheries et l'investissement dans des centrales hydroélectriques (Chomitz et Kumari, 1996). [GT III TRE 4.4.1]

Le déboisement et la dégradation des bassins hydrographiques des hauts versants peuvent perturber les systèmes hydrologiques, en remplaçant les débits d'eau annuels réguliers dans les régions en aval par des régimes de crues et de sécheresses (Myers, 1997). Bien qu'il existe souvent des synergies entre l'augmentation du stockage de carbone via les activités de boisement, reboisement et déboisement (BRD) et d'autres incidences associées souhaitables, aucune règle générale ne peut être appliquée; les incidences doivent être évaluées au cas par cas, pour chaque site. Les incidences associées peuvent souvent être significatives et influer sur le bien-fondé global d'activités de BRD spécifiques. [LULUCF 3.6.2]

6.2.12 Gestion des déchets solides et traitement des eaux usées[12)]

Les décharges contrôlées (avec ou sans récupération et utilisation du gaz) permettent de maîtriser et de réduire les émissions de GES, mais elles peuvent avoir des incidences négatives sur la qualité des eaux, lorsque les sites ne sont pas correctement gérés. Ceci est également vrai pour le traitement biologique aérobie (compostage) et anaérobie

(digestion anaérobie). Le recyclage, la réutilisation et la réduction au minimum des déchets peuvent nuire à leur enlèvement dans des décharges ouvertes, dont la pollution des eaux est une éventuelle conséquence. [GT III tableau 10.7]

Lorsqu'elles sont appliquées avec efficacité, les technologies de transport et de traitement des eaux usées permettent de réduire ou d'éliminer la génération et les émissions de GES. De plus, la gestion des eaux usées favorise la conservation de l'eau en évitant la pollution des décharges non traitées vers les eaux de surface, les eaux souterraines, les sols et les zones côtières, réduisant ainsi le volume de polluants et diminuant le volume de l'eau à traiter. [GT III 10.4.6]

Les eaux usées traitées peuvent être réutilisées ou évacuées, mais la réutilisation est la meilleure solution pour l'irrigation agricole et horticole, la pisciculture, la reconstitution artificielle d'aquifères ou les applications industrielles. [GT III 10.4.6]

6.2.13 Pétrole non conventionnel[13)]

Au fur et à mesure de la raréfaction des réserves de pétrole conventionnel et de l'augmentation du coût d'extraction, les combustibles liquides non conventionnels deviennent plus attractifs économiquement, mais les coûts pour l'environnement sont supérieurs (Williams *et al.*, 2006). L'extraction et la valorisation des sables et des schistes bitumineux nécessitent de grands volumes d'eau. Les technologies de récupération des sables bitumineux incluent l'exploitation ouverte en surface, où les gisements sont peu profonds, ou l'injection de vapeur dans des puits *in situ* pour réduire la viscosité du pétrole avant son extraction. Le processus d'extraction nécessite environ quatre litres d'eau pour produire un litre de pétrole, mais le produit extrait est raffinable. Le processus *in situ* nécessite environ deux litres d'eau pour un litre de pétrole, mais le produit très lourd obtenu doit être nettoyé et dilué en raffinerie (généralement avec du naphta) ou transporté vers une unité de valorisation pour donner du brut synthétique avec un rendement énergétique d'environ 75 % (ONE, 2006). Le rendement énergétique de la valorisation des sables bitumineux est d'environ 75 %. L'extraction de sables bitumineux laisse derrière elle des grandes quantités de polluants et de vastes superficies de terres perturbées. [GT III 4.3.1.4]

6.3 Effets des politiques et des mesures de gestion de l'eau sur les émissions et l'atténuation des GES

Comme indiqué précédemment, les pratiques d'atténuation du changement climatique dans divers secteurs peuvent avoir une incidence sur les ressources en eau. Inversement, les politiques et les mesures de gestion de l'eau peuvent avoir une influence sur les émissions de GES associées aux différents secteurs, et donc sur les mesures d'atténuation correspondantes (tableau 6.2).

6.3.1 Barrages hydroélectriques[1)]

Environ 75 % des réservoirs d'eau dans le monde sont construits à des fins d'irrigation, de maîtrise des crues et d'approvisionnement en eau des villes. Les émissions de gaz à efet de serre varient en fonction de l'emplacement du réservoir, de la densité de puissance (capacité énergétique par surface inondée), du débit et du type de centrale (barrage ou au fil de l'eau). L'empreinte des gaz à effet de serre des réservoirs hydroélectriques a été récemment remise en question. Certains réservoirs absorbent le dioxyde de carbone à leur surface, mais la plupart émettent de faibles quantités de GES, étant donné que l'eau transporte le carbone dans le cycle naturel du carbone. De fortes émissions de méthane ont été enregistrées dans certains réservoirs tropicaux peu profonds de type plateau, où le cycle naturel du carbone est le plus productif, tandis que les émissions des réservoirs profonds sont moins élevées. Le méthane émanant des zones humides et des terres inondables naturelles peut être éliminé si celles-ci sont inondées pour former un nouveau réservoir, étant donné que le méthane est oxydé au fur et à mesure qu'il remonte la colonne d'eau. La formation de méthane en eau douce implique la présence de composés carbonés (acides phénolique et humique) qui piègent efficacement le carbone en question. S'agissant des réservoirs tropicaux peu profonds, il est nécessaire d'approfondir les recherches pour définir dans quelle mesure ils peuvent augmenter les émissions de méthane. [GT III 4.3.3.1]

L'émission de gaz à effet de serre par des réservoirs attribuable à la décomposition de la végétation et aux apports de carbone du bassin hydrographique est une incidence récemment identifiée des barrages sur l'écosystème. Ceci remet en cause les connaissances conventionnelles selon lesquelles l'énergie hydraulique n'a que des effets atmosphériques positifs (notamment des réductions des émissions de CO_2 et d'oxyde nitreux), par rapport aux sources de production d'énergie classiques (Commission internationale des grands barrages, 2000).

Les évaluations du cycle de vie des projets hydroélectriques disponibles au moment de l'élaboration du quatrième Rapport d'évaluation ont montré de faibles émissions nettes globales de gaz à effet de serre. Étant donné l'incertitude de mesure des émissions anthropiques croissantes des réservoirs d'eau douce, le Conseil exécutif de la CCNUCC a exclu les grands projets hydroélectriques dotés d'un stockage d'eau conséquent de son Mécanisme pour un développement «propre» (MDP). [GT III 4.3.3.1]

Tableau 6.2: *Influence de la gestion de l'eau sur les émissions de GES par secteur. L'augmentation des émissions de GES est indiquée par [-] (car elle implique une incidence négative) et la réduction des émissions de GES est indiquée par [+]. Les chiffres en exposant font référence aux notes qui figurent sous le tableau ainsi qu'aux sous-sections correspondantes du paragraphe 6.3.*

Secteur	Qualité		Quantité		Niveau de l'eau	
	Chimique/ biologique	Température	Demande moyenne	Humidité du sol	Eaux de surface	Eaux souterraines
Énergie		Énergie géothermique[7] [+]	Barrages hydroélectriques[1] [+/-] Irrigation[2] [-] Énergie géothermique[7]) [+] Dessalement[6] [-]		Barrages hydro-électriques[1] [+/-]	
Agriculture			Barrages hydroélectriques[1] [-]	Irrigation[2] [+/-] Retour des résidus[3] [+]		Drainage des terres cultivées[4] [+/-]
Déchets	Traitement des eaux usées[5] [+/-]					

Notes:
1) L'énergie hydroélectrique ne nécessite pas de combustibles fossiles et est une source importante d'énergie renouvelable. Cependant l'empreinte des gaz à effet de serre des réservoirs hydroélectriques a été remise en question récemment. Le méthane est particulièrement visé.
2) L'application de mesures d'irrigation plus efficaces peut améliorer le stockage de carbone dans les sols via des rendements et un retour des résidus accrus, mais certains de ces avantages peuvent être compromis par les émissions de CO_2 provenant de l'énergie utilisée pour la fourniture de l'eau. L'irrigation peut également entraîner des émissions supplémentaires de CH_4 et de N_2O, dans des cas spécifiques.
3) Le retour de résidus au champ pour améliorer la capacité de rétention de l'eau va permettre de piéger le carbone via une augmentation de la production des cultures et une réduction de la respiration du sol.
4) Le drainage des terres agricoles dans les régions humides peut favoriser la productivité (et donc le carbone dans le sol), voire éventuellement supprimer les émissions de N_2O en améliorant l'aération. Toute perte d'azote par le drainage peut cependant se produire sous forme de N_2O.
5) En fonction de la conception et de la gestion des installations (technologies de traitement des eaux usées et de purification de traitement), des émissions plus ou moins élevées de CH_4 et de N_2O (les principales émissions de GES des eaux usées) peuvent se produire à toutes les étapes, depuis la source jusqu'à l'évacuation; dans la pratique, cependant, la plupart des émissions se produisent en amont du traitement.
6) Le dessalement implique une consommation d'énergie et génère donc des émissions de GES.
7) L'utilisation d'énergie géothermique à des fins de chauffage ne génère pas d'émissions de GES, comme dans le cas des autres procédés de production d'énergie.

6.3.2 Irrigation[2)]

Environ 18 % des terres cultivées dans le monde reçoivent actuellement de l'eau d'irrigation (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005a, b). L'extension de cette superficie (lorsque les réserves en eau le permettent) ou l'utilisation de mesures d'irrigation plus efficaces peut améliorer le stockage de carbone dans les sols, via des rendements et un retour des résidus accrus (Follett, 2001; Lal, 2004). Cependant, certains de ces avantages peuvent être compensés par le dioxyde de carbone issu de l'énergie utilisée pour fournir l'eau (Schlesinger, 1999; Mosier *et al.*, 2005) ou les émissions de N_2O issues de l'augmentation des apports d'humidité et d'engrais azotés (Liebig et *al.*, 2005), bien que ce dernier effet n'ait pas fait l'objet de mesures à grande échelle [GT III 8.4.1.1.d]. L'extension de la superficie de rizières en zones humides peut également augmenter les émissions de méthane par les sols (Yan et *al.*, 2003). [GT III 8.4.1.1.e]

6.3.3 Retour de résidus[3)]

La compétition des mauvaises herbes pour l'eau est une cause importante de mauvaise récolte ou de diminution des rendements des récoltes dans le monde entier. Les progrès réalisés dans les méthodes de contrôle des mauvaises herbes et l'outillage agricole permettent à présent de cultiver un grand nombre d'espèces avec un minimum de labour (réduction du labour), voire sans labour du tout. Ces pratiques, qui maintiennent les résidus de culture à la surface du sol et évitent donc les pertes d'eau par évaporation sont de plus en plus utilisées dans le monde entier (par exemple Cerri et *al.*, 2004). Étant donné que la perturbation des sols a tendance à stimuler les pertes de carbone du sol via une augmentation de la décomposition et de l'érosion (Madari et *al.*, 2005), la réduction ou l'absence de labour entraîne souvent un gain de carbone dans le sol, quoique ce ne soit pas toujours le cas (West et Post, 2002; Alvarez, 2005; Gregorich *et al.*, 2005; Ogle *et al.*, 2005). L'adoption de ces pratiques peut également influencer les émissions de N_2O, mais les effets nets sont irréguliers et mal quantifiés à l'échelle mondiale (Cassman *et al.*, 2003; Smith et Conen, 2004; Helgason *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2005). L'effet de la réduction du labour sur les émissions de N_2O peut dépendre du sol et des conditions climatiques: dans certaines régions la réduction du labour favorise les émissions de N_2O, tandis que dans d'autres elle peut réduire les émissions ou ne pas avoir d'influence mesurable (Marland *et al.*, 2001). De surcroît, les systèmes sans labour peuvent réduire les émissions de dioxyde de carbone liées à la consommation d'énergie (Marland et *al.*, 2003; Koga *et al.*, 2006). Les systèmes qui

retiennent les résidus des cultures ont tendance à augmenter la quantité de carbone dans le sol, car ces résidus sont les précurseurs de la matière organique du sol, principale forme de stockage de carbone dans le sol. Le fait de ne pas brûler les résidus (notamment par la mécanisation de la récolte de la canne à sucre et la suppression de la nécessité de brûlage préalable à la culture; Cerri *et al*., 2004), permet également d'éviter l'émission d'aérosols et de GES générés par le feu, bien que les émissions de dioxyde de carbone provenant des carburants utilisés puissent augmenter. [GT III 8.4.1.1.c]

6.3.4 Drainage des terres cultivées[4)]

Le drainage des terres cultivées dans les régions humides peut favoriser la productivité (et donc le carbone dans le sol), voire éventuellement supprimer les émissions de N_2O en améliorant l'aération (Monteny *et al*., 2006). Toute perte d'azote par le drainage peut cependant se produire sous forme de N_2O (Reay *et al*., 2003). [GT III 8.4.1.1.d]

6.3.5 Traitement des eaux usées[5)]

En ce qui concerne le CH_4 des décharges (plus grande source d'émissions de GES des déchets), les émissions se poursuivent pendant plusieurs décennies après l'évacuation des déchets, et l'estimation des tendances d'émission nécessite donc des modèles qui tiennent compte des tendances temporelles. Le CH_4 est également émis pendant le transport des eaux usées, les processus d'épuration des eaux usées et les fuites de la digestion anaérobie des déchets ou des boues des eaux usées. Les principales sources de N_2O sont les eaux d'égout et le traitement des eaux usées. [GT III 10.3.1]

Les émissions de méthane des eaux usées seules devraient augmenter de presque 50 % entre 1990 et 2020, en particulier dans les pays en développement rapide de l'Asie de l'Est et du Sud. Les estimations des émissions mondiales de N_2O des eaux usées sont incomplètes et fondées uniquement sur le traitement des eaux usées domestiques, mais elles indiquent une augmentation de 25 % entre 1990 et 2020. Il est important de souligner cependant que ces scénarios sont classiques et que les émissions réelles pourraient s'avérer bien inférieures si des mesures supplémentaires étaient mises en place. D'autres réductions des émissions du secteur des déchets dépendront en partie de la disponibilité après 2012 des mécanismes de Kyoto tels que le MDP. [GT III 10.3.1]

Dans les pays en développement, en raison de la croissance démographique rapide et de l'urbanisation sans le développement simultané d'infrastructures pour les eaux usées, les émissions de CH_4 et de N_2O des eaux usées sont généralement supérieures à celles des pays développés. L'examen des émissions de méthane et de N_2O estimées pour 1990 et des tendances prévues pour 2020 à partir des eaux usées et des eaux d'égout confirme cette observation. [GT III 10.3.3]

Bien que les émissions de GES des eaux usées soient aujourd'hui inférieures à celles des déchets, il est reconnu que les estimations actuelles ne quantifient pas une partie importante des émissions, en particulier celle des fosses septiques, des latrines et des rejets non contrôlés dans les pays en développement. Les processus de traitement «naturels» et décentralisés, ainsi que les fosses septiques dans les pays en voie de développement peuvent être responsables de fortes émissions de méthane et de N_2O, en particulier en Chine, en Inde et en Indonésie. Dans les pays en développement, les égouts à ciel ouvert ou les retenues d'eaux usées sans autorisation formelle entraînent bien souvent des rejets non contrôlés dans les rivières et les lacs, et une augmentation rapide des volumes d'eaux usées parallèlement au développement économique. D'un autre côté, des toilettes peu consommatrices d'eau (de 3 à 5 litres) et des méthodes d'assainissement écologique (notamment les toilettes écologiques) où les éléments nutritifs sont recyclés sans danger dans agriculture productive et dans l'environnement sont actuellement utilisées au Mexique, au Zimbabwe, en Chine et en Suède. Elles pourraient également être utilisées dans un grand nombre de pays développés et en développement, en particulier lorsqu'il existe des pénuries d'eau ou des approvisionnements en eau irréguliers, ou lorsqu'il est nécessaire de mettre en place d'autres mesures pour la conservation des ressources en eau. Toutes ces mesures encouragent également l'utilisation de stations de traitement des eaux usées de plus petite taille avec des charges réduites d'éléments nutritifs et des émissions de GES proportionnellement inférieures. [GT III 10.6.2] Somme toute, la quantité des eaux usées recueillies et traitées augmente dans un grand nombre de pays afin de maintenir et d'améliorer la qualité de l'eau potable, et à des fins de santé publique et de protection de l'environnement. En parallèle, les émissions de GES issues des eaux usées vont diminuer en fonction des augmentations futures des volumes de collecte et de traitement des eaux usées. [GT III 10.6.2]

6.3.6 Dessalement[6)]

Dans les régions pauvres en eau, l'approvisionnement en eau peut se faire en partie par le dessalement de l'eau de mer. Un tel procédé nécessite de l'énergie et implique donc des émissions de GES si l'on utilise des combustibles fossiles. [GT II 3.3.2]

6.3.7 Énergie géothermique[7)]

L'utilisation d'énergie géothermique à des fins de chauffage ne génère pas d'émissions de GES, au contraire d'autres procédés de production d'énergie (voir également le paragraphe 6.2.5).

6.4 Conflits potentiels entre adaptation et atténuation pour les ressources en eau

D'éventuels confits entre l'adaptation et l'atténuation pour les ressources en eau peuvent surgir. Les quelques études réalisées (notamment Dang *et al*., 2003) indiquent que les répercussions de l'atténuation sur l'adaptation, et vice versa, sont marginales à l'échelle mondiale, bien qu'elles puissent être significatives à l'échelle régionale. Dans les régions où le changement climatique déclenchera des décalages importants du régime hydrologique, mais où les potentiels pour l'énergie hydroélectrique existent encore, cela accroîtra la concurrence autour de l'eau, en particulier si les efforts d'adaptation au changement climatique sont mis en œuvre dans divers secteurs (à savoir la concurrence pour les ressources en eau de surface entre l'irrigation, pour faire face aux incidences du changement climatique sur l'agriculture, l'augmentation de la demande en eau potable et l'augmentation de la demande en eau de refroidissement pour le secteur énergétique). Cela vient confirmer l'importance des stratégies intégrées de gestion des terres et de l'eau dans les bassins fluviaux pour garantir l'affectation optimale de ressources naturelles rares (terres, eau). En outre, l'atténuation et l'adaptation doivent être évaluées en même temps, avec des compromis explicites, afin d'optimiser les investissements économiques tout en encourageant le développement durable. [GT II 18.8, 18.4.3]

Plusieurs études confirment l'éventualité de conflits entre l'approvisionnement en eau, la maîtrise des crues, l'énergie hydroélectrique et un écoulement fluvial minimal (indispensable à des fins écologiques et de qualité de l'eau) dans des conditions climatiques et hydrologiques variables (Christensen *et al*., 2004; Van Rheenen *et al*., 2004). [GT II 18.4.3]

L'adaptation à une disponibilité en eau et à des régimes hydrologiques variables nécessitera également des apports permanents d'énergie supplémentaire. Dans les régions pauvres en eau, l'augmentation de la réutilisation des eaux usées et le traitement correspondant, le pompage en puits profonds et en particulier le dessalement à grande échelle, augmenteront la consommation d'énergie dans le secteur de l'eau (Boutkan et Stikker, 2004) et généreront donc des émissions de GES, à moins d'utiliser des options d'«énergie propre» pour produire l'énergie nécessaire. [GT II 18.4.3]

7

Implications pour la politique et le développement durable

Le changement climatique constitue un défi conceptuel majeur pour les gestionnaires des ressources en eau, les utilisateurs (par exemple dans l'agriculture) ainsi que les décideurs politiques en général, dans la mesure où l'on ne peut plus supposer que les conditions climatiques et hydrologiques passées vont demeurer les mêmes dans le futur. La gestion des ressources en eau influence manifestement de nombreux autres domaines de la politique (par exemple l'énergie, la santé, la sécurité alimentaire, la conservation de la nature). Par conséquent, l'évaluation des possibilités d'adaptation et d'atténuation doit être menée au travers des multiples secteurs qui dépendent de l'eau.

Des changements significatifs ont pu être observés au cours des dernières décennies dans de nombreuses variables relatives à l'eau, mais aucune corrélation formelle n'a jamais été établie à ce jour entre les changements constatés et les causes naturelles ou anthropiques. Les projections à l'échelle régionale en matière de précipitations futures, d'humidité des sols et de ruissellement sont entachées d'une grande incertitude. Dans de nombreuses régions, certains modèles divergent quant à savoir dans quel sens se feront les changements prévus. Cependant, on retrouve quelques solides constantes dans les projections des modèles climatiques. Des augmentations des précipitations (et de l'écoulement fluvial) sont *très probables* aux latitudes élevées et dans quelques zones tropicales humides (zones très peuplées de l'est et du sud-est asiatique, notamment), tandis que des diminutions sont *très probables* dans la majeure partie des latitudes moyennes et des zones tropicales sèches [GT II figure 3.4]. L'interprétation et la quantification des incertitudes se sont récemment améliorées, et de nouvelles méthodes (par exemple des approches fondées sur un ensemble) ont été développées en vue de leur caractérisation [GT II 3.4, 3.5]. Toutefois, les projections quantitatives des changements dans les précipitations, l'écoulement fluvial ou le niveau des eaux à l'échelle du bassin hydrographique restent entachées d'incertitudes, dont il convient de tenir compte dans la planification des décisions relatives au changement climatique. [GT II RT, 3.3.1, 3.4]

L'adaptation au changement climatique se fait à la fois dans le temps et dans l'espace. Elle s'appuie sur les mesures prises au niveau des collectivités, des bassins hydrographiques et de la communauté internationale pour faire face à la variabilité du climat dans le cadre d'actions et de politiques visant à atténuer les vulnérabilités dans une perspective à long terme. Le fait d'investir constamment dans des mesures d'adaptation uniquement basées sur les expériences passées plutôt que sur les prévisions de la variabilité et du changement climatiques, va *probablement* augmenter la vulnérabilité au changement climatique de plus d'un secteur. [GT II RT, 14.5]

7.1 Implications politiques par secteur

Gestion des ressources en eau

- Les bassins hydrographiques dominés par une couverture neigeuse saisonnière connaissent déjà des débits de pointe dès le printemps et ce décalage se maintiendra vraisemblablement sous un climat plus chaud. Aux altitudes inférieures, les précipitations hivernales prendront de plus en plus la forme de chutes de pluie plutôt que de chutes de neige. Dans de nombreuses zones montagneuses, par exemple dans les Andes tropicales et dans de nombreux massifs montagneux d'Asie, où les glaciers assurent l'essentiel du ruissellement durant les périodes sèches prononcées, les volumes d'eau stockés par les glaciers et le manteau neigeux devraient diminuer. Le ruissellement pendant les saisons chaudes et sèches sera renforcé lors de la fonte des glaciers, mais il se réduira considérablement lorsque ces derniers auront disparu. [GT II 3.4.1]
- Les régions affectées par la sécheresse sont *probablement* appelées à s'étendre et les épisodes de précipitations extrêmes, qui vont *très probablement* augmenter en fréquence et en intensité, vont accroître le risque de crues. Jusqu'à 20 % de la population mondiale vit dans des bassins hydrographiques qui seront *probablement* touchés par un risque de crue aggravé vers 2080 du fait des changements climatiques. [GT II 3.4.3]
- Les régions semi-arides et arides sont particulièrement exposées aux conséquences du changement climatique sur l'eau douce. Un grand nombre de ces régions (par exemple le bassin méditerranéen, l'ouest des États-Unis, le sud de l'Afrique, le nord-est du Brésil, le sud et l'est de l'Australie) vont souffrir d'une diminution des ressources hydrologiques en raison du changement climatique. [GT II encadré RT.5, 3.4, 3.7] Les efforts déployés pour compenser la diminution de la disponibilité des eaux de surface due à la variabilité croissante des précipitations seront pénalisés par le fait que l'alimentation des nappes souterraines devrait diminuer considérablement dans certaines régions soumises à un stress hydrique [GT II 3.4.2], phénomène encore accentué par la demande accrue d'eau. [GT II 3.5.1]
- L'élévation de la température des eaux, l'intensité croissante des précipitations et les périodes prolongées d'étiage vont amplifier de nombreuses formes de pollution des eaux, avec des conséquences pour les écosystèmes, la santé publique, la fiabilité des systèmes de distribution d'eau et les coûts d'exploitation. [GT II 3.2, 3.4.4, 3.4.5]
- Les régions où le ruissellement devrait décroître seront confrontées à une réduction de la valeur des services fournis par les ressources en eau. L'impact positif d'un ruissellement annuel accru dans d'autres régions sera atténué par les effets négatifs de la variabilité accrue des précipitations et des décalages des ruissellements

saisonniers sur l'approvisionnement en eau, la qualité de l'eau et les risques de crue. [GT II 3.4, 3.5]

- Au niveau mondial, les impacts négatifs du changement climatique sur l'eau douce vont l'emporter sur les avantages. [GT II 3.4, 3.5]
- Les effets pervers du climat sur les systèmes d'eau douce amplifient les conséquences d'autres contraintes comme l'accroissement de la population, le changement d'affectation des terres et l'urbanisation. [GT II 3.3.2, 3.5] Globalement, la demande en eau va augmenter au cours des décennies à venir, essentiellement du fait de la croissance démographique et de l'augmentation des richesses. [GT II 3.5.1]
- Le changement climatique affecte le fonctionnement et l'exploitation des infrastructures hydrauliques existantes ainsi que les pratiques de gestion de l'eau. Les pratiques actuelles sont *très probablement* inadaptées pour réduire les impacts négatifs du changement climatique sur la fiabilité de l'approvisionnement en eau, les risques de crue, la santé, l'énergie et les écosystèmes aquatiques. [GT II RT, 3.4, 3.5, 3.6]
- Des procédures d'adaptation et des pratiques de gestion des risques pour le domaine hydrologique sont développées dans certains pays et régions (par exemple dans les Caraïbes, au Canada, en Australie, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, aux États-Unis et en Allemagne) qui tiennent compte de l'incertitude des changements hydrologiques prévus, mais il est indispensable d'élaborer des critères d'évaluation de leur efficacité. [GT II 3.6]

Écosystèmes

- La résilience de nombreux écosystèmes et leur capacité d'adaptation naturelle sera *probablement* dépassée vers 2100 sous l'effet d'une combinaison sans précédent des changements climatiques, des perturbations qui y sont associées (par exemple les crues, les sécheresses et les feux incontrôlés) et d'autres éléments déclencheurs de changements globaux (par exemple le changement d'affectation des terres, la pollution et la surexploitation des ressources). [GT II RT]
- La variabilité accrue des précipitations menacera *probablement* la pérénité des zones humides en raison des changements concernant l'époque de la montée des eaux, la durée des hautes eaux et le niveau des eaux. [GT II 4.4.8]
- Parmi tous les écosystèmes, les écosystèmes d'eau douce présenteront la plus forte concentration d'espèces menacées d'extinction par le changement climatique. [GT II 4.4.8]
- Les pratiques de conservation actuelles sont en règle générale mal adaptées aux changements à intervenir dans les ressources en eau durant les prochaines décennies. [GT II 4.RE]
- La mise en œuvre de mesures d'adaptation permettant de conserver la biodiversité et d'autres écoservices sera *probablement* coûteuse, mais à moins que les besoins en eau de conservation soient pris en compte dans les stratégies d'adaptation, de nombreux écosystèmes naturels et les espèces qu'ils font vivre vont connaître un déclin. [GT II 4.RE, 4.4.11, tableau 4.1, 4.6.1, 4.6.2]

Agriculture, forêts

- Une fréquence accrue des sécheresses et des crues influe négativement sur le rendement des cultures et du bétail, avec des impacts à la fois plus importants et plus précoces que ceux prévus en se basant sur les changements utilisés dans les seules variables moyennes. [GT II 5.4.1, 5.4.2] L'augmentation de la fréquence des sécheresses et des crues aura un effet négatif sur la production locale, notamment dans les secteurs de subsistance aux basses latitudes. [GT II RiD]
- Les impacts du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation peuvent être importants. [GT II 5.4] De nouveaux stockages d'eau, à la fois en surface et en sous-sol, peuvent réduire les pénuries d'eau, mais ne sont pas toujours réalisables. [GT II 5.5.2]
- Les cultivateurs pourront peut-être s'adapter partiellement en modifiant les cultivars ou les dates de semis des cultures annuelles, et en adoptant d'autres stratégies. Un éventuel accroissement des besoins en eau devrait être pris en compte dans la conception de nouveaux systèmes d'irrigation et dans la réhabilitation de systèmes anciens. [GT II 5.5.1]
- Les mesures de lutte contre les pénuries d'eau, telles que la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture, nécessitent une gestion soigneuse pour éviter les impacts négatifs en matière de sécurité alimentaire et de santé. [GT II 8.6.4]
- Des mesures unilatérales qui visent à faire face aux pénuries d'eau dues au changement climatique peuvent engendrer une certaine concurrence autour des ressources en eau. Des approches internationales et régionales sont nécessaires afin de développer des solutions communes. [GT II 5.7]

Systèmes côtiers et zones de faible altitude

- L'élévation du niveau de la mer va étendre les zones de salinisation des eaux souterraines et les estuaires, ce qui va entraîner une diminution des ressources en eau douce. [GT II 3.2, 3.4.2]
- La population vivant dans les régions côtières de faible altitude qui disposent de peu de capacités d'adaptation ou sont fortement menacées, sera exposée à un risque de crue aggravé et à une élévation du niveau de la mer. Ces régions comprennent les deltas de fleuves, en particulier les mégadeltas d'Asie (par exemple celui du Gange-Brahmapoutre au Bangladesh et au Bengale-Occidental) et les zones urbaines côtières de faible altitude, notamment les régions sujettes à des affaissements de terrain naturels ou provoqués par l'activité humaine et à des tempêtes tropicales (par exemple La Nouvelle-Orléans, Shanghai). [GT II 6.3, 6.4]

Industrie, établissements humains et société

- Les infrastructures telles que les systèmes urbains d'adduction d'eau sont sensibles, notamment dans les

régions côtières, à l'élévation du niveau de la mer et à la réduction des précipitations à l'échelle régionale. [GT II 7.4.3, 7.5]

- L'augmentation prévue des précipitations extrêmes a des implications importantes pour l'infrastructure, et notamment pour la conception des égouts pluviaux, des franchissements routiers, des ponts, des digues et des ouvrages de défense contre les inondations, y compris le dimensionnement des réservoirs de maîtrise des crues. [GT II 7.4.3.2]
- Des règles de planification peuvent être appliquées pour prévenir l'extension des zones soumises à un fort risque de crue (par exemple les lits majeurs), qui tiennent compte de la construction de logements, du développement industriel, de l'implantation des décharges, etc. [GT II 7.6]
- Le développement des infrastructures, avec ses longs délais et ses investissements importants, bénéficierait de la prise en compte d'informations relatives au changement climatique. [GT II 14.5.3, figure 14.3]

Assainissement de l'eau et santé humaine

- Les effets du changement climatique sur l'eau constituent une menace pour la santé humaine en modifiant la qualité et la disponibilité des ressources en eau. Bien que l'accès à l'eau potable et à l'assainissement dépende en premier lieu de facteurs non climatiques, le changement climatique va probablement accentuer les difficultés d'accès des ménages à ces ressources au sein de certaines populations. [GT II 8.2.5]
- Il convient d'élaborer des mesures adéquates de planification préalable et de prévention des catastrophes, afin de faire face au risque aggravé d'inondations dues au changement climatique et de réduire leur impact sur la santé et les systèmes sanitaires. [GT II 8.2.2]

Besoins en matière d'information climatologique

Les progrès dans la compréhension de l'impact climatique sur le cycle de l'eau dépendent d'une meilleure disponibilité des données. Des relevés hydrométriques portant sur une période trop courte peuvent entraîner une sous-estimation de l'ampleur réelle de la variabilité naturelle. La surveillance exhaustive des variables relatives à l'eau, en termes à fois de qualité et de quantité, facilite la prise de décision et constitue la condition préalable à la gestion adaptative indispensable dans le cadre du changement climatique. [GT II 3.8]

7.2 Principaux impacts relatifs à l'eau prévus par région

Afrique

- Les impacts du changement climatique en Afrique seront *probablement* plus importants s'ils se produisent parallèlement à une série d'autres facteurs de contrainte (croissance démographique, accès inégal aux ressources, accès insuffisant à l'eau et à l'assainissement [GT II 9.4.1], insécurité alimentaire [GT II 9.6] et systèmes de santé publique précaires [GT II 9.2.2, 9.4.3]). Ces facteurs, ainsi que le changement climatique, vont augmenter la vulnérabilité de nombreuses populations en Afrique. [GT II 9.4]
- Un certain nombre de scénarios de changement climatique prévoient une augmentation de 5 à 8 % (60 à 90 millions d'hectares) de la superficie des terres arides et semi-arides en Afrique d'ici les années 2080. [GT II 9.4.4]
- La chute des rendements agricoles est *probablement* due à la sécheresse et à la dégradation des sols, en particulier dans les zones marginales. Les systèmes pluviaux mixtes au Sahel seront très affectés par le changement climatique. Dans la région des Grands Lacs et dans d'autres parties de l'Afrique de l'Est, ces systèmes ainsi que les systèmes pérennes des hauts plateaux seront également gravement affectés. [GT II 9.4.4, encadré RT.6]
- Le stress hydrique qui sévit actuellement en Afrique sera *probablement* accentué par le changement climatique, mais la politique de l'eau et la gestion des bassins hydrographiques doivent également être prises en compte dans les futures évaluations du stress hydrique dans ce continent. L'augmentation du ruissellement (et du risque de crues) en Afrique de l'Est et sa réduction (ainsi que le risque accru de sécheresse) dans d'autres régions (par exemple en Afrique australe) sont prévisibles pour les années 2050. [GT II 9.4.1, 9.4.2, 9.4.8]
- Toute modification de la production primaire des grands lacs aura des impacts importants sur l'offre alimentaire locale. Le lac Tanganyika assure actuellement 25 à 40 % de l'apport en protéines animales des populations vivant aux alentours, et le changement climatique va *probablement* entraîner une réduction de la production primaire et, éventuellement, du rendement piscicole d'environ 30 %. [GT II 9.4.5, 3.4.7, 5.4.5] L'interaction entre des décisions erronées en matière de gestion, notamment la surpêche, va *probablement* contribuer à réduire davantage le rendement piscicole des lacs. [GT II 9.2.2, encadré RT.6]

Asie

- La disponibilité d'eau douce par habitant en Inde va vraisemblablement chuter de quelque 1 820 m^3 actuellement à moins de 1 000 m^3 en 2025 sous l'effet conjugué de la croissance démographique et du changement climatique. [GT II 10.4.2.3]
- Des pluies plus intenses et des crues soudaines plus fréquentes pendant la mousson entraîneront une augmentation du ruissellement et une réduction du volume d'eau qui atteint les nappes souterraines. [GT II 10.4.2]
- La demande d'irrigation agricole dans les régions arides et semi-arides de l'est de l'Asie devrait augmenter de 10 % si les températures s'accroissent de 1 °C. [GT II 10.4.1]
- Les régions côtières, en particulier les régions fortement peuplées des mégadeltas asiatiques, seront les plus

exposées à un risque d'inondation marine et, dans certains mégadeltas, d'inondation fluviale. [GT II 6.4, 10.4.3]

- Les changements affectant la fonte des neiges et des glaciers, de même que le relèvement de la limite des neiges éternelles dans l'Himalaya modifieront les variations saisonnières du ruissellement, provoquant des pénuries d'eau pendant les mois secs de l'été. Un quart de la population chinoise et des centaines de millions de personnes en Inde seront concernées (Stern, 2007). [GT II 3.4.1, 10.4.2.1]

Australie et Nouvelle-Zélande

- Des problèmes permanents de sécurité hydrique s'accentueront *très probablement* dans le sud et l'est de l'Australie (avec, par exemple, une diminution du ruissellement jusqu'à 45 % dans l'État de Victoria vers 2030 et une diminution de 10 à 25 % de l'écoulement fluvial dans le bassin australien du Murray-Darling vers 2050) ainsi qu'en Nouvelle-Zélande, dans l'Île du Nord et dans certaines régions orientales. [GT II 11.4.1]
- Les risques concernant des infrastructures majeures vont *probablement* augmenter du fait du changement climatique. Il est *très probable* que, d'ici 2030, les phénomènes extrêmes dépassent les capacités de résistance des ouvrages. Ces risques comprennent la rupture de digues des lits majeurs, la défaillance des réseaux urbains de drainage et l'inondation de villes côtières situées à proximité d'un fleuve. [GT II 11.RE, 11.4.5, 11.4.7]
- On prévoit une diminution de la production agricole et sylvicole vers 2030 dans une grande partie du sud et de l'est de l'Australie, ainsi que dans certaines régions orientales de la Nouvelle-Zélande, en raison notamment de l'augmentation de la sécheresse. Toutefois, la Nouvelle-Zélande devrait en bénéficier dans un premier temps dans les zones occidentales et méridionales proches des grands fleuves du fait de l'augmentation des précipitations. [GT II 11.4]

Europe

- La probabilité que les précipitations hivernales extrêmes dépassent la normale de deux écarts types devrait être multipliée par cinq dans certaines régions du Royaume-Uni et du nord de l'Europe vers les années 2080, avec un doublement du CO_2. [GT II 12.3.1]
- Vers 2070, le ruissellement annuel devrait augmenter dans le nord de l'Europe et diminuer jusqu'à 36 % dans le sud, et les débits d'étiage perdraient jusqu'à 80 % d'après le scénario IS92a. [GT II 12.4.1, T12.2]
- La proportion de bassins versants considérés comme étant soumis à un stress hydrique grave (prélèvement: taux de disponibilité supérieur à 0,4) devrait passer de 19 % actuellement à 34 à 36 % d'ici les années 2070. [GT II 12.4.1]
- Les populations vivant dans des bassins hydrographiques soumis à un stress hydrique (ce qui concerne 17 pays d'Europe occidentale) augmenteront *probablement* pour passer de 16 à 44 millions de personnes (résultats du modèle climatique HadCM3) d'ici les années 2080. [GT II 12.4.1]
- Dans les années 2070, le potentiel d'énergie hydraulique de l'Europe devrait diminuer de 6 %, avec de fortes variations régionales, à savoir une diminution de 20 à 50 % dans les régions méditerranéennes, et une augmentation de 15 à 30 % dans le nord et l'est de l'Europe. [GT II 12.4.8]
- Les petits glaciers de montagne vont disparaître dans différentes régions, tandis que les grands glaciers vont subir une réduction de volume de 30 à 70 % d'ici 2050 selon une série de scénarios d'émissions, parallèlement à une réduction de la fonte au printemps et en été. [GT II 12.4.3]

Amérique latine

- Toute réduction future des chutes de pluie dans des régions arides et semi-arides d'Argentine, du Chili et du Brésil va probablement entraîner de sévères pénuries d'eau. [GT II 13.4.3]
- Du fait du changement climatique et de la croissance démographique, les populations vivant dans des bassins hydrographiques soumis à un stress hydrique devraient atteindre 37 à 66 millions de personnes vers 2020 (contre 56 millions de personnes en dehors d'un changement climatique) d'après le scénario SRES A2. [GT II 13.4.3]
- Les régions d'Amérique latine soumises à un stress hydrique grave comprennent l'est de l'Amérique centrale, les plaines, la vallée du Motagua et la façade pacifique du Guatemala, les régions orientales et occidentales d'El Salvador, la vallée centrale et la région pacifique du Costa Rica, les régions intermontagneuses du nord, du centre et de l'est du Honduras, ainsi que la péninsule d'Azuero, au Panama. Dans ces régions, l'approvisionnement en eau et la production d'énergie hydroélectrique pourraient être sérieusement affectés par le changement climatique. [GT II 13.4.3]
- Le rétrécissement des glaciers devrait accentuer les pénuries d'eau en saison sèche sous l'effet du réchauffement climatique, avec des conséquences néfastes pour les ressources en eau et la production d'énergie hydraulique en Bolivie, au Pérou, en Colombie et en Équateur. Le risque de crue devrait augmenter lors de la saison humide. [GT II 13.2.4, 13.4.3]

Amérique du Nord

- Le réchauffement attendu dans les montagnes de l'ouest vers le milieu du XXIe siècle va *très probablement* causer d'importantes réductions du manteau neigeux, une fonte des neiges plus précoce, davantage de pluies d'hiver, plus de crues et de débits hivernaux records ainsi que des débits estivaux réduits. [GT II 14.4.1]
- La réduction de l'approvisionnement en eau conjuguée à l'augmentation de la demande vont *probablement* accentuer la concurrence pour des ressources en eau déjà surexploitées. [GT II 14.2.1, encadré 14.2]

- L'évolution modérée du climat au cours des premières décennies du siècle devrait accroître de 5 à 20 % le rendement des cultures pluviales, mais avec de nets écarts d'une région à l'autre. De graves difficultés risquent de surgir dans le cas des cultures déjà exposées à des températures proches de la limite supérieure de leur plage de tolérance ou qui dépendent de ressources en eau déjà fortement utilisées. [GT II 14.4.4]
- La vulnérabilité au changement climatique concernera *probablement* des groupes et des régions spécifiques, y compris les populations autochtones et les populations à faibles revenus, ainsi que les populations urbaines les plus âgées et les plus démunies. [GT II 14.2.6, 14.4.6]

Régions polaires

- L'étendue du pergélisol de l'hémisphère Nord va *probablement* enregistrer un recul de 20 à 35 % d'ici à 2050. La profondeur de la fonte saisonnière du pergélisol devrait augmenter de 15 à 25 % dans la plupart des régions d'ici à 2050, et de 50 % ou plus dans les régions les plus septentrionales, selon l'ensemble des scénarios SRES [GT II 15.3.4], ce qui devrait entraîner une perturbation des écosystèmes dans l'Arctique. [GT II 15.4.1]
- L'on s'attend à un nouveau recul de la couverture de glace des lacs et des fleuves, qui affectera les structures thermiques, la qualité et la quantité des habitats sous-glaciaires et, dans l'Arctique, modifiera l'époque d'apparition et l'intensité des embâcles et des inondations subséquentes. Le réchauffement de l'eau douce devrait influencer la productivité et la répartition des espèces aquatiques, en particulier les poissons, modifiant ainsi les bancs de pêche et réduisant la population des espèces vivant dans des eaux plus froides. [GT II 15.4.1]
- L'augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations, de l'érosion et de la destruction du pergélisol menace les communautés, l'infrastructure industrielle et l'approvisionnement en eau dans les zones arctiques. [GT II 15.4.6]

Petites îles

- D'après la plupart des scénarios de changement climatique, on dispose de preuves solides indiquant que les ressources en eau des petites îles vont *probablement* être sérieusement compromises. [GT II 16.RE] La plupart des petites îles disposent d'un approvisionnement en eau limité, et leurs ressources hydrologiques sont particulièrement exposées aux changements futurs du régime pluviométrique et de la distribution des précipitations. De nombreuses îles des Caraïbes vont *probablement* subir un stress hydrique accru en raison du changement climatique. Tous les scénarios SRES envisagent une diminution des pluies en été dans cette région, de sorte qu'il est *improbable* que la demande en eau soit satisfaite au cours des périodes de faibles pluies. Il est *improbable* que des pluies hivernales plus importantes compensent ces pénuries, du fait du manque de capacités de stockage et du ruissellement important qui accompagne les tempêtes. [GT II 16.4.1]
- Une réduction des chutes de pluie moyennes aboutirait à la réduction de la taille des lentilles d'eau douce. Dans le Pacifique, une réduction de 10 % des précipitations moyennes (d'ici à 2050) entraînerait une réduction de 20 % de la taille des lentilles d'eau douce à Kiribati, sur l'atoll de Tarawa. La diminution des précipitations, conjuguée à des prélèvements d'eau accrus, à l'élévation du niveau de la mer et à l'intrusion d'eau salée qui l'accompagne, accentuerait cette menace. [GT II 16.4.1]
- De nombreux petits pays insulaires (par exemple la Barbade, les Maldives, les Seychelles et Tuvalu) ont commencé à investir dans la mise en œuvre de stratégies d'adaptation, notamment le dessalement, pour compenser les pénuries d'eau actuelles et celles prévues. [GT II 16.4.1]

7.3 Implications pour une politique d'atténuation des effets du changement climatique

La mise en œuvre d'importantes mesures d'atténuation telles que le boisement et le recours à l'énergie hydraulique et aux biocarburants peut avoir des impacts à la fois positifs et négatifs sur les ressources en eau douce, en fonction des situations particulières des zones concernées. Il est donc nécessaire d'évaluer et d'optimiser en conséquence l'efficacité des mesures d'atténuation et les impacts concernant l'eau.

L'expansion des zones irriguées et l'accroissement de la production d'énergie hydroélectrique à partir de barrages peuvent contribuer à amoindrir l'efficacité du potentiel d'atténuation associé. Dans le cas de l'irrigation, les émissions de CO_2 découlant de l'utilisation d'énergie pour pomper l'eau et les émissions de méthane dans les rizières peuvent contrebalancer en partie les effets de l'atténuation. Les réservoirs d'eau douce destinée à la production d'énergie électrique peuvent également être à l'origine d'émissions de certains gaz à effet de serre, de sorte qu'il devient nécessaire de procéder à une évaluation globale ciblée du bilan de gaz à effet de serre final. [GT III 4.3.3.1, 8.4.1.1]

7.4 Implications pour le développement durable

Les pays et les régions à faibles revenus devraient rester vulnérables à moyen terme, car ils disposent de moins d'options que les pays à hauts revenus pour s'adapter au changement climatique. C'est pourquoi des stratégies d'adaptation

doivent être conçues dans le contexte des politiques de développement, d'environnement et de santé publique. Bon nombre d'options utilisables pour réduire une vulnérabilité future sont précieuses pour s'adapter au climat actuel et peuvent être mises à profit pour atteindre d'autres objectifs sociaux et environnementaux.

Dans de nombreuses régions du globe, les impacts du changement climatique sur les ressources en eau douce peuvent pénaliser le développement durable et mettre en danger la réduction de la pauvreté et de la mortalité infantile (tableau 7.1). Il est très probable que les impacts négatifs de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues et des sécheresses sur le développement durable ne pourront être évités. [GT II 3.7] Cependant, en dehors de phénomènes extrêmes majeurs, le changement climatique constitue rarement le facteur principal de contraintes sur la durabilité. L'importance du changement climatique tient à ses interactions avec d'autres sources de changement et de contrainte, et ses impacts doivent être pris en compte dans ce contexte. [GT II 7.1.3, 7.2, 7.4]

Tableau 7.1: *Contribution potentielle du secteur hydrologique à la réussite des objectifs du Millénaire pour le développement [GT II tableau 3.6]*

Objectifs	Relation directe avec l'eau	Relation indirecte avec l'eau
Objectif 1: Réduire l'extrême pauvreté et la faim	L'eau constitue un facteur de bon nombre d'activités de production (par exemple l'agriculture, l'élevage, l'artisanat). Production durable de poissons, de cultures arbustives et d'autres cultures alimentaires rassemblées comme ressources communes.	La réduction de la dégradation des écosystèmes permet d'améliorer le développement durable au niveau local. Réduction de la faim dans les villes grâce à une alimentation meilleur marché produite au moyen d'un approvisionnement en eau plus fiable.
Objectif 2: Assurer l'éducation primaire pour tous		Amélioration de la scolarisation par une amélioration de la santé et la réduction de la corvée de l'eau, essentiellement pour les filles.
Objectif 3: Promouvoir l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes	Développement de programmes de gestion de l'eau favorisant l'égalité entre les sexes.	Gain de temps et préservation de la santé grâce à un accès à l'eau amélioré, laissant plus de temps aux activités génératrices de revenu et permettant d'assurer un meilleur équilibre entre les sexes.
Objectif 4: Réduire la mortalité infantile	Amélioration de l'accès à l'eau potable en quantité suffisante et de meilleure qualité et amélioration de l'assainissement afin de réduire les causes principales de morbidité et de mortalité infantile.	
Objectif 6: Combattre le VIH/sida, le paludisme et d'autres maladies	L'accès amélioré à l'eau et à l'assainissement apporte une aide aux ménages atteints par le VIH/sida et peut permettre d'améliorer l'impact des programmes de santé publique. Une meilleure gestion de l'eau réduit l'habitat des moustiques et le risque de transmission du paludisme.	
Objectif 7: Assurer un environnement durable	Une meilleure gestion de l'eau permet de réduire la consommation d'eau et de recycler des éléments nutritifs et organiques. Actions pour assurer l'accès à un éco-assainissement amélioré et, si possible, productif pour les ménages pauvres. Actions en vue d'améliorer l'approvisionnement en eau et les services d'assainissement pour les communautés pauvres. Actions pour réduire les rejets d'eaux usées et améliorer les conditions d'hygiène dans les bidonvilles.	Développement de systèmes d'exploitation, d'entretien et de recouvrement des coûts pour assurer la viabilité des prestations de services.

8

Lacunes dans les connaissances et suggestions pour les travaux futurs

Il est largement prouvé par des relevés d'observations et des projections climatiques que les ressources en eau douce sont vulnérables et pourront souffrir gravement du changement climatique. Toutefois, la capacité à quantifier les changements futurs des variables hydrologiques et leurs incidences sur les systèmes et les secteurs est limitée par l'incertitude affectant tous les niveaux du processus d'évaluation. Cette incertitude provient de la multitude de scénarios de développement socioéconomiques, de la gamme des projections de modèles climatiques pour un scénario donné, de la réduction des effets climatiques à l'échelle locale et régionale, des évaluations des incidences et des retours d'information au sujet des activités d'adaptation et d'atténuation. Les limitations inhérentes aux observations et à la compréhension restreignent notre capacité à réduire ces incertitudes en ce moment. La prise de décision exige de travailler dans le contexte de cette incertitude. Des méthodes éprouvées d'évaluation des risques fondées sur ces incertitudes n'en sont qu'à un stade précoce de développement.

La capacité d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ses conséquences est limitée par la disponibilité et la viabilité économique de techniques appropriées et de solides processus de collaboration en matière de prise de décision parmi les nombreuses parties prenantes et compte tenu des multiples critères de gestion. Les coûts et les bénéfices (dommages évités compris) des options spécifiques sont mal connus. Des stratégies de gestion s'adaptant en fonction des changements climatiques doivent être alimentées par un réseau d'observations approprié. On comprend peu les cadres légal et institutionnel, ainsi que les statistiques du côté de la demande qui sont nécessaires pour intégrer les adaptations dans les plans de développement afin de réduire les vulnérabilités liées à l'eau, et les canaux appropriés pour diriger les flux financiers dans le secteur de l'eau vers les investissements d'adaptation.

La présente section relève un certain nombre de lacunes clés dans les connaissances relatives à ces besoins.

8.1 Besoins en matière d'observations

De meilleures données d'observation et un accès facilité à ces données sont indispensables pour améliorer la compréhension des changements en cours et pour mieux limiter les projections de modèles; ces données constituent également un prérequis pour une gestion adaptative nécessaire dans les conditions d'un changement climatique. Les progrès enregistrés dans les connaissances dépendent d'une meilleure disponibilité des données. L'on constate une réduction de l'ampleur de certains réseaux d'observation. Des relevés relativement brefs peuvent ne pas être en mesure de rendre compte de l'étendue totale de la variabilité naturelle et créent la confusion dans les études de détection, alors qu'une reconstruction sur le long terme est en mesure de placer les tendances récentes et les extrêmes dans un contexte plus large. Les lacunes les plus importantes concernant les observations du changement climatique relatives à l'eau douce et aux cycles hydrologiques ont été identifiées comme suit [GT I RT.6; GT II 3.8]:

- Les difficultés dans le domaine de la mesure des précipitations demeurent un problème dans la quantification de tendances mondiales et régionales. Les mesures de précipitations sur les océans (à partir de satellites) sont toujours en phase de développement. Il convient d'assurer une surveillance permanente par satellite et de développer des statistiques fiables pour en déduire les précipitations. [GT I 3.3.2.5]
- De nombreuses variables hydrométéorologiques, par exemple l'écoulement fluvial, l'humidité du sol et l'évapotranspiration réelle ne sont pas mesurées de façon appropriée. L'évapotranspiration potentielle est généralement calculée à partir de paramètres tels que le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent. Les relevés sont souvent très courts et ne sont disponibles que pour un petit nombre de régions, ce qui empêche toute analyse exhaustive des changements qui en découlent en matière de sécheresse. [GT I 3.3.3, 3.3.4]
- Il peut y avoir des possibilités de récupération des données sur l'écoulement fluvial dans certaines régions. Quand les données d'observation font défaut, il conviendrait de prévoir la mise en place de nouveaux réseaux d'observation. [GT I 3.3.4]
- Les eaux souterraines ne sont pas bien surveillées et les processus d'épuisement et d'alimentation des nappes souterraines ne sont pas correctement modélisés dans de nombreuses régions. [GT I 3.3.4]
- Des données de surveillance de la qualité de l'eau, de la consommation de l'eau et du transport de sédiments sont indispensables.
- Les inventaires des neiges, glaces et sols gelés sont incomplets. La surveillance des changements est inégalement répartie dans l'espace et dans le temps. Il existe un manque général de données provenant de l'hémisphère Sud. [GT I RT 6.2, 4.2.2, 4.3]
- Il est nécessaire de disposer de plus d'informations sur les conséquences qu'ont les effets combinés de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère, de l'élévation de la température et de l'augmentation de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère sur l'évapotranspiration des plantes, afin de mieux comprendre les relations entre les effets directs de l'enrichissement en CO_2 de l'atmosphère et les changements intervenant dans le cycle hydrologique. [GT I 7.2]
- L'assurance de la qualité, l'homogénéisation des jeux de données et l'étalonnage réciproque des méthodes et procédures pourraient être importants lorsque différents pays, agences, etc. maintiennent une surveillance sur une région ou un bassin hydrographique.

8.2 Comprendre les projections climatiques et leurs impacts

8.2.1 Compréhension et projection du changement climatique

Les incertitudes majeures dans la compréhension et la modélisation des changements climatiques en matière de cycle hydrologique sont les suivantes [RSY; GT I RT.6]:

- Les changements qui affectent un certain nombre d'agents de forçage radiatif du climat ne sont pas intégralement quantifiés et appréhendés (par exemple, les aérosols et leurs effets sur les propriétés des nuages, le méthane, l'ozone, la vapeur d'eau stratosphérique, le changement d'affectation des terres, les variations passées de l'activité solaire).
- L'attribution de certains phénomènes de changement climatique observés à des processus anthropiques ou naturels bénéficie d'un degré de confiance qui est limité par des incertitudes concernant le forçage radiatif, de même que par des incertitudes dans les processus et les observations. L'attribution devient plus difficile à des échelles spatiales et temporelles plus restreintes et la compréhension des changements dans les précipitations bénéficie d'un degré de confiance moindre que la compréhension des changements dans la température. Il n'existe que très peu d'études d'attribution pour les changements en matière de phénomènes extrêmes.
- L'incertitude reste importante dans la modélisation de certains modes de variabilité climatique, ainsi que dans la distribution des précipitations entre événements majeurs et événements mineurs. Dans de nombreuses régions, les projections de changement en matière de précipitations moyennes varient aussi énormément entre les modèles, même dans le sens du changement. Il est nécessaire d'améliorer la compréhension des sources d'incertitude.
- Dans de nombreuses régions où l'on établit des échelles spatio-climatiques fines d'après des relevés topographiques, on ne dispose que d'informations insuffisantes sur la manière dont le changement climatique va s'exprimer à ces échelles.
- Les modèles climatiques restent limités par la résolution spatiale et la taille d'ensemble qui peut être obtenue à l'aide des moyens informatiques actuels, par la nécessité d'y introduire quelques processus additionnels et par la grande incertitude entachant la modélisation de certaines rétroactions (dues par exemple aux nuages et au cycle du carbone).
- La connaissance limitée des processus impliquant les nappes glaciaires et les plates-formes de glace conduit à des incertitudes non quantifiées dans les projections du futur bilan de masse des nappes glaciaires, ce qui entraîne ensuite des incertitudes concernant les projections de l'élévation du niveau de la mer.

8.2.2 Impacts liés à l'eau [GT II 3.5.1, 3.8]

- En raison des incertitudes, une approche probabiliste s'avère nécessaire pour permettre aux gestionnaires de l'eau de mener des analyses de risque en matière de changement climatique. Des techniques sont en cours de développement pour élaborer des distributions de probabilité de résultats spécifiques. La poursuite du développement de ces recherches et des techniques de communication des résultats, ainsi que leur application pour la communauté des utilisateurs sont indispensables.
- Il est nécessaire de poursuivre le travail sur la détection et l'attribution des changements hydrologiques actuels, en particulier sur les changements en matière de ressources en eau et sur l'occurrence de phénomènes extrêmes. Parmi ces efforts, il est demandé de développer des indicateurs d'incidences du changement climatique sur l'eau douce et des systèmes opérationnels permettant de les surveiller.
- Il subsiste une asymétrie d'échelle entre les modèles climatiques à grande échelle et l'échelle du bassin hydrographique – qui est la plus importante pour la gestion de l'eau. Il est donc nécessaire d'élaborer des modèles climatiques de plus haute résolution, avec de meilleures propriétés et interactions de la surface du sol, pour obtenir des informations plus pertinentes pour la gestion de l'eau. Une réduction d'échelle statistique et physique peut y contribuer.
- La plupart des études d'incidence du changement climatique sur le stress hydrique dans les pays évaluent la demande et l'approvisionnement sur une base annuelle. Il est souhaitable de disposer d'une référence mensuelle ou d'une meilleure résolution dans le temps, car les changements intervenant dans les schémas saisonniers et la probabilité de phénomènes extrêmes peuvent compenser l'effet positif de la disponibilité accrue de ressources en eau.
- L'incidence du changement climatique sur la neige, la glace et les sols gelés en tant que variables de stockage sensibles dans le cycle de l'eau est largement non linéaire, et il est nécessaire de disposer d'une modélisation plus orientée sur la physique et les processus, de même que d'une réduction d'échelle atmosphérique spécifique. Il existe également un manque de connaissances détaillées des changements du ruissellement dus à l'évolution des glaciers, de la couverture neigeuse, de la transition neige-pluie et des sols gelés dans différentes régions climatiques.
- Il est nécessaire d'améliorer les méthodes permettant l'évaluation des incidences de la variabilité du changement climatique sur les ressources en eau douce. Il est en particulier nécessaire de développer des jeux de données à échelle locale ainsi que des modèles simples et informatisés de bassins versants en rapport avec le climat qui permettraient aux gestionnaires de l'eau

d'estimer les incidences et d'évaluer le fonctionnement et la résilience de leurs systèmes, compte tenu de la plage d'incertitude entourant les futures projections climatiques.

- Les rétroactions entre l'utilisation des terres et le changement climatique (incluant le changement de végétation et l'activité anthropique telle que l'irrigation et la construction de réservoirs) devraient être analysées avec plus de précision, par exemple, par modélisation couplée entre le climat et l'utilisation des terres.
- Une meilleure évaluation des conséquences des différentes politiques climatiques et des modes de développement sur l'eau est nécessaire.
- Les incidences du changement climatique sur la qualité de l'eau ne sont que peu connues, que ce soit pour les pays en développement ou pour les pays développés, notamment en ce qui concerne l'impact des phénomènes extrêmes.
- Relativement peu de résultats sont disponibles sur les aspects socioéconomiques des conséquences du changement climatique sur les ressources en eau, y compris sur la demande en eau.
- Les incidences du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques (non seulement les températures, mais aussi l'altération des régimes d'écoulement, des niveaux de l'eau et de la couche de glace) ne sont pas assez bien comprises.
- Malgré leur importance, les eaux souterraines ne se sont vu accorder que peu d'attention dans l'évaluation de l'incidence du changement climatique par rapport aux ressources en eaux de surface.

8.3 Adaptation et atténuation

- La gestion des ressources en eau influe clairement sur de nombreux autres domaines d'ordre politique (par exemple, les projections concernant l'énergie, l'utilisation des terres, la sécurité alimentaire et la conservation de la nature). Il n'existe pas d'outils adaptés pour faciliter l'évaluation des options d'adaptation et d'atténuation au travers des nombreux secteurs dépendant de l'eau, et notamment l'adoption de techniques et pratiques d'utilisation rationnelle de l'eau.
- En l'absence de projections fiables pour les futurs changements des variables hydrologiques, les processus et méthodes d'adaptation pouvant être appliqués en l'absence de projections précises, comme l'amélioration du rendement hydraulique et de la gestion de la demande en eau, offrent des options «sans regrets» pour faire face au changement climatique. [GT II 3.8]
- *Biodiversité.* Il s'agit de l'identification des besoins en ressources en eau pour le maintien des valeurs et services environnementaux, tout particulièrement en ce qui concerne les écosystèmes des deltas, les zones humides et des flux entrants suffisants.
- *Piégeage et stockage du carbone*. Il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance des processus de fuite, du fait de la dégradation potentielle de la qualité des eaux souterraines, ce qui exige de renforcer la capacité de surveillance et de vérification du comportement du CO_2 stocké dans des réservoirs géologiques. [CCS, RT, chapitre 10]
- *Constructions de barrages et énergie hydraulique*. Une approche intégrée est nécessaire, compte tenu de la diversité des intérêts en jeu (maîtrise des crues, énergie hydroélectrique, irrigation, approvisionnement en eau des villes, écosystèmes, pêcheries et navigation), pour aboutir à des solutions durables. Il est également nécessaire d'évaluer les émissions de méthane. De même, il faut évaluer l'effet net sur le bilan carbone dans les régions concernées.
- *Bioénergie*. Il est nécessaire de disposer d'une connaissance de la demande en eau et de ses conséquences, ainsi que des plantations à grande échelle de cultures bioénergétiques à finalité commerciale. [GT III 4.3.3.3]
- *Agriculture*. Les effets nets d'une irrigation plus efficace sur le bilan des gaz à effet de serre devraient être mieux compris (augmentation des stocks de carbone dans les sols par des rendements améliorés et des retours de résidus, et compensation par les émissions de CO_2 issues des systèmes d'énergie utilisés pour la distribution de l'eau, ou encore par les émissions de N_2O issues d'une plus grande humidité et des apports d'engrais). [GT III 8.4.1.1]
- *Sylviculture*. Il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance des effets de boisements massifs sur les processus constitutifs du cycle hydrologique, tels que chutes de pluie, évapotranspiration, ruissellement, infiltrations et alimentation des nappes souterraines. [GT III 9.7.3]
- *Eaux usées et réutilisation de l'eau.* Il faut une meilleure connaissance des émissions issues des processus d'épuration décentralisés et des déversements sauvages d'eaux usées dans les pays en développement. L'incidence de la réutilisation adéquate de l'eau sur les stratégies d'atténuation et d'adaptation doit être comprise et quantifiée.

Références

Abdalati, W. and K. Steffen, 2001: Greenland ice sheet melt extent: 1979–1999. *J. Geophys. Res.*, **106**(D24), 33983–33988.

Abeku, T.A., G.J. van Oortmarssen, G. Borsboom, S.J. de Vlas and J.D.F. Habbema, 2003: Spatial and temporal variations of malaria epidemic risk in Ethiopia: factors involved and implications. *Acta Trop.*, **87**, 331-340.

Abou-Hadid, A.F., 2006: *Assessment of Impacts: Adaptation and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources*. Washington, DC, 127 pp. http://www.aiaccproject.org/Final%20Reports/Final%20Reports/FinalRept_AIACC_AF90.pdf.

Abou-Hadid, A.F., R. Mougou, A. Mokssit and A. Iglesias, 2003: *Assessment of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources*. AIACC AF90 Semi-Annual Progress Report, 37 pp.

Abu-Taleb, M.F., 2000: Impacts of global climate change scenarios on water supply and demand in Jordan. *Water International*, **25**(3), 457–463.

ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), 2004: *Impacts of a Warming Arctic: Synthesis Report of the Arctic Climate Impact Assessment*, Policy Document prepared by the Arctic Council and presented at the Fourth Arctic Council Ministerial Meeting, Reykjavik, 24 November 2004, 140 pp.

ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), 2005: *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 1042 pp.

ADB (Asia Development Bank), 1994: *Climate Change in Asia: Vietnam Country Report*. Asia Development Bank, Manila, 103 pp.

Adler, R.F. and Co-authors, 2003: The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147–1167.

AEMA**,** 2002: *Uso sostenible del agua en Europa. Gestión de la demanda*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 94 pp.

Agarwal, P.K., S.K. Bandyopadhyay, H. Pathak, N. Kalra, S. Chander and S. Kumar, 2000: Analysis of yield trends of the rice–wheat system in north-western India. *Outlook on Agriculture*, **29**(4), 259–268.

Agoumi, A., 2003: *Vulnerability of North African Countries to Climatic Changes: Adaptation and Implementation Strategies for Climatic Change,* IISD. http://www.cckn.net//pdf/north_africa.pdf.

Aguilar, E., T.C. Peterson, P. Ramírez Obando, R. Frutos, J.A. Retana, M. Solera, J. Soley, I. González García and co-authors, 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.

Alcamo, J. and T. Henrichs, 2002: Critical regions: a model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquat. Sci.*, **64**, 352-362.

Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch and S. Siebert, 2003a: Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 317–338.

Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch and S. Siebert, 2003b: Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 339–348.

Alcamo, J. and Co-authors, 2004: A new perspective on the impacts of climate change on Russian agriculture and water resources. *Proc. World Climate Change Conference*, 29 September–3 October, 2003, Moscow, 324–335.

Alcamo, J., M. Flörke and M. Marker, 2007: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic change. *Hydrol. Sci. J.*, **52**, 247–275.

Aldhous, P., 2004: Borneo is burning. *Nature*, **432**, 144–146.

Alexander, L.V., X. Zhang, T.C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A.M.G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D.B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J.L. Vazquez-Aguirre, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.

Allen Consulting Group, 2005: *Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an Efficient Adaptation Response in Australia*. Report to the Australian Greenhouse Office by the Allen Consulting Group, 159 pp. http://www.greenhouse.gov.au/impacts/publications/risk-vulnerability.html.

Alvarez, R., 2005: A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage. *Soil Use Manage.*, **21,** 38-52.

Álvarez Cobelas, M., J. Catalán and D. García de Jalón, 2005: Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático,* J.M. Moreno, Ed., Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 113–146.

Ames, A., 1998: A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. *Z. Glet. Glazialgeol.*, **34**(1), 1–26.

Andréasson, J., S. Bergström, B. Carlsson, L.P. Graham and G. Lindström, 2004: Hydrological change: climate impact simulations for Sweden. *Ambio*, **33**(4–5), 228–234.

Andreone, F., J.E. Cadle, N. Cox, F. Glaw, R.A. Nussbaum, C.J. Raxworthy, S.N. Stuart amd D. Vallan, 2005: Species review of amphibian extinction risks in Madagascar: conclusions from the Global Amphibian Assessment. *Conserv. Biol.*, **19**, 1790–1802.

Anisimov, O.A. and M.A. Belolutskaia, 2004: Predictive modelling of climate change impacts on permafrost: effects of vegetation. *Meteorol. Hydrol.*, **11**, 73–81.

Antle, J.M., S.M. Capalbo, E.T. Elliott and K.H. Paustian, 2004: Adaptation, spatial heterogeneity, and the vulnerability of agricultural systems to climate change and CO_2 fertilization: an integrated assessment approach. *Climatic Change*, **64**, 289-315.

Aparicio, M., 2000: *Vulnerabilidad y Adaptación a la Salud Humana ante los Efectos del Cambio Climático en Bolivia*. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Viceministerio de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Desarrollo Forestal. Programa Nacional de Cambios Climáticos. PNUD/GEF.

Arkell, B.P. and Darch, G.J.C., 2006: Impact of climate change on London's transport network. *Proc. Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, **159**(4), 231–237.

Arnell, N.W., 2003: Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain. *J. Hydrol.*, **270**, 195-213.

Arnell, N.W., 2004: Climate change and global water resources: SRES emissions and socio economic scenarios. *Global Environmen. Chang.*, **14**, 31–52.

Arnell, N.W., 2006a: Global impacts of abrupt climate change: an initial assessment. Working Paper 99, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, 37 pp.

Arnell, N.W., 2006b: Climate change and water resources: a global perspective. *Avoiding Dangerous Climate Change*, H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakićenović, T. Wigley and G. Yohe, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 167-175.

Arnell, N.W. and E.K. Delaney, 2006: Adapting to climate change: public water supply in England and Wales, *Climatic Change*, **78**, 227-255.

Arnell, N.W., M.J.L. Livermore, S. Kovats, P.E. Levy, R. Nicholls, M.L. Parry and S.R. Gaffin, 2004: Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines. *Global Environ. Chang.*, **14**, 3–20.

Ashton, P.J., 2002: Avoiding conflicts over Africa's water resources, *Ambio*, **31**(3), 236–242.

Attaher, S., M.A. Medany, A.A. Abdel Aziz and A. El-Gindy, 2006: Irrigation-water demands under current and future climate conditions in Egypt. *Misr. Journal of Agricultural Engineering*, **23**, 1077-1089.

Auer, I. and Co-authors, 2007: Histalp - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region 1760-2003. *Int. J. Climatol.*, **27**, 17-46.

Bachelet, D., R.P. Neilson, J.M. Lenihan and R.J. Drapek, 2001: Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States. *Ecosystems*, **4**, 164-185.

Baker, T.R., O.L. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, T. Erwin, N. Higuchi, and Co-authors, 2004: Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, **359**, 353–365.

Balmford, A., P. Crane, A. Dobson, R.E. Green and G.M. Mace, 2005: The 2010 challenge: data availability, information needs and extraterrestrial insights. *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, **360**, 221-228.

Barber, V.A., G.P. Juday and B.P. Finney, 2000: Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, **405**, 668-673.

Barnett, T.P., R. Malone, W. Pennell, D. Stammer, B. Semtner and W. Washington, 2004: The effects of climate change on water resources in the West: introduction and overview. *Climatic Change*, **62**, 1–11.

Barnett, T.P., J.C. Adam and D.P. Lettenmaier, 2005: Potential impacts of warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, **438**, 303–309.

Barras, J., S. Beville, D. Britsch, S. Hartley, S. Hawes, J. Johnston, P. Kemp, Q. Kinler, A. Martucci, J. Porthouse, D. Reed, K. Roy, S. Sapkota and J. Suhayda, 2003: *Historical and Projected Coastal Louisiana Land Changes: 1978–2050*. Open File Report 03-334. U.S. Geological Survey. 39 pp.

Barreira, A., 2004: *Dams in Europe. The Water Framework Directive and the World Commission on Dam Recommendations: A Legal and Policy Analysis*. http://assets.panda.org/downloads/wfddamsineurope.pdf

Basán Nickisch, M., 2002: Sistemas de captación y manejo de agua. Estación Experimental Santiago del Estero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. http://www.inta.gov.ar/santiago/info/documentos/agua/0001res_sistemas.htm.

Batima, P., 2003: Climate change: pasture–livestock. Synthesis Report. *Potential Impacts of Climate Change, Vulnerability and Adaptation Assessment for Grassland Ecosystem and Livestock Sector in Mongolia*. Admon Publishing, Ulaanbaatar, 36–47.

Batima, P., Batnasan N. and Lehner B., 2004: *The Freshwater Systems of Western Mongolia's Great Lakes Basin: Opportunities and Challenges in the Face of Climate Change*. Admon Publishing, Ulaanbaatar, 95 pp.

Batima, P., T. Ganbaatar, D. Tumerbaatar, B. Erdenetsetseg, B. Bolortsetseg, B. Gantsetseg, G. Sanjid and S. Khudulmur, 2005: Climate change impacts on environment. *Climate Change Impacts*, P. Batima and B. Bayasgalan, Eds., Admon Publishing, Ulaanbaatar, 59–115.

Bationo, A., S.P. Wani, C.L. Bielders, P.L.G. Velk and A.U. Mokwunye, 2000: Crop residues and fertilizer management to improve soil organic carbon content, soil quality and productivity in the desert margins of West Africa. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lweis Publishers, Boca Raton, FL, 117-146.

Bauder, E.T., 2005: The effects of an unpredictable precipitation regime on vernal pool hydrology. *Freshw. Biol.*, **50**, 2129–2135.

Beare, S. and A. Heaney, 2002: *Climate change and water resources in the Murray Darling Basin, Australia; impacts and adaptation*. Conference Paper 02.11, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, 33 pp. http://www.abarepublications.com/product.asp?prodid=12389.

Beaulieu, N. and M. Allard, 2003: The impact of climate change on an emerging coastline affected by discontinuous permafrost: Manitounuk Strait, northern Quebec. *Can. J. Earth Sci.*, **40**, 1393-1404.

Beck, C., J. Grieser and B. Rudolph, 2005: A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. DWD, *Klimastatusbericht 2004*, 181–190.

Beltaos, S. and Co-authors, 2006: Climatic effects on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta. *Hydrol. Process.,* **20**(19), 4031–4050.

Benhin, J.K.A., 2006: *Climate change and South African agriculture: impacts and adaptation options*. CEEPA Discussion Paper No.21. Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa. The Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 78 pp.

Beniston, M. and H.F. Díaz, 2004: The 2003 heatwave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global Planet. Change*, **44**, 73–81.

Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler and K. Woth, 2007: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change,* **81**(Suppl. 1), 71-95.

Berezovskaya, S., D.Q. Yang and L. Hinzman, 2005: Long-term annual water balance analysis of the Lena River. *Global Planet. Change*, **48**(1–3), 84–95.

Berger, T., J. Mendoza, B. Francou, F. Rojas, R. Fuertes, M. Flores, L. Noriega, C. Ramallo, E. Ramírez and H. Baldivieso, 2005: Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas y Meteorológicas, Año Hidrológico 2004-2005. *Informe Great Ice Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI-COBEE*, 171.

Berndes, G. and P. Börjesson, 2002: Multi-functional biomass production systems. http://www.brdisolutions.com/pdfs/bcota/abstracts/6/70.pdf.

Berndes, G., F. Fredrikson, and P. Borjesson, 2004: Cadmium accumulation and Salix-based phytoextraction on arable land in

Sweden. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **103**, 207-223.
Berthelot, M., P. Friedlingstein, P. Ciais, P. Monfray, J.L. Dufresen, H.L. Treut and L. Fairhead, 2002: Global response of the terrestrial biosphere and CO_2 and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochem. Cy.*, **16**, doi:10.1029/2001GB001827.
Betts, R.A., P.M. Cox, S.E. Lee and F.I. Woodward, 1997: Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*, **387**, 796–799.
Betts, R.A., O. Boucher, M. Collins, P.M. Cox, P.D. Falloon, N. Gedney, D.L. Hemming, C. Huntingford, C.D. Jones, D. Sexton and M. Webb, 2007: Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature,* **448**, 1037-1041.
Beuhler, M., 2003: Potential impacts of global warming on water resources in southern California. *Water Sci. Technol.*, **47**(7–8), 165–168.
Bhadra, B., 2002: Regional cooperation for sustainable development of Hindu Kush Himalaya region: opportunities and challenges. Keynote paper presented at *The Alpine Experience – An Approach for other Mountain Regions*, Berchtesgaden, Germany, June 26–29.
Bidegain, M., R.M. Caffera, F. Blixen, V.P. Shennikov, L.L. Lagomarsino, E.A. Forbes and G.J. Nagy, 2005: Tendencias climáticas, hidrológicas y oceanográficas en el Río de la Plata y costa Uruguaya. *El Cambio Climático en el Río de la Plata,* V. Barros A. Menéndez and G.J. Nagy, Eds., Proyectos AIACC, 137-143.
Bigio, A., 2003: Cities and climate change. *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*, A. Kreimer, M. Arnold and A. Carlin, Eds., World Bank, Washington, DC, 91-100.
Bindoff, N., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C.L. Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: oceanic climate change and sea level. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 385-432.
Blais, J.M., D.W. Schindler, D.C.G. Muir, M. Sharp, D. Donald, M. Lafreniere, E. Braekevelt and W. M.J. Strachan, 2001: Melting glaciers: a major source of persistent organochlorines to subalpine Bow Lake in Banff National Park, Canada. *Ambio*, **30**, 410-415.
Blythe, E.M., A.J. Dolman and J. Noilhan, 1994: The effect of forest on mesoscale rainfall: an example from HAPEX-MOBILHY. *J. Appl. Meteorol.,* **33**, 445-454.
Bobba, A., V. Singh, R. Berndtsson and L. Bengtsson, 2000: Numerical simulation of saltwater intrusion into Laccadive Island aquifers due to climate change. *J. Geol. Soc. India*, **55**, 589–612.
Bodaly, R.A., J.W.M. Rudd, R.J.P. Fudge and C.A. Kelly, 1993: Mercury concentrations in fish related to size of remote Canadian shield lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 980-987.
Bogaart, P.W. and R.T. van Balen, 2000: Numerical modeling of the response of alluvial rivers to Quaternary climatic change. *Global Planet. Change*, **27**, 124–141.
Bogoyavlenskiy, D. and A. Siggner, 2004: Arctic demography. *Arctic Human Development Report (AHDR),* N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute, Akureyri, 27–41.
Börjesson, P. and G. Berndes, 2006: The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, **30**, 428-438.
Bouma, M.J., 2003: Methodological problems and amendments to demonstrate effects of temperature on the epidemiology of malaria: a new perspective on the highland epidemics in Madagascar, 1972–1989. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.*, **97**, 133-139.
Bouraoui, F., B. Grizzetti, K. Granlund, S. Rekolainen and G. Bidoglio, 2004: Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment. *Climatic Change*, **66**, 109–126.
Boutkan, E. and A. Stikker, 2004: Enhanced water resource base for sustainable integrated water resource management. *Nat. Resour. Forum*, **28**, 150-154.
Bou-Zeid, E. and El-Fadel, M., 2002: Climate change and water resources in Lebanon and the Middle East. *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **128**(5), 343–355.
Box, J.E. and Co-authors, 2006: Greenland ice-sheet surface mass balance variability (1988-2004) from calibrated polar MM5 output. *J. Clim.*, **19**(12), 2783–2800.
Bradley, R.S., F.T. Keimig and H.F. Diaz, 2004: Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16210, doi:10.1029/2004GL020229.
Bradley, R.S., M. Vuille, H. Diaz and W. Vergara, 2006: Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, **312**, 1755-1756.
Braun, O., M. Lohmann, O. Maksimovic, M. Meyer, A. Merkovic, E. Messerschmidt, A. Reidel and M. Turner, 1999: Potential impact of climate change effects on preferences for tourism destinations: a psychological pilot study, *Clim. Res.*, **11**, 2477–2504.
Briers, R.A., J.H.R. Gee and R. Geoghegan, 2004: Effects of North Atlantic oscillation on growth and phenology of stream insects. *Ecography*, **27**, 811–817.
Brklacich, M., C. Bryant, B. Veenhof and A. Beauchesne, 1997: Implications of global climatic change for Canadian agriculture: a review and appraisal of research from 1984–1997. *Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, Environment Canada, Toronto, ON, 220–256.
Bromley, C.J. and S. Currie, 2003: Analysis of subsidence at Crown Road, Taupo: a consequence of declining groundwater. *Proc. 25th New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland University, 113-120.
Brouyere, S., G. Carabin and A. Dassargues, 2004: Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeol. J.*, **12**(2), 123–134.
Brown, R.A., N.J. Rosenberg, C.J. Hays, W.E. Easterling and L.O. Mearns, 2000: Potential production and environmental effects of switchgrass and traditional crops under current and greenhouse-altered climate in the central United States: a simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **78**, 31-47.
Brown, R.D. and R.O. Braaten, 1998: Spatial and temporal variability of Canadian monthly snow depths. *Atmos.-Ocean*, **36**, 37–54.
Bruinsma, J., 2003: *World Agriculture: Towards 2015/2030. An FAO Perspective*. Earthscan, London, 444 pp.
Brutsaert, W. and M.B. Parlange, 1998: Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, **396**, 30.
Bunn, S.E. and Arthington, A.H., 2002: Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environ. Manage.*, **30**, 492–507.
Burger, R.L., 1992: *Chavin and the Origins of Andean Civilization*. Thames and Hudson, London, 240 pp.
Burke, E.J., S.J. Brown, and N. Christidis, 2006: Modelling the recent evolution of global drought and projections for the 21 st century with the Hadley Centre climate model. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 1113–1125.
Burke, L. and J. Maidens, 2004: *Reefs at Risk in the Caribbean*. World Resources Institute, Washington, DC, 81 pp. http://archive.wri.org/publication_detail.cfm?pubid=3944.
Burke, L., E. Selig and M. Spalding, 2002: *Reefs at Risk in Southeast Asia*. World Resources Institute, Washington DC, 37 pp. http://www.wri.org/biodiv/pubs_description.cfm?PubID=3144.
Burkett, V.R. and J. Kusler, 2000: Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, **36**, 313–320.

Burkett, V.R., D.A. Wilcox, R. Stottlemeyer, W. Barrow, D. Fagre, J. Baron, J. Price, J. Nielsen, C.D. Allen, D.L. Peterson, G. Ruggerone amd T. Doyle, 2005: Nonlinear dynamics in ecosystem response to climate change: case studies and policy implications. *Ecological Complexity*, **2**, 357–394.

Buttle, J., J.T. Muir and J. Frain, 2004: Economic impacts of climate change on the Canadian Great Lakes hydro-electric power producers: a supply analysis. *Can. Water Resour. J.*, **29**, 89–109.

Calder, I.R., 1990: *Evaporation in the Uplands*. John Wiley and Sons, Chichester, 148 pp.

Calder, I.R., 1992: Water use of eucalyptus – a review. *Growth and Water Use of Forest Plantations,* I.R. Calder, R.L. Hall and P.G. Adlard, Eds., John Wiley and Sons, Chichester, 167-179.

Caldwell, C.R., S.J. Britz and R.M. Mirecki, 2005: Effect of temperature, elevated carbon dioxide, and drought during seed development on the isoflavone content of dwarf soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] grown in controlled environments. *J. Agr. Food Chem.*, **53**(4), 1125–1129.

California Regional Assessment Group, 2002: *The Potential Consequences of Climate Variability and Change for California: The California Regional Assessment*. National Center for Ecological Analysis and Synthesis, University of California Santa Barbara, Santa Barbara, California, 432 pp. http://www.ncgia.ucsb.edu/pubs/CA_Report.pdf.

Callaghan, T.V., L.O. Björn, F.S. Chapin III, Y. Chernov, T.R. Christensen, B. Huntley, R. Ims, M. Johansson, D.J. Riedlinger, S. Jonasson, N. Matveyeva, W. Oechel, N. Panikov and G. Shaver, 2005: Arctic tundra and polar desert ecosystems. *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA): Scientific Report*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 243-352.

Camilloni, I., 2005: Tendencias climáticas. *El Cambio Climático en el Río de la Plata*, V. Barros, A. Menéndez and G.J. Nagy, Eds., CIMA/CONICET-UBA, Buenos Aires, 13-19.

Canziani, O.F. and L.J. Mata, 2004: The fate of indigenous communities under climate change. UNFCCC Workshop on impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. *Tenth Session of the Conference of Parties (COP-10)*, Buenos Aires, 3 pp.

Caran, S.C. and J.A. Nelly, 2006: Hydraulic engineering in prehistoric Mexico. *Sci. Am. Mag.*, **October**, 8 pp.

Carey, M., 2005: Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global Planet. Change*, **47**, 122-134.

Cassman, K.G., A. Dobermann, D.T. Walters and H. Yang, 2003: Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **28**, 315-358.

CCME, 2003: *Climate, Nature, People: Indicators of Canada's Changing Climate*. Climate Change Indicators Task Group of the Canadian Council of Ministers of the Environment, Canadian Council of Ministers of the Environment Inc., Winnipeg, Canada, 51 pp.

CDC (Centers for Disease Control), 2005: Vibrio illnesses after Hurricane Katrina: multiple states, August–September 2005. *MMWR–Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, **54**, 928-931.

Census Bureau, 2004: *(U. S. Census Bureau), NP-T1. Annual Projections of the Total Resident Population as of July 1: Middle, Lowest, Highest, and Zero International Migration Series, 1999 to 2100*. Population Division, U.S. Census Bureau, Washington, D.C. 20233, Washington DC. http://www.census.gov/population/projections/nation/summary/np-t1.txt.

Cerri, C.C., M. Bernoux, C.E.P. Cerri and C. Feller, 2004: Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. *Soil Use Manage.*, **20,** 248-254.

Chan, N.W., 1986: Drought trends in northwestern peninsular Malaysia: is less rain falling? *Wallaceana*, **4**, 8-9.

Chang, H., C.G. Knight, M.P. Staneva and D. Kostov, 2002: Water resource impacts of climate change in southwestern Bulgaria. *GeoJournal*, **57**, 159–168.

Changnon, S.A., 2005: Economic impacts of climate conditions in the United States: past, present, and future – an editorial essay. *Climatic Change*, **68**, 1–9.

Changnon, S.A. and D. Changnon, 2000: Long-term fluctuations in hail incidences in the United States. *J. Climate*, **13**, 658–664.

Chappell, A. and C.T. Agnew 2004: Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931–90) as an artifact of changing station locations. *Int. J. Clim.*, **24**(5), 547–554.

Chattopadhyay, N. and M. Hulme, 1997: Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agric. For. Meteorol.*, **87**, 55–73.

Chauhan, M. and B. Gopal, 2001: Biodiversity and management of Keoladeo National Park (India): a wetland of international importance. *Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation*. Volume 2. Backhuys Publishers, Leiden, 217–256.

Checkley, W., L.D. Epstein, R.H. Gilman, D. Figueroa, R.I. Cama, J.A. Patz and R.E. Black, 2000: Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *Lancet*, **355**, 442–450.

Cheikh, N., P.W. Miller and G. Kishore, 2000: Role of biotechnology in crop productivity in a changing environment. *Global Change and Crop Productivity*, K.R. Reddy and H.F. Hodges, Eds., CAP International, New York, 425-436.

Chen, C., D. Gillig and B.A. McCarl, 2001: Effects of climatic change on a water dependent regional economy: a study of the Texas Edwards Aquifer. *Climatic Change*, **49**, 397–409.

Chen, M., P. Xie, and J.E. Janowiak, 2002: Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 249–266.

Chen, Z., S. Grasby and K. Osadetz, 2004: Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *J. Hydrol.*, **290**(1–2), 43–62.

Chiew, F.H.S., T.I. Harrold, L. Siriwardenena, R.N. Jones and R. Srikanthan, 2003: Simulation of climate change impact on runoff using rainfall scenarios that consider daily patterns of change from GCMs. *MODSIM 2003: Proc. International Congress on Modelling and Simulation*, D.A. Post, Ed., Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra ACT, Townsville, 154–159.

Choi, O. and A. Fisher, 2003: The impacts of socioeconomic development and climate change on severe weather catastrophe losses: Mid-Atlantic Region MAR and the U.S. *Climatic Change*, **58**(1–2), 149–170.

Chomitz, K.M. and K. Kumari, 1996: *The domestic benefits of tropical forests: a critical review emphasizing hydrological functions*. Policy Research Working Paper, World-Bank, No. WPS1601, 41 pp.

Christensen, J.H. and O.B. Christensen, 2003: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, **421**, 805.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Koli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V.M. Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 847-940.

Christensen, N.S., A.W. Wood, N. Voisin, D.P. Lettenmaier and R.N. Palmer, 2004: The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, **62**(1–3), 337–363.

Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, et al., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**, 529–533.

City of New York, 2005: New York City's Water Supply System. The City of New York Department of Environmental Protection, New York, New York. http://www.ci.nyc.ny.us/html/dep/html/watersup.html.

Clark, M.E., K.A. Rose, D.A. Levine and W.W. Hargrove, 2001: Predicting climate change effects on Appalachian trout: combining GIS and individual-based modeling. *Ecol. Appl.*, **11**, 161-178.

Clarke, R. and J. King, 2004: *The Atlas of Water*. Earthscan, London, 128 pp.

Cohen, S., D. Neilsen and R. Welbourn, Eds., 2004: *Expanding the dialogue on climate change and water management in the Okanagan Basin, British Columbia*. Final Report 1 January 2002 to 30 June 2004. http://www.ires.ubc.ca/aird/documents/Okanagan2004-final.pdf.

Cohen, S.J., R. de Loë, A. Hamlet, R. Herrington, L.D. Mortsch and D. Shrubsole, 2003: *Integrated and cumulative threats to water availability. Threats to Water Availability in Canada*. National Water Research Institute, Burlington, Ontario, 117-127. http://www.nwri.ca/threats2full/ThreatsEN_03web.pdf.

COHIFE, 2003: Principios rectores de Política Hídrica de la República Argentina. *Acuerdo Federal del Agua, Consejo Hídrico Federal*, COHIFE 8, August 2003, Argentina.

Cole, C.V., K. Flach, J. Lee, D. Sauerbeck and B. Stewart, 1993: Agricultural sources and sinks of carbon. *Water Air Soil Poll.,* **70**, 111-122.

Coleman, J.M. and O.K. Huh, 2004: *Major World Deltas: A Perspective fromSpace*. Coastal Studies Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana. http://www.geol.lsu.edu/WDD/PUBLICATIONS/introduction.htm

Compton, K., T. Ermolieva, and J.C. Linnerooth-Bayer, 2002: Integrated Disaster Risk Management: Megacity Vulnerability and Resilience, *Proc. Second Annual IIASA-DPRI Meeting*, IIASA Laxenburg, 20 pp.

Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villareal and C. Gay, 1997: Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Clim. Res.*, **9**, 17–23.

Conway, D., 2005: From headwater tributaries to international river: observing and adapting to climate variability and change in the Nile basin. *Global Environ. Chang.*, **15**, 99–114.

Cook, E.R., R.D. D'Arrigo and M.E. Mann, 2002: A well-verified, multiproxy reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index since A.D. 1400. *J. Clim.*, **15**, 1754–1764.

Cortazar, P.F., 1968: Documental del Perú, Departamento del Cusco, S.A. Ioppe. Ed., February 1968.

Cosgrove, W., R. Connor and J. Kuylenstierna, 2004: Workshop 3 (synthesis): climate variability, water systems and management options. *Water Sci. Techn.*, **7**, 129–132.

Coudrain, A., B. Francou and Z.W. Kundzewicz, 2005: Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources: Editorial. *Hydrol. Sci. J.*, **50**(6), 925–932.

Crabbe, P. and M. Robin, 2006: Institutional adaptation of water resource infrastructures to climate change in Eastern Ontario. *Climatic Change*, **78**(1), 103–133.

Craig, M.H., I. Kleinschmidt, D. Le Sueur and B.L. Sharp, 2004: Exploring thirty years of malaria case data in KwaZulu-Natal, South Africa. Part II. The impact of non-climatic factors. *Trop. Med. Int. Health*, **9**, 1258-1266.

Cross, J., 2001: Megacities and small towns: different perspectives on hazard vulnerability. *Environmental Hazards*, **3**, 63–80.

CTIC, 1998: *17th Annual Crop Residue Management Survey Report*. Conservation Technology Information Center, West Lafayette, IN. http://www.ctic.purdue.edu.

Cullen, P., 2002: Living with water: sustainability in a dry land. *Adelaide Festival of Arts, Getting it Right Symposium, 1–12 March, 2002*.

Curriero, F., J.A. Patz, J.B. Rose and S. Lele, 2001: The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948–1994. *Am. J. Public Health*, **91**, 1194–1199.

Cury, P. and L. Shannon, 2004: Regime shifts in upwelling ecosystems: observed changes and possible mechanisms in the northern and southern Benguela. *Prog. Oceanogr.*, **60**, 223–243.

CWC (Central Water Commission), 2001: *Water and related statistics*, Report of the Ministry of Water Resources, New Delhi.

DAFF, 2006a: *National Water Initiative*. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Australia. http://www.pmc.gov.au/water_reform/nwi.cfm.

DAFF, 2006b: Contours. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 24 pp. http://www.daff.gov.au/__data/assets/pdf_file/0020/98201/contours-dec-06.pdf.

Dai, A. and K.E. Trenberth, 2002: Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 660–687.

Dai, A., P.J. Lamb, K.E. Trenberth, M. Hulme, P.D. Jones and P. Xie, 2004a: The recent Sahel drought is real. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1323—1331.

Dai, A., K.E. Trenberth and T. Qian, 2004b: A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 1117–1130.

Dalal, R.C., W. Wang, G.P. Robertson and W.J. Parton, 2003: Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian J. Soil Res.*, **41**, 165-195.

Dang, H.H., A. Michaelowa and D.D. Tuan, 2003: Synergy of adaptation and mitigation strategies in the context of sustainable development: the case of Vietnam. *Clim. Policy*, **3**, S81-S96.

DaSilva, J., B. Garanganga, V. Teveredzi, S. Marx, S. Mason and S. Connor, 2004: Improving epidemic malaria planning, preparedness and response in Southern Africa. *Malaria J.*, **3**, 37.

Davis, J.R., Ed., 1997: *Managing Algal Blooms. Outcomes from CSIRO's Multi-Divisional Blue-Green Algae Program*. CSIRO Land and Water, Canberra, 113 pp.

de Wit, M. and J. Stankiewicz, 2006: Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science Express*, doi:10.1126/science.1119929. http://www.scienceexpress.org.

Declerck, S., J. Vandekerkhove, L.S. Johansson, K. Muylaert, J.M. Conde-Porcuna, K. van der Gucht, C. Pérez-Martínez, T.L. Lauridsen, K. Schwenk, G. Zwart, W. Rommens, J. López-Ramos, E. Jeppesen, W. Vyverman, L. Brendonck and L. de Meester, 2005: Multi-group biodiversity in shallow lakes along gradients of phosphorus and water plant cover. *Ecology*, **86**, 1905–1915.

Delworth, T.L. and M.E. Mann, 2000: Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, **16**, 661–676.

Dessai, S., X. Lu and J.S. Risbey, 2005: On the role of climate scenarios for adaptation planning. *Global Environ. Chang.*, **15**, 87–97.

DEUS, 2006: *NSW Government Water Savings Fund*. Department of Energy, Utilities and Sustainability, 17 pp. http://www.deus.nsw.gov.au/Publications/WaterSavingsFundR3Guide.pdf.

Dias de Oliveira, M.E., B.E. Vaughan, and E.J. Rykiel, Jr., 2005: Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *BioScience*, **55**, 593-602.

Diaz-Nieto, J. and R. Wilby, 2005: A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impact on low flows in the river Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, **69**, 245–268.

Dinesh Kumar, P.K., 2006: Potential vulnerability implications of sea level rise for the coastal zones of Cochin, southwest coast of India. *Environ. Monit. Assess.*, **123**, 333–344.

DNPC, 2005/2006: Informe de las lluvias caídas en Venezuela en los meses de Febrero y marzo de 2005 y Febrero 2006. Dirección Nacional de Protección Civil, República Bolivariana de Venezuela.

Döll, P., 2002: Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, **54**, 269–293.

Döll, P. and M. Flörke, 2005: Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. *Frankfurt Hydrology Paper 03*, Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Frankfurt.

Döll, P., M. Flörke, M. Mörker and S. Vassolo, 2003: Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen und Bewässerungswasserbedarf: eine globale Analyse unter Berücksichtigung neuer Klimaszenarien (Impact of climate change on water resources and irrigation water requirements: a global analysis using new climate change scenarios). *Klima–Wasser–Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut*, H.-B. Kleeberg, Ed., *Proc. Tag der Hydrologie 2003 in Freiburg, Germany, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung,* 11–14.

Donevska, K. and S. Dodeva, 2004: Adaptation measures for water resources management in case of drought periods. *Proc. XXIInd Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004, CD-edition.

Doran, P.T. and Co-authors, 2002: Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. *Nature*, **415**, 517–520.

Dore, M. and I. Burton, 2001: *The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada: A Stratified Estimate by Sectors and Regions – Social Infrastructure*. Climate Change Laboratory, Brock University, St Catharines, ON, 117 pp.

Douglas, E.M., R.M. Vogel and C.N. Kroll, 2000: Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.*, **240**(1–2), 90–105.

Dourojeanni, A., 2000: *Procedimientos de Gestión para el Desarrollo Sustentable*. ECLAC, Santiago, 376 pp.

Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, J.F. Royer, D. Salas-Melia and S. Tyteca, 2002: Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Clim. Dyn.*, **20**, 45–68.

Downing, T.E., R.E. Butterfield, B. Edmonds, J.W. Knox, S. Moss, B.S. Piper, E.K. Weatherhead and the CCDeW Project Team, 2003: *Climate change and the demand for water, Research Report*. Stockholm Environment Institute, Oxford Office, Oxford.

DPMC, 2004: *Water Reform*. Department of Prime Minister and Cabinet, Australia. http://www.dpmc.gov.au/nwi/index.cfm.

Drennen, P.M., M. Smith, D. Goldsworthy and J. van Staten, 1993: The occurrence of trahaolose in the leaves of the desiccation-tolerant angiosperm *Myronthamnus flabellifoliius* Welw. *J. Plant Physiol.*, **142**, 493-496.

du Plessis, C., D.K. Irurah and R.J. Scholes, 2003: The built environment and climate change in South Africa. *Build. Res. Inf.*, **31**(3–4), 240–256.

Duguay, C.R. and Co-authors, 2003: Ice-cover variability on shallow lakes at high latitudes: model simulations and observations. *Hydrol. Process.*, **17**, 3465–3483.

Duong, L.C., 2000: Lessons from severe tropical storm Linda, Workshop Report: "The Impact of El Niño and La Niña on Southeast Asia", 21–23 February, Hanoi.

Dwight, R.H., J.C. Semenza, D.B. Baker and B.H. Olson, 2002: Association of urban runoff with coastal water quality in Orange County, California. *Water Environ. Res.*, **74**, 82-90.

Dyurgerov, M. and M.F. Meier, 2005: *Glaciers and Changing Earth System: A 2004 Snapshot*. 58, INSTAAR, Boulder, CO.

Dyurgerov, M.B. and C.L. Carter, 2004: Observational evidence of increases in freshwater inflow to the Arctic Ocean. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **36**(1), 117–122.

Eakin, H. and M.C. Lemos, 2006: Adaptation and the state: Latin America and the challenge of capacity – building under globalization. *Global Environ. Chang.*, **16**, 7–18.

Easterling, W.E., 2003: Observed impact of climate change in agriculture and forestry. *IPCC Workshop on the Detection and Attribution of the Effects of Climate Change*, GISS, New York, 54-55.

Ebi, K.L., D.M. Mills, J.B. Smith and A. Grambsch, 2006: Climate change and human health impacts in the United States: an update on the results of the US National Assessment. *Environ. Health Persp.*, **114**(9), 1318–1324

ECF (European Climate Forum) and Potsdam Institute, 2004: *Report on the Beijing Symposium on Article 2*, September, 2004.

Eckhardt, K. and U. Ulbrich, 2003: Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *J. Hydrol.*, **284**(1–4), 244–252.

EEA, 2004: *Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment*. EEA Report No 2/2004, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark (or: Luxembourg, Office for Official Publications of the EC), 107 pp.

EEA, 2005: *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. EEA Technical Report No. 7/2005, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark (or: Luxembourg, Office for Official Publications of the EC).

Eheart, J.W. and D.W. Tornil, 1999: Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural Midwest under various climate change scenarios. *Water Resour. Res.*, **35**, 2237–2246.

Eid, H.M., S.M. El-Marsafawy and S.A. Ouda, 2006: *Assessing the Impacts of Climate Change on Agriculture in Egypt: a Ricardian Approach*. Centre for Environmental Economics and Policy in Africa (CEEPA) Discussion Paper No. 16, Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 1-33.

Eisenreich, S.J., Ed., 2005: *Climate Change and the European Water Dimension*. Report to the European Water Directors. European Commission-Joint Research Centre, Ispra, 253 pp.

Eitzinger, J., M. Stastna, Z. Zalud and M. Dubrovsky, 2003: A simulation study of the effect of soil water balance and water stress in winter wheat production under different climate change scenarios. *Agric. Water Manage.,* **61**, 195-217.

El-Gindy, A., A.A. Abdel Azziz and E.A. El-Sahaar, 2001: *Design of Irrigation and Drainage Networks*. Faculty of Agriculture lectures, Ain Shams University, 28 pp (in Arabic).

Ellis, J., 1995: Climate variability and complex ecosystem dynamics; implications for pastoral development. *Living with Uncertainty: New Directions in Pastoral Development in Africa*, I. Scoones, Ed., Intermediate Technology Publications, London, 37-46.

Elpiner**,** L.I., 2004: Scenarios of human health changes under global hydroclimatic transformations. *Proc. Climate Change and Public Health in Russia in the XXI Century.* April 5–6, 2004, Publishing Company "Adamant", Moscow, 195–199 (in Russian).

Elsasser, H. and R. Burki, 2002: Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Clim. Res.*, **20**, 253–257.

Elsasser, H., R. Bürki and B. Abegg, 2003: *Fifth World Conference on Sport and the Environment*, IOC/UNEP, Turin. http://www.unep.org/sport_env/Documents/torinobuerki.doc.

Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nuñez and P.J Trimble, 2001: The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2077–2080.

Environment Canada, 2001: *Threats to sources of drinking water and aquatic ecosystems health in Canada. National Water Research Report No.1*. National Water Resources Research Institute, Burlington, Ontario, 72 pp.

EPIQ (Environmental Policy and Institutional Strengthening Indefinite

Quantity, Water Policy Reform Activity, Agricultural Policy Reform Programme and Market-Based Incentives Team), 2002: Economic Instruments for Improved Water Resources Management in Egypt, Prepared for the United States Agency for International Development/Egypt, No. PCE-I-00-96-00002-00, 173 pp.

Ericson, J.P., C.J. Vorosmarty, S.L. Dingman, L.G. Ward and M. Meybeck, 2006: Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global Planet. Change*, **50**, 63–82.

Etchevers, P., C. Golaz, F. Habets and J. Noilhan, 2002: Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4293, doi:10.1029/2001JD000490.

Evans, E., R. Ashley, J. Hall, E. Penning-Rowsell, A. Saul, P. Sayers, C. Thorne and A. Watkinson, 2004: *Foresight. Future Flooding. Scientific Summary: Volume 1. Future Risks and their Drivers*. Office of Science and Technology, London.

Falconer, I.R., 1997: Blue-green algae in lakes and rivers: their harmful effects on human health. *Australian Biologist*, **10**(2), 107–110.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2003: *World Agriculture Towards 2015/2030*. http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/004/y3557e/y3557e00.htm.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2004a: *Yearbook of Fishery Statistics 2002*. Capture Production, Vol. 94/1, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 654 pp.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2004b: *Yearbook of Fishery Statistics 2002*, Aquaculture production, Vol. 94/2, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 206 pp.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2004c: *Data Base*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2006: Third Session of the Sub-Committee on Aquaculture: Committee on Fisheries (COFI). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), New Delhi, India, 4-8 September.

Faruqui, N.I., A.K. Biswas and M.J. Bino, Eds., 2001: *Water Management in Islam*. United Nations University Press, Tokyo, 149 pp.

Fay, M., F. Ghesquiere and T. Solo, 2003b: Natural disasters and the urban poor. *IRDB En Breve,* **32**, The World Bank, 4 pp.

Fay, P.A., J.D. Carlisle, A.K. Knapp, J.M. Blair and S.L. Collins, 2003a: Productivity responses to altered rainfall patterns in a C-4-dominated grassland. *Oecologia*, **137**(2), 245–251.

Fedorov, A. and P. Konstantinov, 2003: Observations of surface dynamics with thermokarst initiation, Yukechi site, Central Yakutia. *Proc. VII International Permafrost Conference*, Switzerland, 21–25 July, 139–243.

Feng, S. and Q. Hu, 2004: Changes in agro-meteorological indicators in the contiguous United States: 1951-2000. *Theor. Appl. Climatol.*, **78**, 247-264.

Ferguson, G. and S.S. George, 2003: Historical and estimated ground water levels near Winnipeg, Canada and their sensitivity to climatic variability. *J. Am. Water Resour. As.*, **39**, 1249-1259.

Fink, A.H., T. Brücher, A. Krüger, G.C. Leckebusch, J.G. Pinto, and U. Ulbrich, 2004: The 2003 European summer heatwaves and drought: synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, **59**, 209–216.

Fischer, G., M. Shah and H.V. Velthuizen, 2002a: *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 152 pp.

Fischer, G., H. van Velthuizen, M. Shah and F.O. Nachtergaele, 2002b: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. Research Report RR-02-02. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, 119 pp and CD-Rom.

Fischer, G., F.N. Tubiello, H. van Velthuizen and D. Wiberg, 2006: Climate change impacts on irrigation water requirements: global and regional effects of mitigation, 1990–2080. *Tech. Forecasting Soc. Ch.,* **74,** doi:10.1016/j.techfore.2006.05.021.

Fish, M.R., I.M. Cote, J.A. Gill, A.P. Jones, S. Renshoff and A. Watkinson, 2005: Predicting the impact of sea level rise on Caribbean sea turtle nesting habitat. *Conserv. Biol.*, **19**(2), 482–491.

Fleury, M.D., D. Charron, J. Holt, B. Allen and A. Maarouf, 2006: The role of ambient temperature in foodborne disease in Canada using time series methods *Int. J. Biometeorol.*, **50**, doi:10.1007/s00484-00006-00028-00489.

Folland, C. K., J.A. Renwick, M.J. Salinger, N. Jiang and N.A. Rayner, 2003: Trends and variations in South Pacific islands and ocean surface temperatures. *J. Climate*, **16**, 2859–2874.

Follett, R.F., 2001: Organic carbon pools in grazing land soils. *The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. R.F. Follett, J.M. Kimble and R. Lal, Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 65-86.

Fosaa, A.M., M.T. Sykes, J.E. Lawesson and M. Gaard, 2004: Potential effects of climate change on plant species in the Faroe Islands, *Global Ecol. Biogeogr.*, **13**, 427–437.

Francou, B. and C. Vincent, 2006: Les glaciers à l'épreuve du climat. IRD/BELIN, Paris, 274 pp.

Francou, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza and J.-E. Sicart, 2003: Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JD002959.

Frauenfeld, O.W., T. Zhang, R.G. Barry and D. Gilichinsky, 2004: Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD004245.

Freibauer, A., M. Rounsevell, P. Smith and A. Verhagen, 2004: Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma,* **122**, 1-23.

Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G.K. Tank and T. Peterson, 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, **19**, 193–212.

Frolov, I., G. Alekseev and A. Danilov, 2004: Climate change in polar areas. *Proc. World Climate Change Conference*, Moscow, 29 September–3 October 2003, 484–490.

Fukushima, Y., 1987: Influence of forestation on mountainside at granite highlands. *Water Sci.*, **177**, 17-34.

Gagnon, A.S., K.E. Smoyer-Tomic and A. Bush, 2002: The El Niño Southern Oscillation and malaria epidemics in South America. *Int. J. Biometeorol.*, **46**, 81-89.

Gallagher, P. and L. Wood, 2003: *Proc. World Summit on Salmon*, June 10-13, 2003, Vancouver, British Columbia. http://www.sfu.ca/cstudies/science/summit.htm.

Gardner, T.A., I. Cote, G. Gill, A. Grant and A. Watkinson, 2003: Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, **301**, 958–960.

Gash, J.H.C. and W.J. Shuttleworth, 1991: Tropical deforestation: albedo and the surface energy balance. *Climatic Change*, **19**, 123-133.

Gavriliev, P.P. and P.V. Efremov, 2003: Effects of cryogenic processes on Yakutian landscapes under climate warming. *Proc. VII International Permafrost Conference*, Switzerland, 21–25 July, 277–282.

GDE (General Directorate of Environment, Comoros), 2002: *Initial National Communication on Climate Change*, Union des Comoros, Ministry of Development, Infrastructure, Post and Telecommunications.

Gedney, N., P.M. Cox, R.A. Betts, O. Boucher, C. Huntingford and P.A. Stott, 2006: Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, **439**(7078), 835–838.

Genovese, G., C. Lazar and F. Micale, 2005: Effects of observed climate fluctuation on wheat flowering as simulated by the European

crop growth monitoring system (CGMS). *Proc. Workshop on Adaptation of Crops and Cropping Systems to Climate Change, 7-8 November 2005, Dalum Landbrugsskole, Odense, Denmark*. Nordic Association of Agricultural Scientists, 12 pp.

Genthon, C., G. Krinner and M. Sacchettini, 2003: Interannual Antarctic tropospheric circulation and precipitation variability. *Clim. Dyn.*, **21**, 289–307.

GEO-3, 2003: *Global Environmental Outlook*. United Nations Environmental Program, 279 pp. http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO__lac2003English.pdf.

Georges, C., 2004: The 20th century glacier fluctuations in the Cordillera Blanca (Perú). *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **36**(1), 100–107.

Geres, D., 2004: Analysis of the water demand management. *Proc. XXII Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004. CD-edition.

Gerolomo, M. and M.F. Penna, 1999: Os primeiros cinco anos da setima pandemia de cólera no Brasil. *Informe Epid. SUS*, **8**(3), 49–58.

Gerten, D., S. Schaphoff, U. Haberlandt, W. Lucht and S. Sitch, 2004: Terrestrial vegetation and water balance: hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *J. Hydrol.*, **286**(1–4), 249–270.

Gibson, J.J., T.D. Prowse and D.L. Peters, 2006: Partitioning impacts of climate and regulation on water level variability in Great Slave Lake. *J. Hydrol.*, **329**, 196-206.

Gilman, E., H. Van Lavieren, J. Ellison, V. Jungblut, L. Wilson, F.Ereki, G. Brighouse, J. Bungitak, E. Dus, M. Henry, I. Sauni, M. Kilman, E. Matthews, N.Teariki-Ruatu, S. Tukia, K. Yuknavage, 2006: Pacific island mangroves in a changing climate and rising sea. *UNEP Regional Sea Reports and Studies,* **179**, United Nations Environment Programme, Regional Sea 44 Programme, Nairobi, 45 pp.

Giorgi, F., X. Bi and J. Pal, 2004: Mean, interannual variability and trend in a regional climate change experiment over Europe. II: Climate change scenarios 2071–2100. *Clim. Dyn.,* **23,** doi:10.1007/s00382-004-0467-0.

Gitay, H., S. Brown, W. Easterling and B. Jallow, 2001: Ecosystems and their goods and services. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 237-342.

Gitay, H., A. Suárez, R.T. Watson and D.J. Dokken, Eds., 2002: *Climate Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper V, IPCC, Geneva, 85 pp.

Githeko, A.K. and W. Ndegwa, 2001: Predicting malaria epidemics in Kenyan highlands using climate data: a tool for decision makers. *Global Change Human Health*, **2**, 54-63.

Glantz, M.H., Ed., 2001: *Once Burned, Twice Shy? Lessons Learned from the 1997–98 El Niño*, United Nations University, 294 pp.

Gnadlinger, J., 2003: *Captação e Manejo de Água de Chuva e Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido Brasileiro - Uma Visão Integrada,* 4º Simpósio Brasileiro de captação e Manejo de água de chuva. 9-12/07/2003. Juazeiro, BA, 2003.

Goldenberg, S.B. and Co-authors, 2001: The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, **293**, 474–479.

Golubev, V.S. and Co-authors, 2001: Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2665–2668.

Gonzalez, P., 2001. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Clim. Res.*, **17**, 217–228

Good, P., L. Bärring, C. Giannakopoulos, T. Holt and J. Palutikof, 2006: Non-linear regional relationships between climate extremes and annual mean temperatures in model projections for 1961-2099 over Europe. *Clim. Res.*, **31**, 19–34.

Gordon, W. and J.S. Famiglietti, 2004: Response of the water balance to climate change in the United States over the 20th and 21st centuries: results from the VEMAP phase 2 model intercomparisons. *Global Biogeochem. Cy.*, **181**, GB1030.

Gorham, E., 1991: Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecol. Appl.*, **1**, 182–195.

Government of South Australia, 2005: *Water Proofing Adelaide: A Thirst for Change 2005–2025*. Government of SA, 64 pp. http://www.waterproofingadelaide.sa.gov.au/pdf/wpa_Strategy.pdf.

Government of Western Australia, 2003: *Securing our Water Future: A State Water Strategy for Western Australia*. Government of WA, 64 pp. http://dows.lincdigital.com.au/files/State_Water_Strategy_complete_001.pdf.

Government of Western Australia, 2006: *Draft State Water Plan*. Government of WA, 88 pp. http://dows.lincdigital.com.au/files/Draft%20State%20Water%20Plan.pdf.

Graham, N.A.J., S.K. Wilson, S. Jennings, N.V.C. Polunin, J.P. Bijoux and J. Robinson, 2006: Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 8425–8429.

Graves, H. M. and M. C. Phillipson, 2000: Potential implications of climate change in the built environment. *FBE Report* **2**. Building Research Establishment Press, London, 74 pp.

Green, R.E., S.J. Cornell, J.P.W. Scharlemann and A. Balmford, 2005: Farming and the fate of wild nature. *Science*, **307**, 550-555.

Greenwood, E.A.N., L.B. Klein, J.D. Beresford and G.D. Watson, 1985: Differences in annual evaporation between grazed pasture and eucalyptus species in plantation on a saline farm catchment. *J. Hydrol.*, **78**, 261-278.

Gregorich, E.G., P. Rochette, A.J. van den Bygaart and D.A. Angers, 2005: Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Res.*, **83**, 53-72.

Griffiths, G.M., M.J. Salinger and I. Leleu, 2003: Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *J. Climatol.*, **23**, 847–869.

Gritti, E.S., B. Smith and M.T. Sykes., 2006: Vulnerability of Mediterranean Basin ecosystems to climate change and invasion by exotic plant species. *J. Biogeogr.*, **33**, 145–157.

Groisman, P.Y., R.W. Knight, T.R. Karl, D.R. Easterling, B. Sun and J.H. Lawrimore, 2004: Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: trends derived from *in situ* observations. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 64–85.

Groisman, P.Y. and Co-authors, 2005: Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.*, 18, 1326–1350.

Gruza, G. and E. Rankova, 2004: Detection of changes in climate state, climate variability and climate extremity, in *Proc. World Climate Change Conference*, 29 September–3 October, 2003, Moscow, 90–93.

Gueye, L., M. Bzioul and O. Johnson, 2005: Water and sustainable development in the countries of Northern Africa: coping with challenges and scarcity. *Assessing Sustainable Development in Africa*, Africa's Sustainable Development Bulletin, Economic Commission for Africa, Addis Ababa, 24-28.

Guo, Q.X., J.L. Li, J.X. Liu and Y.M. Zhang, 2001: The scientific significance of the forest vegetation ecotone between Daxing'an and Xiaoxing'an Mountains to global climate change study. *J. Forestry, Northeast University*, **29**(5), 1–4.

Gupta, S.K. and R.D. Deshpande, 2004: Water for India in 2050: first-order assessment of available options. *Current Sci.*, **86**(9), 1216–1224.

Gutiérrez Teira, B., 2003: Variaciones de las comunidades y poblaciones de macroinvertebrados del tramo alto del río manzanares a causa de la temperatura. Posibles efectos del cambio climático. *Tesis*

Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

GWP (Global Water Partnership), 2002: *Dialogue on Effective Water Governance*, GWP, 6 pp.

Haeberli, W. and C. Burn, 2002: Natural hazards in forests - glacier and permafrost effects as related to climate changes. *Environmental Change and Geomorphic Hazards in Forests,* R.C. Sidle, Ed., IUFRO Research Series, 9, 167-202.

Hales S., N. de Wett, J. Maindonald and A. Woodward, 2002: Potential effect of population and climates change models on global distribution of dengue fever: an empirical model. *Lancet*, **360**, 830-834.

Hall, C.J. and C.W. Burns, 2002: Mortality and growth responses of *Daphnia carinata* to increases in temperature and salinity. *Freshw. Biol*., **47**, 451–458.

Hall, G., R. D'Souza and M. Kirk, 2002: Foodborne disease in the new millennium: out of the frying pan and into the fire? *Med. J. Australia*, **177**, 614-618.

Hall, J.W., P.B. Sayers and R.J. Dawson, 2005: National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales. *Nat. Hazards*, **36**, 147–164.

Hamlet, A.F., 2003: The role of transboundary agreements in the Columbia River Basin: an integrated assessment in the context of historic development, climate, and evolving water policy. *Climate, Water, and Transboundary Challenges in the Americas*, H. Diaz and B. Morehouse, Eds., Kluwer Press, Dordrecht, 263-289.

Harding, R.J., 1992: The modification of climate by forests. *Growth and Water Use of Forest Plantations,* I.R. Calder, R.L. Hall and P.G. Adlard, Eds., John Wiley and Sons, Chichester, 332-346.

Hareau, A., R. Hofstadter and A. Saizar, 1999: Vulnerability to climate change in Uruguay: potential impacts on the agricultural and coastal resource sectors and response capabilities. *Clim. Res*., **12**, 185–193.

Harman, J., M. Gawith and M. Calley, 2005: Progress on assessing climate impacts through the UK Climate Impacts Programme, *Weather*, **60**, 258–262.

Harrison, G.P. and H.W. Whittington, 2002: Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change. *J. Hydrol*., **264**(1–4), 230–241.

Hartmann, J., K. Ebi, J. McConnell, N. Chan and J.P. Weyant, 2002: Stable malaria transmission in Zimbabwe under different climate change scenarios. *Global Change and Human Health*, **3**, 2–14.

Hatfield, J.L. and J.H. Pruger, 2004: Impacts of changing precipitation patterns on water quality. *J. Soil Water Conserv*., **59**, 51-58.

Hay, S.I., D.J. Rogers, S.E. Randolph, D.I. Stern, J. Cox, G.D. Shanks and R.W. Snow, 2002a: Hot topic or hot air? Climate change and malaria resurgence in East African highlands. *Trends Parasitol*., **18**, 530-534.

Hay, S.I., J. Cox, D.J. Rogers, S.E. Randolph, D.I. Stern, G.D. Shanks, M.F. Myers and R.W. Snow, 2002b: Climate change and the resurgence of malaria in the East African highlands. *Nature*, **415**, 905-909.

Hay, S.I., G.D. Shanks, D.I. Stern, R.W. Snow, S.E. Randolph and D.J. Rogers, 2005: Climate variability and malaria epidemics in the highlands of East Africa. *Trends Parasitol*., **21**, 52-53.

Hayhoe, K. and Co-authors, J.H., 2004: Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 12422-12427.

Haylock, M.R. and C.M. Goodess, 2004: Interannual variability of extreme European winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *Int. J. Climatol*., **24**, 759–776.

Haylock, M.R., T. Peterson, L.M. Alves, T. Ambrizzi, Y.M.T. Anunciação, J. Baez, V.R. Barros, M.A. Berlato and Co-authors, 2006: Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate*, **19**, 1490-1512.

Helgason, B.L., H.H. Janzen, M.H. Chantigny, C.F. Drury, B.H. Ellert, E.G. Gregorich, Lemke, E. Pattey, P. Rochette and C. Wagner-Riddle, 2005: Toward improved coefficients for predicting direct N_2O emissions from soil in Canadian agroecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **71**, 7-99.

Helms, M., B. Büchele, U. Merkel and J. Ihringer, 2002: Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe) river. *J. Hydrol*., **267**, 94–114.

Hemp, A., 2005: Climate change-driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro. *Glob. Change Biol*., **11**, 1013-1023.

Hendy, C. and J. Morton, 2001: Drought-time grazing resources in Northern Kenya. *Pastoralism, Drought and Planning: Lessons from Northern Kenya and Elsewhere*, J. Morton, Ed., Natural Resources Institute, Chatham, 139-179.

Herath, S. and U. Ratnayake, 2004: Monitoring rainfall trends to predict adverse impacts: a case study from Sri Lanka (1964–1993). *Global Environ. Change*, **14**, 71–79.

Herron, N., R. Davis and R. Jones, 2002: The effects of large-scale afforestation and climate change on water allocation in the Macquarie River catchment, NSW, Australia. *J. Environ. Manage*., **65**, 369–381.

Hewitt, K., 2005: The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the "elevation effect", Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, **25**(4), 332–340.

Hibbert, A.R., 1967: Forest treatment effects on water yield. *Forest Hydrology. Proc. International Symposium on Forest Hydrology,* W.E. Sopper and H.W. Lull, Eds., Forest hydrology, Pergamon Press, London, 527-543.

Higashi, H., K. Dairaku and T. Matuura, 2006: Impacts of global warming on heavy precipitation frequency and flood risk, *Jour. Hydroscience and Hydraulic Engineering*, **50**, 205–210.

Hild, C. and V. Stordhal, 2004: Human health and well-being. *Arctic Human Development Report (AHDR)*. N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute, Akureyri, 155-168 pp.

Hinzman, L., N. Bettez, W. Bolton, F. Chapin, M. Dyurgerov, C. Fastie, B. Griffith, R. Hollister and Co-authors., 2005: Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions. *Climatic Change*, **72**, 251–298.

Hoanh, C.T., H. Guttman, P. Droogers and J. Aerts, 2004: Will we produce sufficient food under climate change? Mekong Basin (South-east Asia). *Climate Change in Contrasting River Basins: Adaptation Strategies for Water, Food, and Environment*, Aerts, J.C.J.H. Aerts and P. Droogers, Eds., CABI Publishing, Wallingford, 157–180.

Hobbins, M.T., J.A. Ramirez, and T.C. Brown, 2004: Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? *Geophys. Res. Lett*., **31**, L13503, doi:10/10029/2004GL019846.

Hock, R., P. Jansson and L. Braun, 2005: Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming. *Global Change and Mountain Regions: A State of Knowledge Overview.* Advances in Global Change Series, U.M. Huber, M.A. Reasoner and H. Bugmann, Eds., Springer, Dordrecht, 243–252.

Hodgkins, G.A., R.W. Dudley and T.G. Huntington, 2003: Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century. *J. Hydrol*., **278**(1–4), 244–252.

Hodgkins, G.A., R.W. Dudley and T.G. Huntington, 2005: Summer low flows in New England during the 20th century. *J. Am. Water Resourc. Assoc*., **41**(2), 403–412.

Hoelzle, M., W. Haeberli, M. Dischl and W. Peschke, 2003: Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length

changes. *Global Planet. Change*, **36**, 295–306.

Holden, N.M., A.J. Brereton, R. Fealy and J. Sweeney, 2003: Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agric. For. Meteorol.*, **116**, 181–196.

Hood, A. and Co-authors, 2002: Options for Victorian Agriculture in a "New" Climate: *A Pilot Study Linking Climate Change Scenario Modelling* and *Land Suitability Modelling*. Volume One - *Concepts and Analysis*. 62 pp. Volume Two - *Modelling Outputs*. Department of Natural Resources and Environment – Victoria, Australia, 83 pp.

Hoogwijk, M., 2004: *On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources*. PhD thesis, Copernicus Institute, Utrecht University, Utrecht, 256 pp.

Hoogwijk, M., A. Faaij, B. Eickhout, B. de Vries and W. Turkenburg, 2005: Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy,* **29**, 225-257.

Hooijer, M., F. Klijn, G.B.M. Pedroli and A.G. van Os, 2004: Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Res. Appl.*, **20**, 343–357.

Hortle, K. and S. Bush, 2003: Consumption in the Lower Mekong Basin as a measure of fish yield. *New Approaches for the Improvement of Inland Capture Fishery Statistics in the Mekong Basin*, T. Clayton, Ed., FAO RAP Publication 2003/01, Bangkok, 76-88.

Howe, A.D., S. Forster, S. Morton, R. Marshall, K.S. Osborn, P. Wright and P.R. Hunter, 2002: *Cryptosporidium* oocysts in a water supply associated with a cryptosporidiosis outbreak. *Emerg. Infect. Dis.*, **8**, 619–624.

Howe, C., R.N. Jones, S. Maheepala and B. Rhodes, 2005: *Implications of Potential Climate Change for Melbourne's Water Resources*. CSIRO Urban Water, CSIRO Atmospheric Research and Melbourne Water, Melbourne, 26 pp.

Hu, D.X., W.Y. Han and S. Zhang, 2001: *Land–Ocean Interaction in Changjiang and Zhujiang Estuaries and Adjacent Sea Areas*. China Ocean Press, Beijing, 218 pp (in Chinese).

Huang, H.J., F. Li, J.Z. Pang, K.T. Le and S.G. Li, 2005: *Land–Ocean Interaction between Huanghe Delta and Bohai Gulf and Yellow Sea*. China Science Press, Beijing, 313 pp (in Chinese).

Huang, Z.G. and Xie X.D., 2000: *Sea Level Changes in Guangdong and its Impacts and Strategies*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 263 pp.

Huffaker, R., 2005: Finding a modern role for the prior appropriation doctrine in the American West. *Water Institutions: Policies, Performance and Prospects,* C. Gopalakrishnan, C. Tortajada and A.K. Biswas, Eds., Springer, Berlin, 187–200.

Hunt, M., 2005: *Flood Reduction Master Plan,* Presented to the City of Peterborough City Council, Peterborough, Canada.

Hunter, P.R., 2003: Climate change and waterborne and vector-borne disease. *J. Appl. Microbiol.*, **94**, 37S–46S.

Huntington, T.G., 2006: Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J. Hydrol.*, **319**, 83–95.

Hurrell, J.W. and Co-authors, 2003: An overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, J.W. Hurrell and Co-authors, Eds., Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, 1–35.

Hurtado-Díaz, M., H. Riojas-Rodríguez, S.J. Rothenberg, H. Gomez-Dantés and E. Cifuentes-García, 2006: Impacto de la variabilidad climática sobre la incidencia del dengue en México. *International Conference on Environmental Epidemiology and Exposure*, Paris.

Huston, M.A. and G. Marland, 2003: Carbon management and biodiversity. *J. Environ. Manage.*, **67**, 77-86.

Hyvarinen,V., 2003: Trend and characteristics of hydrological time series in Finland. *Nordic Hydrol.,* **34**, 71-91.

Iafiazova, R.K., 1997: Climate change impact on mud flow formation in Trans-Ili Alatay mountains. *Hydrometeorology and Ecology*, **3**, 12–23 (in Russian).

ICID (International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi), 2005: *Water Policy Issues of Egypt*, Country Policy Support Programme, 36 pp.

Iglesias, A., T. Estrela and F. Gallart, 2005: Impactos sobre los recursos hídricos. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España for Efecto del Cambio Climático*, J.M. Moreno, Ed., Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 303–353.

Inouye, D.W., B. Barr, K.B. Armitage and B.D. Inouye, 2000: Climate change is affecting altitudinal migrants and hibernating species. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**(4), 1630–1633.

Instanes, A. and Co-authors, 2005: Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*. C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 907–944.

IOCI, 2002: *Climate Variability and Change in SouthWest Western Australia*. Indian Ocean Climate Initiative. Perth, Australia, 36 pp. http://www.ioci.org.au/publications/pdf/IOCI_CVCSW02.pdf.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000: *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo and D. J. Dokken, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 375 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001a: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001b: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 1032 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001c: *Climate Change 2001*: *Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 760 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007a: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007b: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007c: *Climate Change 2007*: *Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B. Metz, O. Davidson, P.Bosch, R. Dave and L. Meyer, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 851 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007d: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Core Writing Team, R.K Pachauri and A. Reisinger, Eds., IPCC, Geneva, 102 pp.

IRDB, 2000: *Gestión de los Recursos Hídricos de Argentina*.

Elementos de Política para su Desarrollo Sustentable en el siglo XXI. Oficina Regional de América Latina y Caribe. Unidad Departamental de Argentina y los Grupos de Finanzas, Sector Privado y Infraestructura, y Medio Ambiente y Desarrollo Social Sustentable. Informe No. 20.729-AR. August 2000.

Isensee, A.R. and A.M. Sadeghi, 1996: Effect of tillage reversal on herbicide leaching to groundwater. *Soil Sci.,* **161**, 382-389.

Ivanov, B. and T. Maximov, Eds., 2003: *Influence of Climate and Ecological Changes on Permafrost Ecosystems*. Yakutsk Scientific Center Publishing House, Yakutsk, 640 pp.

Ivey, J.L., J. Smithers, R.C. de Loe and R.D. Kreutzwiser, 2004: Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors. *Environ. Manage.*, **33**(1), 36–47.

Izrael, Y.A. and Y.A. Anokhin, 2001: Climate change impacts on Russia. *Integrated Environmental Monitoring*, Nauka, Moscow, 112–127 (in Russian with an English abstract).

Izrael, Y.A., Y.A. Anokhin and A.V. Pavlov, 2002: Permafrost evolution and the modern climate change. *Meteorol. Hydrol.*, **1**, 22–34.

Jackson, R.B., E.G. Jobbágy, R. Avissar, S. Baidya Roy, D. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, B.A. McCarl and B.C. Murray, 2005: Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, **310**, 1944-1947.

Jansson, P., R. Hock and T. Schneider, 2003: The concept of glacier storage: a review. *J. Hydrol.,* **282**, 116–129.

Jasper, K., P. Calanca, D. Gyalistras and J. Fuhrer, 2004: Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine rivers. *Clim. Res.*, **26**, 113–125.

Jenkins, B., 2006: Overview of Environment Canterbury water issues. managing drought in a changing climate. *Royal Society of New Zealand Drought Workshop, 10 April 2006*, Christchurch, NZ. http://www.rsnz.org/advisory/nz_climate/workshopApr2006/.

Jeppesen, E., J.P. Jensen and M. Søndergaard, 2003: Climatic warming and regime shifts in lake food webs: some comments. *Limnol. Oceanogr.*, **48**, 1346–1349.

Jiménez, B., 2003: Health risks in aquifer recharge with recycle water. *State of the Art Report Health Risk in Aquifer Recharge using Reclaimed Water,* R. Aertgeerts and A. Angelakis, Eds., WHO Regional Office for Europe, 54–172.

Jin, Z.Q., C.L. Shi, D.K. Ge and W. Gao, 2001: Characteristic of climate change during wheat growing season and the orientation to develop wheat in the lower valley of the Yangtze River. *Jiangsu J. Agric. Sci.*, **17**(4), 193–199.

Jiongxin, X., 2003: Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environ. Manage*, **31**, 328–341.

Johannessen, O.M., Khvorostovsky, K., Miles, M.W. and Bobylev, L.P., 2005: Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science*, **310**(5750), 1013–1016.

Johnson, W.C., B.V. Millett, T. Gilmanov, R.A. Voldseth, G.R. Guntenspergen and D.E. Naugle, 2005: Vulnerability of northern prairie wetlands to climate change. *BioScience*, **55**(10), 863–872.

Jones, B. and D. Scott, 2006: Implications of climate change to Ontario's provincial parks. *Leisure*, **30** (1), 233-261.

Jones, J.A. and G.E. Grant, 1996: Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resourc. Res.*, **32**, 959-974.

Jones, M.L., B.J. Shuter, Y.M. Zhao and J.D. Stockwell, 2006: Forecasting effects of climate change on Great Lakes fisheries: models that link habitat supply to population dynamics can help. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **63**, 457-468.

Jones, P.D., T.J. Osborn and K.R. Briffa, 2003a: Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface climate parameters. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Hurrell, J.W. and Co-authors, Eds., Geophysical Monograph 134, American Geophysical Union, Washington, DC, 51–62.

Jones, P.D., D.H. Lister, K.W. Jaggard and J.D. Pidgeon, 2003b: Future climate impact on the productivity of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Europe. *Climatic Change*, **58**, 93–108.

Jones, R. and P. Durack, 2005: *Estimating the Impacts of Climate Change on Victoria's Runoff using a Hydrological Sensitivity Model*. Consultancy Report for the Victorian Department of Sustainability and Environment, 50 pp.

Jones, R.N. and C.M. Page, 2001: Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquarie River catchment. *Integrating Models for Natural Resources Management Across Disciplines: Issues and Scales*, F. Ghassemi, P.H. Whetton, R. Little and M. Littleboy, Eds., Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, 673–678.

Jordan, E., 1991: *Die gletscher der bolivianischen Anden: eine photogrammetrisch-kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage für klimatische Deutungen und Potential für die wirtschaftliche Nutzung (The Glaciers of the Bolivian Andes, A Photogrammetric-Cartographical Inventory of the Bolivian Glaciers as a Basis for Climatic Interpretation and Potential for Economic Use)*. Erdwissenschaftliche Forschung 23, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 401 pp.

Jorgenson, M.T., C.H. Racine, J.C. Walters and T.E. Osterkamp, 2001: Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, **48**(4), 551–571.

Justic, D., N.N. Rabalais and R.E. Turner, 2005: Coupling between climate variability and coastal eutrophication: evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *J. Sea Res.*, **54**(1), 25–35.

Kabat, P., R.E. Schulze, M.E. Hellmuth and J.A. Veraart, Eds., 2002: *Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: a Scoping Paper.* DWC Report No. DWCSSO-01(2002), International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen.

Kajiwara, M., T. Oki and J. Matsumoto, 2003: *Inter-annual Variability of the Frequency of Severe Rainfall in the Past 100 Years over Japan*. Extended abstract for a bi-annual meeting of the Meteorological Society of Japan (in Japanese).

Kanai, S., T. Oki and A. Kashida, 2004: Changes in hourly precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 241–247.

Kane, R.P., 2002: Precipitation anomalies in southern America associated with a finer classification of El Niño and La Niña events. *Int. J. Climatol.*, **22**, 357-373.

Kang, G., B.S. Ramakrishna, J. Daniel, M. Mathan and V. Mathan, 2001: Epidemiological and laboratory investigations of outbreaks of diarrhoea in rural South India: implications for control of disease. *Epidemiol. Infect.*, **127**, 107.

Karst-Riddoch, T.L., M.F.J. Pisaric and J.P. Smol, 2005: Diatom responses to 20th century climate-related environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *J. Paleolimnol.*, **33**, 265-282.

Kaser, G. and H. Osmaston, 2002: *Tropical Glaciers*. UNESCO International Hydrological Series. Cambridge University Press, Cambridge, 207 pp.

Kaser, G. and Co-authors, 2003: The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *J. Hydrol.*, **282**, 130–144.

Kashyap, A., 2004: Water governance: learning by developing adaptive capacity to incorporate climate variability and change. *Water Sci. Technol.*, **19**(7), 141–146.

Kaspar, F., 2003: *Entwicklung und Unsicherheitsanalyse eines globalen hydrologischen (Model Development and Uncertainty Analysis of*

a Global Hydrological Model). University of Kassel, Kassel, PhD thesis.

Kaste, Ø., K. Rankinen and A. Leipistö, 2004: Modelling impacts of climate and deposition changes on nitrogen fluxes in northern catchments of Norway and Finland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **8**, 778–792.

Kay, A., V. Bell and H. Davies, 2006a: *Model Quality and Uncertainty for Climate Change Impact*. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford.

Kay, A., N.A. Reynard and R.N. Jones, 2006b: RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *J. Hydrol.*, **318**, 163–172.

Keddy, P.A., 2000: *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, 614 pp.

Keller, F., S. Goyette and M. Beniston, 2005: Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. *Climatic Change*, **72**(3), 299–319.

Kergoat, L., S. Lafont, H. Douville, B. Berthelot, G. Dedieu, S. Planton and J.-F. Royer, 2002: Impact of doubled CO_2 on global-scale leaf area index and evapotranspiration: conflicting stomatal conductance and LAI responses. *J. Geophys. Res.*, **107**(D24), 4808.

Kerr, R., 2000: A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, **288**, 1984–1985.

Kerr, S.A., 2005: What is small island sustainable development about? *Ocean Coast. Manage.*, **48**, 503–524.

Khan, T.M.A., O.P. Singh and M.S. Rahman, 2000: Recent sea level and sea surface temperature trends along the Bangladesh coast in relation to the frequency of intense cyclones. *Marine Geodesy*, **23**(2), 103–116.

Kharkina, M.A., 2004: Natural resources in towns. *Energia*, **2**, 44–50.

Kirschbaum, M. and A. Fischlin, 1996: Climate change impacts on forests. *Climate Change 1995: Impacts; Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*., R. Watson, M.C. Zinyowera and R.H. Moss, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 95-129.

Kirshen, P., M. McCluskey, R. Vogel and K. Strzepek, 2005a: Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: a case study in China. *Climatic Change*, **68**(3), 303–330.

Kirshen, P., M. Ruth and W. Anderson, 2005b: Responding to climate change in Metropolitan Boston: the role of adaptation. *New Engl. J. Public Pol.*, **20**(2), 89–104.

Kirshen, P., M. Ruth and W.Anderson, 2006: Climate's long-term impacts on urban infrastructures and services: the case of Metro Boston. *Regional Climate Change and Variability: Impacts and Responses*, M. Ruth, K. Donaghy and P.H. Kirshen, Eds., Edward Elgar Publishers, Cheltenham, 190–252.

Kishor, P.B.K., Z. Hong, G. Miao, C. Hu and D. Verma, 1995: Overexpression of Δ1-pyrroline-5-carboxylase synthase increases praline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *J. Plant Physiol.*, **108**, 1387-1394.

Kistemann, T., T. Classen, C. Koch, F. Dagendorf, R. Fischeder, J. Gebel, V. Vacata and M. Exner, 2002: Microbial load of drinking water reservoir tributaries during extreme rainfall and runoff. *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**(5), 2188–2197,

Kjellström, E., 2004: Recent and future signatures of climate change in Europe. *Ambio*, **23**, 193-198.

Klanderud, K. and H.J.B. Birks, 2003: Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *Holocene,* **13**(1), 1.

Klein, R.J., T.J. Nicholls, and J. Thomalla, 2003: The resilience of coastal mega cities to weather-related hazards in building safer cities*: The Future of Climate Change*, A. Kreimer, M. Arnold and A. Karlin, Eds., World Bank, Washington, DC, 101–121.

Klein Tank, A.M.G., J.B. Wijngaard, G.P. Konnen, R. Bohm, G. Demaree, A. Gocheva, M. Mileta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino, P. Bessemoulin, G. Muller-Westermeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Palsdottir, D. Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A.F.V. VanEngelen, E. Forland, M. Mietus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T. Cegnar, J.A. López, B. Dahlstrom, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L.V. Alexander and P. Petrovic, 2002: Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1441–1453.

Klein Tank, A.M.G. and G.P. Können, 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–1999. *J. Clim.*, **16**, 3665–3680.

Klijn, F., J. Dijkman and W. Silva, 2001: *Room for the Rhine in the Netherlands. Summary of Research Results*. RIZA Report 2001.033, Rijkswaterstaat, Utrecht.

Klijn, F., M. van Buuren and S.A.M. van Rooij, 2004: Flood-risk management strategies for an uncertain future: living with Rhine river floods in the Netherlands? *Ambio*, **33**(3), 141–147.

Knight, C.G., I. Raev, and M. P. Staneva, Eds., 2004: *Drought in Bulgaria: A Contemporary Analog of Climate Change*. Ashgate, Aldershot, Hampshire 336 pp.

Knight, J. and Co-authors, 2005: a signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20708, doi:1029/2005GL024233.

Knowles, N., M.D. Dettinger and D.R. Cayan, 2006: Trends in snowfall versus rainfall for the western United States, 1949–2004. *J. Climate*, **18**, 1136–1155.

Ko, A., R.M. Galvão, D. Ribeiro, C.M. Dourado, W.D. Johnson Jr. and L.W. Riley, 1999: Urban epidemic of severe leptospirosis in Brazil, Salvador. Leptospirosis Study Group. *Lancet*, **354**, 820-825.

Kobayashi, K., 1987: Hydrologic effects of rehabilitation treatment for bare mountain slops. *Bull. Forestry Forest Products Res. Instit.*, **300**, 151-185.

Koga, N., T. Sawamoto and H. Tsuruta 2006: Life cycle inventory-based analysis of greenhouse gas emissions from arable land farming systems in Hokkaido, northern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition,* **52**, 564-574.

Korhola, A. and Co-authors, 2002: A multi-proxy analysis of climate impacts on recent ontogeny of subarctic Lake Sannajärvi in Finnish Lapland. *J. Paleolimnol.*, **1**, 59–77.

Körner, C., 1999: *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer, Berlin, 343 pp.

Kosek, M., C. Bern and R.L. Guerrent, 2003: The global burden of diarrhoeal disease, as estimated from studies published between 1992 and 2000. *Bull. World Health Organ.*, **81**, 197-204.

Kovats, R.S. and C. Tirado, 2006: Climate, weather and enteric disease. *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health,* B. Menne and K.L. Ebi, Eds., Springer, Darmstadt, 269–295.

Kovats, R.S., Campbell-Lendrum D. and Matthies, F., 2005: Climate change and human health: estimating avoidable deaths and disease. *Risk Analysis*, **25**(6), 1409–1418.

Kramer, R., D. Richter, S. Pattanayak and N. Sharma, 1997: Economic and ecological analysis of watershed protection in eastern Madagascar. *J. Environ. Manage.,* **49**, 277-295.

Krauss, K.W., J.L. Chambers, J.A. Allen, D.M. Soileau Jr and A.S. DeBosier, 2000: Growth and nutrition of baldcypress families planted under varying salinity regimes in Louisiana, USA. *J. Coast. Res.*, **16**, 153–163.

Kriticos, D.J., T. Yonow and R.C. McFadyen, 2005: The potential distribution of *Chromolaena odorata* (Sim weed) in relation to climate. *Weed Research*, **45**, 246–254

Kron, W. and G. Berz, 2007: Flood disasters and climate change: trends and options – a (re-)insurer's view. *Global Change: Enough Water for All?* J.L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel and C.-D. Schönwiese, Eds., University of Hamburg, Hamburg, 268-273.

Krüger, A., U. Ulbrich and P. Speth, 2002: Groundwater recharge in Northrhine-Westfalia by a statistical model for greenhouse gas scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**, 853–861.

Krysanova, V. and F. Wechsung, 2002: Impact of climate change and higher CO_2 on hydrological processes and crop productivity in the state of Brandenburg, Germany. *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, M. Beniston, Ed., Kluwer, Dordrecht, 271–300.

Krysanova, V., F. Hattermann and A. Habeck, 2005: Expected changes in water resources availability and water quality with respect to climate change in the Elbe River basin (Germany). *Nordic Hydrol.*, **36**(4–5), 321–333.

Kumagai, M., K. Ishikawa and J. Chunmeng, 2003: Dynamics and biogeochemical significance of the physical environment in Lake Biwa. *Lakes Reserv. Res. Manage.*, **7**, 345-348.

Kumar, P.K., 2006: Potential vulnerability implications of sea level rise for the coastal zones of Cochin, southwest coast of India. *Environ. Monitor. Assess.*, **123**, 333–344.

Kundzewicz, Z.W., U. Ulbrich, T. Brücher, D. Graczyk, A. Krüger, G. Leckebusch, L. Menzel, I. Pińskwar, M. Radziejewski and M. Szwed, 2005: Summer floods in Central Europe climate change track? *Nat. Hazards*, **36**(1/2), 165–189.

Kundzewicz, Z.W., M. Radziejewski and I. Pińskwar, 2006: Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Clim. Res,* **31**, 51–58.

Kunkel, K.E. and Co-authors, 2003: Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895–2000. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1900, doi:10.1029/2003GL018052.

Kupek, E., M.C. de Sousa Santos Faversani and J.M. de Souza Philippi, 2000: The relationship between rainfall and human leptospirosis in Florianópolis, Brazil, 1991–1996. *Braz. J. Infect. Dis.*, **4**, 131-134.

La Nación, 2002: Buenos Aires, 13 March.

Labat, D. and Co-authors, 2004: Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv. Water Resources*, **27**, 631–642.

Lal, M., 2002: *Global climate change: India's monsoon and its variability*, Final Report under "Country Studies Vulnerability and Adaptation" Work Assignment with Stratus Consulting's Contract of the U.S. Environmental Protection Agency, September 2002, 58 pp.

Lal, R., 2003: Offsetting global CO_2 emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation and Dev.*, **14**, 309–322.

Lal, R., 2004: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science,* **304**, 1623-1627.

Lal, R., J.M. Kimble and R.F. Follett, 1999: Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. *Recommendation and Conclusions of the International Symposium,* 19-23 July 1999, Columbus, OH, 12 pp.

Lama, J.R., C.R. Seas, R. León-Barúa, E. Gotuzzo and R.B. Sack, 2004: Environmental temperature, cholera, and acute diarrhoea in adults in Lima, Peru. *J. Health Popul. Nutr.*, **22**, 399–403.

Larsen, C.F., R.J. Motyka, J.T. Freymueller, K.A. Echelmeyer and E.R. Ivins, 2005: Rapid uplift of southern Alaska caused by recent ice loss. *Geophys. J. Int.*, **158**, 1118-1133.

Laternser, M. and M. Schneebeli, 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *Int. J. Climatol.*, **23**, 733–750.

Latif, M., 2001: Tropical Pacific/Atlantic Ocean interactions at multi-decadal time scales. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 539–542.

Le Maitre, D.C. and D.B. Versfeld, 1997: Forest evaporation models: relationships between stand growth and evaporation. *J. Hydrol.*, **193**, 240-257.

Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical overview of climate change science. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 93-128.

Lean, J., C.B. Buntoon, C.A. Nobre and P.R. Rowntree, 1996: The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. *Amazonian Deforestation and Climate,* J.H.C Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and T.L. Victoria, Eds., John Wiley and Sons, Chicester, 549-576.

Leary, N., J. Adejuwon, W. Bailey, V. Barros, M. Caffera, S. Chinvanno, C. Conde, A. De Comarmond, A. De Sherbinin, T. Downing, H. Eakin, A. Nyong, M. Opondo, B. Osman, R. Payet, F. Pulhin, J. Pulhin, J. Ratnasiri, E. Sanjak, G. von Maltitz, M. Wehbe, Y. Yin and G. Ziervogel, 2006: For whom the bell tolls: vulnerabilities in a changing climate. *AIACC Working Paper No.* **30**, International START Secretariat, Washington, DC, 31 pp.

Leemans, R. and A. Kleidon, 2002: Regional and global assessment of the dimensions of desertification. *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* J.F. Reynold and D.S. Smith, Eds., Dahlem University Press, Berlin, 215-232.

Legates, D.R., H.F. Lins and G.J. McCabe, 2005: Comments on "Evidence for global runoff increase related to climate warming" by Labat et al. *Adv. Water Resour.*, **28**, 1310-1315.

Lehner, B., G. Czisch and S. Vassolo, 2005: The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energ. Policy*, **33**, 839–855.

Lehner, B., P. Döll, J. Alcamo, T. Henrichs and F. Kaspar, 2006: Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, **75**, 273–299.

Leipprand, A. and D. Gerten, 2006: Global effects of doubled atmospheric CO_2 content on evapotranspiration, soil moisture and runoff under potential natural vegetation. *Hydrol. Sci. J.*, **51**, 171–185.

Lemmen, D. S. and F. J. Warren, Eds., 2004: *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, 201 pp, http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective_e.asp.

Lenderink, G., A. vanUlden, B. van den Hurk and E. van Meijgaard, 2007: Summertime inter-annual temperature variability in an ensemble of regional model simulations: analysis of the surface energy budget. *Climatic Change*, **81**, S233-S247.

Lewsey, C., Gonzalo, C. and Kruse, E., 2004: Assessing climate change impacts on coastal infrastructure in the Eastern Caribbean. *Marine Policy*, **28**, 393–409.

Li, C., S. Frolking and K. Butterbach-Bahl, 2005: Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change,* **72**, 321-338.

Li, C.X., D.D. Fan, B. Deng and V. Korotaev, 2004: The coasts of China and issues of sea level rise. *J. Coast. Res.*, **43**, 36–47.

Liebig, M.A., J.A. Morgan, J.D. Reeder, B.H. Ellert, H.T. Gollany and G.E. Schuman, 2005: Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. *Soil and Tillage Res.,* **83**, 25-52.

Lincoln Environmental, 2000: *Information on Water Allocation in New Zealand*. Report No. 4375/1, prepared for Ministry for the Environment by Lincoln Ventures Ltd, Canterbury, New Zealand. http://www.mfe.govt.nz/publications/water/water-allocation-apr00.pdf.

Lindstrom, G. and S. Bergstrom, 2004: Runoff trends in Sweden

1807–2002. *Hydrol. Sci. J.*, **49**(1), 69–83.

Liniger, H. and R. Weingartner, 1998: Mountains and freshwater supply. *Unasylva,* **195**(49), 39-46.

Lipp, E. and Co-authors, 2001: The effects of seasonal variability and weather on microbial faecal pollution and enteric pathogens in a subtropical estuary. *Estuaries*, **24**, 226–276.

Liu, B.H. and Co-authors, 2004: A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. *J. Geophys. Res.*, **109**, D15102, doi:10.1029/2004JD004511.

Liu, C.Z., 2002: Suggestion on water resources in China corresponding with global climate change. *China Water Resources*, **2**, 36–37.

Liu, S.G., Li, C.X., Ding, J., Li, X.Z. and Ivanov, V.V., 2001: The rough balance of progradation and erosion of the Yellow River delta and its geological meaning. *Marine Geology and Quaternary Geology*, **21**(4), 13–17.

Liu, Y.B. and Y.N. Chen, 2006: Impact of population growth and land-use change on water resources and ecosystems of the arid Tarim River Basin in western China. *Int. J. Sust. Dev. World*, **13**, 295-305.

Llasat, M.C., 2001: An objective classification of rainfall intensity in the Northeast of Spain. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1385–1400.

Lofgren, B., A. Clites, R. Assel, A. Eberhardt and C. Luukkonen, 2002: Evaluation of potential impacts on Great Lakes water resources based on climate scenarios of two GCMs. *J. Great Lakes Res.*, **28**(4), 537–554.

London Climate Change Partnership, 2004: *London's Warming*: *A Climate Change Impacts in London Evaluation Study*, London, 293 pp.

LOSLR (International Lake Ontario–St. Lawrence River Study Board), 2006: *Options for Managing Lake Ontario and St. Lawrence River Water Levels and Flows*. Final Report to the International Joint Commission. http://www.losl.org/reports/finalreport-e.html.

Luoto, M., R.K. Heikkinen and T.R. Carter, 2004: Loss of palsa mires in Europe and biological consequences. *Environ. Conserv.*, **31**, 30–37.

MacDonald, R., T. Harner, J. Fyfe, H. Loeng and T. Weingartner, 2003: Influence of Global Change on Contaminant Pathways to, within and from the Arctic. *ANAO Assessment 2002*. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, 65 pp.

Machado, P.L.O.A. and C.A. Silva, 2001: Soil management under notillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **61**, 119-130.

Madari, B., P.L.O.A. Machado, E. Torres, A.G. Andrade and L.I.O. Valencia, 2005: No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Fhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil and Tillage Research,* **80**, 185-200.

Magadza, C., 2000: Climate change impacts and human settlements in Africa: prospects for adaptation. *Environ. Monit. Assess.*, **61**(1), 193–205.

Magrin, G.O., M.I. Travasso and G.R. Rodríguez, 2005: Changes in climate and crops production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change*, **72**, 229–249.

Manton, M.J., P.M. Della-Marta, M.R. Haylock, K.J. Hennessy, N. Nicholls, L.E. Chambers, D.A. Collins, G. Daw, A. Finet, D. Gunawan, K. Inape, H. Isobe, T.S. Kestin, P. Lefale, C.H. Leyu, T. Lwin, L.Maitrepierre, N. Ouprasitwong, C.M. Page, J. Pahalad, N. Plummer, M.J. Salinger, R. Suppiah, V.L. Tran, B. Trewin, I. Tibig and D. Lee, 2001: Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific; 1961–1998, *Int. J. Climatol.*, **21**, 269–284.

Manuel, J., 2006: In Katrina's wake. *Environ. Health Persp.*, **114**, A32-A39.

Marengo, J.A., 2004: Interdecadal variability and trends of rainfall variability in the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.*, **78**, 79-96.

Mark, B.G. and G.O. Seltzer, 2003: Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Perú. *J. Glaciol.*, **49**, 271-281.

Marland, G., B.A. McCarl and U.A. Schneider, 2001: Soil carbon: policy and economics. *Climatic Change,* **51**, 101-117.

Marland, G., T.O. West, B. Schlamadinger and L. Canella, 2003: Managing soil organic carbon in agriculture: the net effect on greenhouse gas emissions. *Tellus*, **55B**, 613-621.

Martin, D., Belanger, D., Gosselin, P., Brazeau, J., Furgal, C. and Dery, S., 2005: *Climate change, Drinking Water, and Human Health in Nunavik: Adaptation Strategies*. Final Report submitted to the Canadian Climate Change Action Fund, Natural Resources Canada. CHUL Research Institute, Quebec, 111 pp.

Martin, E. and P. Etchevers, 2005: Impact of climatic change on snow cover and snow hydrology in the French Alps. *Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview),* U.M. Huber, H. Bugmann, and M.A. Reasoner, Eds., Springer, New York, 235–242.

Mata, L.J, M. Campos, E. Basso, R. Compagnucci, P. Fearnside, G. Magri, J. Marengo, A.R. Moreno, A. Suaez, S. Solman, A. Villamizar and L. Villers, 2001: Latin America. *Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* J. J McCarthy, O. Canziani, N.Leary, D. Dokken and K.White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 691–734.

Maya, C., N. Beltran, B. Jiminez and P. Bonilla, 2003: Evaluation of the UV disinfection process in bacteria and amphizoic amoebeae inactivation. *Water Science and Technology*, **3**(4), 285–291.

Mazhitova, G., N. Karstkarel, N. Oberman, V. Romanovsky and P. Kuhty, 2004: Permafrost and infrastructure in the Usa Basin (Northern European Russia): possible impacts of global warming. *Ambio*, **3**, 289–294.

McBean, G. and Co-authors, 2005: Arctic Climate: past and present. *Arctic Climate Impacts Assessment (ACIA)*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 21–60.

McCabe, G.J., M. Palecki and J.L. Betancourt, 2004: Pacific and Atlantic Ocean influences on multi-decadal drought frequency in the United States. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 4136–4141.

McClelland, J.W., R.M. Holmes and B.J. Peterson, 2004: Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **109,** D18102, doi:10.1029/2004JD004583.

McKerchar, A.I. and R.D. Henderson, 2003: Shifts in flood and low-flow regimes in New Zealand due to inter-decadal climate variations. *Hydrol. Sci. J.*, **48**(4), 637–654.

McMichael, A. and Co-authors, Eds., 2003: *Climate Change and Human Health: Risks and Responses*. WHO, Geneva, 322 pp.

McPeak, J.G. and C.B. Barrett, 2001: Differential risk exposure and stochastic poverty traps among East African pastoralists. *Am. J. Agr. Econ.*, **83**, 674-679.

MDBC, 2006: *Basin Statistics*. Murray Darling Basin Commission. http://www.mdbc.gov.au/about/basin_statistics.

Meehl, G.A. and C. Tebaldi, 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, **305**, 994–997.

Meher-Homji, V.M., 1992: Probable impact of deforestation on hydrological process. *Tropical Forests and Climate,* N. Myers, Ed., Springer, Berlin, 163-174.

Melbourne Water, 2006: Eastern Treatment plant: treating sewage from Melbourne's south-eastern and eastern suburbs. http://www.melbournewater.com.au/content/sewerage/eastern_treatment_plant/eastern_treatment_plant.asp?bhcp=1.

Melnikov B.V. and A. L. Revson, 2003: Remote sensing of northern regions of West Siberia. *Cryosphere of Earth*, **4**, 37–48 (in Russian).

Mendelsohn, R., M. Morrison, M. Schlesinger and N. Andronova,

2000a: Country-specific market impacts from climate change, *Climatic Change,* **45**, 553–569.

Mendelsohn, R., A. Dinar and A. Dalfelt, 2000b: *Climate change impacts on African agriculture*. Paper prepared for the World Bank, Washington, DC, 25 pp

Menzel, A., G. Jakobi, R. Ahas, H. Scheifinger and N. Estrella, 2003: Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Climatol.*, **23**, 793-812.

Menzel, L. and G. Bürger,, 2002: Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *J. Hydrol.*, **267**(1–2), 53–64.

Mercier, F., A. Cazenave and C. Maheu, 2002: Interannual lake level fluctuations (1993–1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian Ocean, *Global Planet. Change*, **32**, 141–163.

Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer, Eds., 2005: *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge, 431 pp.

Middelkoop, H. and J.C.J. Kwadijk, 2001: Towards an integrated assessment of the implications of global change for water management: the Rhine experience. *Phys Chem Earth, Part B Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**(7–8), 553–560.

Middelkoop, H., K. Daamen, D. Gellens, W. Grabs, J.C.J. Kwadijk, H. Lang, B.W.A.H. Parmet, B. Schädler, J. Schulla and K. Wilke, 2001: Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change*, **49**, 105–128.

Miettinen, I., O. Zacheus, C. von Bonsdorff and T. Vartiainen, 2001: Waterborne epidemics in Finland in 1998–1999. *Water Sci. Technol.*, **43**, 67–71.

Miles, E.L., A.K. Snover, A. Hamlet, B. Callahan and D. Fluharty, 2000: Pacific Northwest Regional Assessment: the impacts of climate variability and climate change on the water resources of the Columbia River Basin. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **36**, 399-420.

Mileti, D., 1999: *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. National Academy Press, Washington, DC, 376 pp.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005a: *Ecosystems and Human Well-being: Volume 2 – Scenarios*. Island Press, Washington, DC, 515 pp.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005b: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, 155 pp.

Miller, K.A. and D. Yates, 2006: *Climate Change and Water Resources: A Primer for Municipal Water Providers*. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 83 pp.

Miller, K.A., S.L. Rhodes and L.J.MacDonnell, 1997: Water allocation in a changing climate: institutions and adaptation. *Climatic Change*, **35**, 157–177.

Miller, M.G. and A. Veltman, 2004: Proposed Canterbury Natural Resources Plan for river and groundwater allocation policies and the implications for irrigation dependent farming in Canterbury. *Proc. New Zealand Grassland Association*, **66**, 11–23.

Mills, E., 2005: Insurance in a climate of change. *Science*, **309**, 1040–1044.

Mills, E. and E. Lecomte, 2006: *From Risk to Opportunity: How Insurers Can Proactively and Profitably Manage Climate Change*. Ceres, Boston, MA, 42 pp.

Mills, P.F., 1994: The agricultural potential of northwestern Canada and Alaska and the impact of climatic change. *Arctic*, **47**(2), 115–123.

Milly, P.C.D., R.T. Wetherald, K.A. Dunne and T.L. Delworth, 2002: Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, **415**, 514–517.

Milly, P.C.D., K.A. Dunne and A.V. Vecchia, 2005: Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, **438**(7066), 347–350.

Mimikou, M., E. Blatas, E. Varanaou and K. Pantazis, 2000: Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *J. Hydrol.*, **234**, 95-109.

Min, S.K., W.T. Kwon, E.H. Park and Y. Choi, 2003: Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climatol.*, **23**, 223–233.

Ministry for the Environment, 2004: *Climate Effects and Impacts Assessment: a Guidance Manual for Local Government in New Zealand*. Prepared by David Wratt, Brett Mullan and Jim Salinger (NIWA), Sylvia Allen and Tania Morgan (MWH New Zealand Ltd.) and Gavun Kenny (Earthwise Consulting). Ministry for the Environment Report ME 513, Wellington, 153 pp.

Mirza, M.M.Q., 2002: Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. *Global Environ. Chang.*, **12**, 127–138.

Mirza, M.M.Q., 2003: Three recent extreme floods in Bangladesh: a hydro-meteorological analysis. *Nat. Hazards*, **28**, 35–64.

Mirza, M.M.Q., 2004: *Climate Change and the Canadian Energy Sector: Report on Vulnerability and Adaptation*. Adaptation and Impacts Research Group, Atmospheric Climate Science Directorate, Meteorological Service of Canada Downsview, Ontario, 52 pp.

Mirza, M.M.Q., R.A. Warrick and N.J. Ericksen, 2003: The implications of climate change on floods of the Ganges, Brahmaputra and Meghna Rivers in Bangladesh. *Climatic Change*, **57**, 287–318.

Mitchell, T.D. and P.D. Jones, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693–712.

Mitchell, W., J. Chittleborough, B. Ronai and G.W. Lennon, 2001: Sea level rise in Australia and the Pacific. *Proc. Science Component. Linking Science and Policy.* Pacific Islands Conference on Climate Change, Climate Variability and Sea Level Rise. 3-7 April 2000, Rarotonga, Cook Islands, National Tidal Facility, The Flinders University of South Australia, Adelaide, 47–58.

Moench, M., A. Dixit, S. Janakarajan, M.S. Rathore and S. Mudrakartha, 2003: *The Fluid Mosaic: Water Governance in the Context of Variability, Uncertainty and Change – A Synthesis Paper*. Nepal Water Conservation Foundation, Kathmandu, 71 pp.

Mohseni, O., H.G. Stefan and J.G. Eaton, 2003: Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climatic Change*, **59**, 389-409.

Mölg, T., D.R. Hardy, N. Cullen and G. Kaser, 2005: Tropical glaciers in the context of climate change and society: focus on Kilimanjaro (East Africa). *Contribution to Mountain Glaciers and Society Workshop*. California University Press, Wengen, 28 pp.

Monson, R.K., D.L. Lipson, S.P. Burns, A.A. Turnipseed, A.C. Delany, M.W. Williams and S.K. Schmidt, 2006: Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, **439**(7077), 711–714.

Monteny, G.-J., A. Bannink and D. Chadwick, 2006: Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agri. Ecosys. Environ.,* **112**, 163-170.

Mool, P.K., D. Wangda and S.R. Bajracharya, 2001: *Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region: Bhutan*. ICIMOD, Kathmandu, 227 pp.

Moonen, A.C., L. Ercoli, M. Mariotti and A. Masoni, 2002: Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agr. Forest Meteorol.*, **111**, 13-27.

Mooney, H., A. Cropper and W. Reid, 2005: Confronting the human dilemma. *Nature*, **434**, 561-562.

Moore, M.V., M.L. Pace, J.R. Mather, P.S. Murdoch, R.W. Howarth, C.L. Folt, C.Y. Chen, H.F. Hemond, P.A. Flebbe and C.T. Driscoll,

1997: Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the New England/Mid-Atlantic region. *Hydrol. Process.*, **11**, 925–947.

Morris, J.D. and L.A.J. Thomson, 1983: The role of trees in dryland salinity control. *Proc. Roy. Soc. Victoria*, **95**, 123-131.

Morton, J., 2006: Pastoralist coping strategies and emergency livestock market intervention. *Livestock Marketing in Eastern Africa: Research and Policy Challenges,* J.G. McPeak and P.D. Little, Eds., ITDG Publications, Rugby, 227-246.

Mosier, A.R., A.D. Halvorson, G.A. Peterson, G.P. Robertson and L. Sherrod, 2005: Measurement of net global warming potential in three agroecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* **72**, 67-76.

Moss, B., D. Mckee, D. Atkinson, S.E. Collings, J.W. Eaton, A.B. Gill, I. Harvey, K. Hatton, T. Heyes and D. Wilson, 2003: How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. *J. Appl. Ecol.*, **40**, 782–792.

Mote, P., A.F. Hamlet, M.P. Clark and D.P. Lettenmaier, 2005: Declining mountain snowpack in western North America. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, doi: 10.1175/BAMS-1186-1171-1139.

Mote, P.W., D.J. Canning, D.L. Fluharty, R.C. Francis, J.F. Franklin, A.F. Hamlet, M. Hershman, M. Holmberg, K.N. Gray-Ideker, W.S. Keeton, D.P. Lettenmaier, L.R. Leung, N.J. Mantua, E.L. Miles, B. Noble, H. Parandvash, D.W. Peterson, A.K. Snover and S.R. Willard, 1999: *Impacts of Climate Variability and Change, Pacific Northwest*, 110 pp. http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalassessment/pnw.pdf.

Mote, P.W., E.A. Parson, A.F. Hamlet, W.S. Keeton, D. Lettenmaier, N. Mantua, E.L. Miles, D.W. Peterson, D.L. Peterson, R. Slaughter and A.K. Snover, 2003: Preparing for climatic change: the water, salmon, and forests of the Pacific Northwest. *Climatic Change*, **61**, 45-88.

Moulton, R. and D. Cuthbert, 2000: Cumulative impacts/risk assessment of water removal or loss from the Great Lakes–St. Lawrence River system. *Can. Water Resour. J.*, **25**, 181-208.

Mountain Agenda, 1997: *Mountains of the World: Challenges of the 21st Century.* Mountain Agenda, Bern, 36 pp.

MRAE (Ministry of Rural Affairs and the Environment, Malta), 2004: *The First Communication of Malta to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Ministry for Rural Affairs and the Environment, Malta.

MRC, 2003: *State of the Basin Report: 2003*. Mekong River Commission, Phnom Penh, 300 pp.

Mueller, D.R., W.F. Vincent and M.O. Jeffries, 2003: Break-up of the largest Arctic ice shelf and associated loss of an epishelf lake. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2031, doi:10.1029/2003GL017931.

Mullan, A.B., A. Porteous, D. Wratt and M. Hollis, 2005: *Changes in Drought Risk with Climate Change*. NIWA Report WLG2005. http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/drought-risk-may05/drought-risk-climate-change-may05.pdf.

Munich Re, 2004: *Annual Review of Natural Catastrophes 2003*. Munich, 8 pp. http://www.munichre.com/app_resources/pdf/ts/geo_risks/topicsgeo_2003_siebert_en.pdf.

MWD, 2005: *The Family of Southern California Water Agencies. Metropolitan Water District of Southern California*. http://www.bewaterwise.com/index.html.

Myers, N., 1997: The world's forests and their ecosystem services. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. G.C. Daily, Ed., Island Press, Washington, DC, 215-235.

Naess, L.O., G. Bang, S. Eriksen and J. Vevatne, 2005: Institutional adaptation to climate change: flood responses at the municipal level in Norway. *Global Environ. Chang.*, **15**, 125–138.

Nagy, G.J., R.M. Caffera, M. Aparicio, P. Barrenechea, M. Bidegain, J.C. Jiménez, E. Lentini, G. Magrin and Co-authors, 2006: *Understanding the Potential Impact of Climate Change and Variability in Latin America and the Caribbean*. Report prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change, 34 pp. http://www.sternreview.org.uk.

Nakićenović, N. and R. Swart, Eds., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, 599 pp.

Namjou, P. and Co-authors, 2006: The integrated catchment study of Auckland City (New Zealand): long-term groundwater behaviour and assessment. *Proc. World Environmental and Water Resources Congress 2006,* R. Graham, Ed., May 21-25, 2006, Omaha, Nebraska, doi:10.1061/40856(200)311.

NAST, 2000: *Climate Change Impacts in the United States, Overview.* Report for the U.S. Global Change Research Program. National Assessment Synthesis Team Members (NAST), 154 pp.

Natsagdorj, L., P. Gomboluudev and P. Batima, 2005: Climate change in Mongolia. *Climate Change and its Projections*, P. Batima and B.Myagmarjav, Eds., Admon Publishing, Ulaanbaatar, 39–84.

NC-Colombia, 2001: *1st National Communication to the UNFCCC*, 267 pp. http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/2979.php.

NC-Ecuador, 2000: *1st National Communication to the UNFCCC*, 128 pp. http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/2979.php.

NC-Nicaragua, 2001: *Impacto del Cambio Climático en Nicaragua*. Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, PNUD/MARENA, 127 pp.

NC-Perú, 2001: *1st National Communication to the UNFCCC*, 155 pp. http://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc1.pdf.

Nchito, M., P. Kelly, S. Sianongo, N.P. Luo, R. Feldman, M. Farthing and K.S. Baboo, 1998: *Cryptosporidiosis* in urban Zambian children: an analysis of risk factors. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, **59**, 435–437.

Ndikumana, J., J. Stuth, R. Kamidi, S. Ossiya, R. Marambii and P. Hamlett, 2000: *Coping Mechanisms and their Efficacy in Disaster-prone Pastoral Systems of the Greater Horn of Africa: Effects of the 1995-97 Drought and the 1997-98 El Niño Rains and the Responses of Pastoralists and Livestock*. ILRI Project Report. A-AARNET (ASARECA-Animal Agriculture Research Network), Nairobi, Kenya, GL-CRSP LEWS (Global Livestock- Collaboratve Research Support Program Livestock Early Warning System), College Station, Texas, USA, and ILRI (International Livestock Research Institute), Nairobi, 124 pp.

NEAB (National Environment Advisory Board, St Vincent and the Grenadines), 2000: *Initial National Communication on Climate Change*, National Environment Advisory Board and Ministry of Health and the Environment, 74 pp.

Nearing, M.A., F.F. Pruski and M.R. O'Neal, 2004: Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *J. Soil Water Conserv.*, **59**, 43-50.

NEB, 2006: *Canada's Oil Sands: Opportunities and Challenges to 2015: An Update*. National Energy Board, Calgary, Alberta, 85 pp.

Neff, R., H. Chang, C. Knight, R. Najjar, B. Yarnal and H. Walker, 2000: Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources. *Climate Res.*, **14**, 207-218.

Nelson, F.E., 2003: (Un)frozen in time. *Science*, **299**, 1673–1675.

New, M., 2002: Climate change and water resources in the southwestern Cape, South Africa. *S. Afri. J. Sci.*, **96**, 369–373.

Nicholls, K.H., 1999: Effects of temperature and other factors on summer phosphorus in the inner Bay of Quinte, Lake Ontario: implications for climate warming. *J. Great Lakes Res.*, **25**(5), 250–262.

Nicholson, S., 2005: On the question of the "recovery" of the rains in

the West African Sahel. *J. Arid Environ.*, **63**, 615–641.

Nicholson, S.E. and J.C. Selato, 2000: The influence of La Niña on African rainfall. *Int. J. Climatol.,* **20**, 1761–1776.

Nicholson, S.E., B. Some and B. Kone, 2000: An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Clim.*, **13**, 2628–2640.

Nilsson, C., C.A. Reidy, M. Dynesius and C. Revenga, 2005: Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, **308**, 405–408.

NLWRA, 2001: *Australian Water Resources Assessment 2000*. National Land and Water Resources Audit, Land and Water Australia.

NOAA, 2005: *Hazards/Climate Extremes*. National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce, http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2005/aug/hazards.html.Flooding.

Noone, D. and I. Simmonds, 2002: Annular variations in moisture transport mechanisms and the abundance of $\delta^{18}O$ in Antarctic snow. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4742, doi:10.1029/2002JD002262.

Norrant, C. and A. Douguédroit, 2006: Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean. *Theor. Appl. Climatol.*, **83**, 89–106.

Nurse, L. and Co-authors, 2001: Small Island States. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* J.J. McCarthy, O. F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 843–876.

Nuttall, M., F. Berkes, B. Forbes, G. Kofinas, T. Vlassova and G. Wenzel, 2005: Hunting, herding, fishing and gathering: indigenous peoples and renewable resource use in the Arctic. *Arctic Climate Impacts Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 649–690.

O'Reilly, C., S. Alin, P. Plisnier, A. Cohen and B. McKee, 2003: Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, **424**, 766-768.

Oba, G., 2001: The importance of pastoralists' indigenous coping strategies for planning drought management in the arid zone of Kenya. *Nomadic Peoples*, **5**, 89-119.

OECD, 2003: *Development and climate change in Nepal: focus on water resources and hydropower*. COM/ENV/EPOC/DCD/DAC(2003)1/FINAL, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 64 pp.

Oenema, O., N. Wrage, G.L. Velthof, J.W. van Groenigen, J. Dolfing and P.J. Kuikman, 2005: Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* **72**, 51-65.

Ogle, S.M., F.J. Breidt and K. Paustian, 2005: Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochem.,* **72,** 87-121.

Oki, T. and S. Kanae, 2006: Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, **313**, 1068–1072.

Oki, T., Y. Agata, S. Kanae, T. Saruhashi and K. Musiake, 2003: Global water resources assessment under climatic change in 2050 using TRIP. *Water Resources: Systems Water Availability and Global Change,* S.W. Franks, G. Böschl, M. Kumagai, K. Musiake and D. Rosbjerg, Eds., IAHS Publication, 124–133.

Olesen, J.E. and M. Bindi, 2002: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European J. Agronomy*, **16**, 239–262.

Olesen, J.E., T.R. Carter, C.H. Díaz-Ambrona, S. Fronzek, T. Heidmann, T. Hickler, T. Holt, M.I. Minguez, P. Morales, J. Palutikov, M. Quemada, M. Ruiz-Ramos, G. Rubæk, F. Sau, B. Smith, B. and M. Sykes, 2006: Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change*, **81**(Suppl. 1), doi: 10.1007/s10584-006-9216-1.

Olsen, J.R., 2006: Climate change and floodplain management in the United States, *Climatic Change*, **76**, 407–426.

Oltchev, A., J. Cermak, J. Gurtz, A. Tishenko, G. Kiely, N. Nadezhdina, M. Zappa, N. Lebedeva, T. Vitvar, J.D. Albertson, F. Tatarinov, D. Tishenko, V. Nadezhdin, B. Kozlov, A. Ibrom, N. Vygodskaya and G. Gravenhorst 2002: The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga source area to climatic and land-use changes. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, **27**, 675–690.

Opopol, N., R. Corobov, A. Nicolenco and V. Pantya, 2003: Climate change and potential impacts of its extreme manifestations on health. *Curier Medical,* **5**, 6-9.

Orlove, B.S., J.C.H. Chiang and M.A. Cane, 2000: Forecasting Andean rainfall and crop yield from the influence of El Niño on Pleiades visibility. *Nature*, **403**, 68-71.

Osman-Elasha, B., N. Goutbi, E. Spanger-Siegfried, B. Dougherty, A. Hanafi, S. Zakieldeen, A. Sanjak, H.A. Atti and H.M. Elhassan, 2006: *Adaptation Strategies to Increase Human Resilience Against Climate Variability and Change: Lessons from the Arid Regions of Sudan*. AIACC Working Paper No. 42, Assessment of Impacts and Adaptation to Climate Change in Multiple Regions and Sectors Programme, 42 pp.

Osterkamp, T.E., L. Vierek, Y. Shur, M.T. Jorgenson, C. Racine, A. Doyle and R.D. Boone, 2000: Observations of thermokarst and its impact on boreal forests in Alaska, U.S.A. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **32**, 303–315.

Ouranos, 2004: *Adapting to Climate Change*. Ouranos, Montreal, ON, 91 pp. http://www.ouranos.ca/cc/climang5.pdf.

Paavola, J. and W. Adger, 2002: *Justice and Adaptation to Climate Change*. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich, 24 pp. http://www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp23.pdf.

Pabón, J.D., 2003: El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos Geograf.*, **12**, 111-119.

Pachauri, R., 2004: Climate change and its implications for development: the role of IPCC assessments. *Inst. Devel. Stud. Bull.*, **35**, 11.

PAGASA (Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration), 2001: *Documentation and Analysis of Impacts of and Responses to Extreme Climate Events*. Climatology and Agrometeorology Branch Technical Paper No. 2001-2, 55 pp.

PAHO, 2003: *Status Report on Malaria Programs in the Americas*. 44th Directing Council, 55th Session of the Regional Comité. Pan American Health Organization, Washington, DC.

Palmer, T.N. and J. Räisänen, 2002: Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, **415**, 512–514.

Pan, X.L., W. Deng and D.Y. Zhang, 2003: Classification of hydrological landscapes of typical wetlands in northeast China and their vulnerability to climate change. *Res. Environ. Sci.*, **16**(1), 14–18.

Pan, Z.T.,M. Segal, R.W.Arritt and E.S. Takle, 2004: On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. *Renew. Energ.*, **29**, 1923-1928.

Parkinson, A.J. and J.C. Butler, 2005: Potential impacts of climate change on infectious diseases in the Arctic. *Int. J. Circumpolar Health*, **64**, 478–486.

Parrotta, J.A., 2002: Restoration and management of degraded tropical forest landscapes. *Modern Trends in Applied Terrestrial Ecology,* R.S. Ambasht and N.K. Ambasht, Eds., Kluwer Academic/Plenum Press, New York, 135-148.

Parry, M., C.A. Rosenzweig, M. Iglesias, M. Livermore and G. Fisher, 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global Environ. Chang.,* **14**(1), 53–67.

Parry, M.L., Ed., 2000: *Assessment of potential effects and adaptations to climate change in Europe: The Europe Acacia Project*. Report of concerted action of the environment programme of the Research Directorate General of the Commission of the European Communities, Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, 320 pp.

Parson, E.A., P.W. Mote, A. Hamlet, N. Mantua, A. Snover, W. Keeton, E. Miles, D. Canning and K.G. Ideker, 2001: Potential consequences of climate variability and change for the Pacific Northwest. *Climate Change Impacts on the United States - The Potential Consequences of Climate Variability and Change-Foundation Report*, National Assessment Synthesis Team, Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 247-280.

Parson, E.A., R.W. Corell, E.J. Barron, V. Burkett, A. Janetos, L. Joyce, T.R. Karl, M. MacCracken, J. Melillo, M.G. Morgan, D.S. Schimel and T. Wilbanks, 2003: Understanding climatic impacts, vulnerabilities and adaptation in the United States: building a capacity for assessment. *Climatic Change*, **57**, 9-42.

Pascual, M., J.A. Ahumada, L.F. Chaves, X. Rodo and M. Bouma, 2006: Malaria resurgence in the East African highlands: temperature trends revisited. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 5829-5834.

Pattanayak, S. and R. Kramer, 2000: Worth of watersheds: a producer surplus approach for valuing drought control in eastern Indonesia. *Environment and Development Economics,* **6**, 123-146.

Patz, J.A., 2002: A human disease indicator for the effects of recent global climate change. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **99**, 12506-12508.

Patz, J.A., D. Campbell-Lendrum, T. Holloway and J.A.N. Foley, 2005: Impact of regional climate change on human health. *Nature*, **438**, 310-317.

Paustian, K., B.A. Babcock, J. Hatfield, R. Lal, B.A. McCarl, S. McLaughlin, A. Mosier, C. Rice, G.P. Robertson, N.J. Rosenberg, C. Rosenzweig, W.H. Schlesinger and D. Zilberman, 2004: *Agricultural Mitigation of Greenhouse Gases: Science and Policy Options*. CAST (Council on Agricultural Science and Technology) Report, R141 2004, Ames, Iowa, 120 pp.

Payne, J.T., A.W. Wood, A.F. Hamlet, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier, 2004: Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change*, **62**(1–3), 233–256.

Penalba, O.C. and W.M. Vargas, 2004: Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1565-1580.

Peters, D.L., T.D. Prowse, A. Pietroniro and R. Leconte, 2006: Establishing the flood hydrology of the Peace–Athabasca Delta, northern Canada. *Hydrol. Process.*, **20**, 4073-4096.

Petersen, T.C., M.A. Taylor, R. Demeritte, D.L. Duncombe, S. Burton, F. Thompson, A. Porter, M. Mercedes, E. Villegas, R. Semexant Fils, A. Klein Tank, A. Martis, R. Warner, A. Joyette, W. Mills, L. Alexander and B. Gleason, 2002: Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *J. Geophys. Res.*, **107 D21**, 4601, doi:10.1029/2002JD002251.

Peterson, A.T. and J. Shaw, 2003: *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.*, **33**, 919-931.

Peterson, A.T., C. Martínez-Campos, Y. Nakazawa and E. Martínez-Meyer, 2005: Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *T. Roy. Soc. Trop. Med. H.*, **99**, 647-655.

Peterson, B.J., R.M. Holmes, J.W. McClelland, C.J. Vorosmarty, R.B. Lammers, A.I. Shiklomanov, I.A. Shiklomanov and S. Rahmstorf, 2002: Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, **298**, 2172–2173.

Peterson, T.C. and R.S. Vose, 1997: An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2837–2848.

Peterson, T.C., V.S. Golubev and P.Y. Groisman, 1995: Evaporation losing its strength. *Nature*, **377**, 687–688.

Petheram, C., G. Walker, R. Grayson, T. Thierfelder and L. Zhang, 2001: Towards a framework for predicting impacts of land-use on recharge. *Aust. J. Soil Res.*, **40**, 397-417.

Pielke, R.A., Jr and M.W. Downton, 2000: Precipitation and damaging floods: trends in the United States, 1932–97. *J. Climate*, **13**, 3625-3637.

Pienitz, R., M.S.V. Douglas and J.P. Smol, 2004: *Long-term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. Springer Verlag, Berlin, 562 pp.

Pilon-Smits, E.A.H., M.J. Ebskamp, M. Ebskamp, M. Paul, M. Jeuken, P. Weisbeek and S. Smeekens, 1995: Improved performance of transgenic fructan-accumulating tobacco under drought stress. *Plant Physiol.*, **107**, 125-130.

Pittock, B., 2003: *Climate Change: An Australian Guide to the Science and Potential Impacts*. Australian Greenhouse Office, Canberra, 239 pp.

Polemio, M. and D. Casarano, 2004: *Rainfall and Drought in Southern Italy (1821–2001)*. UNESCO/IAHS/IWHA, Pub. 286.

Polsky, C. and W.E. Easterling, 2001: Adaptation to climate variability and change in the US Great Plains: a multi-scale analysis of Ricardian climate sensitivities. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **85**, 133-144.

Porter, J.R. and M.A. Semenov, 2005: Crop responses to climatic variation. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biological Sciences*, **360**, 2021–2035.

Pounds, J.A. and R. Puschendorf, 2004: Ecology: clouded futures. *Nature*, **427**, 107–109.

Pounds, J. A., M. R. Bustamante, L.A. Coloma, J.A. Consuegra, M.P.L. Fogden, P.N. Foster, E. La Marca, K.L. Masters, A. Merino-Viteri, R. Puschendorf, S.R. Ron, G.A. Sanchez-Azofeifa, C.J. Still and B. E. Young, 2006: Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, **439**(7073), 161–167.

Premier of Victoria, 2006: Ballarat's future water supplies secured by major Bracks government action plan. Media release, 17 October 2006. http://www.premier.vic.gov.au/newsroom/news_item.asp?id=978.

Protopapas, L., S. Katchamart and A. Platonova, 2000: Weather effects on daily water use in New York City. *J. Hydrol. Eng.*, **5**, 332–338.

Prowse, T.D. and S. Beltaos, 2002: Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrol. Process.*, **16**, 805-822.

Prowse, T.D., F.J. Wrona and G. Power, 2004: *Threats to Water Availability in Canada*. Environment Canada, NWRI Scientific Assessment Report No. 3, 9–18.

Prowse, T.D. and Co-authors, 2006: Historical changes in Arctic freshwater ecosystems. *Ambio*, **35**(7), 339–346.

Prudhomme, C. and H. Davies, 2006: Comparison of different sources of uncertainty in climate change impact studies in Great Britain. Hydrological Processes: Special Issue of International Workshop "Climatic and Anthropogenic Impacts on Water Resources Variability". *Technical Document in Hydrology No*. **80** / *Document technique en hydrologie No*. **80**, UNESCO, Paris / UMR 5569, HydroSciences Montpellier, 2007, 183-190. http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001502/150251M.pdf.

Prudhomme, C., D. Jakob and C. Svensson, 2003: Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *J. Hydrol.*, **277**, 1–23.

Psenner, R. and R. Schmidt, 1992: Climate-driven pH control of remote Alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature*, **356**, 781-783.

Pulwarty, R., K. Jacobs and R. Dole, 2005: The hardest working river: drought and critical water problems on the Colorado. *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management,* D. Wilhite Ed., Taylor and Francis Press, Boca Raton, FL, 249-285.

Pulwarty, R.S. and T.S. Melis, 2001: Climate extremes and adaptive management on the Colorado River: lessons from the 1997–1998 ENSO event. *J. Environ. Manage.*, **63**, 307-324.

Qian, T. and Co-authors, 2006a: Simulation of global land surface conditions from 1948–2004. Part I: Forcing data and evaluations. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 953–975.

Qian, Y. and Co-authors, 2006b: More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01812, doi:10.1029/2005GL024586.

Qin, D.H., 2002: *Assessment of Environment Change in Western China, 2nd Volume, Prediction of Environment Change in Western China*. Science Press, Beijing, 64, 73, 115, 132, 145-154, 160-161.

Quadrelli, R. and J.M. Wallace, 2004: A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Climate*, **17**, 3728–3744.

Quayle, W.C., L.S. Peck, H. Pet, J.C. Ellis-Evans and P.R. Harrigan, 2002: Extreme responses to climate change in Antarctic lakes. *Science*, **295**(5555), 645–645.

Quayle, W.C., P. Convey, L.S. Peck, J.C. Ellis-Evans, H.G. Butler and H.J. Peat, 2003: Ecological responses of maritime Antarctic lakes to regional climate change. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Palaeoenvironmental Perspectives.* E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., American Geophysical Union, Washington, DC, 159–170.

Queensland Government, 2005: *Queensland Water Plan 2005-2010*. Queensland Government, 27 pp. http://www.nrw.qld.gov.au/water/pdf/qld_water_plan_05_10.pdf.

Ragab, R. and C. Prudhomme, 2002: Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21st century. *Biosys. Engineering*, **81**, 3–34.

Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstieg, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelson, P. and Willén, U., 2004: European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dyn.*, **22**, 13–31.

Ramírez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guérin, J. Mendoza, R.Gallaire, B. Pouyaud and E. Jordan, 2001: Small glaciers disappearing in the tropicalAndes: a case study in Bolivia: the Chacaltaya glacier, 16°S. *J. Glaciol.*, **47**, 187–194.

Rawlins, S. C., A. Chen, M. Ivey, D. Amarakoon and K. Polson, 2005: The impact of climate change/variability events on the occurrence of dengue fever in parts of the Caribbean: a retrospective study for the period 1980-2002. *West Indian Med. J. Suppl.*, **53**(2), 54.

Reay, D.S., K.A. Smith and A.C. Edwards, 2003: Nitrous oxide emission from agricultural drainage waters. *Global Chang. Biol.,* **9**, 195-203.

Reilly, J. and Co-authors, 2003: U.S. agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, **57**, 43–69.

Reilly, J.M., Ed., 2002: *Agriculture: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 136 pp.

Reist, J.D. and Co-authors, 2006a: General effects of climate change on arctic fishes and fish populations. *Ambio*, **35**(7), 370–380.

Reist, J.D. and Co-authors, 2006b: An overview of effects of climate change on selected arctic freshwater and anadromous fishes. *Ambio,* **35**(7), 381–387.

Reist, J.D. and Co-authors, 2006c: Effects of climate change and UV radiation on fisheries for arctic freshwater and anadromous species. *Ambio*, **35**(7), 402–410.

Republic of Vanuatu, 1999: *Vanuatu National Communication to the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 55 pp.

Resck, D.V.S., C.A. Vasconcellos, L. Vilela and M.C.M Macedo, 2000: Impact of conversion of Brazilian cerrados to cropland and pastureland on soil carbon pool and dynamics. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems,* R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 169-195.

Reynard, N., S. Crooks, R. Wilby and A. Kay, 2004: Climate Change and Flood Frequency in the UK. *Proc. 39th DEFRA Flood and Coastal Management Conference*, York. Defra, London, 11.1.1-11.1.12.

Richardson, D., 2002: Flood risk: the impact of climate change. *Proc. Inst. Civil Engineers-Civil Engineering*, **150**, 22–24.

Riebsame, W.E., K.M. Strzepek, J.L. Wescoat, Jr, R. Perrit, G.L. Graile, J. Jacobs, R. Leichenko, C. Magadza, H. Phien, B.J. Urbiztondo, P. Restrepo, W.R. Rose, M. Saleh, L.H. Ti, C. Tucci and D. Yates, 1995: Complex river basins. *As Climate Changes: International Impacts and Implications,* K.M. Strzepek and J.B. Smith, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 57–91.

Rivera, A., G. Casassa, R. Thomas, E. Rignot, R. Zamora, D. Antúnez, C. Acuña and F. Ordenes, 2005: Glacier wastage on Southern Adelaide Island and its impact on snow runway operations. *Ann. Glaciol.*, **41**, 57-62.

Robeson, S.M., 2002: Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change*, **52**, 219-238.

Robock, A. and Co-authors, 2000: The global soil moisture data bank. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1281–1299.

Robock, A. and Co-authors, 2005: Forty five years of observed soil moisture in Ukraine: no summer desiccation (yet). *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03401, doi:10.0129/2004GL021914.

Rockstrom, J., 2003: Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shift in rain-fed agriculture. *Philos. Trans. Roy. Soc. London - Series B*, **358**, 1997–2009.

Roderick, M.L. and G.D. Farquhar, 2004: Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1077-1090.

Roderick, M.L. and G.D. Farquhar, 2005: Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *Int. J. Climatol.*, **25**, 2031-2039.

Rogora, M., R. Mosello and S. Arisci, 2003: The effect of climate warming on the hydrochemistry of Alpine lakes. *Water Air Soil Pollut.*, **148**, 347-361.

Ronchail, J., L. Bourrel, G. Cochonneau, P. Vauchel, L. Phillips, A. Castro, J.L. Guyot and E. Oliveira, 2005: Inundations in the Mamoré Basin (south-western Amazon-Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *J. Hydrol.*, **302**, 223-238.

Root, T.L. and S.H. Schneider, 2002: Climate change: overview and implications for wildlife. *Wildlife Responses to Climate Change: North American Case Studies*, S.H. Schneider and T.L. Root, Eds., Island Press, Washington, DC, 1–56.

Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and J.A. Pounds, 2003: Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, **421**(6918), 57–60.

Rosenberg, N.J., D.J. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan and J.G. Arnold, 1999: Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Climatic Change*, **42**, 677-692.

Rosenberg, N.J., R.A. Brown, C. Izaurralde and A.M. Thomson, 2003: Integrated assessment of Hadley Centre HadCM2 climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States. I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agri. Forest Meteorol.*, **117**(1–2), 73–96.

Rosenzweig, C. and F.N. Tubiello, 2007: Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**, 855-873.

Rosenzweig, C., F.N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills and J. Bloomfield, 2002: Increased crop damage in the US from excess precipitation

under climate change. *Global Environ. Chang.*, **12**, 197–202.

Ross, M.S., J.F. Meeder, J.P. Sah, P.L. Ruiz and G.J. Telesnicki, 2000: The southeast saline Everglades revisited: 50 years of coastal vegetation change. *J. Vegetation Sci.,* **11**, 101–112.

Rowell, A. and P.F. Moore, 2000: *Global Review of Forest Fires*. WWF/IUCN, Gland, 66 pp. http://www.iucn.org/themes/fcp/publications/files/global_review_forest_fires.pdf.

Ruhland, K.M., A. Priesnitz and J.P. Smol, 2003: Paleolimnological evidence from diatoms for recent environmental changes in 50 lakes across Canadian Arctic treeline. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **35**, 110–123.

Ruosteenoja, K., T.R. Carter, K. Jylhä, and H. Tuomenvirta, 2003: *Future Climate in World Regions: An Intercomparison of Model-Based Projections for the New IPCC Emissions Scenarios*. The Finnish Environment **644**, Finnish Environment Institute, Helsinki, 83 pp.

Ruth, M., B. Davidsdottir and A. Amato, 2004: Climate change policies and capital vintage effects: the case of U.S. pulp and paper, iron and steel, and ethylene, *J. Environ. Manage.*, **70**, 235–252.

Saintilan, N. and R.J. Williams 1999: Mangrove transgression into saltmarsh environments in south east Australia. *Global Ecol. Biogeogr.*, **8**(2), 117–124.

Sala, O.A., F.S. Chapin III, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L.F. Huenneke, R.B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D.M. Lodge, H.A. Mooney, M. Oesterheld, N.L. Poff, M.T. Sykes, B.H. Walker, M. Walker and D.H. Wall, 2000: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**, 1770-1774.

Salewicz, A., 1995: Impact of climate change on the operation of Lake Kariba hydropower scheme on the Zambezi River. *Water Resources Management in the Face of Climatic and Hydrologic Uncertainties,* Z. Kaczmarek, Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 395 pp.

Salinger, M. J., 2001: Climate variation in New Zealand and the Southwest Pacific. *The Physical Environment. A New Zealand Perspective*, A. Sturman and R. Spronken-Smith, Eds., Oxford University Press, Victoria, 35 pp.

Sanders, C. and M. Phillipson, 2003: UK adaptation strategy and technical measures: the impacts of climate change on buildings. *Build. Res. Inf.*, **31**(3–4), 210–221

Sand-Jensen, K. and N.L. Pedersen, 2005: Broad-scale differences in temperature, organic carbon and oxygen consumption among lowland streams. *Freshw. Biol.*, **50**, 1927–1937.

Sankaran, M., N.P. Hanan, R.J. Scholes, J. Ratnam, D.J. Augustine, B.S. Cade, J. Gignoux, S.I. Higgins, X. le Roux, F. Ludwig, J. Ardo, F. Banyikwa, A. Bronn, G. Bucini, K.K. Caylor, M.B. Coughenour, A. Diouf, W. Ekaya, C.J. Feral, E.C. February, P.G.H. Frost, P. Hiernaux, H. Hrabar, K.L. Metzger, H.H.T. Prins, S. Ringrose, W. Sea, J. Tews, J. Worden and N. Zambatis, 2005: Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, **438**, 846-849.

Santos**,** F.D., K. Forbes and R. Moita, Eds., 2002: *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. SIAM Project Report, Gradiva, Lisbon, 456 pp.

Sanz, J.J., T.J. Potti, J. Moreno, S. Merion and O. Frias, 2003: Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region, *Global Change Biol.*, **9**, 461–472.

Scaife, A., J. Knight, G. Vallis and C.K. Folland, 2005: A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18715, doi: 10.1029/2005GL023226.

Scavia, D., J.C. Field, D.F. Boesch, R. Buddemeier, D.R. Cayan, V. Burkett, M. Fogarty, M. Harwell, R. Howarth, C. Mason, D.J. Reed, T.C. Royer, A.H. Sallenger and J.G. Titus, 2002: Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, **25**, 149–164.

Schallenberg, M., C.J. Hall and C.W. Burns, 2003: Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecol. Prog. Ser.*, **251**, 181–189.

Schär, C., P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M.A. Liniger and C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, **427**(6972), 332–336.

Scheffer, M., S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke and B. Walker, 2001: Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591-596.

Schiermeier, Q., 2006: Insurers' disaster files suggest climate is culprit. *Nature*, **441**(7094), 674–675.

Schijven, J.F. and A.M. de Roda Husman, 2005: Effect of climate changes on waterborne disease in the Netherlands. *Water Sci. Technol.*, **51**, 79-87.

Schlenker, W., W.M. Hanemann and A.C. Fisher, 2005: Will U.S. agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the hedonic approach. *American Economic Review*, **95**, 395–406.

Schlesinger, M.E. and N. Ramankutty, 1994: An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, **367**, 723–726.

Schlesinger, W.H., 1999: Carbon sequestration in soils. *Science,* **284**, 2095.

Schneeberger, C., H. Blatter, A. Abe-Ouchi and M. Wild, 2003: Modelling changes in the mass balance of glaciers of the northern hemisphere for a transient 2× CO_2 scenario. *J. Hydrol.*, **282**(1–4), 145–163.

Schofield, N.J., 1992: Tree planting for dryland salinity control in Australia. *Agroforestry Sys.,* **20**, 1-23.

Schreider, S.Y., D.I. Smith and A.J. Jakeman, 2000: Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, **47**(1–2), 91–115.

Schröter D., W. Cramer, R. Leemans, I.C. Prentice, M.B. Araújo, N.W. Arnell, A. Bondeau, H. Bugmann, T.R. Carter, C.A. Gracia, A.C. de la Vega-Leinert, M. Erhard, F. Ewert, M. Glendining, J.I. House, S. Kankaanpää, R.J.T. Klein, S. Lavorell, M. Linder, M.J. Metzger, J. Meyer, T.D. Mitchell, I. Reginster, M. Rounsevell, S. Sabaté, S. Sitch, B. Smith, J. Smith, P. Smith, M.T. Sykes, K. Thonicke, W. Thuiller, G. Tuck, S. Zaehle and B. Zierl, 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, **310**, 1333–1337.

Schulze, E.-D., 1982: Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. *Physiology and Plant Ecology II. Water Relations and Carbon Assimilation,* O.L. Lange, C.B. Osmond and H. Ziegler, Eds., Springer-Verlag, Berlin, 615-676.

Schuster, C.J., A. Ellis, W.J. Robertson, J.J. Aramini, D.F. Charron and B. Marshall, 2005: Drinking water related infectious disease outbreaks in Canada, 1974-2001. *Can. J. Public Health*, **94**, 254-258.

Scott, D., 2005: Ski industry adaptation to climate change: hard, soft and policy strategies. *Tourism and Global Environmental Change*, S. Gossling and M. Hall, Eds. Routledge, Oxford. 265–285.

Scott, D. and B. Jones, 2006: *Climate Change and Seasonality in Canadian Outdoor Recreation and Tourism,* Climate Change Action Fund, University of Waterloo, Faculty of Environmental Studies, Waterloo, ON, 33 pp.

Scudder, T., 2005: *The Future of Large Dams*. Earthscan, London, 408 pp.

Semenov, S.M., V.V. Yasukevich and E.S. Gel'ver, 2006: *Identification of Climatogenic Changes*. Publishing Centre, Meteorology and Hydrology, Moscow, 325 pp.

Senate of Canada, 2003: *Climate change: We are at Risk*. Final Report, Standing Senate Committee on Agriculture and Forestry, Ottawa.

Senhorst, H.A. and J.J. Zwolsman, 2005: Climate change and effects on water quality: a first impression. *Water Sci. Technol.*, **51**, 53–59.

Seo, S. N. and R. Mendelsohn, 2006: Climate change impacts on animal husbandry in Africa: a Ricardian analysis. *CEEPA Discussion Paper No.***9**. Special Series on Climate Change and Agriculture in Africa. The Centre for Environmental Economics and Policy in Africa, University of Pretoria, Pretoria, 42 pp.

Serreze, M.C. and Co-authors, 2003: Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system. *J. Geophys. Res.*, **108**(D2), 8160.

Shabbar, A. and W. Skinner, 2004: Summer drought patterns in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *J. Clim.*, **17**, 2866–2880.

Shanks, G.D., S.I. Hay, D.I. Stern, K. Biomndo and R.W. Snow, 2002: Meteorologic influences on *Plasmodium falciparum* malaria in the highland tea estates of Kericho, western Kenya. *Emerg. Infect. Dis.*, **8**, 1404-1408.

Shen, X.T., Z.C. Mao and J.R. Zhu, 2003: *Saltwater Intrusion in the Changjiang Estuary*. China Ocean Press, Beijing, 175 pp (in Chinese).

Sherbinin, A., A. Schiller and A. Pulsipher, 2007: The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environ. Urbaniz.*, **12**(2), 93–102.

Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B., Peterson, B.J. and Vorosmarty, C.J., 2000: The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean. *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*, E.L. Lewis, E.P. Jones, T.D. Prowse and P. Wadhams, Eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 281–296.

Shrestha, A.B., C.P. Wake, J.E. Dibb and P.A. Mayewski, 2000: Precipitation fluctuations in the Nepal Himalaya and its vicinity and relationship with some large-scale climatological parameters. *Int. J. Climatol.*, **20**, 317–327.

Shrestha, M.L. and A.B. Shrestha, 2004: *Recent Trends and Potential Climate Change Impacts on Glacier Retreat/Glacier Lakes in Nepal and Potential Adaptation Measures*. ENV/EPOC/GF/SD/RD(2004)6/FINAL, OECD, Paris, 23 pp.

Shukla, P.R., M. Kapshe and A. Garg, 2005: Development and climate: impacts and adaptation for infrastructure assets in India. *Proc. OECD Global Forum on Sustainable Development: Development and Climate Change*, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 38 pp.

Silander, J., B. Vehviläinen, J. Niemi, A. Arosilta, T. Dubrovin, J. Jormola, V. Keskisarja, A. Keto, A. Lepistö, R. Mäkinen, M. Ollila, H. Pajula, H. Pitkänen, I. Sammalkorpi, M. Suomalainen and N. Veijalainen, 2006: *Climate Change Adaptation for Hydrology and Water Resources*. FINADAPT Working Paper 6, Finnish Environment Institute Mimeographs 336, Helsinki, 54 pp.

Silvestri, G.E. and C.S. Vera, 2003: Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2115, doi:10.1029/2003GL018277.

Simonovic, S.P. and L.H. Li, 2003: Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. *J. Water Res. Pl.-ASCE*, **129**(5), 361–371.

Sims, R.E.H., A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor and P. Smith, 2006: Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biol.*, **12**, 1-23.

Sinclair, M.R., J.A. Renwick and J.W. Kidson, 1997: Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. *Mon. Weather Rev.*, **125**, 2531–2543.

Sinclair, T.R. and L.C. Purcell, 2005: Is a physiological perspective relevant in a 'genocentric' age? *J. Exp. Bot.*, **56**, 2777-2782.

Singh, R.B.K., S. Hales, N. de Wet, R. Raj, M. Hearnden and P. Weinstein, 2001: The influence of climate variation and change on diarrhoeal disease in the Pacific Islands. *Environ. Health Persp.*, **109**, 155–1594.

Small, C. and R.J. Nicholls, 2003: A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coastal Res.*, **19**, 584–599.

Smeets, E.M.W., A.P.C. Faaij, I.M. Lewandowski and W.C. Turkenburg, 2007: A bottom up quickscan and review of global bio-energy potentials to 2050. *Prog. Energy Comb. Sci.*, **33**, 56-106.

Smit, B. and E. Wall, 2003: *Adaptation to Climate Change Challenges and Opportunities: Implications and Recommendations for the Canadian Agri-Food Sector,* Senate Standing Committee on Forestry and Agriculture, Ottawa, Canada. http://www.parl.gc.ca/37/2/parlbus/commbus/senate/Com-e/agri-e/power-e/smith-e.htm.

Smith, K.A. and F. Conen, 2004: Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use Manage.,* **20**, 255-263.

Smith, L.C., Y. Sheng, G.M. MacDonald and L.D. Hinzman, 2005: Disappearing Arctic lakes. *Science*, **308**, 1429.

Smith, S.D., T.E. Huxman, S.F. Zitzer, T.N. Charlet, D.C. Housman, J.S. Coleman, L.K. Fenstermaker, J.R. Seemann and R.S. Nowak, 2000: Elevated CO_2 increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature*, **408**, 79 - 82.

Smith, V.R., 2002: Climate change in the sub-Antarctic: an illustration from Marion Island. *Climatic Change,* **52**(3), 345–357.

Smol, J.P. and Co-authors, 2005: Climate driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **102**(12), 4397–4402.

SOE, 2001: *Australia State of the Environment 2001*, Independent Report to the Commonwealth Minister for the Environment and Heritage. Australian State of the Environment Committee, CSIRO Publishing on behalf of the Department of the Environment and Heritage, 129 pp. http:/www.ea.gov.au/soe/2001.

Solanes, M. and A. Jouravlev, 2006: *Water Governance for Development and Sustainability*. Economic Commission for Latin America and the Caribbean, Santiago, 84 pp.

Somlyódy, L., 2002: *Strategic Issues of the Hungarian Water Resources Management*. Academy of Science of Hungary, Budapest, 402 pp (in Hungarian).

Sommaruga-Wograth, S., K.A. Koinig, R. Schmidt, R. Sommaruga, R. Tessadri and R. Psenner, 1997: Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature*, **387**, 64-67.

Sorensen, I., P. Stone and B. Rogers, 2000: Effect of time of sowing on yield of a short and a long-season maize hybrid. *Agronomy New Zealand*, **30**, 63–66.

SRA, 2005: Sequía en el Chaco genera fuerte pérdidas. Comunicado de prensa de la Sociedad Rural Argentina. http://www.ruralarg.org.ar/.

Stakhiv, E.Z., 1998: Policy implications of climate change impacts on water resource management. *Water Policy*, **1**, 159–175.

Steenvoorden, J. and T. Endreny, 2004: *Wastewater Re-use and Groundwater Quality*. IAHS Publication 285, 112 pp.

Stern, N., 2007: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge, 692 pp.

Stewart, I.T., D.R. Cayan and M.D. Dettinger, 2005: Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *J. Climate*, **18**, 1136–1155.

Stige, L.C., J. Stave, K.S. Chan, L. Ciannelli, N. Pettorelli, Glantz, P., H.R Herren and N.C. Stenseth, 2006: The effect of climate variation on agro-pastoral production in Africa. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 3049–3053.

Straile, D., D.M. Livingstone, G.A. Weyhenmeyer and D.G. George, 2003: The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Geophysical Monograph, 134. American Geophysical Union, Washington, DC, 279 pp.

Suarez, P., W. Anderson, V. Mahal and T.R. Lakshmanan, 2005: Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **10**(3), 231–244.

Summit Environmental Consultants, 2004: *Trepanier Landscape Unit (Westside) Water Management Plan*. Regional District of Central Okanagan and British Columbia, Ministry of Sustainable Resource Management, Kelowna, 300 pp.

Sutherland, K., B. Smit, V. Wulf, and T. Nakalevu, 2005: Vulnerability

to climate change and adaptive capacity in Samoa: the case of Saoluafata village. *Tiempo*, **54**, 11–15.

Sutherst, R.W., 2004: Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. *Clin. Microb. Rev.*, **17**, 136–173.

Sutton, R.T. and D.L.R. Hodson, 2003: Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871–1999. *J. Clim.*, **16**, 3296–3313.

Sutton, R.T. and D.L.R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, **290**, 2133–2137.

Swank, W.T. and J.E. Douglass, 1974: Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science*, **185**, 857-859.

Swarup, A., M.C. Manna and G.B. Singh, 2000: Impact of land use and management practices on organic carbon dynamics in soils of India. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*, R. Lal, J.M. Kimble and B.A. Stewart, Eds., CRC-Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 261-282.

Swiss Re, 1998: *Floods: An Insurable Risk*, Swiss Reinsurance Company, Zurich, 51 pp.

Syvitski, J.P.M., 2002: Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future. *Polar Res.*, **21**(2), 323–330.

Syvistki, J.P.M., C.J. Vorosmarty, A.J. Kettner and P. Green, 2005: Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, **308**, 376–380.

Szolgay, J., K. Hlavcova, S. Kohnová and R. Danihlik, 2004: Assessing climate change impact on river runoff in Slovakia. *Characterisation of the Runoff Regime and its Stability in the Tisza Catchment. Proc. XXII Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Brno, 30 August–2 September 2004. Brno, 2004. CD-edition.

Tao, F., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2003a: Changes in agricultural water demands and soil moisture in China over the last half-century and their effects on agricultural production. *Agri. Forest Meteorol.*, **118**, 251–261.

Tao, F., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2003b: Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agri. Eco. Environ.*, **95**, 203–215.

Tao, F., M. Yokozawa, Z. Zhang, Y. Hayashi, H. Grassl and C. Fu, 2004: Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asia summer monsoon and El Niño South Oscillation, *Clim. Res.*, **28**, 23–30.

Tao, F.L., M. Yokozawa, Y. Hayashi and E. Lin, 2005: A perspective on water resources in China: interactions between climate change and soil degradation. *Climatic Change*, **68**(1–2), 169–197.

Tebakari, T., J. Yoshitani, and C. Suvanpimol, 2005: Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand. *J. Hydrol. Eng.*, **10**, 205-215.

Thanh, T.D., Y. Saito, D.V. Huy, V.L. Nguyen, T.K.O. Ta and M. Tateishi, 2004: Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam. *Reg. Environ. Change*, **4**, 49–62.

The Water Page, 2001: BPD business partners for development water and sanitation clusters. http://www.africanwater.org/bpd.htm.

Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M.F. de Siqueira and Co-authors, 2004: Extinction from climate change. *Nature*, **427**, 145-148.

Thomas, J.M.G., K.J. Boote, L.H. Allen Jr., M. Gallo-Meagher and J.M. Davis, 2003: Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance. *Crop Science*, **43**(4), 1548–1557.

Thomas, M.K., D.F. Charron, D. Waltner-Toews, C. Schuster, A.R. Maarouf and J.D. Holt, 2006: A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975-2001. *Int. J. Environ. Health Res.*, **16**, 167-180.

Thomson, A.M., N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde and R.A. Brown, 2005a: Climate change impacts for the conterminous USA: an integrated assessment Part 5. Irrigated agriculture and national grain crop production. *Climatic Change*, **69**, 89-105.

Thomson, M.C., S.J. Mason, T. Phindela and S.J. Connor, 2005b: Use of rainfall and sea surface temperature monitoring for malaria early warning in Botswana. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, **73**, 214-221.

Thomson, M.C., F.J. Doblas-Reyes, S.J. Mason, R. Hagedorn, S.J. Connor, T. Phindela, A.P. Morse and T.N. Palmer, 2006: Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature*, **439**, 576-579.

Thornton, P.K., P.G. Jones, T.M. Owiyo, R.L. Kruska, M. Herero, P. Kristjanson, A. Notenbaert, N. Bekele and A Omolo, with contributions from V. Orindi, B. Otiende, A. Ochieng, S. Bhadwal, K. Anantram, S. Nair, V. Kumar and U. Kulkar, 2006: *Mapping Climate Vulnerability and Poverty in Africa*. Report to the Department for International Development, ILRI, Nairobi, 200 pp.

Treacy, J.M., 1994: *Las Chacras de Coparaque: Andenes y Riego en el Valle de Colca*. Instituto de Estudios Peruanos, Lima, 298 pp.

Trenberth, K.E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **71**, 988–993.

Trenberth, K.E. and J.M. Caron, 2000: The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures and precipitation. *J. Clim.*, **13**, 4358–4365.

Trenberth, K.E and T.J. Hoar, 1997. El Niño and climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 3057–3060.

Trenberth, K.E., and D.J. Shea, 2006: Atlantic hurricanes and natural variability in 2005, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L12704, doi:10.1029/2006GL026894.

Trenberth, K.E. and D.P. Stepaniak, 2001: Indices of El Niño evolution. *J. Clim.*, 14, 1697–1701.

Trenberth, K.E., A.G. Dai, R.M. Rasmussen and D.B. Parsons, 2003: The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **84**, 1205–1217.

Trenberth, K.E., D.P. Stepaniak and L. Smith, 2005: Interannual variability of the patterns of atmospheric mass distribution. *J. Clim.*, **18**, 2812–2825.

Trnka, M., M. Dubrovski and Z. Zalud, 2004: Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change*, **64**, 227–255.

Tuchman, N.C., K.A. Wahtera, R.G. Wentzel and J.A. Teeri, 2003: Elevated atmospheric CO_2 alters leaf litter quality for stream ecosystems: an *in situ* leaf decomposition study. *Hydrobiologica*, **495**, 203-211.

Tumerbaatar, D., 2003: *Annual report on permafrost: potential impacts of climate change, vulnerability and adaptation assessment for grassland ecosystem and livestock sector in Mongolia*, AIACC Project Report.

UCV, 2005: Análisis de las lluvias diarias y acumuladas durante Febrero de 2005 en la región central capital. Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluidos Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

UK Water Industry Research, 2004: *Climate Change and the Hydraulic Design of Sewerage Systems: Summary Report*. Report 03/CC/10/0, UKWIR, London.

UN, 2002: *CEO Briefing on Climate Change and the Financial Services Industry.* Environment Programme Finance Initiatives (UNEP FI).

UN, 2003: *World Water Development Report: Water for Life, Water for People*. UNESCO, Paris and Berghahn Books, Barcelona, 36 pp.

UN, 2006: *World Water Development Report 2: Water, a Shared Responsibility*. UNESCO, Paris, 601 pp.

UNCHS, 2003: *Local Action for Global Goals: Water and Sanitation in the World's Cities 2003*. Earthscan, London.

UNCHS, 2006: *Meeting Development Goals in Small Urban Centres:*

Water and Sanitation in the World's Cities 2006. Earthscan, London, 273 pp.

UNDP, 2006: *Beyond Scarcity: Power, Poverty, and the Global Water Crisis*. Human Development Report 2006. United Nations Development Program, New York.

UNEP/GRID-Arendal, 2002: *Vital Climate Graphics*. United Nations Environment Programme. http://www.grida.no/climate/vital/index.htm.

UN-HABITAT, 2003: *The Challenge of Slums: Global Report on Human Settlements 2003*, Earthscan Publications, London, 310 pp.

United States Environmental Protection Agency, 1997: Need for American Indian and Alaska Native water systems. *Drinking Water Infrastructure Needs Survey First Report to Congress*. EPA 812-R-97-001, UNEPA, Washington, DC, 27-33. http://www.epa.gov/ogwdw/needssurvey/pdfs/1997/report_needssurvey_1997_findings-tribal.pdf

Unkovich, M., 2003: Water use, competition, and crop production in low rainfall, alley farming systems of south-eastern Australia. *Australian J. Agri. Res.*, **54**, pp. 751-762.

UNMSM, 2004: Calor intenso y largas sequías. Especials, Perú. http://www.unmsm.edu.pe/Destacados/contenido.php?mver=11.

UNWWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2003: *Water for People, Water for Life - UN World Water Development Report,* UNESCO, Paris, and Berghahn Books, Oxford, 688 pp.

UNWWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2006: *Water: A Shared Responsibility*. UNESCO, Paris, and Berghahn Books, Oxford, 600 pp.

US Department of the Interior, 2005: *Water 2025: Preventing Crises and Conflict in the West*. Water 2025 Status Report, Washington, DC, 36 pp. http://www.doi.gov/water2025.

US Global Change Research Program, 2000: *Water: the Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*. National Water Assessment Group, U.S. Global Change Research Program, 160 pp. http://www.gcrio.org/NationalAssessment/water/water.pdf.

Uyarra, M., I. Cote, J. Gill, R. Tinch, D. Viner and A.L Watkinson, 2005: Island-specific preferences of tourists for environmental features: implications of climate change for tourism-dependent states. *Environ. Cons.*, **32**(1), 11–19.

van Lieshout, M., R.S. Kovats, M.T.J. Livermore and P. Martens, 2004: Climate change and malaria: analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environ. Chang.*, **14**, 87-99.

Van Rheenen, N.T., A.W. Wood, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier, 2004: Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacramento–San Joaquin River Basin hydrology and water resources. *Climatic Change*, **62**, 257-281.

Vandenberghe, J., 2002: The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. *Quaternary Int.*, **91**, 17–23.

VanRheenen, Vasilev, V., 2003: Variability of Shigella flexneri serotypes during a period in Israel, 2000-2001. *Epidemiol. Infect.*, **132**, 51–56.

Vásquez, O.C., 2004: *El Fenómeno El Niño en Perú y Bolivia: Experiencias en Participación Local*. Memoria del Encuentro Binacional Experiencias de prevención de desastres y manejo de emergencias ante el Fenómeno El Niño, Chiclayo, Peru. ITDG, 209 pp.

Vasquez-Leon, M., C.T. West, and T.J. Finan, 2003: A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexico border. *Global Environ. Chang.*, **13,** 159-173.

Venegas, S.A. and L.A. Mysak, 2000: Is there a dominant timescale of natural climate variability in the Arctic? *J. Clim.*, **13**, 3412–3434.

Vesely, J., V. Majer, J. Kopacek and S.A. Norton, 2003: Increasing temperature decreases aluminium concentrations in Central European lakes recovering from acidification. *Limnol. Oceanogr.*, **48**, 2346-2354.

Vic DSE, 2006: *Wimmera Mallee Pipeline*. Department of Sustainability and Environment, Victoria.

Villagrán de León, J., J. Scott, C. Cárdenas and S. Thompson, 2003: *Early Warning Systems in the American Hemisphere: Context, Current Status, and Future Trends*. Final Report. Hemispheric Consultation on Early Warning, Antigua, 15 pp.

Vincent, J.R., 1995: Timber trade, economics and tropical forest management. *Ecology, Conservation and Management of Southeast Asia Rainforests*, B.R. Primack and T.E. Lovejoy, Eds., Yale University Press, New Haven, CN, 241-261.

Viner, D., M. Sayer, M. Uyarra and N. Hodgson, 2006: *Climate Change and the European Countryside: Impacts on Land Management and Response Strategies*. Report prepared for the Country Land and Business Association, CLA, Norwich, 180 pp.

Viney, N.R., Bates, B.C., Charles, S.P., Webster, I.T., Bormans, M. and Aryal, S.K., 2003: Impacts of climate variability on riverine algal blooms. *Proc. International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2003 14–17 July*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., 23–28. http://mssanz.org.au/modsim03/Media/Articles/Vol%201%20Articles/23-28.pdf.

Vörösmarty, C.J., P.J. Green, J. Salisbury and R.B. Lammers, 2000: Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, **289**, 284–288.

Vörösmarty, C.J., E.M. Douglas, A.A. Green and C. Ravenga, 2005: Geospatial indicators of emerging water stress: an application to Africa. *Ambio*, **34**(3), 230–236.

Vuille, M., R.S. Bradley, M. Werner and F. Keimig, 2003: 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climatic Change*, **59**, 75-99.

Wahab, H.M., 2005: The impact of geographical information system on environmental development. *Unpublished MSc Thesis*, Faculty of Agriculture, Al-Azhar University, Cairo, 149 pp.

Wall, E., and B. Smit, 2005: Climate change adaptation in light of sustainable agriculture. *J. Sustainable Agric.*, **27**, 113–123.

Walsh, J.E. and Co-authors, 2005: Cryosphere and hydrology. *Arctic Climate Impacts Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 183–242.

Walsh, M.E., D.G. de la Torre Ugarte, H. Shapouri and S.P. Slinsky, 2003: Bioenergy crop production in the United States. *Environ. Res. Econ.*, **24**, 313-333.

Walter, M.T., D.S. Wilks, J.Y. Parlange and B.L. Schneider, 2004: Increasing evapotranspiration from the conterminous United States. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 405-408.

Wang, T., 2003: Study on desertification in China. Contents of desertification research. *J. Desert Res.*, **23**(5), 477–482.

Warren, J., J. Berner and J. Curtis, 2005: Climate change and human health: infrastructure impacts to small remote communities in the North. *Int. J. Circumpolar Health*, **64**(5), 498.

Warren, R., N. Arnell, R. Nicholls, P. Levy and J. Price, 2006: *Understanding the Regional Impacts of Climate Change*. Research Report prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 90, UEA, Norwich, 223 pp

Wassmann, R., X.H. Nguyen, T.H. Chu and P.T. To, 2004: Sea-level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: water elevation in the flood season and implications for rice production. *Climatic Change*, **66**, 89-107.

Water 21, 2002: Joining forces. *Magazine of the International Water Association*, **October**, 55-57.

Water Corporation, 2006: *Planning for New Sources of Water.* West Australian Water Corporation. http://www.watercorporation.com.au/W/water_sources_new.cfm.

Waters, D., W.E. Watt, J. Marsalek and B.C. Anderson, 2003: Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change *J. Environ. Plan. Manag.*, **46**, 755–770.

Watson, R.T. and W. Haeberli, 2004: Environmental threats, mitigation strategies and high mountain areas. Mountain Areas: A Global Resource. *Ambio*, **13**, 2-10.

Watson, R.T., M.C. Zinyowera and R.H. Moss, Eds., 1997: *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, 517 pp.

WDR, 2003: *World Disaster Report: Focus on Ethics in Aid*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, 240 pp.

WDR, 2004: *World Disaster Report: Focus on Community Resilience*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva, 240 pp.

Webster, P.J., V.O. Magana, T.N. Palmer, J. Shukla, R.A. Tomas, M. Yanagi and T. Yasunari, 1998: Monsoons: processes, predictability and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14451–14510.

Werritty, A., 2001: Living with uncertainty: climate change, river flow and water resources management in Scotland. *Sci. Total Environ.*, **294**, 29–40.

West, T.O. and G. Marland, 2003: Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochem.*, **63**, 73-83.

West, T.O. and W.M. Post, 2002: Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.,* **66**, 1930-1946.

Wheaton, E., V. Wittrock, S. Kulshretha, G. Koshida, C. Grant, A. Chipanshi and B. Bonsal, 2005: *Lessons Learned from the Canadian Drought Years of 2001 and 2002: Synthesis Report*. Saskatchewan Research Council Publication No. 11602-46E03, Saskatoon, Saskatchewan. http://www.agr.gc.ca/pfra/drought/info/11602-46E03.pdf.

White, M.A., N.S. Diffenbaugh, G.V. Jones, J.S. Pal and F. Giorgi, 2006: Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 11217-11222.

Whittington, H. and S.W. Gundry, 1998: Global climate change and hydroelectric resources. *Eng. Sci. Ed. J.*, **7**, 29-34.

WHO (World Health Organization), 2003: *Report of Synthesis Workshop on Climate Change and Health in Small Islands States*, 1-4 December 2003, Republic of the Maldives. World Health Organization, Geneva, 95 pp.

WHO (World Health Organization), 2004: *Guidelines for Drinking Water Quality. Volume 1: Recommendations*, Third Edition, WHO, Geneva, 366 pp.

WHO (World Health Organization), 2005: *Water Safety Plans: Managing Drinking Water Quality from Catchment to Consumer*. Prepared by A. Davison and Co-authors, WHO/SDE/WSH/05.06, WHO, Geneva, 235 pp.

WHO/UNICEF, 2000: *Global water supply and sanitation assessment 2000 report*. World Health Organization with UNICEF, Geneva, 79 pp. http://www.who.int/docstore/water_sanitation_healt/Globassessment/GlobalTOC.htmWHO/UNICEF.

Wijeratne, M.A., 1996: Vulnerability of Sri Lanka tea production to global climate change. *Water Air Soil Poll.,* Historical Archive, 87–94.

Wilby, R.L., 2006: When and where might climate change be detectable in UK river flows? *Geophys. Res. Lett.*, **33**(19), L19407, doi:10.1029/2006GL027552.

Wilby R.L. and I. Harris, 2006: A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.*, **42**, W02419, doi:10.1029/2005WR004065.

Williams, K.L., K.C. Ewel, R.P. Stumpf, F.E. Putz and T.W. Workman, 1999: Sea-level rise and coastal forest retreat on the west coast of Florida. *Ecology*, **80**, 2045–2063.

Williams, R.H., E.D. Larson and H. Jin, 2006: Synthetic fuels in a world of high oil and carbon prices. *Proc. 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Trondheim, Norway, June.

Williams, S.E., E.E. Bolitho and S. Fox, 2003: Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. *P. Roy. Soc. Lond. B Bio.*, **270**, 1887-1892.

Winter, T.C. and M.K. Woo, 1990: Hydrology of lakes and wetlands. *Surface Water Hydrology,* M.G. Wolman and H.C. Riggs, Eds., Geological Society of America, Boulder, CO, Vol. 0-1, 159–188.

Woo, M.K., R.D. Rowsell and R.G. Clark, 1993: *Hydrological Classification of Canadian Prairie Wetlands and Prediction of Wetland Inundation in Response to Climatic Variability.* Canadian Wildlife Service, Environment Canada, Ottawa, ON, 23 pp.

Woodruff, R.E. and Co-authors, 2002: Predicting Ross River virus epidemics from regional weather data. *Epidemiology*, **13**, 384–393.

Woodruff, R.E., C.S. Guest, M.G. Garner, N. Becker and M. Lindsay, 2006: Early warning of Ross River virus epidemics: combining surveillance data on climate and mosquitoes. *Epidemiology*, **17**(5), 569–575.

Woods, R.A. and C. Howard-Williams, 2004: Advances in freshwater sciences and management. *Freshwaters of New Zealand*, J.S. Harding, M.P. Mosley, C.P. Pearson and B.K. Sorrell, Eds., New Zealand Hydrological Society Inc. and New Zealand Limnological Society Inc., Christchurch, 764 pp.

Woodworth, P.L. and D.L. Blackman, 2004: Evidence for systematic changes in extreme high waters since the mid-1970s. *J. Climate*, **17**, 1190-1197.

World Bank, 2000: *Cities, Seas and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies. Vol. IV, Adapting to Climate Change*. The World Bank, Washington, DC, 72 pp.

World Bank, 2002: *World Development Indicators*, CD-ROM, The World Bank, Washington, DC.

World Bank, 2004a: *Water Resources Sector Strategy: Strategic Directions for World Bank Engagement*. Pub. No. 28114, The World Bank, Washington, DC, 88 pp.

World Bank, 2004b: *Modelled Observations on Development Scenarios in the Lower Mekong Basin*. Mekong Regional Water Resources Assistance Strategy, prepared for theWorld Bank with Mekong River Commission cooperation, Washington, DC and Vientiane, 142 pp. http://www. mrcmekong.org/free_download/report.htm.

World Commission on Dams, 2000: *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Earthscan, London, 442 pp.

World Water Council, 2006: *Final* R*eport of the 4th World Water Forum*. National Water Commission of Mexico, Mexico City, 262 pp.

World Water Forum, 2000: *The Africa Water Vision for 2025: Equitable and Sustainable Use of Water for Socioeconomic Development*. World Water Forum, The Hague, 30 pp.

Wright, K.R. and A. Valencia Zegarra, 2000: *Machu Picchu: A Civil Engineering Marvel*. American Society of Civil Engineers Press, Reston, Virginia, 144 pp.

Wrona, F.J. and Co-authors, 2005: Freshwater ecosystems and fisheries. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 353–452.

Wrona, F.J., T.D. Prowse, J.D. Reist, J.E. Hobbie, L.M.J. Lévesque

and W.F. Vincent, 2006: Climate change effects on aquatic biota, ecosystem structure and function. *Ambio*, **35**(7), 359–369.

WWF, 2005: *An Overview of Glaciers, Glacier Retreat, and Subsequent Impacts in Nepal, India and China*. WWF Nepal Programme, 79 pp. http://assets.panda.org/downloads/himalayaglaciersreport2005.pdf.

Xu, C.X., 2003: *China National Offshore and Coastal Wetlands Conservation Action Plan*. China Ocean Press, Beijing, 116 pp (in Chinese).

Yamada, T., 1998: *Glacier Lake and its Outburst Flood in the Nepal Himalaya*. Monograph No. 1, March 1998, Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, Tokyo, 96 pp.

Yan, X., T. Ohara and H. Akimoto, 2003: Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice field in East, Southeast and South Asian countries. *Global Change Biology,* **9**, 237-254.

Yang, D., B. Ye and A. Shiklomanov, 2004a: Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *J. Hydrometeorol*., **5**, 595–610.

Yang, D., B. Ye and D.L. Kane, 2004b: Streamflow changes over Siberian Yenisei River basin. *J. Hydrol*., **296**, 59–80.

Yang, D.Q., D.L. Kane, L.D. Hinzman, X. Zhang, T. Zhang and H. Ye, 2002: Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *J. Geophys. Res*., **107**(D23), 4694, doi:10.1029/2002JD002542.

Yin, Y.Y., Q.L. Miao and G.S. Tian, 2003: *Climate Change and Regional Sustainable Development*. Science Press, Beijing, 224 pp.

Yoshikawa, K. and L.D. Hinzman, 2003: Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost. *Permafrost Periglac. Proc*., **14**(2), 151–160.

Young, R.A., 2005: *Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods*. Resources for the Future Press, Washington, DC, 300 pp.

Zavaleta, E.S. and K.B. Hulvey, 2004: Realistic species losses disproportionately reduce grassland resistance to biological invaders. *Science*, **306**, 1175-1177.

Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schroeter, C. Hasse, U. Fritsch and W. Cramer, 2005: *Climate Change in Germany: Vulnerability and Adaptation of Climate Sensitive Sectors*. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Dessau, 205 pp.

Zeidler, R.B., 1997: Continental shorelines: climate change and integrated coastal management. *Ocean Coast. Manage*., **37**(1), 41–62.

Zhai P. and X. Pan, 2003: Trends in temperature extremes during 1951–1999 in China. *Geophys. Res. Lett*., **30**(17), 1913, doi:10.1029/2003GL018004.

Zhai, P.M., 2004: Climate change and meteorological disasters. *Sci. Techn. Rev*., **193**(7), 11–14.

Zhai, P.M., A. Sun, F. Ren, X. Liu, B. Gao and Q. Zhang, 1999: Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, **42**, 203–218.

Zhang, T.J., O.W. Frauenfeld, M.C. Serreze, A. Etringer, C. Oelke, J. McCreight, R.G. Barry, D. Gilichinsky, D.Q. Yang, H.C. Ye, F. Ling and S. Chudinova, 2005: Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. *J. Geophys. Res*., **110**(D16), D16101, doi:10.1029/2004JD005642.

Zhang, Y., W. Chen and J. Cihlar, 2003: A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes, *J. Geophys. Res*., **108**(D22), 4695 doi:10.1029/2002JD003354.

Zhou, G., N. Minakawa, A.K. Githeko and G. Yan, 2004: Association between climate variability and malaria epidemics in the East African highlands. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **101**, 2375-2380.

Zhou, Y. and R.S.J. Tol, 2005: Evaluating the costs of desalination and water transport. *Water Resourc. Res*., **41**, 1–10.

Zierl, B. and H. Bugmann, 2005: Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resourc. Res*., **41**(2), 1–13.

Appendice I: Descriptions des modèles climatiques

Modèle	Groupe d'origine	Résolution (latitude/ longitude)	Référence pour la description du modèle (voir ci-dessous)
CGCM1	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, Canada	Composante atmosphérique: ~3,7° x 3,7° Composante océanique: ~1,8° x 1,8°	Flato *et al*., 2000
HadCM2	Met Office Hadley Centre, Royaume-Uni	2,5° x 3,75°	Johns *et al*., 1997
HadCM3	Met Office Hadley Centre, Royaume-Uni	2,5° x 3,75°	Gordon *et al*., 2000 Pope *et al*., 2000
RegCM2	National Center for Atmospheric Research, États-Unis d'Amérique	~50 km	Giorgi *et al*., 1993a, b
ECHAM4 (avec OPYC3)	Max Planck Institut für Meteorologie (MPI) et Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Allemagne	~2,8° x 2,8°	Roeckner *et al*., 1996

Références:

Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader et A.J. Weaver, 2000: The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Clim. Dyn.*, **16**, 451-467.

Giorgi, F., M.R. Marinucci et G. T. Bates, 1993: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2794-2813.

Giorgi, F., M.R. Marinucci, G. T. Bates et G. DeCanio 1993: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2814-2832.

Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H.T. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell et R.A. Wood, 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, **16**,147-168.

Johns, T.C., R.E. Carnell, J.F. Crossley, J.M. Gregory, J.F.B. Mitchell, C.A. Senior, S.F.B. Tett et R.A. Wood, 1997: The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Clim. Dyn.*, **13**, 103-134.

Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree et R.A. Stratton, 2000: The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Clim. Dyn.*, **16**, 123-146.

Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese et U. Schulzweida, 1996: *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate*. Max-Planck Institute for Meteorology, Rapport n° 218, Hambourg, Allemagne, 90 p.

Appendice II: Glossaire

Rédacteur: Jean Palutikof (Royaume-Uni)

Corédacteurs: Clair Hanson (Royaume-Uni), Bryson Bates (Australie)

Le présent glossaire est fondé sur les glossaires figurant dans le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC.

Les termes en italique ont la signification suivante: *référence à une autre entrée du glossaire; référence secondaire au glossaire* (termes qui figurent dans un glossaire des contributions des Groupes de travail du GIEC au quatrième Rapport d'évaluation ou qui sont définis dans le texte d'une entrée du présent glossaire).

A.

Adaptation
Initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des *changements climatiques* réels ou prévus. On distingue plusieurs sortes d'adaptation: *anticipative* ou *réactive*, de caractère *privé* ou *public*, *autonome* ou *planifiée*. Citons à titre d'exemple l'édification de digues le long des cours d'eau ou des côtes et le remplacement des plantes fragiles psar des espèces résistant aux chocs thermiques.

Aérosols
Ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille varie généralement de 0,01 à 10 μm (millionième de mètre) et qui séjournent dans l'atmosphère plusieurs heures au moins. Les aérosols peuvent être d'origine naturelle ou humaine (*anthropique*). Ils peuvent influer sur le *climat* de diverses façons: directement, par diffusion ou *absorption* du rayonnement, et indirectement, en agissant comme des noyaux de condensation pour la formation de nuages ou en modifiant les propriétés optiques et la durée de vie des nuages.

Albédo
Fraction du *rayonnement solaire* réfléchi par une surface ou un objet, souvent exprimée en pourcentage. Les surfaces enneigées ont un albédo élevé, les sols de surface ont un albédo élevé à faible et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible. L'albédo de la Terre varie principalement en fonction de la nébulosité, de l'enneigement, de l'englacement, de la surface foliaire et des variations du couvert terrestre.

Alimentation d'une nappe souterraine
Réapprovisionnement en eau de la zone de saturation d'un *aquifère*, soit directement dans la formation concernée, soit indirectement par le biais d'une autre formation.

Anthropique
Résultant de l'action de l'homme ou fait par lui.

Aquiculture
Culture de plantes aquatiques ou élevage d'animaux aquatiques tels que le saumon ou les coquillages tenus en captivité aux fins de récolte.

Aquifère
Formation poreuse enfermant de l'eau. Un aquifère à nappe libre est alimenté directement par les précipitations locales et par les cours d'eau et les lacs avoisinants, le taux de recharge étant fonction de la perméabilité des roches et des sols susjacents.

Atmosphère
Enveloppe gazeuse de la Terre. L'atmosphère sèche est composée presque entièrement d'azote (rapport de mélange en volume de 78,1 %) et d'oxygène (rapport de mélange en volume de 20,9 %) ainsi que d'un certain nombre de gaz présents à l'état de trace, tels que l'argon (rapport de mélange en volume de 0,93 %), l'hélium et des gaz à effet de serre qui influent sur le rayonnement, notamment le *dioxyde de carbone* (rapport de mélange en volume de 0,035 %) et l'*ozone*. En outre, l'atmosphère contient de la vapeur d'eau en proportion très variable, mais générale-ment dans un rapport de mélange en volume d'environ 1 %. L'atmosphère contient également des nuages et des *aérosols*.

Atténuation
Modification et substitution des techniques employées dans le but de réduire les ressources engagées et les émissions par unité de production. Bien que certaines politiques sociales, économiques et technologiques puissent contribuer à réduire les émissions, du point de vue du *changement climatique*, l'atténuation signifie la mise en

œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de *gaz à effet de serre* et à renforcer les *puits*.

Attribution
Voir *Détection et attribution*.

B.
Base de référence
Référence pour des quantités mesurables à partir de laquelle on peut mesurer un autre résultat; par exemple, un *scénario* de non-intervention sert de référence pour l'analyse des scénarios fondés sur l'hypothèse d'une intervention.

Bassin
Surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac.

Bassin hydrographique
Zone qui recueille et draine les eaux pluviales.

Bilan de masse (des glaciers, calottes glaciaires ou nappes glaciaires)
Bilan entre le gain de masse de la masse de glace (accumulation) et la perte de masse (ablation, vêlage d'icebergs). La terminologie dans ce domaine comprend les termes suivants:
Bilan de masse spécifique: perte ou gain net de masse pendant la durée d'un *cycle hydrologique* en un point donné de la surface d'un *glacier*;
Bilan de masse totale (d'un glacier): bilan de masse spécifique intégré spatialement pour toute la surface du glacier; perte ou gain total de masse d'un glacier pendant la durée d'un cycle hydrologique;
Bilan de masse spécifique moyen: bilan de masse totale par unité de surface du glacier. Lorsque la *surface* est spécifiée (*bilan de masse surfacique spécifique*, etc.), on ne tient pas compte de l'écoulement glaciaire; dans le cas contraire, l'écoulement glaciaire et le vêlage d'icebergs sont pris en compte dans le bilan massique. Le bilan de masse surfacique spécifique est positif dans la zone d'accumulation et négatif dans la zone d'ablation.

Biocarburant
Carburant obtenu à partir de matière organique sèche ou d'huiles combustibles d'origine végétale. L'alcool, la liqueur noire issue de la préparation de la pâte à papier, le bois et l'huile de soja sont des exemples de biocarburants.

Biodiversité
Diversité totale de tous les organismes et écosystèmes présents à diverses échelles spatiales (depuis les gènes jusqu'aux *biomes* entiers).

Bioénergie
Énergie tirée de la biomasse.

Biomasse
Masse totale des organismes vivants présents dans un périmètre ou un volume donné; les végétaux morts depuis peu sont souvent inclus en tant que biomasse morte. La quantité de biomasse est exprimée en poids sec, en contenu énergétique (*énergie*) ou en teneur en carbone ou en azote.

Biome
Élément régional majeur et distinct de la *biosphère*, généralement constitué de plusieurs écosystèmes (*forêts*, cours d'eau, étangs, marécages, etc. dans une *région* de même climat). Les biomes se caractérisent par des communautés végétales et animales particulières.

Biome des glaces de mer
Biome constitué de tous les organismes marins vivant dans ou sur la banquise (eau de mer gelée) des océans polaires.

Biosphère (terrestre et marine)
Partie du système terrestre comprenant tous les *écosystèmes* et organismes vivants présents dans l'*atmosphère*, sur terre (*biosphère terrestre*) ou dans les océans (*biosphère marine*), y compris la matière organique morte qui en provient, telle que la litière, la matière organique des sols et les détritus des océans.

Biote
Ensemble des organismes vivants d'une région donnée; la flore et la faune considérées comme un tout.

Boisement
Plantation de nouvelles forêts sur des terres qui, historiquement, n'en possédaient pas (depuis 50 ans au moins). Pour une analyse plus approfondie du terme *forêt* et d'autres termes connexes tels que boisement, *reboisement* et *déboisement*, on se reportera au rapport spécial du GIEC intitulé «Land Use, Land-Use Change, and Forestry» (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000).

Bourbier
Zone humide où s'accumule la *tourbe*. Voir *Tourbière*.

C.
Calotte glaciaire
Masse de glace en forme de dôme recouvrant une zone située en altitude, d'une superficie très inférieure à celle d'une *nappe glaciaire*.

Canevas
Description circonstanciée d'un scénario (ou d'une famille de scénarios), où sont détaillées les principales caractéristiques du scénario, les relations entre les principaux éléments moteurs et la dynamique des scénarios.

Capacité d'adaptation
Ensemble des capacités, des ressources et des institutions d'un pays ou d'une *région* lui permettant de mettre en œuvre des mesures d'*adaptation* efficaces.

Carbone noir
Espèce d'*aérosol* définie de manière opérationnelle à partir de mesures de l'absorption de la lumière, de la réactivité chimique et/ou de la stabilité thermique; le carbone noir est constitué de suie, de charbon de bois et/ou de matière organique réfractaire absorbant la lumière.

Chaîne alimentaire
Chaîne de *relations trophiques* qui se forment lorsque différentes espèces se nourrissent les unes des autres. Voir *Réseau alimentaire*.

Changement climatique
Variation de l'état du *climat*, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les *changements climatiques* peuvent être dus à des processus internes naturels, à des *forçages externes* ou à des changements *anthropiques* persistants dans la composition de l'*atmosphère* ou dans l'*utilisation des terres*. On notera que la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*, dans son article premier, définit les changements climatiques comme des «changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat due à des causes naturelles. Voir également *Variabilité du climat*; *Détection et attribution*.

Changement climatique brusque
La non-linéarité du *système climatique* peut conduire à des *changements climatiques* brusques, parfois dénommés *changements climatiques rapides*, *événements brusques* ou même *événements surprise*. Le terme *brusque* se réfère souvent à des échelles temporelles plus courtes que l'échelle temporelle type du forçage responsable.
Toutefois, tous les changements climatiques brusques ne sont pas forcément imputables à des *forçages externes*. Au nombre des événements brusques possibles qui ont été envisagés figurent une réorganisation de grande ampleur de la circulation thermohaline, une déglaciation rapide et une fonte massive du *pergélisol* ou un accroissement de la respiration des sols entraînant de rapides changements dans le *cycle du carbone*. D'autres événements peuvent survenir de façon totalement inattendue, à la suite d'un forçage intense à évolution rapide d'un système non linéaire.

Choléra
Infection intestinale d'origine hydrique provoquée par une bactérie (*Vibrio cholerae*), qui se traduit par des selles aqueuses fréquentes, des crampes abdominales et un éventuel collapsus dû à la déshydratation.

Circulation de Hadley
Cellule atmosphérique d'inversion, d'origine thermique, consistant en un flux orienté vers les pôles dans la partie supérieure de la *troposphère*, en une subsidence de l'air dans les anticyclones subtropicaux, en un flux de retour faisant partie des alizés à proximité de la surface et en une ascendance de l'air à proximité de l'équateur, dans ce qu'on appelle la zone de convergence intertropicale.

Circulation méridienne océanique
Circulation convective méridienne (nord-sud) à grande échelle, moyennée zonalement, dans les océans. Dans l'Atlantique, cette circulation mobilise les eaux relativement chaudes des couches supérieures vers le nord et les eaux relativement froides des couches profondes vers le sud. Le *Gulf Stream* fait partie de cette circulation atlantique.

Circulation thermohaline
Dans les océans, circulation à grande échelle sous l'effet des variations de densité liées aux différences de température et de salinité. Dans l'Atlantique Nord, la circulation thermohaline consiste en un déplacement vers le nord des eaux chaudes de surface et en un déplacement vers le sud des eaux froides des grands fonds, entraînant un transfert net de chaleur vers le pôle. Les eaux de surface s'enfoncent vers le fond dans des zones océaniques très restreintes situées à des latitudes élevées. Appelée également *circulation méridienne océanique*.

Climat
Au sens étroit du terme, le climat désigne en général le «temps moyen» ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du *système climatique*, y compris sa description statistique.

CO_2
Voir *Dioxyde de carbone*.

Combustibles fossiles
Combustibles carbonés extraits des dépôts de carbone fossile (charbon, tourbe, pétrole, gaz naturel, etc.).

Communauté écologique
Communauté de végétaux et d'animaux caractérisée par un assemblage particulier d'espèces et par leur abondance. Voir également *Écosystème*.

Confiance
Le niveau de confiance dans la justesse d'un résultat est exprimé, dans le présent document technique, au moyen d'une terminologie standard, définie dans l'encadré 1.1. Voir également *Probabilité*; *Incertitude*.

Consommation d'eau
Quantité d'eau irrémédiablement perdue lors de son utilisation (par évaporation et production de biens). La consommation d'eau correspond à la différence entre l'eau prélevée et l'eau rejetée.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)
Convention adoptée le 9 mai 1992 à New York et signée par plus de 150 pays et par la Communauté européenne lors du Sommet Planète Terre, qui s'est tenu à Rio de Janeiro en 1992. Son objectif ultime est de «stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique». Elle contient des engagements pour toutes les Parties. Conformément à la Convention, les Parties figurant à l'*annexe I* (les pays faisant partie de l'OCDE en 1990 et les pays à économie en transition) doivent s'employer à ramener en 2000 les émissions de *gaz à effet de serre* non réglementées par le Protocole de Montréal à leur niveau de 1990. La Convention est entrée en vigueur en mars 1994. Voir *Protocole de Kyoto*.

Convention-cadre sur les changements climatiques
Voir *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*.

Corail
Le terme *corail* a plusieurs significations, mais désigne habituellement l'ordre des *Scléractinies*, dont tous les membres possèdent des exosquelettes calcaires et qui se divisent en coraux qui construisent des récifs (hermatypiques) et en coraux qui n'en construisent pas ou en coraux d'eaux froides et en coraux d'eaux chaudes. Voir *Récifs de corail*.

Couche active
Couche du sol qui est soumise chaque année à la fonte et au gel dans les régions où la sous-couche est constituée de *pergélisol*.

Couche limite
Voir *Couche limite atmosphérique*.

Couche limite atmosphérique
Couche atmosphérique adjacente à la surface de la Terre, affectée par la friction contre cette surface limite et, probablement aussi, par le transfert de chaleur et d'autres variables à travers cette surface (AMS, 2000). La partie inférieure (correspondant à une dizaine de mètres d'épaisseur) de la couche limite, où la génération mécanique de turbulences est la plus forte, est appelée *couche limite de surface* ou *couche de surface*.

Coût
Consommation de ressources (temps de travail, capitaux, matériel, combustibles, etc.) considérée comme la conséquence d'une action. En économie, toutes les ressources sont évaluées à leur *coût de substitution*, qui est le coût du renoncement à une activité économique au profit d'une autre. Les coûts sont définis de multiples façons et en fonction de diverses hypothèses qui influent sur leur valeur. Il existe différents types de coût: les *frais d'administration*, les *coûts des dommages* (causés aux écosystèmes, à l'économie et aux personnes par les effets négatifs des *changements climatiques*) et les *coûts de mise en œuvre* pour toute politique nécessitant des modifications de la règlementation existante, des efforts pour renforcer les capacités, des activités d'information, de formation et de sensibilisation, etc. Les *coûts privés* sont supportés par des personnes, des entreprises ou autres entités privées qui engagent l'action, tandis que les *coûts sociaux* comprennent en plus les coûts externes pour l'environnement et pour la société dans son ensemble. Les avantages sont le contraire des coûts (on les qualifie parfois de *coûts négatifs*). Les *coûts nets* correspondent aux coûts, moins les avantages.

Cryosphère
Composante du *système climatique* constituée de la totalité de la neige, de la glace et du *gélisol* (y compris le *pergélisol*) au-dessus et au-dessous de la surface des terres émergées et des océans. Voir également *Glacier*; *Nappe glaciaire*.

Cycle du carbone
Expression utilisée pour désigner le flux de carbone (sous diverses formes telles que le *dioxyde de carbone*) dans l'*atmosphère*, les océans, la *biosphère* terrestre et la lithosphère.

Cycle hydrologique
Cycle selon lequel l'eau des océans et l'eau présente à la surface des terres émergées s'évapore, se déplace dans l'atmosphère sous la forme de vapeur d'eau, se condense pour former des nuages, retombe sous forme de pluie ou de neige, est interceptée par les arbres et la végétation, s'écoule par *ruissellement* à la surface des terres émergées, s'infiltre dans les sols, réalimente les nappes souterraines, se déverse dans les cours d'eau et, pour finir, se jette dans les océans, d'où elle s'évapore à nouveau (AMS, 2000). Les différents systèmes participant au cycle hydrologique sont habituellement qualifiés de *systèmes hydrologiques*.

D.

Déboisement
Conversion d'une forêt en zone non forestière. Pour une analyse détaillée du terme *forêt* et de termes apparentés tels que *boisement*, *reboisement* ou déboisement, on se reportera au rapport spécial du GIEC intitulé «Land Use, Land-Use Change, and Forestry» (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000).

Décharge
Site d'élimination des déchets solides, où les déchets sont déposés au-dessous, au niveau ou au-dessus du sol. Les décharges se limitent aux sites aménagés avec matériaux de couverture, mise en décharge réglementée et gestion des liquides et des gaz et ne comprennent pas les décharges sauvages.

Dengue
Maladie infectieuse virale transmise par des moustiques, souvent appelée en anglais «breakbone fever» en raison des douleurs intenses qu'elle déclenche dans le dos et les articulations. Des infections répétées peuvent provoquer une dengue hémorragique ou une dengue à syndrome de choc, qui peuvent être mortelles.

Désert
Région à très faible pluviosité, le terme «très faible» signifiant habituellement que la hauteur de précipitation y est inférieure à 100 millimètres par an.

Désertification
Dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches due à divers facteurs, dont les variations du climat et l'activité humaine. Pour sa part, la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification définit la dégradation des terres comme la diminution ou la disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement tels que: i) l'*érosion* des sols causée par le vent et/ou l'eau; ii) la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques des sols; et iii) la disparition à long terme de la végétation naturelle.

Détection et attribution
Le *climat* varie continuellement à toutes les échelles temporelles. La ***détection*** des *changements climatiques* consiste à montrer que le climat a changé selon certains critères statistiques définis, sans donner la raison de ce changement. L'***attribution*** consiste à établir, avec un certain degré de *confiance*, les causes les plus probables du changement détecté.

Développement durable
Développement qui répond aux besoins de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins.

Déversement de glace dynamique
Déversement de glace en provenance de *nappes glaciaires* et de *calottes glaciaires* plutôt sous l'effet de la dynamique de ces nappes ou calottes (par exemple sous forme de mouvements de *glaciers*, de courants glaciaires et de vêlage d'icebergs) que par suite de la fonte ou du *ruissellement*.

Digue
Mur ou remblai érigé le long du rivage pour protéger les basses terres des inondations.

Dilatation thermique
En relation avec l'*élévation du niveau de la mer*, augmentation de volume (et diminution de la densité) résultant du réchauffement de l'eau. Un réchauffement des océans entraîne une augmentation de leur volume et, par conséquent, une élévation du niveau de la mer. Voir *Variation du niveau de la mer*.

Dioxyde de carbone (CO_2)
Gaz d'origine naturelle ou résultant de la combustion des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon, etc.) et de la *biomasse* ainsi que des *changements d'affectation des terres* et d'autres procédés industriels. C'est le principal *gaz à effet de serre anthropique* qui influe sur le bilan radiatif de la Terre. C'est aussi le gaz de référence pour la mesure des autres gaz à effet de serre, dont le *potentiel de réchauffement global* est donc égal à un.

Disparition locale
Disparition d'une espèce dans une partie seulement de son habitat; *extinction* locale.

Données indirectes
Un indicateur climatique indirect est un relevé établi localement qui est interprété selon des principes physiques et biophysiques afin de représenter certaines combinaisons de variations relatives au climat survenues dans le passé. Les données relatives au climat obtenues de cette manière sont appelées données indirectes. L'analyse de pollen, les relevés dendrochronologiques (relatifs aux anneaux de croissance des arbres), les caractéristiques des coraux et diverses données obtenues à partir des carottes de glace sont des exemples de données indirectes.

E.

Échelles spatiales et temporelles
Le *climat* peut varier selon des échelles spatiales et temporelles très diverses. Les *échelles spatiales* vont de l'échelle locale (moins de 100 000 km^2) ou régionale (100 000 à 10 millions de km^2) à l'échelle continentale (de 10 à 100 millions de km^2). Quant aux *échelles temporelles*,

elles varient de l'échelle saisonnière à l'échelle géologique (correspondant à des périodes qui peuvent couvrir des centaines de millions d'années).

Écosystème
Système d'organismes vivant en interaction les uns avec les autres et avec leur environnement physique. Les limites de ce qu'on peut appeler un écosystème sont quelque peu arbitraires et dépendent du centre d'intérêt ou du thème de l'étude effectuée. Un écosystème peut donc se limiter à un espace très réduit ou s'étendre à l'ensemble du globe.

Écoulement fluvial
Mouvement de l'eau dans le lit d'un cours d'eau, généralement exprimé en m^3/s. Synonyme de débit fluvial.

Effet de serre
Les *gaz à effet de serre* absorbent efficacement le rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, par l'*atmosphère* elle-même en raison de la présence de ces gaz et par les nuages. Le rayonnement atmosphérique est émis dans toutes les directions, y compris vers la surface de la Terre. Par conséquent, les gaz à effet de serre retiennent la chaleur dans le système surface-*troposphère*: c'est ce qu'on appelle *l'effet de serre*. Dans la troposphère, le rayonnement infrarouge thermique est étroitement lié à la température de l'atmosphère à l'altitude à laquelle il est émis, cette température diminuant en général avec l'altitude. En fait, le rayonnement infrarouge émis vers l'espace provient d'une altitude où la température est en moyenne de -19°C, en équilibre avec le rayonnement solaire net incident, alors que la surface de la Terre se maintient à une température beaucoup plus élevée, de +14 °C en moyenne. Une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre accroît l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et entraîne donc un rayonnement effectif vers l'espace depuis une altitude plus élevée et à une température plus basse. Il en résulte un *forçage radiatif* qui entraîne un renforcement de l'effet de serre; c'est ce qu'on appelle l'*effet de serre renforcé*.

Effet indirect des aérosols
Les *aérosols* peuvent provoquer indirectement un *forçage radiatif* du *système climatique* en agissant comme noyaux de condensation ou en modifiant les propriétés optiques ou la durée de vie des nuages. On distingue deux effets indirects:

L'effet sur l'albédo des nuages: forçage radiatif provoqué par un accroissement des *aérosols anthropiques*, qui entraîne une augmentation initiale de la concentration des gouttelettes et une diminution de leur taille pour une teneur fixe en eau liquide ce qui a pour effet d'augmenter l'*albédo* des nuages.

L'effet sur la durée de vie des nuages: forçage radiatif dû à l'augmentation des *aérosols anthropiques*, qui entraîne une diminution de la taille des gouttelettes, réduisant la capacité de précipitation et modifiant de ce fait la teneur en eau liquide ainsi que l'épaisseur et la durée de vie des nuages.

Outre ces effets indirects, les *aérosols* peuvent également avoir des effets semi-directs: l'absorption du rayonnement solaire par un aérosol absorbant entraîne en effet un réchauffement de l'air et une augmentation de la stabilité statique par rapport à la surface et peut également provoquer l'*évaporation* de gouttelettes.

Effets liés au marché
Incidences liées aux mécanismes du marché et qui ont une influence directe sur le *produit intérieur brut* (PIB) – par exemple des modifications de l'offre et du prix des denrées agricoles et d'autres biens. Voir également *Effets non liés au marché*.

Effets non liés au marché
Incidences sur les *écosystèmes* ou le bien-être qui ne sont pas facilement chiffrables en termes monétaires – par exemple un risque accru de mort prématurée ou l'augmentation du nombre de personnes menacées de famine. Voir également *Effets liés au marché*.

El Niño-Oscillation australe (ENSO)
El Niño, au sens original du terme, est un courant marin chaud qui se manifeste périodiquement le long de la côte de l'Équateur et du Pérou, perturbant la pêche locale. Il a depuis lors été associé à une vaste zone de réchauffement située dans la partie tropicale de l'océan Pacifique, à l'est de la ligne de changement de jour. Cet événement océanique est lié à une fluctuation du régime de pression en surface dans les zones tropicales et subtropicales, dénommée *oscillation australe*. Le phénomène résultant de la combinaison de ces deux événements, qui se produit à des échelles de temps de deux à sept ans environ, est généralement connu sous le nom d'*El Niño-oscillation australe* (*ENSO*). Il est souvent mesuré par la différence de pression en surface entre Darwin et Tahiti et par les valeurs de la température de la mer en surface au centre et à l'est du Pacifique équatorial. Lors d'un épisode ENSO, les alizés dominants faiblissent, réduisant les remontées d'eau froide et modifiant les courants océaniques de telle sorte que la température de la mer en surface augmente, ce qui a pour effet d'affaiblir encore plus les alizés. Ce phénomène exerce une grande influence sur le vent, la température de la mer en surface et les précipitations dans la partie tropicale du Pacifique. Il a également des répercussions climatiques dans toute la *région* du Pacifique et dans d'autres régions du monde, par ses effets sur les téléconnexions mondiales. La phase froide du phénomène ENSO est appelée *La Niña*.

Endémique
Limité ou propre à un endroit ou à une région. Sur le plan sanitaire, se dit d'une maladie ou d'un agent habituellement présent ou très répandu dans une population ou une zone géographique donnée.

Énergie
Quantité de travail ou de chaleur fournie. L'énergie se classe en différentes catégories et devient utile à l'homme

lorsqu'elle circule d'un point à un autre ou qu'elle est convertie d'une catégorie en une autre. L'*énergie primaire* (on parle également de *sources d'énergie*) est présente dans les ressources naturelles (charbon, pétrole brut, gaz naturel, uranium, etc.) et n'a encore fait l'objet d'aucun processus anthropique de conversion ou de transformation. Cette énergie doit être transformée et acheminée pour devenir de l'*énergie utile* (la lumière, par exemple). L'*énergie renouvelable* est obtenue à partir des flux d'énergie continus ou répétitifs qui se produisent dans le milieu naturel et comprend des technologies sans carbone, comme l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice, l'énergie de la houle et l'énergie géothermique, ainsi que des technologies neutres en carbone, telles que la biomasse. L'*énergie intrinsèque* est l'énergie utilisée pour produire une substance (métal industriel ou matériau de construction), compte tenu de l'énergie utilisée dans l'unité de production (ordre zéro), de l'énergie utilisée pour produire des matières qui sont utilisées dans l'unité de production (premier ordre) et ainsi de suite.

Enrichissement en dioxyde de carbone (CO_2)
Voir *Fertilisation par le dioxyde de carbone*.

Ensemble
Groupe de simulations effectuées à l'aide de modèles tournant en parallèle, utilisé pour obtenir des *projections climatiques*. La variabilité des résultats obtenus par les différents modèles constituant l'ensemble permet d'évaluer le degré d'*incertitude*. Des ensembles composés du même modèle, mais avec des conditions initiales différentes, permettent de caractériser uniquement l'incertitude associée à la *variabilité climatique* interne, alors que des ensembles à modèles multiples, comprenant des simulations effectuées par plusieurs modèles, prennent également en compte l'incidence des différences entre les modèles. Les ensembles à paramètres perturbés, où l'on fait varier les paramètres des modèles de façon systématique, permettent d'obtenir une estimation plus objective de l'incertitude liée à la modélisation que celle que pourraient fournir les ensembles à modèles multiples classiques.

Épidémique
Qui touche en même temps un nombre anormalement élevé d'individus; se dit spécialement des *maladies infectieuses*, mais s'applique également aux autres maladies, aux lésions ou à d'autres problèmes sanitaires liés à ces poussées épidémiques.

Équivalent en eau de la neige
Volume (ou masse) d'eau qui serait obtenu après la fonte d'une masse donnée de neige ou de glace.

Érosion
Processus d'enlèvement et de transport des sols et des roches sous l'effet des phénomènes atmosphériques, des mouvements en masse et de l'action des cours d'eau, des *glaciers*, des vagues, du vent et des eaux souterraines.

Eutrophisation
Enrichissement (naturel ou par suite d'une pollution) d'une masse d'eau (souvent peu profonde) en substances nutritives dissoutes, avec appauvrissement saisonnier de la teneur en oxygène dissous.

Évaporation
Passage de l'état liquide à l'état gazeux.

Évapotranspiration
Processus combiné d'évaporation à la surface de la Terre et de transpiration de la végétation.

Événement météorologique extrême
Événement rare en un endroit et à un moment de l'année particuliers. Si les définitions du mot «rare» varient considérablement, un événement météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que le 10e ou le 90e percentile de la fonction de densité de probabilité observée. Par définition, les caractéristiques de ce qu'on appelle *événements météorologiques extrêmes* peuvent, dans l'absolu, varier d'un endroit à un autre. Des événements extrêmes isolés ne peuvent pas être imputés purement et simplement à un *changement climatique anthropique*, car il existe toujours une chance infime pour que l'événement en question soit dû à des causes naturelles. Lorsque des conditions météorologiques extrêmes se prolongent pendant un certain temps, l'espace d'une saison par exemple, elles peuvent être considérées comme un *événement climatique extrême*, en particulier si elles correspondent à une moyenne ou à un total en lui-même extrême (par exemple une *sécheresse* ou de fortes pluies pendant toute une saison).

Extinction
Disparition totale et irréversible d'une espèce tout entière.

F.

Fertilisation par le CO_2
Voir *Fertilisation par le dioxyde de carbone*.

Fertilisation par le dioxyde de carbone (CO_2)
Stimulation de la croissance des végétaux due à l'augmentation de la concentration atmosphérique de *dioxyde de carbone* (CO_2). Selon leur mode de *photosynthèse*, certains types de plantes sont plus sensibles aux variations de la concentration atmosphérique de CO_2.

Fleur d'eau
Prolifération d'algues dans un lac, un cours d'eau ou un océan.

Flux de chaleur latente
Flux de chaleur de la surface de la Terre vers l'*atmosphère*, qui est lié à l'évaporation ou à la condensation de vapeur

d'eau à la surface du globe; composante du bilan énergétique de surface.

Forçage
Voir *Forçage externe*.

Forçage externe
Se rapporte à un agent de forçage extérieur au *système climatique* qui provoque un changement dans ce dernier. Les éruptions volcaniques, les variations du rayonnement solaire, les changements *anthropiques* de la composition de l'*atmosphère* ainsi que les *changements d'affectation des terres* sont des forçages externes.

Forçage radiatif
Variation de l'éclairement énergétique net (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en W/m^2) à la tropopause due à une modification d'un agent externe du *changement climatique*, comme par exemple une modification de la concentration de *dioxyde de carbone* ou du rayonnement solaire. On calcule le forçage radiatif après avoir laissé les températures stratosphériques éventuellement perturbées se réajuster à l'équilibre radiatif-dynamique, en maintenant toutefois toutes les propriétés *troposphériques* à leurs valeurs non perturbées. Le forçage radiatif est qualifié d'*instantané* si l'on n'observe aucune modification de la température *stratosphérique*. Dans le présent document technique, le forçage radiatif est en outre défini comme le changement par rapport à l'année 1750 et, sauf indication contraire, se rapporte à une valeur moyenne annuelle à l'échelle du globe.

Forêt
Type de végétation dominée par les arbres. Un grand nombre de définitions du terme «forêt» sont utilisées dans le monde, du fait de la grande disparité des conditions biogéophysiques, des structures sociales et des conditions économiques. Des critères particuliers sont appliqués dans le cadre du *Protocole de Kyoto*. Pour une analyse détaillée du terme *forêt* et de termes apparentés tels que *boisement*, *reboisement* ou *déboisement*, on se reportera au rapport spécial du GIEC intitulé «Land Use, Land-Use Change, and Forestry» (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000).

Forêt boréale
Forêts de pins, d'épicéas, de sapins et de mélèzes s'étendant de la côte est du Canada à l'Alaska et de la côte est de la Sibérie à la grande plaine européenne.

G.
Gaz à effet de serre (GES)
Constituants gazeux de l'*atmosphère*, tant naturels qu'*anthropiques*, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'*effet de serre*. La vapeur d'eau (H_2O), le *dioxyde de carbone* (CO_2), l'*oxyde nitreux* (N_2O), le *méthane* (CH_4) et l'*ozone* (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO_2, le N_2O et le CH_4, le *Protocole de Kyoto* traite, quant à lui, d'autres gaz à effet de serre tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC).

Gélisol
Sol ou roche dont une partie ou la totalité de l'eau interstitielle est gelée. Ce terme englobe également le *pergélisol*. Un sol qui gèle et dégèle chaque année est appelé *gélisol saisonnier*.

Gélisol saisonnier
Voir *Gélisol*.

Gestion intégrée des ressources en eau (IWRM)
Notion primordiale de la gestion des ressources en eau, cependant définie non sans ambiguïté. La gestion intégrée des ressources en eau est basée sur quatre principes énoncés lors de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement qui s'est tenue à Dublin, en 1992: 1) l'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, nécessaire à la vie, au développement et à l'environnement; 2) la mise en valeur et la gestion des ressources en eau devraient être fondées sur une approche participative faisant intervenir les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs de tous niveaux; 3) les femmes ont un rôle prépondérant à jouer en matière d'approvisionnement en eau et de gestion et de conservation des ressources en eau; 4) du fait de ses multiples usages concurrentiels, l'eau a une valeur économique et devrait être considérée comme un bien économique.

Glace de mer
Toute forme de glace présente en mer et provenant de la congélation de l'eau de mer. Il peut s'agir de morceaux distincts (*floe*) qui se déplacent à la surface de l'océan sous l'effet du vent et des courants (*banquise dérivante*) ou d'une plate-forme immobile rattachée à la côte (*banquise côtière*).

Glacier
Masse de glace terrestre s'écoulant le long d'une pente (par déformation interne et/ou glissement à la base) et limitée dans ses mouvements par les contraintes internes et la friction à la base et sur les côtés. Les glaciers sont alimentés par la neige accumulée en altitude, cette accumulation étant elle-même compensée par la fonte à basse altitude ou le déversement en mer. Voir *Bilan de masse*.

Glissement de terrain
Mouvement en masse de matériaux sous l'effet de la gravité, souvent facilité par la présence d'eau lorsque les matériaux

sont saturés; mouvement en masse rapide de sols, de roches ou de débris sur un versant.

Gouvernance
L'évolution sociale, économique et technologique des dernières décennies a conduit à reconsidérer le sens du terme «gouvernement». On a ainsi pu observer un glissement du gouvernement se rapportant strictement à l'État-nation vers la notion plus générale de gouvernance, qui recouvre les contributions des divers niveaux de gouvernement (mondial, international, régional, local) ainsi que le rôle du secteur privé, des acteurs non gouvernementaux et de la société civile.

Gradient vertical
Taux de variation d'une variable atmosphérique, généralement la température, en fonction de l'altitude. Le gradient vertical est considéré comme positif lorsque la valeur de la variable décroît avec la hauteur.

H.
Habitat
Milieu naturel ou endroit où vit une espèce végétale ou animale ou un groupe d'organismes étroitement liés particulier.

Holocène
Période géologique qui s'étend d'environ 11 600 ans avant J.-C. à nos jours.

Humidité du sol
Eau emmagasinée à la surface ou sous la surface du sol et susceptible de s'évaporer.

Hydrosphère
Composante du *système climatique* formée des eaux superficielles et souterraines liquides, telles que les océans, les mers, les cours d'eau, les lacs d'eau douce, les eaux souterraines, etc.

Hypolimnique
Se dit de la partie d'un lac qui se trouve au-dessous de la *thermocline*, constituée d'eau stagnante d'une température généralement uniforme, sauf pendant la période de renversement des eaux.

I.
Incertitude
Expression du degré d'inconnaissance d'une valeur (l'état futur du *système climatique*, par exemple). L'incertitude peut être due à un manque d'information ou à un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. Elle peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'erreurs chiffrables dans les données, d'une définition trop imprécise des concepts ou de la terminologie employés ou encore de *projections* incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives (par exemple un ensemble de valeurs calculées par divers modèles) ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'un groupe d'experts). Voir également *Probabilité*; *Confiance*.

Incidences (des changements climatiques)
Effets des *changements climatiques* sur les systèmes naturels et les *systèmes humains*. Selon que l'on tient compte ou non de l'*adaptation*, on peut établir une distinction entre incidences potentielles et incidences résiduelles:
• *Incidences potentielles*: toutes les incidences susceptibles de se produire dans le cadre d'un changement climatique prévu, sans qu'il soit tenu compte de l'*adaptation*;
• *Incidences résiduelles*: incidences des changements climatiques après *adaptation*;
Voir également *Effets liés au marché* et *Effets non liés au marché*.

Indice d'oscillation australe
Voir *El Niño-oscillation australe*.

Indice pour le Pacifique Nord (IPN)
L'IPN est une anomalie de la pression moyenne relevée au niveau de la mer qui correspond à la dépression des Aléoutiennes dans le golfe d'Alaska (30°N-65°N, 160°E-140°W). Il s'agit d'un indice de l'*oscillation décennale du Pacifique* (également connue sous de nom d'*oscillation interdécennale du Pacifique*). Pour plus d'informations, voir l'encadré 3.4 du rapport du GT I.

Infrastructure
Matériel de base, équipements collectifs, entreprises productives, installations et services nécessaires au bon fonctionnement et au développement d'une organisation, d'une ville ou d'un pays.

Intrusion d'eau salée
Phénomène par lequel de l'eau salée, plus dense, repousse des eaux douces de surface ou souterraines, généralement dans des zones côtières ou des estuaires, soit en raison d'une diminution de l'influence continentale (par exemple du fait d'une réduction du *ruissellement* et de l'alimentation connexe de la nappe souterraine ou encore d'un prélèvement excessif d'eau dans les aquifères), soit en raison d'une influence maritime accrue (par exemple du fait de l'*élévation* relative *du niveau de la mer*).

Isostasie
L'isostasie se rapporte à la façon dont la lithosphère et le manteau réagissent, d'un point de vue viscoélastique, aux modifications de charge en surface. Toute modification de la charge à laquelle sont soumis la lithosphère et/ou le manteau par suite de changements de la masse de glace terrestre, de la masse de l'océan, de la sédimentation, de l'érosion ou de processus orogéniques donne lieu à un réajustement isostatique vertical qui rétablit l'équilibre.

L.

La Niña

Voir *El Niño-oscillation australe (ENSO)*.

Lac glaciaire

Lac formé par les eaux de fonte d'un *glacier*, situé à l'avant du front (*lac proglaciaire*), à la surface (*lac supraglaciaire*), à l'intérieur (*lac intraglaciaire*) ou au-dessous (*lac sous-glaciaire*) du glacier en question.

Lentille d'eau douce

Formation lenticulaire d'eau douce souterraine se trouvant sous une île océanique et surmontant de l'eau salée.

Lessivage

Entraînement des éléments constitutifs des sols ou des produits chimiques épandus par percolation.

Ligne d'équilibre

Limite entre la partie d'un *glacier* où se produit une déperdition annuelle nette de la masse de glace (zone d'ablation) et la partie où l'on observe un accroissement annuel net (zone d'accumulation). L'altitude de cette limite est appelée *altitude de la ligne d'équilibre*.

M.

Maladie à vecteur

Maladie transmise par un *vecteur* (moustique, tique, etc.); c'est notamment le cas du *paludisme*, de la *dengue* et de la leishmaniose.

Maladie infectieuse

Toute maladie causée par des agents microbiologiques qui peut être transmise d'une personne à une autre. Cette transmission peut s'effectuer par contact physique direct, par manipulation d'un objet où se trouvent des agents infectieux, par le truchement d'un porteur de la maladie, par de l'eau contaminée ou par le biais de gouttelettes infectées expectorées ou exhalées dans l'air.

Manteau neigeux

Accumulation saisonnière de neige fondant lentement.

Mécanisme pour un développement «propre» (MDP)

Défini dans l'article 12 du *Protocole de Kyoto*, le mécanisme pour un développement «propre» poursuit un double objectif: 1) aider les Parties ne figurant pas à l'*annexe I* à parvenir à un *développement durable* ainsi qu'à contribuer à l'objectif ultime de la Convention; et 2) aider les Parties visées à l'annexe I à remplir leurs engagements chiffrés de limitation et de réduction de leurs émissions. Les unités de réduction certifiée des émissions obtenues dans le cadre de projets revelant du mécanisme pour un développement «propre» exécutés dans des pays ne figurant pas à l'annexe I qui contribuent à limiter ou à réduire les émissions de GES, lorsqu'elles sont certifiées par des entités opérationnelles désignées par la Conférence des Parties agissant en tant que Réunion des Parties, peuvent être portées au crédit des investisseurs (publics ou privés) des Parties visées à l'*annexe B*. Une part des fonds provenant d'activités de projets certifiées est utilisée pour couvrir les dépenses administratives et aider les pays en développement qui sont particulièrement vulnérables aux effets défavorables des *changements climatiques* à financer le coût de l'*adaptation*.

Méningite

Inflammation des méninges (partie de l'enveloppe du cerveau), habituellement causée par des bactéries, des virus ou des champignons.

Méthane (CH_4)

L'un des six *gaz à effet de serre* dont les émissions doivent être réduites au titre du *Protocole de Kyoto*. Constituant principal du gaz naturel, le méthane est présent dans tous les combustibles hydrocarbonés et est aussi lié à l'élevage et à l'agriculture. Le *grisou* est le gaz que l'on trouve dans les filons de charbon.

Mode de développement

Évolution basée sur un réseau de caractéristiques technologiques, économiques, sociales, institutionnelles, culturelles, biologiques et physiques qui déterminent les relations réciproques entre les *systèmes humains* et naturels, y compris les schémas de production et de consommation dans tous les pays, à une échelle temporelle donnée. Les *modes alternatifs de développement* se rapportent à diverses évolutions possibles en matière de développement, la continuation de l'évolution actuelle ne constituant qu'un mode parmi bien d'autres.

Modèle climatique

Représentation numérique du *système climatique* fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et sur leurs processus d'interaction et de *rétroaction* et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles d'une complexité variable: autrement dit, pour une composante ou une combinaison de composantes donnée, on peut définir un spectre ou une hiérarchie de modèles différant par certains aspects tels que le nombre de dimensions spatiales, le degré de représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques ou le degré d'inclusion de paramétrisations empiriques. Les modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) fournissent une représentation d'ensemble du système climatique, qui est une des plus complètes du spectre actuellement disponible. Une évolution se dessine vers des modèles plus complexes à chimie et biologie interactives (voir chapitre 8 du rapport du Groupe de travail I). Les modèles climatiques sont des outils de recherche pour l'étude et la simulation du *climat* et servent aussi à des fins opérationnelles, notamment pour les prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles.

Modèle de circulation générale
Voir *Modèle climatique*.

Modèle global dynamique de la végétation (DGVM)
Modèle simulant le développement et la dynamique de la végétation dans l'espace et dans le temps sous l'influence du *climat* et d'autres modifications du milieu.

Modes annulaires
Schémas préférentiels de changements dans la circulation atmosphérique, correspondant aux changements dans les vents d'ouest de latitude moyenne moyennés par zone. Le *mode annulaire nord* présente une polarisation vers l'Atlantique Nord et est étroitement lié à l'*oscillation nord-atlantique*, tandis que le *mode annulaire sud* se produit dans l'hémisphère Sud. La variabilité des vents d'ouest de latitude moyenne, connue également sous le nom de vacillation de la *circulation zonale* (ou *vent zonal*), est définie au moyen d'un *indice zonal*. [Encadré 3.4 du rapport du GT I]

Mondialisation
Intégration et interdépendance croissantes des pays du monde entier en raison d'une augmentation du volume et de la diversité des transactions transfrontalières de biens et services, de la libre circulation internationale des capitaux et de la diffusion accrue des technologies, des informations et de la culture.

Montagnarde
Se dit de la zone biogéographique à hauts versants frais et relativement humides située sous la zone *subalpine*, caractérisée par la présence de forêts mixtes d'arbres à feuillage caduc à basse altitude et de forêts de conifères à une altitude plus élevée.

Morbidité
Fréquence d'une maladie ou de tout autre trouble de santé dans une population donnée, compte tenu du taux de morbidité par âge. Parmi les indicateurs de morbidité figurent l'incidence ou la prévalence des maladies chroniques, les taux d'hospitalisation, les consultations pour soins de santé primaires, les jours de congé-maladie (jours d'absence au travail) et la prévalence des symptômes.

Mortalité
Fréquence des décès au sein d'une population sur une période de temps donnée; pour calculer la mortalité, on tient compte du taux de mortalité par âge, ce qui permet de déterminer l'espérance de vie et la proportion des morts prématurées.

Mousson
Inversion saisonnière tropicale et subtropicale des vents au sol et des précipitations associées, due à l'échauffement différentiel entre une masse continentale et l'océan adjacent. Les pluies de mousson se produisent principalement au-dessus des terres en été.

N.
Nappe glaciaire (ou inlandsis)
Masse de glace terrestre suffisamment épaisse pour recouvrir la majeure partie des formations rocheuses sous-jacentes, de sorte que sa forme est déterminée principalement par sa dynamique interne (écoulement de la glace à mesure qu'elle se déforme intérieurement et/ou qu'elle glisse à sa base). Une nappe glaciaire se déplace à partir d'un haut plateau central selon une très faible pente moyenne en surface. Ses bords sont fortement inclinés, et la glace s'écoule par le biais de courants de glace rapides ou de *glaciers* émissaires, parfois dans la mer ou dans des plates-formes de glace flottant sur la mer. Il n'existe actuellement que trois grandes nappes glaciaires, une au Groenland et deux en Antarctique – les nappes glaciaires antarctiques est et ouest –, séparées par la chaîne transantarctique. Les nappes glaciaires étaient plus nombreuses pendant les périodes glaciaires.

Non-linéarité
Un processus est dit «non linéaire» lorsqu'il n'y a pas de rapport de proportion simple entre ses causes et ses effets. Le *système climatique* comprend de nombreux processus non linéaires, d'où son comportement potentiellement très complexe.

O.
Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD)
Ensemble d'objectifs à échéance déterminée et mesurables visant à lutter contre la pauvreté, la famine, les maladies, l'analphabétisme, la discrimination à l'égard des femmes et la dégradation de l'environnement, adoptés en 2000 lors du Sommet du Millénaire des Nations Unies.

Obstacle
Toute difficulté qui s'oppose à la réalisation d'un but ou d'un potentiel d'*adaptation* ou d'*atténuation* et qui peut être surmontée ou atténuée par une politique, un programme ou une mesure. Le processus de *suppression des obstacles* comprend la correction directe des défaillances du marché ou la diminution des coûts de transaction dans les secteurs public et privé, notamment par l'amélioration des capacités institutionnelles, la réduction des risques et des incertitudes, la facilitation des opérations de bourse et le renforcement des politiques de réglementation.

Onde de tempête
Élévation temporaire du niveau de la mer, en un lieu donné, en raison de conditions météorologiques extrêmes (basse pression atmosphérique et/ou vents forts). L'onde de tempête est définie comme la différence entre la marée effective et la marée habituellement prévue à l'endroit et au moment considérés.

Organisation non gouvernementale (ONG)
Groupe ou association à but non lucratif, organisé en dehors des structures politiques institutionnalisées en vue

d'atteindre des objectifs sociaux et/ou environnementaux particuliers ou de servir la cause de groupes d'intérêt particuliers.

Oscillation atlantique multidécennale (OAM)
Fluctuation multidécennale (de 65 à 75 ans) dans l'Atlantique Nord, lors de laquelle les *températures de la mer en surface* indiquent la présence de phases chaudes de 1860 à 1880 et de 1930 à 1960, et de phases froides de 1905 à 1925 et de 1970 à 1990, avec une variation de l'ordre de 0,4 °C.

Oscillation décennale du Pacifique (ODP)
Également dénommée *oscillation interdécennale du Pacifique (OIP)*. Voir *Indice pour le Pacifique Nord*. [Encadré 3.4 du rapport du GT I]

Oscillation interdécennale du Pacifique (OIP)
Également dénommée *oscillation décennale du Pacifique (ODP)*. Voir *Indice pour le Pacifique Nord*. [Pour en savoir plus, consulter l'encadré 3.4 du rapport du GT I]

Oscillation nord-atlantique (NAO)
L'oscillation nord-atlantique consiste en des variations opposées de la pression barométrique à proximité de l'Islande et des Açores. Elle correspond donc à des fluctuations de la force des vents d'ouest dominants à travers l'Atlantique jusqu'en Europe et, par conséquent, à des fluctuations des cyclones déjà formés et des systèmes frontaux qui leur sont associés. Voir l'encadré 3.4 du rapport du GT I.

Oxyde nitreux (N_2O)
L'un des six *gaz à effet de serre* dont il est prévu de réduire les émissions au titre du *Protocole de Kyoto*. L'agriculture (gestion des sols et des effluents d'élevage) est la principale source anthropique d'oxyde nitreux, même si l'épuration des eaux usées, la combustion des combustibles fossiles et les procédés de l'industrie chimique jouent également un rôle important à cet égard. L'oxyde nitreux est aussi émis naturellement par toute une série de sources biologiques dans les sols et dans l'eau, et notamment par l'action microbienne dans les forêts tropicales humides.

Ozone (O_3)
Forme triatomique de l'oxygène, l'ozone est un constituant gazeux de l'*atmosphère*. Dans la *troposphère*, il se forme naturellement, mais aussi par suite de réactions photochimiques faisant intervenir des gaz dus à l'activité humaine (smog). L'ozone troposphérique agit comme un *gaz à effet de serre*. Dans la *stratosphère*, l'ozone résulte de l'interaction du rayonnement ultraviolet solaire et de l'oxygène moléculaire (O_2). L'ozone stratosphérique joue un rôle décisif dans l'équilibre radiatif stratosphérique. C'est dans la couche d'ozone que sa concentration est la plus élevée.

P.

Paludisme
Maladie parasitaire endémique ou épidémique causée par un parasite protozoaire du genre *Plasmodium* et transmise par les moustiques du genre *Anopheles*; provoque de fortes fièvres et des troubles systémiques, touche environ 300 millions de personnes et cause la mort de quelque deux millions de personnes chaque année.

Parcours
Prairies non améliorées, terres arbustives, *savanes* et *toundra*.

Partie prenante
Personne ou organisation ayant un intérêt légitime dans un projet ou une entité ou qui pourrait subir les effets de certaines mesures ou *politiques*.

Passage de contrôle
Passage d'un modèle effectué en vue d'établir une *base de référence* aux fins de comparaison avec des expériences de changements climatiques. Le passage de contrôle se fonde sur des valeurs constantes du *forçage radiatif* dû aux *gaz à effet de serre* propres aux conditions actuelles ou de l'époque *préindustrielle*.

Pays visés à l'annexe I
Groupe de pays figurant dans l'annexe I (sous sa forme amendée en 1998) de la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*, comprenant tous les pays faisant partie de l'OCDE en 1990 ainsi qu'un certain nombre de pays à économie en transition. Conformément aux articles 4.2 a) et 4.2 b) de la Convention, les pays visés à l'annexe I s'engagent à ramener individuellement ou conjointement à leurs niveaux de 1990 les émissions de *gaz à effet de serre* d'ici à 2000. Les autres pays sont appelés, par défaut, *pays ne figurant pas dans l'annexe I*.

Pays visés à l'annexe II
Groupe de pays figurant dans l'annexe II de la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*, comprenant tous les pays faisant partie de l'OCDE en 1990. Conformément à l'article 4.2 g) de la Convention, ces pays s'engagent à fournir des ressources financières afin d'aider les pays en développement à s'acquitter de leurs obligations, notamment pour ce qui concerne l'établissement des communications nationales. Les pays visés à l'annexe II sont aussi censés faciliter le transfert de technologies écologiquement rationnelles aux pays en développement.

Pays visés à l'annexe B
Pays figurant dans l'annexe B du *Protocole de Kyoto* qui sont convenus d'un objectif précis pour leurs émissions de gaz à effet de serre et comprenant tous les *pays visés à*

l'annexe I (sous sa forme amendée de 1998), à l'exception de la Turquie et du Bélarus. Voir *Protocole de Kyoto*.

Percentile
Sur une échelle de 100, valeur indiquant le pourcentage des valeurs d'un ensemble de données qui lui sont égales ou inférieures. Le percentile est souvent utilisé pour évaluer les extrêmes d'une répartition. Par exemple, le 90e (ou le 10e) percentile peut servir de seuil pour les extrêmes supérieurs (ou inférieurs).

Pergélisol
Sol (sol proprement dit ou roche, y compris la glace et les substances organiques) dont la température reste égale ou inférieure à 0 °C pendant au moins deux années consécutives. Voir aussi *Gélisol*.

Petit âge glaciaire (PAG)
Période comprise approximativement entre les années 1400 et 1900 de notre ère, pendant laquelle les températures dans l'hémisphère Nord étaient généralement inférieures à celles d'aujourd'hui, plus particulièrement en Europe.

pH
Mesure adimensionnelle de l'acidité de l'eau (ou de toute autre solution). L'eau pure a un pH égal à 7. Les solutions acides ont un pH inférieur à 7 et les solutions basiques ont un pH supérieur à 7. Le pH est mesuré sur une échelle logarithmique. Par conséquent, une diminution du pH d'une unité correspond à un décuplement de l'acidité.

Phénologie
Étude des phénomènes naturels périodiques (par exemple les stades de développement ou la migration) et de leur rapport avec le *climat* et les changements saisonniers.

Photosynthèse
Processus par lequel les plantes vertes, les algues et certaines bactéries absorbent le *dioxyde de carbone* de l'air (ou le bicarbonate de l'eau) pour produire des hydrates de carbone et rejettent de l'oxygène. La photosynthèse s'effectue selon des processus qui varient en fonction de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Voir également *Fertilisation par le dioxyde de carbone*.

Piégeage
Stockage du carbone dans des *réservoirs* terrestres ou marins. Le piégeage biologique contribue à l'élimination directe du *dioxyde de carbone* présent dans l'atmosphère par l'intermédiaire d'un *changement d'affectation des terres*, du *boisement*, du *reboisement*, du stockage du carbone dans les *décharges* et de pratiques agricoles favorisant l'augmentation de la teneur en carbone des sols.

Piégeage du carbone
Piégeage de substances contenant du carbone, en particulier le *dioxyde de carbone*. Voir *Piégeage*.

Piégeage et stockage du (dioxyde de) carbone
Processus consistant à extraire le *dioxyde de carbone* des sources d'émissions industrielles et énergétiques, à le transporter vers un site de stockage et à l'isoler de l'*atmosphère* pendant une longue période de temps.

Plancton
Micro-organismes vivant dans les couches supérieures des milieux aquatiques. Il convient de distinguer le *phytoplancton*, qui tire son énergie de la photosynthèse, et le *zooplancton*, qui se nourrit de phytoplancton.

Plantes en C_3
Plantes qui synthétisent leurs constituants à partir de molécules à trois atomes de carbone (*photosynthèse*), incluant la plupart des arbres et des plantes agricoles telles que le riz, le blé, le soja, la pomme de terre et les légumes.

Plantes en C_4
Plantes qui synthétisent leurs constituants à partir de molécules à quatre atomes de carbone (*photosynthèse*); principalement d'origine tropicale, elles comprennent de nombreuses graminées ainsi que des plantes agricoles importantes telles que le maïs, la canne à sucre, le mil et le sorgho.

Plantes herbacées
Plantes florales non ligneuses.

Plate-forme de glace
Nappe glaciaire flottante d'une épaisseur considérable, reliée à la côte (généralement d'une grande étendue, à surface plane ou légèrement ondulée); il s'agit souvent du prolongement d'une *nappe glaciaire* en mer. Presque toutes les plates-formes de glace se trouvent en Antarctique.

Politique «sans regrets»
Politique procurant des avantages nets sur le plan social et/ou économique, que se produisent ou non des *changements climatiques anthropiques*.

Politiques
Dans le contexte de la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*, les politiques sont engagées et/ou prescrites par un gouvernement – souvent de concert avec les milieux d'affaires et des entreprises établies dans le pays considéré ou avec d'autres pays –, afin d'accélérer l'application des mesures d'*atténuation* et d'*adaptation*. Au nombre des politiques figurent les taxes sur le carbone ou autres taxes sur l'énergie et les normes en matière de rendement des carburants pour les véhicules automobiles. Par *politiques communes et*

coordonnées ou politiques harmonisées, on entend les politiques adoptées conjointement par les Parties à la Convention.

Population autochtone
Il n'existe pas de définition du terme «population autochtone» qui soit reconnue sur le plan international. Au nombre des critères communs souvent retenus par le droit international et les organismes des Nations Unies pour caractériser les populations autochtones figurent: la résidence dans ou l'attachement à des habitats traditionnels géographiquement distincts, des territoires ancestraux et leurs ressources naturelles; le maintien d'identités culturelles et sociales ainsi que d'institutions sociales, économiques, culturelles et politiques autres que celles des sociétés ou cultures dominantes; le fait d'être issu de populations présentes dans une région donnée, généralement avant la création d'États ou de territoires modernes et avant l'établissement des frontières actuelles; enfin, le fait de se considérer comme faisant partie d'un groupe culturel indigène distinct et la volonté de préserver son identité culturelle.

Probabilité
La probabilité de réalisation d'un événement ou d'un résultat, lorsqu'une telle estimation probabiliste est possible, est exprimée dans le présent document technique à l'aide d'une terminologie standard définie dans l'encadré 1.1. Voir également *Confiance*; *Incertitude*.

Production nette d'un écosystème (PNE)
La production nette d'un écosystème est égale à la *production primaire nette (PPN)*, moins la perte de carbone due à la *respiration hétérotrophe* (provenant principalement de la décomposition des matières organiques) de cet *écosystème* dans une zone donnée.

Production primaire
Production, sous toutes les formes possibles, des plantes, aussi appelées producteurs primaires. Voir *Production primaire brute*, *Production primaire nette* et *Production nette d'un écosystème*.

Production primaire brute (PPB)
Quantité totale de carbone de l'atmosphère fixé par *photosynthèse*.

Production primaire nette (PPN)
Production primaire brute, moins la perte de carbone due à la *respiration* autotrophe, c'est-à-dire la somme des processus métaboliques nécessaires à la croissance et la conservation des plantes, dans une zone donnée.

Produit intérieur brut (PIB)
Valeur monétaire de tous les biens et services produits dans un pays donné.

Produit national brut (PNB)
Le produit national brut (PNB) correspond à la valeur monétaire de tous les biens et services produits par les acteurs économiques d'un pays donné; il comprend les revenus en provenance de sources étrangères revendiquées par des résidents, mais non les revenus produits par des étrangers.

Projection
Indication de l'évolution future possible d'une grandeur ou d'un ensemble de grandeurs, souvent calculée à l'aide d'un modèle. Les projections se distinguent des prévisions en ce sens qu'elles reposent sur des hypothèses concernant par exemple l'évolution des conditions socioéconomiques ou des techniques qui peuvent ou non se concrétiser et qu'elles sont donc sujettes à une forte *incertitude*. Voir également *Projection climatique*.

Projection climatique
Projection de la réaction du *système climatique* à des *scénarios d'émissions* ou de concentration de *gaz à effet de serre* et d'*aérosols* ou à des scénarios de *forçage radiatif*, basée généralement sur des simulations par des *modèles climatiques*. Les projections climatiques se distinguent des prévisions climatiques par le fait qu'elles sont fonction des scénarios d'émissions, de concentration ou de forçage radiatif utilisés, qui reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socioéconomique et technologique à venir. Or, ces hypothèses peuvent se réaliser ou non, et sont donc sujettes à une forte *incertitude*.

Protocole de Kyoto
Le Protocole de Kyoto à la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)* a été adopté en 1997 à Kyoto (Japon), lors de la troisième session de la Conférence des Parties (CdP) de la CCNUCC. Il comporte des engagements contraignants, en plus de ceux qui figurent dans la CCNUCC. Les pays visés à l'*annexe B* du Protocole (la plupart des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et des pays à économie en transition) se sont engagés à ramener leurs émissions *anthropiques* de *gaz à effet de serre* (*dioxyde de carbone*, *méthane*, *oxyde nitreux*, hydrofluorocarbones, hydrocarbures perfluorés et hexafluorure de soufre) à 5 % au moins au-dessous de leurs niveaux de 1990 pendant la période d'engagement (2008-2012). Le *Protocole de Kyoto* est entré en vigueur le 16 février 2005.

Puits
Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'*atmosphère* un *gaz à effet de serre*, un *aérosol* ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol.

R.

Reboisement
Plantation de *forêts* sur des terres anciennement forestières, mais converties à d'autres usages. Pour une analyse

détaillée du terme *forêt* et de termes apparentés tels que *boisement*, reboisement ou *déboisement*, on se reportera au rapport spécial du GIEC intitulé «Land Use, Land-Use Change, and Forestry» (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000).

Réchauffement mondial
Augmentation progressive, prévue ou observée, de la température à la surface du globe, qui est l'une des conséquences du forçage radiatif provoqué par les émissions anthropiques.

Récifs de corail
Structures calcaires ressemblant à des rochers édifiées par les *coraux* le long des côtes océaniques (*récifs côtiers*) ou sur les bancs ou les plates-formes continentales immergés à faible profondeur (*récifs-barrières*, *atolls*), surtout présentes dans les eaux océaniques tropicales et subtropicales.

Reconstitution
Utilisation d'indicateurs climatiques pour la détermination de *climats* (généralement passés).

Réduction d'échelle
Méthode permettant d'obtenir des informations à l'échelle locale ou régionale (10 à 100 kilomètres) à partir de modèles ou d'analyses de données à plus grande échelle. Il existe deux méthodes distinctes: la *réduction d'échelle dynamique* et la *réduction d'échelle empirique/statistique*. La méthode dynamique utilise les données de sortie de *modèles climatiques* régionaux, de modèles globaux à résolution spatiale variable ou de modèles globaux à haute résolution. La méthode empirique ou statistique établit des relations statistiques entre les variables atmosphériques à grande échelle et les variables climatiques locales ou régionales. Dans tous les cas, la qualité des résultats de la réduction d'échelle dépend de la qualité du modèle utilisé.

Régime
État préférentiel du *système climatique*, représentant généralement une phase des configurations ou modes de variabilité climatique prépondérants.

Régime de perturbation
Fréquence, intensité et nature des perturbations telles que les incendies, les pullulations d'insectes ou de ravageurs, les inondations et les *sécheresses*.

Région
Territoire se caractérisant par un certain nombre de particularités géographiques ou climatologiques. Le *climat* d'une région est soumis à l'influence de forçages à l'échelle locale et régionale tels que le relief, les modes d'*utilisation des terres* ou la présence de lacs, ainsi qu'aux influences plus lointaines d'autres régions.

Relation trophique
Relation écologique caractérisée par le fait qu'une espèce se nourrit d'une autre.

Rendement hydraulique
Gain en carbone de *photosynthèse* par unité d'eau perdue par *évapotranspiration*. Ce rendement peut être évalué à court terme comme le rapport entre le gain en carbone photosynthétique et la perte en eau unitaire par évapotranspiration ou, à l'échelle d'une saison, comme le rapport entre la *production primaire nette* ou le rendement agricole et la quantité d'eau disponible.

Rendement hydraulique de l'irrigation
Le *rendement hydraulique* de l'irrigation correspond à la quantité de *biomasse* ou au rendement en grains par unité d'eau d'irrigation utilisée; il s'établit généralement à une tonne environ de matière sèche par 100 millimètres d'eau d'irrigation.

Réseau alimentaire
Réseau de *relations trophiques* au sein d'une *communauté écologique* impliquant plusieurs *chaînes alimentaires* reliées entre elles.

Réservoir
Lieu de stockage naturel ou artificiel de l'eau (lac, étang, *aquifère*, etc.), où l'on peut prélever de l'eau à des fins d'irrigation ou d'alimentation en eau.

Résilience
Capacité d'un système social ou écologique d'absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement, la capacité de s'organiser et la capacité de s'adapter au stress et aux changements.

Respiration
Processus par lequel les organismes vivants transforment de la matière organique en *dioxyde de carbone* en libérant de l'énergie et en consommant de l'oxygène.

Respiration hétérotrophe
Conversion de matière organique en *dioxyde de carbone* par des organismes autres que les végétaux.

Rétroaction
Voir *Rétroaction climatique*.

Rétroaction climatique
Un mécanisme d'interaction de certains processus du *système climatique* est appelé rétroaction climatique lorsque le résultat d'un processus initial provoque, dans un second processus, des changements qui influent à leur tour sur le processus initial. Une rétroaction positive renforce le processus initial, alors qu'une rétroaction négative l'atténue.

Riverain
Relatif aux rives ou vivant ou situé sur les rives d'un cours d'eau naturel ou, parfois, d'un lac ou d'une masse d'eau sujette aux marées.

Ruissellement
Partie des précipitations qui ne s'évapore pas ou ne transpire pas, mais qui s'écoule à la surface du sol et se déverse dans les masses d'eau. Voir *Cycle hydrologique*.

S.

Sables et schistes bitumineux
Sables poreux instables, grès et schistes contenant du bitume, qui peuvent être extraits et convertis en combustibles liquides.

Salinisation
Accumulation de sels dans les sols.

Savane
Biomes tropicaux ou subtropicaux de prairies ou de terrains boisés, couverts d'arbustes, d'arbres isolés ou de bosquets très clairsemés, tous caractérisés par un *climat* sec (aride, semi-aride ou semi-humide).

Scénario
Description vraisemblable et souvent simplifiée de ce que nous réserve l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales relations et forces motrices en jeu. Les scénarios peuvent être établis à partir de *projections*, mais sont souvent basés sur des informations complémentaires émanant d'autres sources, parfois accompagnées d'un *canevas circonstancié*. Voir également *Scénarios SRES*; *Scénario climatique*; *Scénario d'émissions*.

Scénario climatique
Représentation vraisemblable et souvent simplifiée du *climat* futur, fondée sur un ensemble intrinsèquement cohérent de relations climatologiques et établie expressément pour déterminer les conséquences possibles des *changements climatiques anthropiques*, qui sert souvent à alimenter les modèles d'impact. Les *projections climatiques* servent fréquemment de matière première aux scénarios climatiques, quoique ces derniers nécessitent généralement des informations supplémentaires, par exemple sur le climat observé actuellement. Un *scénario de changement climatique* correspond à la différence entre un scénario climatique et le climat actuel.

Scénario d'émissions
Représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances susceptibles d'avoir des effets radiatifs (*gaz à effet de serre*, *aérosols*, par exemple), fondée sur un ensemble cohérent et homogène d'hypothèses relatives aux éléments moteurs (évolution démographique et socioéconomique, progrès technologique, etc.) et à leurs interactions principales. Les *scénarios de concentration*, découlant des scénarios d'émissions, servent d'entrée dans les *modèles climatiques* pour le calcul des *projections climatiques*. Voir *Scénarios SRES*.

Scénarios IS92
Voir *Scénarios d'émissions*.

Scénarios SRES
Scénarios d'émissions élaborés par Nakićenović et Swart (2000), sur lesquels sont notamment fondées certaines *projections climatiques* présentées dans le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC. Les définitions ci-après permettent de mieux comprendre l'agencement et l'utilisation de l'ensemble de ces scénarios:

• *Famille de scénarios*: scénarios fondés sur le même canevas pour ce qui est de l'évolution démographique, sociétale, économique et technologique. L'ensemble des scénarios SRES comprend quatre familles de scénarios: A1, A2, B1 et B2.

• *Scénario illustratif*: scénario qui sert à l'illustration de chacun des six groupes de scénarios présentés dans le «Résumé à l'intention des décideurs» de Nakićenović et Swart (2000). Ces scénarios illustratifs consistent en quatre scénarios de référence révisés pour les groupes de scénarios A1B, A2, B1 et B2 ainsi qu'en deux scénarios supplémentaires pour les groupes A1FI et A1T. Tous les groupes de scénarios sont également fiables.

• *Scénario de référence*: scénario diffusé à l'origine, dans sa version préliminaire, sur le site Web consacré au SRES pour représenter une famille de scénarios donnée. Pour choisir les scénarios de référence, on s'est fondé sur les quantifications initiales qui reflétaient le mieux les canevas ainsi que sur les caractéristiques des modèles utilisés. Si les scénarios de référence ne sont ni plus ni moins vraisemblables que n'importe quel autre scénario, l'équipe de rédaction du SRES a cependant estimé qu'ils illustraient fort bien les canevas considérés. Ces scénarios – qui figurent sous une forme revue et corrigée dans Nakićenović et Swart (2000) – ont été examinés avec la plus grande attention par toute l'équipe de rédaction et dans le cadre du processus ouvert propre au SRES. Des scénarios ont également été choisis pour illustrer les deux autres groupes de scénarios.

• *Canevas*: description circonstanciée d'un scénario (ou d'une famille de scénarios), qui met en lumière les principales caractéristiques du scénario, les relations entre les principaux éléments moteurs et la dynamique de leur évolution.

Sécheresse
En termes généraux, la sécheresse est «une absence prolongée ou une insuffisance marquée de précipitations», «une insuffisance de précipitations entraînant une pénurie d'eau pour certaines activités ou certains groupes» ou «une période de temps anormalement sec suffisamment longue pour que le manque de précipitations cause un déséquilibre

hydrologique sérieux» (Heim, 2002). La sécheresse est définie de plusieurs façons. La *sécheresse agricole* désigne un déficit hydrique dans la couche supérieure (un mètre environ) du sol (la zone radiculaire), qui affecte les cultures; la *sécheresse météorologique* est essentiellement un manque prolongé de précipitations; quant à la *sécheresse hydrologique*, elle se caractérise par un débit des cours d'eau et un niveau des lacs et des nappes souterraines inférieurs à la normale. Une *méga-sécheresse* est une sécheresse persistante et étendue, d'une durée très supérieure à la normale (en général une décennie ou plus).

Sécurité alimentaire
Situation dans laquelle des personnes ont un accès assuré à une nourriture saine et nutritive en quantités suffisantes pour leur garantir une croissance normale et une vie saine et active. L'*insécurité alimentaire* peut résulter d'un manque de nourriture, d'un pouvoir d'achat insuffisant, de problèmes de distribution ou d'une mauvaise utilisation des aliments dans les ménages.

Sécurité hydrique
Approvisionnement en eau en quantité et en qualité suffisantes pour assurer des conditions sanitaires et environnementales satisfaisantes et pour préserver les moyens de subsistance et de production.

Sensibilité
Degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la *variabilité du climat* ou les *changements climatiques*. Les effets peuvent être *directs* (par exemple la modification des rendements agricoles due à un changement de la valeur moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou *indirects* (par exemple les dommages causés par une augmentation de fréquence des inondations côtières en raison d'une *élévation du niveau de la mer*).

Seuil
Degré d'ampleur d'un processus où survient un changement soudain ou rapide. Point ou niveau où un système écologique, économique ou autre acquiert des propriétés nouvelles, qui invalident les prévisions fondées sur des relations mathématiques applicables aux niveaux inférieurs.

Source
Tout procédé, activité ou mécanisme qui libère dans l'*atmosphère* des *gaz à effet de serre*, des *aérosols* ou des précurseurs de gaz à effet de serre ou d'aérosols. Le terme source peut aussi se rapporter à une source d'*énergie*, par exemple.

Stratosphère
Région très stratifiée de l'*atmosphère* située au-dessus de la *troposphère* et s'étendant de 10 kilomètres (neuf kilomètres aux hautes latitudes et 16 kilomètres en zone tropicale en moyenne) à 50 kilomètres d'altitude environ.

Stress hydrique
Un pays est soumis à un stress hydrique lorsque la nécessité d'une alimentation en eau douce assurée par prélèvement d'eau est un frein au développement. Dans les évaluations à l'échelle du globe, les bassins soumis à un stress hydrique sont souvent définis comme des bassins où les disponibilités en eau par habitant sont inférieures à 1 000 m^3/an (sur la base du ruissellement moyen à long terme). Des prélèvements d'eau représentant plus de 20 % de l'alimentation en eau renouvelable sont considérés comme un indice de stress hydrique. Les cultures sont soumises à un stress hydrique si l'humidité du sol, donc l'*évapotranspiration* effective, est inférieure aux besoins potentiels en la matière.

Subvention
Initiative gouvernementale consistant à octroyer des crédits ou à accorder une réduction d'impôt à une entité privée afin de faciliter la mise en œuvre d'une pratique que le gouvernement souhaite promouvoir. On encourage la réduction des *émissions de gaz à effet de serre* en restreignant les subventions existantes qui ont pour effet d'augmenter ces émissions (par exemple les subventions destinées à favoriser l'utilisation des combustibles fossiles) ou en octroyant des subventions destinées à encourager les pratiques qui contribuent à réduire ces émissions ou à donner plus d'ampleur aux puits (par exemple pour l'isolation des bâtiments ou la plantation d'arbres).

Succulentes
Plantes grasses telles que les cactus, qui possèdent des organes leur permettant d'emmagasiner l'eau et de survivre en période de *sécheresse*.

Sylviculture
Culture et entretien des *forêts*.

Système climatique
Système extrêmement complexe comprenant cinq grands éléments (l'*atmosphère*, l'*hydrosphère*, la *cryosphère*, les terres émergées et la *biosphère*) et qui résulte de leurs interactions. Ce système évolue avec le temps sous l'effet de sa propre dynamique interne et en raison de *forçages externes* tels que les éruptions volcaniques, les variations de l'activité solaire ou les forçages *anthropiques* (par exemple les variations de la composition de l'atmosphère ou les *changements d'affectation des terres*).

Système humain
Tout système où l'organisation humaine joue un rôle de premier plan. Souvent, mais pas toujours, synonyme de *société* ou de *système social* (système agricole, système politique, système technologique, système économique, etc.).

Systèmes hydrologiques
Voir *Cycle hydrologique*.

T.

Taïga
Partie la plus septentrionale de la ceinture de *forêts boréales* adjacente à la *toundra* arctique.

Technologie
Mise en pratique de connaissances en vue d'accomplir des tâches particulières qui nécessitent à la fois des artefacts techniques (matériel et équipement) et des informations (sociales) («logiciels», savoir-faire pour la production et l'utilisation des artefacts).

Téléconnexion
Connexion entre les *variations du climat* dans des régions du monde très éloignées les unes des autres. D'un point de vue physique, les téléconnexions sont souvent une conséquence de mouvements ondulatoires à grande échelle, par le biais desquels de l'énergie est transférée depuis sa source jusque dans l'*atmosphère*, le long d'itinéraires préférentiels.

Téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord (PNA)
Configuration ondulatoire atmosphérique à grande échelle présentant une séquence d'anomalies troposphériques anticycloniques et dépressionnaires s'étendant depuis la partie ouest du Pacifique subtropical jusqu'à la côte est de l'Amérique du Nord. [Encadré 3.4 du rapport du GT I]

Température de la mer en surface (SST)
Température moyenne de la subsurface dans les premiers mètres des eaux océaniques, mesurée depuis des bateaux, des bouées ancrées ou des bouées dérivantes. Pour ce qui est des mesures effectuées depuis des bateaux, elles se faisaient sur des échantillons prélevés dans des seaux, puis, à partir des années 1940, sur des échantillons prélevés à l'admission d'eau des moteurs. Des mesures par satellite de la température pelliculaire (correspondant à la couche superficielle d'une fraction de millimètre d'épaisseur) dans l'infrarouge ou de la température de la mer dans le premier centimètre environ au-dessous de la surface en hyperfréquences sont également utilisées, mais elles doivent être corrigées afin d'assurer leur compatibilité avec la température moyenne.

Tendance
Dans le présent document technique, le terme *tendance* désigne un changement, généralement monotone, dans la valeur d'une variable.

Thermocline
Zone des océans, située en général à une profondeur d'un kilomètre, où la température décroît rapidement avec la profondeur et qui marque la limite entre les eaux de surface et les eaux profondes.

Thermokarst
Modelé irrégulier en bosses et en creux souvent remplis d'eau (étangs) qui résulte de la fonte de la glace souterraine ou du *pergélisol*. Les processus thermokarstiques sont des processus régis par le réchauffement qui entraînent la formation de thermokarst.

Toundra
Plaine non arborée, plate ou légèrement ondulée, propre aux régions arctiques et subarctiques, caractérisée par des températures basses et une période de végétation courte.

Tourbe
La tourbe est formée de plantes mortes, habituellement des mousses de type sphaigne, partiellement décomposées du fait de leur immersion permanente dans l'eau et de la présence de substances préservatrices telles que les acides humiques.

Tourbière
Zone humide acide, tel qu'un *bourbier*, où s'accumule lentement la *tourbe*; milieu marécageux.

Tourbière ombrotrophique
Zone humide acide où la *tourbe* s'accumule, alimenté par les eaux pluviales (et non par des eaux souterraines) et, par conséquent, particulièrement pauvre en éléments nutritifs.

Trajectoires des tempêtes
Terme désignant, à l'origine, les tracés de systèmes cycloniques particuliers, mais souvent utilisé de nos jours pour désigner, de façon plus générale, les *régions* où l'on observe le passage fréquent de perturbations extratropicales liées à des séries de systèmes de basses pressions (dépressionnaires ou cycloniques) et de hautes pressions (anticycloniques).

Transpiration
Évaporation de la vapeur d'eau à partir de la surface des feuilles par les stomates. Voir *Évapotranspiration*.

Troposphère
Partie inférieure de l'*atmosphère*, s'étendant de la surface de la Terre à environ 10 kilomètres d'altitude aux latitudes moyennes (cette altitude variant en moyenne de neuf kilomètres aux latitudes élevées à 16 kilomètres en zone tropicale), où se forment les nuages et se produisent les phénomènes météorologiques. Dans la troposphère, la température diminue généralement avec l'altitude.

U.

Urbanisation
Conversion de terres à l'état naturel, exploitées (à des fins agricoles, par exemple) ou non, en zones urbaines; le processus va de pair avec un exode rural, une proportion croissante de la population venant s'installer dans des établissements définis comme des *centres urbains*.

Utilisation des terres et changement d'affectation des terres
Le terme ***utilisation des terres*** désigne l'ensemble des dispositions, activités et apports par type de couverture

terrestre (ensemble d'activités humaines). Ce terme est également utilisé pour définir les objectifs sociaux et économiques de l'exploitation des terres (pâturage, exploitation forestière et conservation, par exemple).
Le terme ***changement d'affectation des terres*** désigne un changement apporté par l'homme dans l'utilisation ou la gestion des terres, qui peut entraîner une modification de la couverture terrestre. Tant cette modification que le changement d'affectation des terres peuvent avoir une incidence sur l'*albédo* de la surface du globe, l'*évapotranspiration*, les *sources* et les *puits* de *gaz à effet de serre* ou sur d'autres propriétés du *système climatique* et peuvent donc entraîner un *forçage radiatif* et/ou avoir d'autres répercussions sur le *climat*, à l'échelle locale ou mondiale. Voir également le rapport spécial du GIEC intitulé «Land Use, Land-Use Change, and Forestry» (Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie) (IPCC, 2000).

V.
Variabilité du climat

Variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts types, phénomènes extrêmes, etc.) du *climat* à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà de la variabilité propre à des phénomènes climatiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du *système climatique* (*variabilité interne*) ou à des variations des *forçages externes anthropiques* ou naturels (*variabilité externe*). Voir également *Changement climatique*.

Variabilité interne

Voir *Variabilité du climat*.

Variation équivalente du niveau de la mer

Variation du niveau moyen mondial de la mer susceptible de se produire si une quantité donnée d'eau ou de glace est ajoutée ou retranchée aux océans.

Variation/élévation du niveau de la mer

Le niveau de la mer peut varier, à l'échelle mondiale et locale, à la suite de modifications i) de la forme des bassins océaniques, ii) de la masse totale d'eau et iii) de la densité de l'eau. Au nombre des facteurs qui concourent à une élévation du niveau de la mer dans le contexte d'un réchauffement général figurent à la fois l'augmentation de la masse totale d'eau due à la fonte de la neige et de la glace présentes sur les terres émergées et les variations de la densité de l'eau dues à une hausse de la température des eaux océaniques et à des modifications de la salinité. L'*élévation relative du niveau de la mer* correspond à une augmentation locale du niveau de l'océan par rapport à la terre, qui peut être provoquée par la montée des eaux océaniques et/ou par une subsidence des terres émergées.

Vecteur

Organisme (un insecte, par exemple) susceptible de transmettre un agent pathogène d'un hôte à un autre.

Vulnérabilité

Mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des *changements climatiques*, y compris la *variabilité du climat* et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de l'évolution et de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la *sensibilité* de ce système et de sa *capacité d'adaptation*.

Z.
Zone alpine

Zone biogéographique correspondant aux régions escarpées qui se trouvent au-dessus de la limite des arbres et caractérisée par la présence de plantes herbacées à rosettes et de plantes arbustives ligneuses à croissance lente.

Zone aride

Région des terres émergées à faible pluviosité, *faible* signifiant généralement que la précipitation y est inférieure à 250 millimètres par an.

Zone humide

Zone de transition régulièrement engorgée, constituée de sols mal drainés, souvent comprise entre un *écosystème* aquatique et un écosystème terrestre et alimentée par les pluies et les eaux de surface ou souterraines. Les zones humides sont caractérisées par la prédominance d'une végétation adaptée aux sols saturés en eau.

Zones semi-arides

Régions à pluviosité faible à modérée, peu productives et généralement classées dans la catégorie des *parcours*. L'expression «pluviosité faible à modérée» correspond habituellement à une hauteur de précipitations comprise entre 100 et 250 millimètres par an. Voir également *Zone aride*.

Références

AMS, 2000: *AMS Glossary of Meteorology*, 2e édition, American Meteorological Society, Boston, MA. http://amsglossary.allenpress.com/glossary/browse.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2000: *Land Use, Land-Use Change, and Forestry,* R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo et D. J. Dokken, éd., Cambridge University Press, Cambridge, 375 p.

Heim, R. R., 2002: «A review of twentieth century drought indices used in the United States», *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, p 1149-1165.

IUCN, 1980: *Stratégie mondiale de la conservation: la conservation des ressources vivantes au service du développement durable,* IUCN/PNUE/WWF, Gland.

Nakićenović, N. et R. Swart, éd., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, 599 p.

Appendice III: Acronymes, symboles chimiques et unités de mesure

III.1 Acronymes et symboles chimiques

ACIA	Évaluation de l'impact du climat dans l'Arctique
BRD	Boisement, reboisement et déboisement
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCS	Piégeage et stockage du dioxyde de carbone
CEPALC	Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes
CH_4	Méthane, voir glossaire
CO_2	Dioxyde de carbone, voir glossaire
CRU	Unité de recherche climatologique
DJF	Décembre, janvier, février
ENSO	*El Niño*-oscillation australe
EROS	Système d'observation des ressources terrestres
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
GHCN	Réseau mondial de données climatologiques anciennes
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLOF	Crue de rupture de lacs glaciaires
GPCC	Centre mondial de climatologie des précipitations
GPCP	Projet mondial de climatologie des précipitations
GT I	Groupe de travail I (du GIEC)
GT II	Groupe de travail II (du GIEC)
GT III	Groupe de travail III (du GIEC)
IA	Indice d'adéquation
IIASA	Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués
JJA	Juin, juillet, août
LULUCF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
MARA/ ARMA	Mapping Malaria Risk in Africa/Atlas du risque de la malaria en Afrique
MCG	Modèle de circulation générale
MCGAO	Modèle de la circulation générale couplé atmosphère-océan
MDP	Mécanisme pour un développement «propre»
N_2O	Oxyde nitreux, voir glossaire
NAM	Mode annulaire boréal
NAO	Oscillation nord-atlantique
NASA	Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace
NU	Nations Unies
OAM	Oscillation atlantique multidécennale
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODP	Oscillation décennale du Pacifique
OIP	Oscillation interdécennale du Pacifique
OMD	Objectifs du Millénaire pour le développement
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisation non gouvernementale
PAG	Petit âge glaciaire
PCB	Biphényles polychlorés
PCM	Programme climatologique mondial
PDSI	Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer
PEID	Petits États insulaires en développement
pH	Voir glossaire
PIB	Produit intérieur brut
PNA	Téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord
PNB	Produit national brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement
ppm	Partie par million, voir appendice III.2
PREC/L	Precipitation Reconstruction over Land (jeu de données relatives aux précipitations)
QF	Questions fréquentes
RE	Résumé exécutif
RiD	Résumé à l'intention des décideurs
RSY	Rapport de synthèse (du quatrième Rapport d'évaluation du GIEC)
RT	Résumé technique
SAM	Mode annulaire austral
SIDA	Syndrome d'immunodéficience acquise
SRES	Rapport spécial sur les scénarios d'émissions
SST	Température de la mer en surface
TRE	Troisième Rapport d'évaluation (du GIEC)
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'enfance
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine
ZCPS	Zone de convergence du Pacifique Sud

III.2 Unités de mesure

Unités du système international (SI)

Quantité physique	*Nom de l'unité*	*Symbole*
Longueur	Mètre	m
Masse	Kilogramme	kg
Temps	Seconde	s
Température thermodynamique	Kelvin	K
Énergie	Joule	J

Fractions et multiples

Fraction	*Préfixe*	*Symbole*	*Multiple*	*Préfixe*	*Symbole*
10^{-1}	Déci	d	10	Déca	da
10^{-2}	Centi	c	10^{2}	Hecto	h
10^{-3}	Milli	m	10^{3}	Kilo	k
10^{-6}	Micro	μ	10^{6}	Méga	M
10^{-9}	Nano	n	10^{9}	Giga	G
10^{-12}	Pico	p	10^{12}	Téra	T
10^{-15}	Femto	f	10^{15}	Péta	P
10^{-18}	Atto	a	10^{18}	Exa	E

Unités, quantités et abréviations connexes ne faisant pas partie du SI

°C	Degré Celsius (0 °C = 273 K approximativement); les différences de température sont également indiquées en °C (= K) plutôt que sous la forme plus correcte de «degrés Celsius»
ppm	Rapport de mélange (servant à mesurer la concentration des GES): parties par million (10^{6}) en volume
watt	Puissance ou flux énergétique; 1 watt = 1 Joule/seconde = 1 kg m^2/s^3
a	Année

Appendice IV: Liste des auteurs

Arblaster, Julie
Centre national de recherches sur l'atmosphère,
États-Unis d'Amérique,
et Bureau de la météorologie,
Australie

Arnell, Nigel
Institut de recherche Walker sur le système climatique,
Université de Reading,
Royaume-Uni

Bates, Bryson
CSIRO
Australie

Betts, Richard
Met Office Hadley Centre,
Royaume-Uni

Dai, Aiguo
Centre national de recherches sur l'atmosphère,
États-Unis d'Amérique

Burkett, Virginia
Commission géologique des États-Unis,
États-Unis d'Amérique

Döll, Petra
Université de Francfort,
Allemagne

Gwary, Daniel
Université de Maiduguri,
Nigéria

Hanson, Clair
Met Office Hadley Centre,
Royaume-Uni

Heij, BertJan
Bergonda Science Communication,
Pays-Bas

Jiménez, Blanca Elena
Université nationale autonome de Mexico,
Mexique

Kaser, Georg
Université d'Innsbruck,
Autriche

Kitoh, Akio
Agence météorologique japonaise,
Japon

Kovats, Sari
École d'hygiène et de médecine tropicale de Londres,
Royaume-Uni

Kumar, Pushpam
Université de Liverpool,
Royaume-Uni

Kundzewicz, Zbigniew W.
Académie des sciences,
Pologne,
et Institut de recherche de Potsdam sur les incidences
du climat,
Allemagne

Magadza, Christopher H.D.
Université du Zimbabwe,
Zimbabwe

Martino, Daniel
Carbosur,
Uruguay

Mata, Luis José
Centre pour la recherche et le développement nord-sud,
Allemagne, Venezuela

Medany, Mahmoud
Laboratoire central de climatologie agricole,
Égypte

Miller, Kathleen
Centre national de recherches sur l'atmosphère,
États-Unis d'Amérique

Milly, Christopher
Commission géologique des États-Unis,
États-Unis d'Amérique

Mortsch, Linda
Environnement Canada,
Canada

Nurse, Leonard
Université des Antilles, campus de Cave Hill,
La Barbade

Oki, Taikan
Université de Tokyo,
Japon

Osman, Balgis
Conseil supérieur pour l'environnement et les ressources naturelles,
Soudan

Palutikof, Jean
Met Office Hadley Centre,
Royaume-Uni

Payne, Richard
Ministère de l'agriculture et de l'alimentation d'Australie-Occidentale,
Australie

Pinskwar, Iwona
Académie des sciences,
Pologne

Prowse, Terry
Environnement Canada et Université de Victoria,
Canada

Pulwarty, Roger
NOAA/CIRES/Centre de diagnostic climatique,
États-Unis d'Amérique/Trinité-et-Tobago

Räisänen, Jouni
Université d'Helsinki,
Finlande

Renwick, James
Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère,
Nouvelle-Zélande

Tubiello, Francesco Nicola
Université de Columbia,
États-Unis d'Amérique/IIASA/Italie

Wilbanks, Tom
Laboratoire national Oak Ridge,
États-Unis d'Amérique

Wood, Richard
Met Office Hadley Centre,
Royaume-Uni

Wu, Shaohong
Institut de recherche en sciences géographiques et sur les ressources naturelles
Académie des sciences,
Chine

Zhao, Zong-Ci
Administration météorologique nationale,
Chine

Appendice V: Liste des examinateurs

Andressen, Rigoberto
Université des Andes,
Venezuela

Asanuma, Jun
Université de Tsukuba,
Japon

Bandyopadhyay, Jayanta
Institut indien de gestion,
Inde

Bayoumi, Attia
Ministère des ressources en eau
et de l'irrigation,
Égypte

Bergström, Sten
Institut météorologique et hydrologique
national,
Suède

Bernstein, Leonard
Association internationale de l'industrie
pétrolière pour la sauvegarde de l'environnement,
Royaume-Uni

Bidegain, Mario
Uruguay

Bojariu, Roxana
Administration météorologique nationale,
Roumanie

De Loë, Rob
Université de Guelph,
Canada

Diaz Morejon, Cristobel Felix
Ministère des sciences, des technologies
et de l'environnement,
Cuba

Elgizouli, Ismail
Conseil supérieur pour l'environnement
et les ressources naturelles,
Soudan

Fobil, Julius
Université du Ghana, Legon,
Ghana

Folland, Chris
Met Office Hadley Centre,
Royaume-Uni

Gallart, Francesc
CSIC,
Espagne

Gerten, Dieter
Institut de recherche de Potsdam
sur les incidences du climat,
Allemagne

Gillett, Nathan
Université d'East Anglia,
Royaume-Uni

Ginzo, Héctor
Ministère des relations extérieures,
Argentine

Grabs, Wolfgang
Organisation météorologique mondiale,
Suisse

Hatfield, Jerry
Ministère de l'agriculture,
États-Unis d'Amérique

Jacob, Daniela
Institut Max Planck
de météorologie,
Allemagne

Jacobs, Katharine
Universités d'Arizona,
États-Unis d'Amérique

Jeffrey, Paul
Université Cranfield,
Royaume-Uni

Jouzel, Jean
Institut Pierre-Simon Laplace,
France

Jin, Byung-bok
Environmental Management Corporation,
République de Corée

Kadaja, Jüri
Institut national de recherche agricole,
Estonie

Kaser, Georg
Université d'Innsbruck,
Autriche

Kimball, Bruce
Ministère de l'agriculture,
États-Unis d'Amérique

Knutson, Thomas
Université Princeton,
États-Unis d'Amérique

Komen, Gerbrand
Institut météorologique royal,
Pays-Bas

Kotwicki, Vincent
Institut national de recherche scientifique,
Koweït

Lal, Murari
CESDAC,
Inde

Lapin, Milan
Université Comenius,
Slovaquie

Leon, Alejandro
Université du Chili,
Chili

Liu, Chunzhen
Ministère des ressources hydriques,
Chine

Mares, Constantin
Académie nationale des sciences
et techniques,
Roumanie

Mares, Ileana
Académie nationale des sciences
et techniques,
Roumanie

Mariotti, Annarita
ENEA,
Italie

Morgenschweis, Gerd
Gestion des ressources en eau,
Allemagne

Müller, Lars
Stratégie climatique,
Union européenne (Allemagne)

Njie, Momodou
Blue Gold Solutions,
Gambie

Noda, Akira
Centre de recherche de pointe sur
les changements à l'échelle mondiale,
Japon

Parry, Martin
Coprésident du Groupe de travail II du GIEC,
Royaume-Uni

Ragab, Ragab
Centre d'écologie et d'hydrologie,
Royaume-Uni

Ren, Guoyu
Centre national climatique,
Chine

Robock, Alan
Université Rutgers,
États-Unis d'Amérique

Roy, Rene
Ouranos, Consortium sur le
changement climatique,
Canada

Savard, Martine M.
Ressources naturelles Canada,
Canada

Schipper, Lisa
Université Chulalongkorn,
Thaïlande

Şen, Zekai
Université technique d'Istanbul,
Turquie

Sherwood, Steve
Université Yale,
États-Unis d'Amérique

Shim, Kyo-moon
Institut national des sciences
et techniques agronomiques,
Corée du Sud

Sorooshian, Soroosh
Université de Californie, Irvine,
États-Unis d'Amérique

Szolgay, Jan
Université nationale de technologie,
Slovaquie

Tabet-Aoul, Mahi
Centre de recherche en anthropologie
sociale et culturelle (CRASC),
Algérie

Trenberth, Kevin
Centre national de recherches
sur l'atmosphère,
États-Unis d'Amérique

Van Walsum, Paul
Université et centre de recherche
de Wageningen,
Pays-Bas

Wojciech, Majewski
Institut de météorologie et
de gestion de l'eau,
Pologne

Wratt, David
Institut national de recherche
sur l'eau et l'atmosphère,
Nouvelle-Zélande

Wurzler, Sabine
Agence de Rhénanie-du-Nord-Westphalie
pour la nature, l'environnement
et la protection des consommateurs,
Allemagne

Yabi, Ibouraïma
LECREDE/DGAT/FLASH/UAC,
République du Bénin

Zhao, Zong-Ci
Administration météorologique nationale,
Chine

Appendice VI: Autorisation de publication

Les autorisations de publication ont été accordées par les détenteurs des droits qui figurent dans la liste suivante:

Figure 3.2: réimprimée avec l'aimable autorisation de Petra Döll.

Figure 3.3: réimprimée d'après Lehner, B. *et al*., 2005: Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated assessment. *Climatic Change*, **75**, 273-299, avec l'aimable autorisation de Springer Science and Business Media.

Figure 4.1 a): d'après Fischer, G. *et al*., 2002: Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results. Rapport de recherche RR-02-02. Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA), Laxenbourg, Autriche. Réimprimée avec l'aimable autorisation de l'IIASA.

Figure 5.1: réimprimée avec l'aimable autorisation de Macmillan Publishers Ltd [*Nature*]: O'Reilly, C.M. *et al*., 2003: Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, **424**, 766-768. Copyright 2003.

Figure 5.3: d'après Hemp, A., 2005: Climate change-driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro. *Glob. Change Biol*., **11**, 1013-1023. Réimprimée avec l'aimable autorisation de Blackwell Publishing Ltd.

Figure 5.4: d'après Arnell, N.W., 2006b: Climate change and water resources: a global perspective. *Avoiding Dangerous Climate Change*, H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakićenović, T. Wigley et G. Dokken, éd., Cambridge University Press, Cambridge, 167-175. Réimprimée avec l'aimable autorisation de Cambridge University Press.

Figure 5.8 a): d'après Haylock, M.R. *et al*., 2006: Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate*, **19**, 1490-1512. Réimprimée avec l'aimable autorisation de l'American Meteorological Society.

Figure 5.8 b): d'après Aguilar, E. *et al*., 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *J. Geophys. Res*., **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119. Copyright (2005) American Geophysical Union. Réimprimée avec l'aimable autorisation de l'American Geophysical Union.

Figure 5.12: d'après Smith, L.C. *et al*., 2005: Disappearing Arctic lakes. *Science*, **308**, 1429. Réimprimée avec l'aimable autorisation de l'AAAS.

Index

Note: les numéros de page en caractères gras font référence à des chapitres complets. Les numéros de page en italique désignent des tableaux, des figures et des encadrés.

A

Adaptation, 6, 57-61
- atténuation, conflits potentiel avec l'~, 148
- autonome, 58, 76
- exemples, *59*
- implications pour le développement durable, 155
- limites de l'~, 60
- planifiée, 58, 76
- possibilités d'adaptation du côté de l'offre et de la demande, 57, *58*
- réduire la vulnérabilité par l'~, 58
- *Voir également* Atténuation

Adaptation, vulnérabilité et développement durable, 149-156
- Afrique, *59*, 100
- agriculture, 75-80
- alimentation en eau et assainissement, 85-87
- Amérique du Nord, *59*, 124-126
- Amérique latine, *59*, 118-119, *119*
- Asie, 104-106
- Australie et Nouvelle-Zélande, *59*, 108-110, *109*
- économie, assurances, tourisme, industrie et transport, 89-90
- établissements humains et infrastructures, 87-89
- Europe, *59*, 113
- petites îles, *59*, 131, 131-135
- régions polaires, *59*, 129
- santé humaine, 83

Afrique, 93-101, 153
- adaptation et vulnérabilité, *59*, 100-101
- changements prévus, 96-100, 153
- écosystèmes forestiers, 71
- lacs et cours d'eau, 41-43, 153
- Mont Kilimandjaro, *97*
- observations actuelles, 93-94, *94-97*
- précipitations, 20-21, 34, 71
- ruissellement, 27, 41-42
- stratégies d'adaptation adoptées par les éleveurs, 77
- vulnérabilités, 79, 153

Agriculture, 70-80, 152
- adaptation, vulnérabilité et développement durable, 75-80
- besoins en eau d'irrigation, 6, 15, 73, 74, 152
- biotechnologie et ~, 78, *78*
- cultures, 73-74
- drainage des terres cultivées, *146*, 147
- effets sur la qualité de l'eau, 15
- gestion de l'eau et émissions des GES, *146*
- gestion des terres cultivées (eau), *140*, 143
- gestion des terres cultivées (réduction du labour), *140*, 143, 146-147
- intensification de l'~, 142-143
- mesures d'atténuation et eau, *140*, 142
- modélisation, 71
- observations, *70*, 71-72
- projections, 72-75, 153
- retour de résidus, *146*, 146-147
- utilisation de fertilisants/d'engrais, 15, 143
- *Voir également* Agriculture: aspects régionaux; Irrigation

Agriculture: aspects régionaux
- Afrique, 96, 98, *99*
- Amérique du Nord, 122-123
- Amérique latine, 117, 118
- Asie, 102, 104
- Australie et Nouvelle-Zélande, 108
- Europe, 112-113
- petites îles, 133

Alimentation en eau et assainissement, 83-87
- adaptation, vulnérabilité et développement durable, 6, 85-87
- observations, 83, *84*
- projections, 83-85

Amérique du Nord, 120-126, 154-155
adaptation, *59*, 124-126
changements observés, 120
changements prévus et conséquences, 120-124, *121*, 154-155
études de cas des incidences du changement climatique, 124, *124-125*
précipitations, 23
ruissellement, 27
sécheresses, 44-45, 79
structure thermique des lacs et cours d'eau, 42-43
Amérique du Sud. *voir* **Amérique latine**
Amérique latine, 113-119, 154
adaptation et vulnérabilité, *59*, 113, *119*
adaptations des communautés précolombiennes, *119*
changements observés, *114*, 114-117
changements prévus, 117-118, 154
glaciers, 41, *114*, *116*, 154
précipitations, 20, *114-115*
ruissellement, 27, 38, 42
stress hydrique, 113-117, 117, *118*, 154
Amphibiens, 65, 68, 117
Aquiculture, 79
Asie, 101-106, 153-154
adaptation et vulnérabilité, *59*, 104-105
approvisionnement en eau, 49, 153-154
crues, 43-44, 101
glaciers, 101, *102*, 154
incidences observées, 101-102
incidences prévues et vulnérabilités, 102-104, 153-154
lacs et cours d'eau, 42
précipitations, 20, 33
ruissellement, 26-27, 37, 53-54
Aspects socioéconomiques de l'eau douce, 53-56, 89-90
Assainissement. *Voir* Santé humaine
Assurances, 89-90, 126
Atténuation, 137-148, 155
avantages par rapport aux effets secondaires négatifs de l'~, 6, 80, 155
barrages hydroélectriques, 145, *146*
besoins futurs en données, 161
boisement/reboisement, *140*, 143-144
changement d'affectation et gestion des terres, *140*, 142-143
cultures bioénergétiques, 139-141, *140*
déboisement évité/réduit, *140*, 144
dessalement, *146*, 147
drainage des terres cultivées, *146*, 147
électricité issue de la biomasse, *140*, 141
émissions de gaz à effet de serre (GES) et ~, 145-148, *146*
énergie géothermique, *140*, 142, *146*, 147
énergie hydraulique, *140*, 141
gestion des déchets/traitement des eaux usées, *140*, 144-145, *146*, 147
gestion des terres cultivées, *140*, 143
implications pour une politique d'atténuation, 155
irrigation, 146, *146*
pétrole non conventionnel, *140*, 145
piégeage et stockage du dioxyde de carbone (CCS), 139, *140*
politiques de gestion de l'eau et ~, 145, *146*, 155
relation avec l'eau, 139
retour des résidus, *146*, 146-147
synergies avec l'adaptation, 80
utilisation de l'énergie dans les bâtiments, *140*, 142
Voir également Adaptation
Attribution des changements climatiques, 19, 21-23
Australie et Nouvelle-Zélande, 106-110, 154
adaptation et vulnérabilité, *59*, 108-110, *109*
changements observés, 106, *107*
changements prévus, 106-108, 154
infrastructures, 154
nappes souterraines, 42
précipitations, 20-21, 70
sécheresses, 44-45, 79

B
Barrages
construction et démantèlement, 14-15, 161
émissions de gaz à effet de serre dues aux ~, 6, 145, *146*, 155
stockage de l'eau dans les ~, 15
Bassin du fleuve Colorado, *60*, 61, *124*
Bassin du fleuve Columbia, *125*
Bâtiments, 88, *140*, 142
Besoins futurs en matière de recherche, 7, 157-161
Bétail, 74-75, *77*

Biocarburants, 79
Biodiversité, 65, 152
Afrique, 96, 99-100, *100*
Amérique du Nord, 123
Amérique latine, 117, 118
Asie, 102
Australie et Nouvelle-Zélande, 108
Europe, 113
petites îles, 133-134
régions polaires, 128-129
Biotechnologie, 78, *78*
Boisement, 6, 71, *140*, 143-144

C
Campylobactériose, 81
Canevas, 14, *14*
Caraïbes, 33-34, 130-131
Voir également Petites îles
Changement climatique, 17-38
amplification des conséquences d'autres contraintes dues au ~, 6, 155-156
attribution du ~, 19, 21-22
incidences sur le développement durable, *55*, **149-156**
incidences sur les ressources en eau, 41-56, *55*, **149-156**
mesures d'atténuation (*voir* Atténuation)
Voir également Relation entre le changement climatique et les ressources en eau
Changement climatique et eau, 9-16
changements observés, 12-14, 41-45
changements prévus, 45-57
facteurs climatiques influant sur les systèmes d'eau douce, 32-38, 45-51
impacts négatifs par rapport aux avantages au niveau mondial, 5-6, 152
incidences prévues par région, **91-135**, 153-155
incidences prévues par secteur, 70-89, 151-153
rappel, objet et contexte, 11-16
relation entre le changement climatique et les ressources en eau, **39-61**
résumé, **3-7**
Changement d'affectation et gestion des terres, *140*, 142-143
Changements observés
climatiques, 19-29
incidences sur les ressources en eau, 12-14, 41-45
résumé, 5-7
Voir également les régions et les secteurs spécifiques
Changements prévus
climatiques, 14, 32-38
des ressources en eau, 14-15, 45-57
résumé, 5-7
Voir également les régions et les secteurs spécifiques
Chimie de l'eau, 43, *44*
Circulation méridienne océanique, 30
Climat
changements observés, 19-29
changements prévus, 32-38
modèles (*voir* Modèles climatiques)
modes de variabilité à grande échelle, 27-29, 38
réaction complexe, 19
rétroactions avec le cycle hydrologique, 19, 29-30
Coûts et aspects socioéconomiques, 53-56, 89-90
Croissance démographique
dans les régions côtières, 87-89
dans les zones soumises à un stress hydrique, 53, *53*
demande en eau et ~, 6, 13-14
Croissance économique, utilisation de l'eau et, 14
Crues
assurances et ~, 90
changements observés, 43-44, *44*
changements prévus, 34, 48, *49*, 151
coûts des incidences futures, 55, 90
en Europe, 111, *112*
fréquence prévue des crues centennales, 48
incidences sur les transports et les infrastructures, 88-89
santé humaine et ~, 81-82
Crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF), 25, 41, 81
projets de prévention, 104, *105*
Cryosphère
changements observés, 5, *23-24*, 25, 41
changements prévus, 35
Cryptosporidiose, 81, 85
Cultures bioénergétiques, 6, 139-141, *140*
Cycle du carbone, rétroactions, 31-32
Cycle hydrologique
changement prévus, 6, 32-38, 45-57
incertitudes et ~, 32-33

postulat concernant l'expérience acquise, 6
rétroactions avec le climat, 19, 29-32
variabilité du ~, 19
Voir également Hydrologie; *entrées concernant l'eau*
Cyclones tropicaux
changements observés, 23
changements prévus, 35, 38, *49*, 122

D
Déboisement, 29, 71, 73
évité/réduit, *140*, 144
Déchets, *140*, 144-145, *146*
Degrés de confiance. *Voir* **Incertitude**
Deltas, incidences prévues, 67-68, 152
Demande en eau
changements prévus, 6, 45-56, 52-53
population et ~, 6, 12-14
pour l'irrigation, prévue, 6, 15, 73, 152
Dessalement, 14-15, 54, 86, 155
émissions de gaz à effet de serre dues au ~, *146*, 147
Développement durable, 149-156
communautés rurales et conflits pour l'eau, 79
incidences futures possibles du changement climatique, *55*, 155-156
objectifs du Millénaire pour le développement, secteur hydrologique, *156*
Voir également Adaptation, vulnérabilité et développement durable
Développement du thermokarst, 67
Dioxyde de carbone atmosphérique et dynamique de l'eau, 72
Voir également Émissions de gaz à effet de serre (GES)
Disponibilité/sécurité alimentaire, 6, 70, 71-74, 78
Disponibilité en eau
mesures d'atténuation et ~, *140*
observations, 82, *84*
projections, 52, 83-85

E
Économie, 89-90
Écosystèmes, 65-69, 152
Ecosystèmes alpins, 69
Écosystèmes de montagne, 68-69
Effets sur les terres émergées, 29-30
Égypte, agriculture en, 98, *99*
Électricité issue de la biomasse, *140*, 141
Élévation du niveau de la mer
changements et incidences prévus, 5, 35-36, 51
changements observés, 25
contributions à l'~, 25, 35-36
qualité de l'eau et ~, 15, 51
***El Niño*-oscillation australe (ENSO),** 27, 38, 100
Émissions de gaz à effet de serre (GES)
dues aux barrages hydroélectriques, 6, 145, *146*, 155
politiques de gestion de l'eau et ~, 145-147, *146*
Énergie
Afrique, 95, 96
Amérique du Nord, 122
Amérique latine, 117, 118
Asie, 104
Australie et Nouvelle-Zélande, 107-108
Europe, 112
gestion de l'eau et émissions de GES, *146*
infrastructures, 88-89
mesures d'atténuation et eau, *140*
petites îles, 133
Énergie géothermique, *140*, 142
émissions de gaz à effet de serre dues à l'~, *146*, 147
Énergie hydraulique, 56, *140*, 141, 161
Afrique, 96
Amérique du Nord, 56
émissions de gaz à effet de serre dues à l'~, 6, 145, *146*, 155
Europe, 56, 154
infrastructures, 89
Voir également Barrages; Énergies
ENSO. *Voir El Niño*-oscillation australe
Érosion du sol, 51, 68
Établissements humains, 87-89, 152-153
Établissements humains et infrastructures, 87-89, 152-153
Europe, 110-113, 154
adaptation et vulnérabilité, *59,* 113
changements observés, 110, *110*
changements prévus, 38, *50*, 111-113, 154
écosystèmes de montagne, 68-69
inondation, estimations des dommages, 54
précipitations, 33, *50*, 70
régions soumises à un stress hydrique, 154
ruissellement, 27, 37, 41, 53, 154
sécheresses, 44-45, 111-112, *112*

vague de chaleur de 2003, 45
Évapotranspiration
changements observés, 26
changements prévus, *31*, 33-34, 36
rétroactions, 29
Extinctions, 65, 66-67, 99, 108, 117, 152,
Voir également Biodiversité

F
Faim, 3, 71
Voir également Disponibilité/sécurité alimentaire
Fertilisation par le dioxyde de carbone, 69
Fleurs d'eau, 66, 81, 85
Fleuve Mékong, *75*
Fleuve Nil, 93, *99*
Fleuves, 42, 66-67
débit fluvial, 54, 68
incidences prévues, 4, 66, 67-68
Voir également Ruissellement
Forêts/foresterie, 71, 152
biotechnologie et ~, 78, *78*
conversion en terres cultivées, 141
écosystèmes, 68-69
mesures d'atténuation et eau, *140*
stratégies d'adaptation, 76
systèmes agroforestiers, 141

G
Gélisol
changements observés, *23*, 24-25, 41, 127
changements prévus, 35, 51, 128, 155
Gestion de l'eau
approche fondée sur les scénarios, 61
changement climatique et ~, 6, 51-52, 151
émissions de gaz à effet de serre et ~, 139
en agriculture, 75-80
gestion adaptative, 61
gestion intégrée des ressources en eau (IWRM), 51, 61, 148
incidences dans d'autres secteurs, 6-7, 51-52, 56
mesures d'adaptation, 57-61, *58-59*
politiques, effets sur les émissions de GES et atténuation, 145-147*, 146*
postulat concernant l'expérience acquise, 6
Voir également Adaptation
Gestion des bassins versants, 80
Gestion intégrée des ressources en eau (IWRM), 51, 61, 148

Glace
changements observés, 5, *23-24*, 25
changements prévus, 35, 155
Glacier Chacaltaya, 41, *116*
Glacier Gangotri, 102, *102*
Glaciers
Amérique latine, 41, *114*, *116*, 154
Asie, 54, 101, *102*, 154
changements observés, 23-24, *25*, 41, *114*
changements prévus, 35, 49, 153-154
Europe, 154
glacier Chacaltaya, 41, *116*

H
Helminthiase, 79, 83
Humidité du sol
changements observés, 26-27
changements prévus, *31*, 36
rétroactions, 29
Hydrologie
changements observés, 41-42
changements prévus, 45-56
incidences prévues sur les écosystèmes et la biodiversité, 65-69

I
Incertitude, 15, *16*
Voir également Lacunes
Incidences régionales, 91-135, 153-154
Voir également les régions spécifiques
Industrie, 89-90, *140*, 152-153
Infrastructures, 6, 88-89, 152-153
Irrigation
émissions de gaz à effet de serre et ~, 146, *146*
mesures d'adaptation, 75-78, 145, *146*, 152
superficies irriguées, 14, 15
utilisation de l'eau, changements observés, 12-14
utilisation de l'eau, changements prévus, 6, 15, 52, 73, 74, 152

K
Kilimandjaro, mont, *97*

L
Lacs
anoxie et fleurs d'eau, 66
changements observés, 42-43
changements prévus, 50-51, 66, 153

chimie, 43
érosion et sédimentation, 43
structure thermique, 42-43, 66
Lacunes, 7, **157-161**
Leptospirose, 117

M
Maladie à vecteur, 82
Maladies à transmission d'origine hydrique, 82, 84, 95-96, 122
Manteau neigeux
changements observés, 5, *23-24*, 24-25, 41
changements prévus, 35
rétroactions sur le climat, 29-32
Méningite, 82
Méthane
barrages hydroélectriques et ~, 145
décharge/eaux usées, 147
sources et puits, 31, 155
Modèles. *Voir* **Modèles climatiques**
Modèles climatiques, 5, 32-38, 57, 206
besoins en matière d'observations, 159
méthodes probabilistes multi-modèles, 34-35, 57
projections des ~, 32-38, 160-161
scénarios/canevas, 14, *14,* 32
Modes annulaires, 28-29, 38
Moteurs non climatiques influant sur les ressources en eau, 12, 15, 51-52

N
Nappes glaciaires
changements observés, 41
contribution à l'élévation du niveau de la mer, 25-26, 35-36
Nappes souterraines
changements observés, 12-13, 41-42
changements prévus, 45-48, *47*
mesures d'atténuation et ~, *140*
salinisation des ~, 5, 51
Nouvelle-Zélande. *Voir* Australie et Nouvelle-Zélande

O
Objectifs du Millénaire pour le développement et domaine de l'eau, *156*
Océans
rétroactions climatiques dues à la circulation, 30
salinité, 19, 30
Voir également Élévation du niveau de la mer
Oscillation nord-atlantique (NAO), 20, 27-28, 38

P
Paludisme, 95, 118
Parcours, 74
Voir également Pâturages
Pâturages, 69, 74
Pêcheries, 75, 79-80, 155
exemple du fleuve Mékong, *75*
stratégies d'adaptation, 76
Petites îles, 129-135, 155
adaptation, *59*, 131, 134-135
changements observés et projections, 130-134, *132-133*, 155
stress hydrique, 155
Pétrole, non conventionnel, *140*, 145
Pergélisol. *Voir* Gélisol; Glace
Phénologie, 72
Piégeage et stockage du dioxyde de carbone (CCS), 139-147, *140*
Politiques
gestion de l'eau, 145-147, *146*
implications du changement climatique pour les ~, **149-156**
Voir également Adaptation, vulnérabilité et développement durable
Précipitations, 19-24, 33-35
changements observés, 5, 19-24, *20-22*
changements prévus, 5, *30-31*, 33-35, 48, *49*, 151
contribution anthropique aux ~, 21
épisodes de fortes précipitations, 5, *22*, 22-23, 48, *49*
épisodes de fortes précipitations, coûts pour l'agriculture, 73
épisodes de fortes précipitations, santé humaine et ~, 84-85, 153
extrêmes, *32*, 34-35
moyennes, 33-34
régimes des moussons, 33
variabilité des ~, 5, 20
Voir également Cyclones tropicaux; Sécheresses
Processus régissant les aérosols, 19
Projet de réduction des risques pour le lac Tsho Rolpa, *105*

Puits de carbone, 31-32

Q
Qualité de l'eau
adaptation et ~, 85-87
changements observés, 14, 42-43
changements prévus, 6, 15, 49-51, 78-79, 84-86
eau potable, 54, 81, 87
mesures d'atténuation et ~, *140*
micropolluants, 15
température et ~, 85
variation de l'écoulement et ~, 84
Qualité de l'eau potable, 53-54, 81, 86

R
Reboisement, 6, 71, *140*, 143-144
Régimes des moussons, 33
Régions polaires, 126-129, 155
adaptation et vulnérabilité, *59*, 129
changements observés, 127, *128*
changements prévus, 128-129, 155
Relation entre le changement climatique et les ressources en eau, 39-61
adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau, 57-61
changements hydrologiques à venir dus au changement climatique, 45-57
incidences observées du changement climatique, 41-45
Voir également les aspects spécifiques du changement et des ressources en eau
Ressources en eau
adaptation, aperçu général, 57-61, *58-59*
conflits, potentiels, 148
facteurs climatiques, 32-38, 45-51
facteurs non climatiques, 12, 15, 51-52
gestion des ~, 86, 151
importance des ~, 11
incertitudes concernant les incidences prévues, 56-57
incidences observées du changement climatique, 41-45
incidences prévues du changement climatique, 45-56
mesures d'atténuation et ~ (*voir* Atténuation)
relation avec le changement climatique, **39-61**
résumé, 5-7
rétroactions avec le climat, 29-32
zones et secteurs particulièrement vulnérables, *55*, 56
Ressources en eau: aspects régionaux
Afrique, 94-95, 96
Amérique du Nord, 120-123, *121*
Amérique latine, 114-115, 117-118
Asie, 101-104
Australie et Nouvelle-Zélande, 106-107
Europe, 111-112
petites îles, 131, *131*
Retour des résidus, *146*, 146-147
Rétroactions biogéochimiques, 31-32
Rétroactions du climat et du cycle hydrologique, 29-32
circulation océanique, 30
effets sur les terres émergées, 29
émissions et puits, 31
Réutilisation des eaux usées, 15
Ruissellement
changements observés, 5, 27, 41-42, *44*
changements prévus, 5, *31*, *37*, 37-38, *70*, 73, 151
mesures d'atténuation et ~, *140*
prévision de l'utilisation du ~, 84-85

S
Sables bitumineux, *140*, 145
Salinisation
des eaux côtières, 67-68
des nappes souterraines, 5, 51, 85
Voir également Dessalement
Santé. *Voir* Santé humaine
Santé humaine, 80-83
adaptation, vulnérabilité et développement durable, 83
Afrique, 95-96, 96-98
Amérique du Nord, 122
Amérique latine, 117, 118
Australie et Nouvelle-Zélande, 108
Europe, 112
observations, 82
petites îles, 133
projections, 82, 153
qualité de l'eau et ~, 78-79
Savanes, 69

Scénarios, *14*, 14-15,
Voir également Modèles climatiques
Scénarios SRES, 14, *14,* 32
Schistosomiase, 82, 117
Sécheresses
changements observés, *44,* 44-45*, 46*
changements prévus, 34-35, 48-49, *49-50*, 151
fréquence prévue des sécheresses centennales, *50*
santé humaine et ~, 82
Voir également les régions spécifiques
Stockage de l'eau
dans des barrages, 15
dans les glaciers et la couverture neigeuse, 5
Stratégies d'adaptation des éleveurs, *77*
Stress hydrique
Afrique, *98*, *153*
Amérique latine, 114-115, 117-118, *118*, *154*
carte du ~, *13*
dans les petites îles, 155
définition du ~, 12
Europe, 154
incidences futures des changements climatiques sur le ~, *53*, 53
vulnérabilité et ~, 13
Système de récupération de l'eau de Nazca, *119*
Systèmes agroforestiers, 143

T
Téléconnexions, 28
Température
changements observés, 19
changements prévus, 32, 38
Température de l'eau
changements observés, 42, *44*
changements prévus, 151
mesures d'atténuation et ~, *140*
Tempêtes de poussière, 82
Tourisme, 41, 89-90
Traitement des eaux usées, 15, 86
émissions de gaz à effet de serre et ~, *146*, 147
mesures d'atténuation et ~, *140*, 144-145
qualité de l'eau et ~, 15
Transport, 88-89

U
Utilisation d'engrais azotés, 15, 143
Utilisation de l'eau
changements observés, 13-14
changements prévus, 51-52, 74
Utilisation des terres, 71
adaptation, 76
cultures bioénergétiques et ~, 139-141

V
Vagues de chaleur
changements observés, 19, 45, 72
changements prévus, 32, 34, 111
en Europe (2003), 45
Vapeur d'eau
changements observés, 22-23, 23-24
changements prévus, 33-34, 36
Variabilité, configurations à grande échelle, 27-29, 38
Vulnérabilités: ressources en eau, 6, *13,* 55, 56
Voir également Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Z
Zones arides. *Voir* Zones arides et semi-arides
Zones arides et semi-arides
changements observés, 45
changements prévus, 73, 151, 153
vulnérabilités, 6, 151
Voir également Sécheresses

Zones côtières
établissements humains et infrastructures, 87-89
incidences futures, 51, 67-68, 152
Zones humides, 66-67, 142
Zones semi-arides. *Voir* Zones arides et semi-arides