



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Parangonnage sur les techniques et pratiques innovantes de gestion de l'eau en agriculture

Rapport n° 21045

établi par

Pierre AUTISSIER

Ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts

Geneviève JOURDIER

Ingénieure générale des ponts, des eaux et des forêts

Mars 2022

CGAAER

CONSEIL GÉNÉRAL

DE L'ALIMENTATION

DE L'AGRICULTURE

ET DES ESPACES RURAUX

SOMMAIRE

RESUME.....	5
LISTE DES RECOMMANDATIONS.....	6
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA MISSION	7
1.1. Le contexte	7
1.2. Les objectifs de la mission	7
1.3. La méthode de travail et le déroulement de la mission	8
2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SON IMPACT SUR LA RESSOURCE EN EAU ET L'AGRICULTURE.....	9
2.1. Un changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante, selon le GIEC	9
2.2. L'impact du changement climatique sur la ressource en eau	9
2.2.1. Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole	9
2.2.2. Les enseignements du projet Explore 2070	10
2.3. Les impacts agricoles selon le projet CLIMATOR	11
3. L'IMPORTANCE DU SOL ET DES PRATIQUES AGRICOLES INNOVANTES DANS LES ECONOMIES D'EAU AGRICOLE	12
3.1. La nécessaire adaptation de l'agriculture	12
3.2. Gestion économe de l'eau et pratiques agricoles	13
3.2.1. La révision des itinéraires techniques	13
3.2.2. L'innovation variétale	15
3.2.3. Les agricultures alternatives	15
3.2.4. Les solutions d'adaptation fondées sur la nature en agriculture	19
4. L'IMPERATIF D'UNE GESTION PLUS ECONOMOME DE L'EAU D'IRRIGATION	20
4.1. Présentation de l'irrigation en France	20
4.1.1. Des surfaces irrigables en baisse	20
4.1.2. La forte prédominance de l'aspersion	22
4.2. Les innovations pour économiser l'eau d'irrigation	23
4.2.1. Les innovations technologiques	23
4.2.2. Les innovations dans l'aide à la décision	26
4.2.3. Agrivoltaïsme et économies d'eau	28
4.3. Les économies d'eau d'irrigation en Espagne et en Italie	29
4.4. Les notions d'irrigation déficitaire et d'irrigation de résilience	30
5. LA RECHERCHE DE RESSOURCES OPTIMISEES ALTERNATIVES EN EAU	32
5.1. L'optimisation de l'ensemble des ouvrages déjà existants	32
5.1.1. La mobilisation des ressources des concessions hydroélectriques	32
5.1.2. La mobilisation des retenues non utilisées	32

5.2. La réalisation de nouveaux stockages d'eau	33
5.2.1. La notion de retenue d'eau	33
5.2.2. Les retenues de substitution, une solution à considérer	34
5.2.3. Le cas de l'Espagne : les limites d'une politique essentiellement centrée sur l'offre	35
5.3. Le drainage.....	36
5.4. Les transferts d'eau entre bassins	37
5.5. La recharge artificielle de nappes d'eau souterraines, une solution à explorer	38
5.5.1. Principaux aspects de la recharge artificielle	38
5.5.2. Situation de la recharge artificielle en Europe et en France	40
5.6. La REUT, une ressource insuffisamment exploitée	40
5.6.1. Situation de la REUT dans le monde	41
5.6.2. Les réglementations européenne et française	42
5.6.3. Des difficultés spécifiques	43
5.7. Le dessalement	45
5.7.1. Une technologie en pleine expansion dans le monde	45
5.7.2. Des obstacles économiques et écologiques	46
5.7.3. Une option pas véritablement d'actualité en France	48
CONCLUSION.....	49
ANNEXES	51
Annexe 1 : Lettre de mission	53
Annexe 2 : Note de cadrage	55
Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées	59
Annexe 4 : Liste des sigles utilisés	63
Annexe 5 : Liste des textes de référence et bibliographie	66
Annexe 6 : Extraits des projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole	72
Annexe 7 : Impacts sur l'agriculture du réchauffement climatique selon CLIMATOR.....	77
Annexe 8 : Compléments sur l'agriculture de conservation des sols	78
Annexe 9 : Compléments sur l'agroforesterie	80
Annexe 10 : Economies d'eau, avantages et inconvénients des trois grands systèmes d'irrigation	82
Annexe 11 : Comparaison synthétique des différents systèmes d'irrigation	83
Annexe 12 : Compléments sur l'agrivoltaïsme	84
Annexe 13 : Compléments sur la recharge artificielle de nappes	87
Annexe 14 : Compléments sur la réutilisation des eaux usées traitées	88
Annexe 15 : Compléments sur le dessalement	90

RESUME

Le changement climatique est, selon le GIEC, généralisé, rapide et d'intensité croissante. Son impact potentiel sur la ressource en eau en France (avec une tendance à la baisse des précipitations en été, une diminution des débits d'étiage des cours d'eau, une baisse du niveau moyen mensuel des nappes...) est tel que le sujet de la gestion de l'eau agricole est devenu central. L'agriculture doit donc s'adapter pour économiser l'eau. Sa mutation ne passe pas par une réponse unique mais par la mobilisation simultanée de plusieurs leviers d'adaptation ou « panier de solutions », dont il convient de rechercher pour chaque territoire la combinaison la mieux adaptée.

Un premier levier fait appel aux pratiques agricoles innovantes visant à préserver, voire à restaurer la qualité des sols. Ces nouvelles pratiques vont de la révision des itinéraires techniques « classiques » aux nouvelles approches agroécologiques (agriculture biologique, agriculture de conservation des sols, agroforesterie), en s'appuyant sur les Solutions fondées sur la Nature (SfN). Ces pratiques semblent intéressantes en matière de gestion de l'eau. Cependant, compte tenu du changement radical qu'elles supposent pour les agriculteurs s'engageant dans la démarche (agriculture de conservation des sols - ACS -...) en vue d'économiser de l'eau, un appui technico-économique est à prévoir pendant toute la période de transition.

Un deuxième levier consiste à mobiliser toutes les innovations technologiques et numériques permettant de diminuer la consommation d'eau d'irrigation, que ce soit en augmentant l'efficacité du matériel ou en recourant à des outils d'aide à la décision (OAD). L'accès aux innovations doit être renforcé via la formation, le conseil et l'appui aux financements. Le concept d'« irrigation de résilience » est à construire de façon plus opérationnelle afin d'en permettre son appropriation par les irrigants. L'agrilvoltaïsme participe également de ces innovations, à la condition que la production agricole concernée reste prioritaire.

Quant au renforcement de la ressource en eau, celui-ci passe par un inventaire exhaustif de l'existant et de sa disponibilité, avant de songer à augmenter le stockage et à mobiliser des ressources alternatives, telles que la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) ou le dessalement de l'eau de mer, souvent plus onéreuses.

Mots clés : innovation, gestion de l'eau, changement climatique, stockage d'eau, irrigation, eau d'irrigation

LISTE DES RECOMMANDATIONS

- R1.** Veiller à l'appui technico-économique des agriculteurs engagés dans une démarche agroécologique en vue d'économiser l'eau, pendant toute la période de transition, à travers les réseaux de la formation et de l'encadrement techniques.
- R2.** Favoriser l'accès aux innovations en irrigation (matériels, outils d'aide à la décision) à travers la formation, le conseil et l'aide au financement.
- R3.** Préciser le concept d'irrigation de résilience, notamment ses bases techniques, agronomiques et économiques, afin d'en permettre l'appropriation par les irrigants.
- R4.** En complément de l'inventaire des retenues d'eau en France décidé dans les conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, établir un état des lieux exhaustif des sites, utilisés ou non, de recharge artificielle de nappes et de REUT.
- R5.** Analyser les dispositifs réglementaires mis en place par les pays utilisateurs d'eaux non conventionnelles leur permettant de les intégrer à la ressource en irrigation.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA MISSION

Par lettre de mission du 13 avril 2021, le CGAAER a été chargé par le Directeur de Cabinet du Ministre chargé de l'Agriculture, d'une mission de parangonnage sur les techniques et pratiques innovantes de gestion de l'eau en agriculture.

1.1. Le contexte

Le changement climatique est une réalité à laquelle l'agriculture doit faire face, notamment en termes de gestion raisonnée et d'économie d'eau alors que l'accès à la ressource et le partage de l'eau entre les différents usages sont déjà sous tension.

Le rapport conjoint¹ du CGAAER et du CGEDD de juillet 2020 intitulé « Changement climatique, eau, agriculture : quelles trajectoires d'ici 2050 ? » considère que « la réponse au changement climatique nécessite un changement de modèle agricole, plus économe en eau et protecteur des sols ». Ce rapport « prône [également] la transition vers un modèle d'irrigation dite "de résilience", plus économe en eau et visant la stabilité des productions dans un contexte climatique fluctuant, plutôt que leur maximisation ». En effet, les tensions augmentent entre les différents usages de l'eau tandis que se confrontent différents modèles agricoles, l'un considérant la ressource en eau comme un « facteur de production à développer, notamment pour l'irrigation, quitte à accepter certaines dégradations des écosystèmes » et l'autre comme un « patrimoine commun qui ne peut être mobilisé que dans le strict respect des équilibres naturels et de l'approvisionnement en eau potable ».

Le Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation et la Secrétaire d'Etat à la Biodiversité ont lancé le 28 mai 2021 le « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique » qui s'inscrit en continuité des travaux des Assises de l'Eau (novembre 2018 - juin 2019) et a pour ambition d'« engager une réflexion collective et [de] construire des politiques durables pour la résilience du modèle agricole face aux aléas climatiques ».

1.2. Les objectifs de la mission

Sur la base de la lettre de mission citée précédemment (voir en annexe 1), les objectifs de la mission sont les suivants :

- Faire un état des lieux des principales innovations technologiques et numériques, en France et dans d'autres pays d'Europe, en matière de stockage d'eau, drainage, irrigation, réutilisation des eaux usées traitées (REUT), dessalement, transfert d'eau et recharge de nappe, et réaliser une évaluation pour chaque exemple retenu ;
- Faire un état des lieux des techniques et pratiques agricoles innovantes, en France et dans d'autres pays d'Europe, permettant d'économiser l'eau et d'adapter les cultures à sa raréfaction et aux nouvelles distributions des pluies liées au changement climatique, et réaliser, pour les exemples retenus, une analyse des conditions nécessaires à leur déploiement ;
- Formuler des recommandations pour intégrer les innovations identifiées comme levier de la

¹ Rapport CGEDD n°012819-01 et CGAAER n°19056

transition agro-écologique (TAE), examiner la capacité de ces innovations à servir de modèle de développement agricole via la production et le recueil des données de terrain collectées et tracer leurs perspectives de développement en termes de recherche et de développement, afin de concilier économies d'eau et adaptation corrélative des systèmes de production.

1.3. La méthode de travail et le déroulement de la mission

La méthode retenue a reposé sur des interviews qualitatives avec les principaux acteurs concernés en France, dans d'autres pays d'Europe du Sud (Espagne, Portugal), hors Europe (Israël) et au sein d'instances internationales (Commission internationale de l'irrigation et du drainage, Centre international des hautes études agronomiques méditerranéennes, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (voir annexe 3). Certains acteurs (du monde associatif, du syndicalisme agricole...) n'ont pas répondu à la demande d'entretien ou ont décliné l'invitation.

En raison de la Covid-19, la mission n'a finalement pas pu se déplacer et les interviews ont été pratiquement toutes réalisées en visioconférence.

La mission a également procédé à une analyse documentaire sur le stockage de l'eau, le drainage, l'irrigation, la REUT, le dessalement, le transfert d'eau, la recharge de nappe ainsi que sur les techniques et pratiques agricoles innovantes.

La mission s'est aussi rapprochée du « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique », plus particulièrement de sa thématique 2 « Renforcer la résilience de l'agriculture dans une approche globale en agissant notamment sur les sols, les variétés, les pratiques culturales et d'élevage, les infrastructures agroécologiques et l'efficience de l'eau d'irrigation ».

2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SON IMPACT SUR LA RESSOURCE EN EAU ET L'AGRICULTURE

2.1. Un changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante, selon le GIEC

Selon le rapport² du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) d'août 2021, les émissions de gaz à effet de serre (GES) dues aux activités humaines ont élevé les températures d'environ 1,1 °C depuis la période 1850-1900, et **le réchauffement planétaire, en moyenne sur les 20 prochaines années, pourrait excéder le seuil de 1,5 °C**. Le GIEC prévient même qu'à moins d'une réduction immédiate, rapide et à grande échelle des émissions de GES, limiter le réchauffement à 1,5 °C sera hors de portée. Or, dans le cas d'une hausse de 2 °C, les chaleurs extrêmes atteindraient plus souvent des seuils de tolérance critiques pour l'agriculture et la santé publique.

Le GIEC rappelle que le changement climatique n'affecte pas que les températures, mais également l'humidité et la sécheresse, les vents, la neige et la glace, les zones côtières et les océans. Notamment, le changement climatique intensifie le cycle de l'eau, modifie la répartition des pluies, élève le niveau de la mer, affecte les écosystèmes marins etc.

2.2. L'impact du changement climatique sur la ressource en eau

2.2.1. Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole

Météo-France a produit début 2021 de nouvelles projections climatiques régionalisées de référence en France³, disponibles sur le site [DRIAS les futurs du climat](#). Les résultats s'appuient sur des indicateurs climatiques DRIAS calculés sur les trois scénarios⁴ d'émission de GES (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) pour trois horizons temporels (H1=2021-2050, H2=2041-2070, H3=2071-2100).

Il en ressort notamment que :

- **la température moyenne est en hausse** pour les trois scénarios d'émission de GES. Le réchauffement est continu jusqu'en fin de siècle avec des valeurs médianes de +2,1 °C pour le scénario RCP4.5 et de +3,9 °C pour le scénario RCP8.5. Cette hausse des températures est plus forte l'été dans ces deux scénarios avec respectivement +2,2 °C et +4,5 °C en valeur médiane. Le réchauffement est **plus marqué en montagne ainsi que dans le sud-est** que dans le nord-ouest ;

² Rapport du Groupe de travail I du GIEC intitulé « Changement climatique 2021 : les éléments scientifiques » publié en août 2021. Ce rapport est le premier volet du sixième Rapport d'évaluation du GIEC dont la publication s'achèvera en 2022.

³ Rapport « Les nouvelles projections climatiques de références DRIAS 2020 pour la métropole », Météo-France.

⁴ Lors de la préparation du 5ème Rapport paru en 2014, les experts du GIEC ont défini quatre trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés RCP (« Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration »). Le RCP2.6 est un scénario strict d'atténuation, il est sans équivalent dans les anciennes propositions du GIEC. En effet, sa réalisation implique l'intégration des effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C. Les RCP4.5 et RCP6.0 sont des scénarios intermédiaires et correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios B1 et A1B des rapports précédents du GIEC. Le RCP8.5 est un scénario d'émissions très élevées de GES, il est le plus extrême et est un peu plus fort que le scénario (A2) le plus marqué utilisé dans les simulations du rapport du GIEC 2007. Le nouveau jeu DRIAS s'appuie sur trois de ces quatre scénarios climatiques (le plus vertueux RCP2.6, le plus extrême RCP8.5, un intermédiaire RCP4.5).

- **le cumul de précipitations est annoncé en légère hausse** pour les trois scénarios entre +2 % et +6 %, **ce résultat étant assorti d'une grande incertitude**. Cette évolution des précipitations est très contrastée selon les saisons avec une **hausse systématique en hiver** souvent supérieure à +10 % (et pouvant atteindre +40 % dans l'enveloppe supérieure du scénario RCP8.5), et une **baisse quasi systématique en été** pouvant atteindre -10 à -20 % en fin de siècle pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette évolution des précipitations est également variable selon les régions avec une **hausse plus marquée pour la moitié nord du pays** et une **baisse pour certaines régions de la moitié sud** ;
- la **durée des épisodes des sécheresses météorologiques** évolue peu dans le scénario RCP2.6, tandis qu'elle **augmente en fin de siècle dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de l'ordre respectivement de 5 à 10 jours**, soit une progression de 30 à 50 %. Les régions les plus touchées sont **le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et l'ouest de la France** (Bretagne, Pays de la Loire).

On se reportera à l'annexe 6 pour plus d'informations.

2.2.2. Les enseignements du projet Explore 2070

Le projet Explore 2070⁵, porté par le ministère en charge de l'Ecologie⁶ et qui s'est déroulé de juin 2010 à octobre 2012⁷, avait pour objectif d'évaluer les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en France métropolitaine et dans les départements d'Outre-mer.

En hydrologie de surface, les résultats de ce projet indiquent à l'horizon 2046-2065 :

- une **augmentation des températures de l'air de l'ordre de 1,4 °C à 3 °C** ;
- une évolution incertaine des précipitations, avec cependant une **tendance à la baisse des précipitations en été de l'ordre de 16 à 23 %** ;
- une **diminution significative globale des débits moyens annuels des cours d'eau de l'ordre de 10 à 40 %**, particulièrement prononcée en Seine-Normandie et Adour-Garonne ;
- pour une grande majorité des cours d'eau, une **diminution des débits d'étiage encore plus prononcée** que leur diminution à l'échelle annuelle.

En hydrologie souterraine, les résultats montrent à l'horizon 2050-2070 une **baisse quasi générale de la piézométrie** associée à une **diminution de la recharge en eau comprise entre 10 et 25 %**. Deux zones sont plus sévèrement touchées : le bassin versant de la Loire avec une baisse de la recharge entre 25 et 30 % et le sud-ouest de la France avec des baisses comprises entre 30 et 50 %. Cette baisse serait moindre dans les vallées mais pourrait atteindre 10 m sur les plateaux, et entraînerait une **diminution des débits d'étiage des cours d'eau** et une **augmentation de la durée des assecs**.

⁵ Source des informations et des résultats d'Explore 2070 : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>

⁶ Avec la participation de l'ONEMA, du CETMEF, des agences de l'eau, des DREAL de bassin, du CGDD, de la DGEC et de la DGPR.

⁷ Depuis, un nouveau projet Explore2, s'inscrivant dans la suite de l'étude Explore 2070, a été lancé en juillet 2021. Ce nouveau projet a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances en matière d'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des dernières publications du GIEC.

2.3. Les impacts agricoles selon le projet CLIMATOR

Le projet de recherche CLIMATOR⁸, qui s'est déroulé de 2007 à 2010, vise à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle et dans des climats contrastés français.

Notamment, le Livre vert du projet CLIMATOR, avant de présenter les effets du changement climatique par culture et/ou filière⁹ puis sa déclinaison pour sept zones géographiques¹⁰, indique que « le changement climatique, tel que prévu par les modèles climatiques, ne provoquera ni dégradation ni amélioration générale des possibilités de culture ». Pour autant, le rapport relève **un certain nombre d'évolutions** a priori **favorables**, telles une accélération des rythmes phénologiques permettant une esquivé partielle des stress hydriques accrus, ou une réduction des accidents liés au gel automnal pour les cultures d'hiver, etc. et, à l'inverse, **défavorables** comme une augmentation du nombre de jours échaudants au printemps ou encore un accroissement des besoins en eau d'irrigation des cultures d'été, etc. (voir annexe 7).

L'eau est indispensable à la production agricole. Ainsi, l'agriculture est responsable de 25 % des prélèvements d'eau douce en Europe, ce pourcentage pouvant atteindre 80 % dans certaines régions méditerranéennes¹¹. Toutes les études sur l'évolution du climat montrent par ailleurs que le sujet de la gestion de l'eau agricole va devenir de plus en plus incontournable.

Pour y répondre, l'agriculture peut s'appuyer sur différents leviers au sein d'un « **panier de solutions** » :

- en faisant appel à l'agronomie (partie 3) ;
- en recourant à la technologie afin de disposer des matériels d'irrigation les plus économes en eau (partie 4) ou pour bénéficier de nouvelles ressources en eau alternatives (partie 5).

⁸ Source des informations et des résultats de CLIMATOR : le Livre vert du projet CLIMATOR 2007-2010 disponible à l'adresse suivante : <http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/synagri/changement-climatique-agriculture-et-foret-en-france-livre-vert-projet-climator-2007-2010>

⁹ Les cultures et/ou filières étudiées sont : le blé, le maïs et le sorgho, la prairie, le colza, le tournesol, la vigne, la forêt. A ces exemples, s'ajoute l'analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures.

¹⁰ Les sept régions sont : le centre-nord, l'ouest, le nord-est, le centre-est, le sud-ouest, le sud-est et les Antilles.

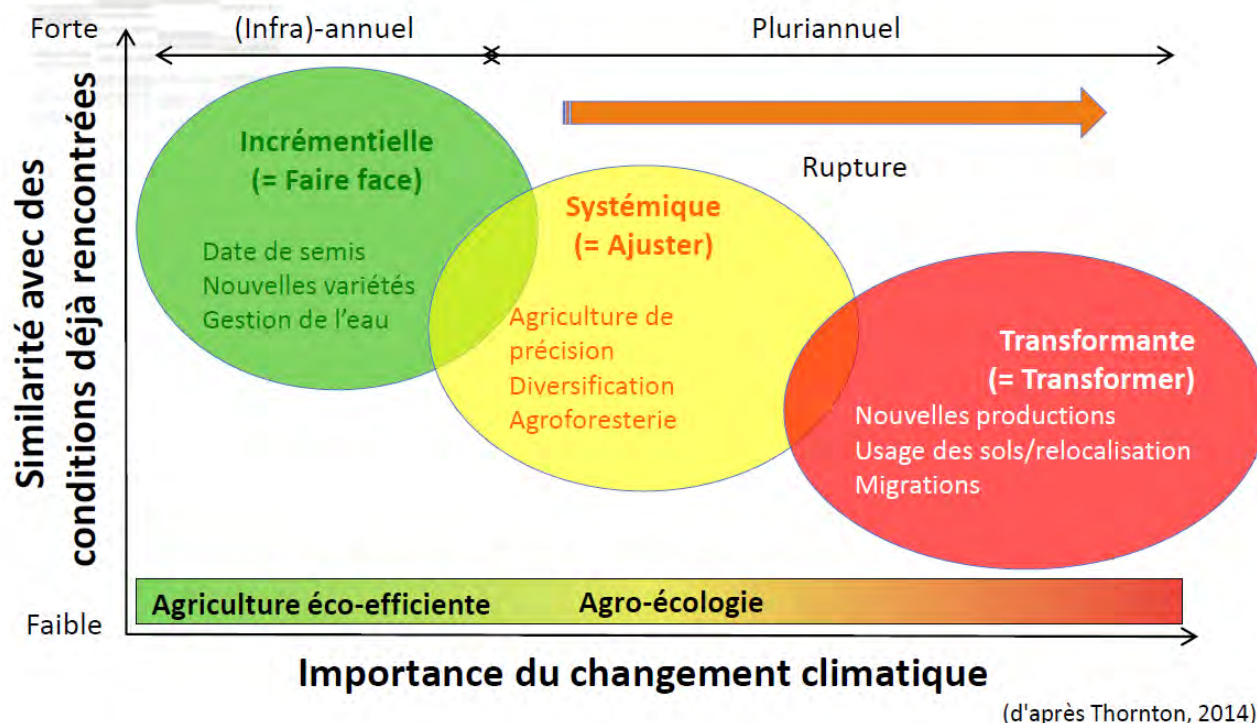
¹¹ Source des données chiffrées : Revue Sciences Eaux & Territoires N° 34 – 2020. A titre de comparaison, toujours selon la même source, l'agriculture est responsable d'environ 70 % du prélèvement d'eau douce dans le monde.

3. L'IMPORTANCE DU SOL ET DES PRATIQUES AGRICOLES INNOVANTES DANS LES ECONOMIES D'EAU AGRICOLE

3.1. La nécessaire adaptation de l'agriculture

Face au changement climatique, l'agriculture va devoir s'adapter, et ce d'autant plus profondément que ce changement climatique sera important. Trois intensités croissantes d'adaptation ont été décrites (voir schéma ci-dessous).

Nature et formes de l'adaptation en agriculture



Source : INRAE

L'adaptation « **incrémentielle**¹² » consiste en des mesures d'adaptation à la marge face à un changement d'ampleur limitée. L'organisation de l'activité n'est pas fondamentalement modifiée.

L'adaptation « **systémique** », devant un changement plus profond, acte l'impossibilité d'y faire face par des mesures d'adaptation à la marge. L'organisation de l'activité est transformée en profondeur.

L'adaptation « **transformante**¹³ » implique le changement des éléments fondamentaux du système en réponse au climat et à ses effets, avec notamment de nouvelles productions et relocalisations.

Compte tenu de ce que l'on sait du changement climatique, l'adaptation incrémentielle, bien que nécessaire, ne sera pas suffisante et devra être dépassée¹⁴.

¹² Dite aussi « incrémentale ».

¹³ Dite aussi « transformationnelle ».

¹⁴ Source : « *Changement climatique, eau, agriculture : Quelles trajectoires d'ici 2050 ?* », rapport CGEDD N°012819-01 / CGAAER N° 19056, Hugues Ayphassorho, Nathalie Bertrand et François Mitteau (CGEDD), Charles Pujos, Dominique Rollin et Michel Sallenave (CGAAER)

Une partie des solutions repose sur des modes de production relevant de l'**agroécologie**¹⁵, dont une des finalités vise à **préserver et à restaurer la qualité des sols**, pour notamment renforcer leur capacité à stocker l'eau et à la restituer aux plantes lors des périodes de sécheresse, en s'appuyant sur la biodiversité.

Comme le rappelle le Gis Sol¹⁶, les sols rendent de nombreux services écosystémiques. Le sol est le support des activités humaines et notamment de la production agricole et forestière, il est également le support des paysages agricoles, forestiers et urbains, il filtre ou dégrade les polluants, il abrite une biodiversité remarquable par son abondance... En matière d'eau, le sol régule le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines, il détermine le partage entre ruissellement et infiltration des précipitations, il joue un rôle tampon vis-à-vis des écoulements hydrologiques, permettant ainsi par exemple d'amortir les phénomènes de crues ou de soutenir les débits des cours d'eau en période d'étiage¹⁷.

3.2. Gestion économe de l'eau et pratiques agricoles

L'adaptation de l'agriculture au changement climatique passe par une révision de ses manières de produire à travers les modifications adaptatives des itinéraires techniques, la sélection variétale (notamment pour la résistance à la sécheresse), les pratiques agricoles économes en intrants (agriculture biologique, agriculture de conservation des sols, agro-foresterie...). L'Office français de la biodiversité (OFB) préconise de s'appuyer plus largement sur les solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature (SafN) en agriculture.

3.2.1. La révision des itinéraires techniques

Dans un contexte de réduction de la ressource en eau, le premier levier d'adaptation consiste en une **modification des itinéraires techniques**, de façon à faire coïncider la demande de la plante à celle de la disponibilité en eau dans le sol. Des économies substantielles d'eau peuvent ainsi être réalisées en modulant les dates et les modes de semis comme les niveaux de fertilisation azotée¹⁸ à travers :

¹⁵ Définition de l'agro-écologie (article L.1-II de la loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt) : « Les politiques publiques visent à promouvoir et à pérenniser les systèmes de production agroécologiques, dont le mode de production biologique, qui combinent performance économique, sociale, notamment à travers un haut niveau de protection sociale, environnementale et sanitaire.

Ces systèmes privilégient l'autonomie des exploitations agricoles et l'amélioration de leur compétitivité, en maintenant ou en augmentant la rentabilité économique, en améliorant la valeur ajoutée des productions et en réduisant la consommation d'énergie, d'eau, d'engrais, de produits phytopharmaceutiques et de médicaments vétérinaires, en particulier les antibiotiques. Ils sont fondés sur les interactions biologiques et l'utilisation des services écosystémiques et des potentiels offerts par les ressources naturelles, en particulier les ressources en eau, la biodiversité, la photosynthèse, les sols et l'air, en maintenant leur capacité de renouvellement du point de vue qualitatif et quantitatif. Ils contribuent à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du changement climatique. »

¹⁶ Le Gis Sol (Groupement d'intérêt scientifique sur les sols), porté par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, le ministère de la Transition écologique, l'ADEME, le BRGM, l'IGN, INRAE, l'IRD et l'OFB, a pour mission de constituer et de gérer le système d'information sur les sols de France afin de pouvoir répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société.

¹⁷ Source : Gis Sol. 2011. Synthèse sur l'état des sols en France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 24 p.

¹⁸ « Perspectives agronomiques et génétiques pour limiter ou réguler la demande en eau d'irrigation », P. Debaecke, J.E. Bergez, D. Leernhardt, La Houille Blanche N°6, 2008

- des **stratégies d'esquive** qui visent à décaler les stades phénologiques de la plante les plus sensibles au déficit hydrique (souvent la floraison) vers une période où la ressource en eau est plus disponible ;
- et/ou des **stratégies d'évitement** qui visent à réduire la consommation d'eau en diminuant la densité de semis et/ou la fertilisation azotée¹⁹.

L'UMR AGIR d'INRAE a évalué quelques stratégies d'évitement et d'esquive permises par différentes gestions du couvert en conditions hydriques plus ou moins limitantes sur blé tendre et tournesol²⁰, et a obtenu des résultats intéressants, notamment pour des semis précoces en sols profonds et en année sèche. Mais la variabilité de ces résultats, en fonction du sol et du climat, laisse penser que « les possibilités offertes par la gestion du couvert pour esquiver ou éviter la contrainte hydrique restent assez limitées dans les conditions pluviales de l'agriculture française ». **« Même si cette gestion permet des gains de rendement ou des économies d'eau, ces gains sont de faible ampleur et ne pourraient constituer une réelle substitution à l'irrigation »**²¹.

Un autre levier d'adaptation repose sur la **diversification et l'allongement des rotations**.

L'introduction de nouvelles espèces cultivées, moins exigeantes en eau, comme celle de cultures intermédiaires protégeant les sols nus de l'érosion et des pertes d'eau par évaporation, sont de plus en plus préconisées, en particulier pour leur rôle positif sur la structure du sol et l'amélioration induite de sa fertilité (notamment par l'introduction de légumineuses symbiotiques ou de prairies temporaires)²², mais peu d'études ont démontré l'impact précis des rotations sur les économies d'eau.

Le projet BAG'AGES, coordonné par INRAE, financé par l'Agence de l'eau Adour-Garonne (2,5 M€) et par la Région Occitanie (500 k€), mené sur 17 sites expérimentaux de 2016 à 2021, a analysé les performances économiques, notamment au regard du bilan hydrique des sols, de différents types d'exploitations agricoles conduites en agriculture conventionnelle, en agriculture biologique ou en agriculture de conservation des sols (ACS). **Les scénarios basés soit sur l'optimisation de l'irrigation soit sur la diversification des monocultures (introduction du blé en monocultures de maïs) montrent qu'il serait possible de réduire les prélèvements annuels pour l'irrigation des cultures à hauteur d'environ 30 % du déficit hydrique du bassin versant**²³.

Des études ont été conduites au niveau européen afin de mesurer les impacts sur la ressource en eau de mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) mises en place dans un certain nombre de pays (Chypre, Grèce, Espagne et Italie)²⁴ et s'appuyant sur la diversification et l'allongement des rotations. Ces impacts ont été difficiles à évaluer en raison du faible nombre

¹⁹ Voir note précédente : « Perspectives agronomiques et génétiques pour limiter ou réguler la demande en eau d'irrigation », P. Debaecke, J.E. Bergez, D. Leernhardt, La Houille Blanche N°6, 2008

²⁰ « Quelles stratégies agronomiques pour une gestion optimale de la ressource en eau du sol en système pluvial ? », Julie Constantina, Philippe Debaeke, Magali Willaume, INRAE UMR AGIR, Académie d'agriculture de France, 05/11/2014

²¹ Voir note précédente : « Quelles stratégies agronomiques pour une gestion optimale de la ressource en eau du sol en système pluvial ? », Julie Constantina, Philippe Debaeke, Magali Willaume, INRAE UMR AGIR, Académie d'agriculture de France, 05/11/2014

²² « Effet des rotations sur le potentiel de rendement des cultures en France : un enjeu de productivité », Irène Felix, ARVALIS, Académie d'agriculture de France, 15/05/2019

²³ Source : Projet BAG'AGES – GT2 – Bilan – juin 2021

²⁴ « Économiser l'eau en changeant les pratiques agricoles : retours d'expériences en Europe », Laurence Menet, Solenn Leplay, Élise Deniel, Bureau d'études Oréade-Brèche, CEP, Analyse N° 124 - Juin 2018

d'adhésion des agriculteurs aux dispositifs proposés. Pour autant, ces études ont démontré que la diversification comme l'allongement des rotations étaient largement tributaires à la fois du niveau de technicité des exploitants comme des débouchés économiques environnants en particulier pour les cultures intermédiaires.

3.2.2. L'innovation variétale

La sélection variétale produit, depuis les années 1950, des variétés efficaces pour toutes les situations, y compris en conditions sèches. Néanmoins, cela ne présage en rien du comportement de ces nouvelles variétés face aux sécheresses à venir.

Plus précisément, la sélection génomique²⁵ permet d'accélérer le temps de sélection en se concentrant sur la caractérisation des gènes de résistance à la sécheresse, comme sur la mise au point de marqueurs moléculaires permettant de caractériser cette résistance²⁶.

Les travaux conduits par INRAE sur le blé tendre semblent prometteurs mais les difficultés à caractériser la capacité à résister au manque d'eau en fonction du type de stress hydrique subi (continu, tardif ou plus précoce) ralentissent les mises sur le marché de nouvelles variétés à la fois résistantes et conservant leur productivité.

Un nouvel outil, la sélection phénotypique, est désormais disponible et est de plus en plus utilisé. Cette technique, qui s'appuie sur la spectrométrie dans le proche infrarouge (NIRS), consiste à « éclairer » l'échantillon de plante avec des longueurs d'onde différentes et à obtenir des spectres aussi caractéristiques et individualisés que le sont les profils de marqueurs moléculaires. L'avantage de la sélection phénotypique, avec son approche non destructive et sans extraction d'ADN, est de pouvoir recueillir les informations génétiques au champ et à un coût faible²⁷. L'influence de l'environnement sur les caractéristiques mesurées reste néanmoins encore à approfondir.

3.2.3. Les agricultures alternatives

- L'agriculture biologique (AB)

L'AB se caractérise par la suppression du recours aux intrants issus de la chimie de synthèse, sans autre spécification particulière dans son cahier des charges sur la gestion de l'eau. Si les vertus de l'agriculture biologique sur la qualité des eaux, notamment de drainage au sortir de la parcelle ne sont plus à démontrer²⁸, en revanche son impact sur la gestion quantitative de l'eau est encore à référencer.

Néanmoins, l'Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques (ITAB) mentionne un moindre recours à l'irrigation et donc une moindre consommation d'eau totale en AB, liés notamment à une

²⁵ La prise en compte des interactions entre le génotype et l'environnement reste encore un point important à travailler.

²⁶ Cette approche se heurte à deux difficultés : la gestion de la contradiction entre transpiration et photosynthèse, à savoir les caractéristiques physiologiques des plantes qui doivent transpirer pour photosynthétiser, donc produire ; les interactions avec l'environnement.

²⁷ Article « Blé tendre et sécheresse, de nouvelles variétés à venir », INRAE, Pascale Mollier, 27/08/2020 <https://www.inrae.fr/actualites/ble-tendre-secheresse-nouvelles-varietes-venir> et article « Vers une sélection variétale moins coûteuse et efficace », Cultivar, Marie Guihard, 29/04/2019 <https://www.cultivar.fr/technique/vers-une-selection-varietale-moins-couteuse-et-efficace>

²⁸ <https://www.agencebio.org/questions/en-quoi-lagriculture-biologique-respecte-t-elle-la-qualite-de-leau/>

fréquence moindre des cultures de printemps dans les assolements et les rotations²⁹.

- L'agriculture de conservation des sols (AC ou ACS)

L'agriculture de conservation ou agriculture de conservation des sols a été définie officiellement par la FAO en 2001 comme l'ensemble des modes de production agricoles reposant sur trois principes fondamentaux appliqués simultanément³⁰ :

- une couverture maximale des sols (résidus de cultures ou mulch, cultures intermédiaires, couverts permanents), surtout en hiver ;
- une absence totale de travail du sol (tolérance uniquement sur la ligne de semis) ;
- une diversification maximale des espèces cultivées (rotations longues, alternances graminées et légumineuses).

L'objectif principal de l'ACS est de lutter contre l'érosion et la compaction des sols cultivés, tout en en préservant la biodiversité³¹.

En France, 1,7 % seulement des exploitations agricoles pratiquent l'ACS en 2020³². En effet, même si le non-labour concerne désormais près de la moitié des surfaces en grandes cultures pour des raisons économiques (diminution des charges), peu d'exploitants l'associent systématiquement à une totale absence de travail du sol, à un allongement et une diversification des rotations comme à une couverture permanente des sols.

L'agriculture de conservation présente un handicap technique, qui est celui de la gestion des adventices. Si certaines études tendent à démontrer que celles-ci peuvent être contrôlées à travers les techniques culturales³³, l'ensemble des essais conduits montre qu'il est difficile de se passer des herbicides en ACS, en particulier du glyphosate³⁴. INRAE, avec l'appui des chambres d'agriculture et des instituts techniques agricoles, a ainsi identifié le cas de l'ACS comme une des situations de difficultés et d'impasses³⁵.

Pour autant, l'agriculture de conservation est souvent présentée dans la presse spécialisée comme une alternative économique et écologiquement vertueuse à l'agriculture conventionnelle fortement consommatrice d'eau³⁶. De fait, même si les performances constatées sont encore discutées (voir annexe 8) et relativement cantonnées aux stations expérimentales qui ont conduit les essais, les

²⁹ Source : webinaire n°3 du 30 novembre 2021 dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique – Thématique 2 – Quelles agricultures résilientes face au changement climatique ?

³⁰ «Le tripode de l'agriculture de conservation », INRAE, Pascale Mollier, 06/11/2013, <https://www.inrae.fr/actualites/tripode-lagriculture-conservation>

³¹ L'agriculture de conservation, CEP, analyse 61, Noémie Schaller, septembre 2013

³² « Les clés de réussite pour amorcer sa transition en Agriculture de Conservation des Sols », Association pour la promotion d'une agriculture durable – APAD, août 2020, <https://apad.asso.fr/images/pdf/cle-reussite-ACS.pdf>

³³ La gestion des graminées d'automne en ACS, APAD, 17/09/2021, <http://www.apad.asso.fr/172-l-instant-technique/388-la-gestion-des-graminees-d-automne-en-systeme-acs>

³⁴ « Glyphosate et agriculture : à la vie, à la mort », Entraid, Pascal Bordeau, 06/12/2018
<https://www.entraid.com/articles/glyphosate-et-agriculture-a-la-vie-a-la-mort-alternatives-sante#>

³⁵ Reboud X. et al, 2017. Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Rapport INRA à la saisine Ref TR507024, 85 pages.

³⁶ « L'ACS préserve la ressource en eau », l'Anjou agricole, 15/12/2020

premiers résultats provisoires du programme BAG'AGES relèvent :

- une amélioration des cycles de l'eau et du carbone (meilleure rétention du C organique), à travers l'amélioration des propriétés d'infiltration des sols (microporosité), permettant de lutter efficacement contre le ruissellement et l'érosion de surface comme, de facto, de favoriser le remplissage des nappes souterraines ;
- une meilleure minéralisation de l'azote ;
- une amélioration de la biodiversité en l'absence de travail du sol, en particulier du nombre de mycorhizes racinaires, favorisant l'exploitation des ressources du sol, notamment en azote et en eau ;
- **une amélioration globale du réservoir utilisable** du sol de 10 à 15 % et des économies d'eau en irrigation pouvant aller jusqu'à 20% quand celle-ci est associée à une gestion raisonnée des cultures (rotations longues par exemple).

Même si les expérimentations conduites laissent espérer des gains substantiels d'eau à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant sur certains types de cultures et dans certains types de sols, la conversion à l'ACS suppose un changement radical dans la pratique de l'agriculture, un encadrement et des connaissances techniques suffisantes pour maintenir un niveau de rendement économiquement acceptable³⁷. La période de transition peut être longue avant que le sol ne retrouve des propriétés structurelles intéressantes vis-à-vis de sa réserve en eau³⁸. Ainsi, en France, le principal frein qui a été identifié au développement de l'ACS est précisément cette période de transition : un encadrement technique, des financements dédiés comme l'établissement de références technico-économiques fiables sont absolument nécessaires pour que les agriculteurs osent la transition³⁹. Les récentes prises de position de la Commission européenne en faveur de la régénération des sols en Europe⁴⁰ devraient permettre d'aller dans ce sens. Mais les performances technico-économiques des nouveaux systèmes d'exploitation doivent encore être mieux modélisées et comprises avant d'en faire des modèles de référence⁴¹.

- L'agroforesterie

Selon le Centre mondial pour l'agroforesterie, « l'agroforesterie est un système dynamique de gestion des ressources naturelles reposant sur des fondements écologiques qui intègrent des arbres dans les exploitations agricoles et le paysage rural et permet ainsi de diversifier et de maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre »⁴².

³⁷ L'agriculture de conservation, CEP, analyse 61, Noémie Schaller, septembre 2013

³⁸ « L'agriculture de conservation en Wallonie, diversité et verrouillages », Jérôme Braibant et Max Morelle, mémoire de fin d'études de bioingénieur, Université catholique de Louvain, 2018

³⁹ Voir cité précédemment : L'agriculture de conservation, CEP, analyse 61, Noémie Schaller, septembre 2013

⁴⁰ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions, Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030, SWD(2021) 323 final, 17/11/2021

⁴¹ Cas de l'agriculture biologique de conservation (ABC) qui vise à combiner ACS et AB. Il s'agit ainsi de réunir deux modes de production a priori difficiles à concilier, et dont la recherche de la combinaison est qualifiée par certains de « graal ». Des expérimentations sont actuellement conduites par un petit nombre d'agriculteurs (notamment le CIVAM bio de la Mayenne, la chambre d'agriculture de l'Ariège, etc...).

⁴² Plan de développement de l'agroforesterie, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, décembre 2015

La base de données EUROSTAT LUCAS sur l'utilisation et l'occupation des sols en Europe a permis d'estimer, dans le cadre du projet européen AGFORWARD, une surface totale en agroforesterie de 15,4 millions ha pour les 27 pays de l'UE (soit 3,6 % de la surface totale et 8,8 % de la surface agricole utilisée ou SAU)⁴³, dont 15,1 millions ha sous forme d'arbres associés à de l'élevage et seulement 358 000 ha sous forme d'associations avec des productions végétales. En Europe, si l'on fait abstraction de l'élevage extensif et nomade des rennes au Nord (voir annexe 9), l'Europe du Sud (Chypre, Portugal, Grèce, Espagne) domine nettement tant en valeur absolue qu'en valeur relative (comparée à la SAU). La France, avec 5 à 10% de sa SAU en agroforesterie, occupe la 11^{ème} place⁴⁴.

En France, dès les années 1990, INRAE a conduit des essais sur le domaine du Conseil départemental de l'Hérault à Restinclières (associant arbres à bois et grandes cultures ou vignes) afin d'évaluer les potentialités agronomiques de ces associations, en s'intéressant notamment à la dynamique de l'eau générée sur les parcelles concernées, et leur éventuelle résilience face aux aléas climatiques⁴⁵. Les essais conduits ont très clairement démontré le rôle positif de ces associations sur le cycle de l'eau (voir annexe 9) à travers :

- un meilleur stockage du carbone, ce qui augmente la capacité de rétention du sol ;
- une meilleure filtration de l'eau vers les horizons profonds, une diminution du ruissellement de surface et de l'érosion, une diminution du drainage ;
- une diminution des pertes par évaporation (sols couverts).

De plus, les rangées de haies et d'arbres présentes dans un système agroforestier ont un effet parasol et un effet brise-vent qui permettent de réduire les amplitudes thermiques au cours de la journée et de réduire l'évapotranspiration des plantes⁴⁶.

Si l'agroforesterie se présente comme une perspective intéressante en termes d'augmentation générale de la productivité d'une parcelle et de résilience vis-à-vis des aléas climatiques, elle nécessite néanmoins une certaine technicité comme du temps dans sa mise en place. Le choix des espèces associées, les densités et/ou les modes de plantation des arbres (écartements) sont essentiels afin de gérer au mieux les compétitions éventuelles, notamment pour la lumière et pour l'eau. Les chevelus racinaires des arbres prélèvent certes l'eau dans les horizons profonds et facilitent les remontées capillaires d'eau des nappes, **mais la compétition entre les arbres et les cultures associées peut devenir pénalisante en conditions sèches et sur des sols superficiels**⁴⁷, créant localement des zones d'assèchement.

L'agroforesterie connaît un développement spectaculaire à l'échelon des territoires, alors que son encadrement réglementaire n'est pas encore suffisamment clair pour les agriculteurs qui font ce

⁴³ « Agroforesterie : des arbres pour une agriculture durable », Foucaud-Scheunemann C., Bertrand I., INRAE, 06/01/2022, <https://www.inrae.fr/actualites/agroforesterie-arbres-agriculture-durable>

⁴⁴ « L'agroforesterie représente un dixième des terres agricoles de l'UE », Loury Romain, Journal de l'environnement, Euractiv, 24/05/2016

⁴⁵ « Agroforesterie des pays tempérés, des systèmes plurispécifiques pour plus de durabilité », Gosme M., Mézière D., INRAE UMR System, Journée de formation de l'Agence Adour Garonne, 16/06/2017

⁴⁶ EVENO Manoa, QUINTELA Caroline, ROBERT Marion, SAUVADET Loïc, 2017. De la forêt à l'agroforesterie. Projet d'élèves ingénieurs n°19. Montpellier SupAgro. 55 pages

⁴⁷ « Agroforesterie des pays tempérés, des systèmes plurispécifiques pour plus de durabilité », Gosme M., Mézière D., INRAE UMR System, Journée de formation de l'Agence Adour Garonne, 16/06/2017

choix d'associer une production d'arbres à une production agricole. La production de bois génère une activité supplémentaire avec ses charges et sa fiscalité propres⁴⁸, ainsi que des contraintes d'investissement importantes pour une rentabilité qui ne s'exprimera que sur le long terme.

En France, le programme « Plantons des haies », qui envisage la plantation de 7000 km de haies sur la période 2021-2022, est doté de 50 M€ dans le cadre du Plan de relance en termes d'investissements, mais également d'accompagnement afin de garantir la pérennité des nouvelles installations⁴⁹.

3.2.4. Les solutions d'adaptation fondées sur la nature en agriculture

Selon l'UICN⁵⁰, les **Solutions fondées sur la Nature (SfN)** sont définies comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité »⁵¹. Les **Solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la Nature (SafN)** sont les SfN répondant plus spécifiquement aux enjeux posés par les effets du changement climatique par le volet de l'adaptation.

L'OFB⁵² encourage le recours aux **SafN en agriculture** : celles-ci intègrent les pratiques agricoles citées précédemment avec la promotion de l'arbre et l'arbuste au sein des systèmes agricoles, la couverture végétale des sols, l'adaptation des pratiques culturales, ainsi que des actions en lien avec les milieux aquatiques et humides (ripisylves, mares tampons, bandes tampons, restauration hydromorphologique, zones d'expansion de crues...)⁵³.

R1. Veiller à l'appui technico-économique des agriculteurs engagés dans une démarche agroécologique en vue d'économiser l'eau, pendant toute la période de transition, à travers les réseaux de la formation et de l'encadrement techniques.

⁴⁸ EVENO Manoa, QUINTELA Caroline, ROBERT Marion, SAUVADET Loïc, 2017. De la forêt à l'agroforesterie. Projet d'élèves ingénieurs n°19. Montpellier SupAgro. 55 pages

⁴⁹ Programme « Plantons des haies » - 50 M€, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 22/12/2021, <https://agriculture.gouv.fr/francelerance-50-meu-pour-planter-7-000-km-de-haies-en-2-ans>

⁵⁰ L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) est l'une des principales ONG mondiales consacrées à la conservation de la nature, elle a été fondée en 1948.

⁵¹ Source : UICN Comité français (2019). Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques liés à l'eau en France. Paris, France.

⁵² Source : webinaire n°3 du 30 novembre 2021 dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique – Thématique 2 – Quelles agricultures résilientes face au changement climatique ?

⁵³ Le projet Life intégré Artisan, piloté par l'OFB et cofinancé par l'Union Européenne, se consacre à démontrer et valoriser le potentiel des SafN, à sensibiliser et faire monter en compétences les acteurs sur cette thématique, et à accompagner et amplifier les projets sur tout le territoire national (y compris l'Outre-mer).

4. L'IMPERATIF D'UNE GESTION PLUS ECONOMIQUE DE L'EAU D'IRRIGATION

En France⁵⁴, le prélèvement en eau pour l'agriculture est de l'ordre de 3 milliards de m³/an pour un prélèvement total (comprenant outre l'agriculture, la production d'énergie, l'industrie et l'eau potable) de plus de 33 milliards de m³/an. Si cette part de l'agriculture dans les prélèvements totaux reste modérée (9 %), la part de la consommation nette de l'agriculture (après restitution au milieu⁵⁵) est très élevée avec 2,88 milliards de m³/an, soit 48 % de la consommation totale de 6 milliards de m³/an (voir tableau ci-dessous).

Prélèvements et consommations d'eau par usage en 2009 (source : Agences de l'eau)

Usage	Volume prélevé		Volume consommé	
	milliards m ³	%	milliards m ³	%
Production d'énergie	21,4	64%	1,32	22%
Industrie	3,3	10%	0,36	6%
Irrigation	3,0	9%	2,88	48%
Eau potable	5,7	17%	1,44	24%
Total	33,4	100%	6,00	100%

Source du tableau : BRL Ingénierie, Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030, Rapport final – Septembre 2012

L'eau destinée à l'irrigation représente ainsi en moyenne annuelle environ 50 % de l'eau consommée en France et peut même atteindre dans certaines régions 80 % des prélèvements effectués en été⁵⁶. En 2016, près des deux tiers de cette eau pour l'irrigation étaient issus des eaux de surface continentales, avec des disparités régionales (de 70 % dans les régions de la frange Sud à 30 % dans les autres régions métropolitaines).

Ces chiffres sont à comparer avec ceux de grands pays irrigants. En Espagne⁵⁷, premier pays irriguant en Europe, la consommation d'eau par l'agriculture atteint, en 2012, 25 milliards de m³, soit 68 % de l'ensemble de l'eau consommée.

4.1. Présentation de l'irrigation en France

4.1.1. Des surfaces irrigables en baisse

Une très large part des prélèvements en eau par l'agriculture (80 %) est destinée à l'irrigation⁵⁸ (le reste étant destiné à l'abreuvement des animaux et le nettoyage des bâtiments et du matériel).

En 2016, la surface agricole utilisée (SAU) irriguée en France s'élève à près de **1,4 million d'ha**⁵⁹. Les surfaces irriguées régressent depuis 2000, après avoir triplé entre 1970 et 2000 en passant de

⁵⁴ Source : BRL Ingénierie, Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030, Rapport final – Septembre 2012.

⁵⁵ Alors qu'au moins 90 % des prélèvements destinés à la production d'électricité sont restitués au milieu naturel, il n'en va pas de même pour l'irrigation qui consomme une part importante de l'eau qu'elle prélève.

⁵⁶ Source des données : Rapport « Sécheresse et agriculture : Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau », Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, octobre 2006.

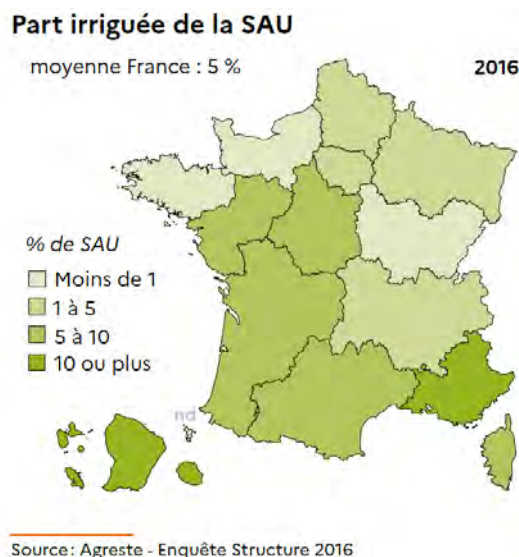
⁵⁷ Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁵⁸ Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁵⁹ Source : Agreste, Graph'Agri 2021 – Pratiques de culture et d'élevage.

0,54 million d'ha à 1,57 million d'ha⁶⁰. Les surfaces irriguées représentent ainsi 5 % de la SAU⁶¹, soit un taux modéré comparé à la moyenne européenne de 6,2 % correspondant à 10 millions d'ha⁶².

Si l'irrigation est présente partout en France, elle varie fortement en fonction des conditions climatiques des régions (moins de 1 % en Bourgogne-Franche-Comté, Normandie et Bretagne, contre 14 % en Provence-Alpes-Côte d'Azur), et au sein d'une même région selon les cultures, les modes d'irrigation et les équipements hydrauliques des exploitations agricoles⁶³.



Le nombre d'exploitations irriguant est difficile à cerner, passant du simple (74 000 exploitations en 2010⁶⁴) au double (134 620 en 2013⁶⁵) selon les sources.

Les objectifs de l'irrigation peuvent différer selon les régions et les cultures⁶⁶ :

- amélioration de la production (cas du Sud-Ouest et des zones à pluviométrie aléatoire) ;
- sécurisation et maintien des rendements en cas de sécheresse (en particulier dans le Centre ou le Bassin Parisien notamment pour les céréales à paille) ;
- amélioration de la qualité des produits (semences, maraîchage, horticulture, vergers... ou cultures contractuelles).

⁶⁰ Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁶¹ Sources : Agreste, Graph'Agri 2021 – Pratiques de culture et d'élevage et Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁶² Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁶³ Source : Agreste, Graph'Agri 2021 – Pratiques de culture et d'élevage.

⁶⁴ Source : « Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000 », Agreste Primeur N° 292, novembre 2012.

⁶⁵ Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁶⁶ Source : Rapport final « Economiser l'eau pour l'irrigation par les changements de pratiques agricoles : analyse comparée de politiques publiques et pistes d'amélioration en France », Oréade-Brèche, janvier 2018.

Pour illustrer cet objectif d'augmentation des rendements, on trouvera ci-après un exemple proposé par la revue ProFilBio, d'une culture de maïs grain en agriculture biologique dont la marge brute double quasiment avec l'irrigation.

COMPARAISON MARGES BRUTES
ENTRE DU MAÏS GRAIN SEC ET IRRIGUÉ

	MAÏS SEC	MAÏS IRRIGUÉ
RENDEMENT (t/ha)	5	8,5
PRIX (€/t)	300	300
FRAIS SÉCHAGE (€/t)	25	25
PRODUIT (€/ha)	1 375	2 337,5
SEMENCE (€/ha)	272	306
ENGRAIS (FIENTE 115 UNITÉS D'AZOTE) (€/ha)	220	220
IRRIGATION (150 MM) (€/ha)		225
BIO-CONTRÔLE (€/ha)	35	35
CHARGES (€/ha)	527	786
MARGE BRUTE (€/ha)	848	1 551,5

Source : Irriguer les grandes cultures en agriculture biologique, ProFilBio, N° 7, juin 2019

Les cultures irriguées⁶⁷ en 2010 sont par ordre décroissant : le maïs grain et semence (41 %), les céréales (17 %), les pommes de terre et légumes frais (11 %), le maïs fourrage (7 %), les vergers (6 %), les cultures industrielles – betteraves, soja et tournesol – (6 %). Le maïs demeure, en France, la principale culture irriguée avec près de la moitié (si l'on additionne le maïs grain et semence et le maïs fourrage) de la surface irriguée totale, même si son irrigation a fortement reculé depuis 2000.

La gestion de l'irrigation en France se fait selon deux modèles principaux : celui de la gestion collective de périmètres d'irrigation, et celui de la gestion individuelle par prélèvement direct soumis à autorisation⁶⁸. En 2010, deux exploitations sur trois ont recours exclusivement à un réseau individuel d'accès à l'eau. Ce nombre est en constante augmentation depuis 1970 alors que les accès via un réseau collectif ont, eux, fortement reculé depuis 2000⁶⁹.

4.1.2. La forte prédominance de l'aspersion

Plusieurs techniques d'irrigation coexistent actuellement en France⁷⁰ :

- **L'irrigation gravitaire** qui consiste à amener l'eau en l'état **sans pression** aux parcelles via un réseau de canalisation. Elle ne concerne que 3 % de la surface totale irrigable et tend à disparaître.

⁶⁷ Source : Rapport final « Economiser l'eau pour l'irrigation par les changements de pratiques agricoles : analyse comparée de politiques publiques et pistes d'amélioration en France », Oréade-Brèche, janvier 2018.

⁶⁸ Source : Rapport final « Economiser l'eau pour l'irrigation par les changements de pratiques agricoles : analyse comparée de politiques publiques et pistes d'amélioration en France », Oréade-Brèche, janvier 2018.

⁶⁹ Source des données : « Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000 », Agreste Primeur N° 292, novembre 2012.

⁷⁰ Sources : « Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000 », Agreste Primeur N° 292, novembre 2012 et rapport « Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation », IRSTEA UMR G-EAU, Claire Serra-Wittling et Bruno Molle, septembre 2017.

- **L'irrigation sous pression** qui consiste à apporter l'eau à la parcelle ou à la plante en utilisant des moyens énergétiques (pompes). On distingue :
 - **L'irrigation par aspersion** qui consiste à projeter l'eau en pluie sur la parcelle. C'est la méthode la plus répandue que ce soit en termes d'irrigants la pratiquant (80 % des irrigants) qu'en termes de surfaces (87,2 % des surfaces irrigables). Elle peut recourir à différents types de matériel :
 - ✓ Le **canon-enrouleur**. Ce matériel, utilisé en grandes cultures et cultures fourragères, est de loin le plus répandu (il couvre les deux tiers de la surface irrigable). Il présente l'avantage d'une installation/désinstallation rapide, ce qui lui donne un avantage comparatif indéniable dans les rotations longues de cultures irriguées ou non sur une même parcelle ;
 - ✓ Le **pivot** (14 % de la surface irrigable) qui se rencontre en grandes cultures et cultures légumières industrielles. Il s'agit d'un système d'irrigation mécanisé irriguant de façon circulaire ou sectorielle, en général à poste fixe ;
 - ✓ Les **rampes frontales** (3 % de la surface irrigable), utilisées surtout pour les cultures sous contrat et l'horticulture de plein champ. Ce sont des systèmes d'irrigation mobiles, construits avec les mêmes éléments qu'un pivot, arrosant de façon linéaire une surface rectangulaire ;
 - ✓ La **couverture intégrale** (11 % de la surface irrigable), qui se rencontre en grandes cultures, maraîchage, horticulture et arboriculture. Ce système consiste, en début de campagne, à disposer les rampes sur la parcelle et à les équiper de l'ensemble des asperseurs. Une fois posé, le système reste fixe pendant toute la saison d'irrigation.
 - La **micro-irrigation**, appelée aussi **irrigation localisée**, qui consiste à effectuer des apports localisés au niveau des racines. Elle concerne de faibles surfaces irrigables (entre 3 % et 5 % selon la source des données) et reste réservée à des exploitations spécialisées en viticulture, en cultures fruitières, en maraîchage et en horticulture. Elle comprend :
 - ✓ la **micro-aspersion** (arboriculture) ;
 - ✓ et le **goutte-à-goutte** de surface ou enterré.

4.2. Les innovations pour économiser l'eau d'irrigation

Les innovations visent à augmenter l'efficacité de l'irrigation, qui se définit comme le rapport entre le volume d'eau utilisé bénéfiquement par la culture, c'est-à-dire réellement transpiré par la culture, et le volume à l'entrée de la parcelle. Deux grands types d'innovations peuvent être distingués : les innovations technologiques d'une part et les innovations dans l'aide à la décision d'autre part. On ajoutera à ces innovations celles apportées par l'agrivoltaïsme.

4.2.1. Les innovations technologiques

Elles portent sur le réglage du matériel et le type de matériel :

- Le **réglage du matériel**. La **gestion et la distribution optimales du volume d'eau dont on dispose** constituent un chantier permanent de l'innovation. Citons : le réglage de l'angle du secteur arrosé par un canon (lutte contre les pertes par dérive) ; le réglage de la vitesse du canon en fonction de la topographie (dans une pente, le canon en s'accéléralant met moins d'eau) ; la régulation de l'enroulement ; la gestion des écartements entre passages ; les ajustements débit/pression.

Concernant les pressions, les innovations portent notamment sur la réduction de celles-ci de manière à aboutir à des arrosages à basse voire très basse pression pour économiser l'énergie et réduire la facture énergétique (notion de « nexus eau-énergie-alimentation⁷¹ »). On trouve ainsi de tels dispositifs en micro-aspersión fonctionnant à basse pression pour des arbres fruitiers, notamment en Italie. Ces dispositifs peuvent aussi être utilisés pour réguler la température en cas de vagues de chaleur (exemple en Sicile et en Croatie).

- Le **type de matériel** plus ou moins consommateur d'eau, en **adoptant un système d'irrigation potentiellement plus efficient**, en passant par exemple de l'irrigation par aspersion à l'irrigation localisée, comme le montre le tableau ci-dessous⁷².

Efficience potentielle de l'irrigation	
Système d'irrigation	Efficience moyenne (et extrema)
Enrouleur	65% (55 à 75%)
Couverture intégrale	75% (60 à 85%)
Pivot traditionnel	80% (75 à 90%)
Micro-aspersión Goutte-à-goutte de surface	85% (70 à 95%)
Goutte-à-goutte enterré	90% (75 à 95%)

Le système d'irrigation le plus efficient dans l'absolu est ainsi le goutte-à-goutte.

Comme le rappelle un article d'INRAE⁷³, les irrigants peuvent prétendre à des aides financières européennes (fonds FEADER) pour leurs investissements dans l'amélioration de leur système hydraulique agricole, à condition qu'ils démontrent ex ante que le nouveau système permet de réaliser des économies d'eau entre 5 et 25 %, sans diminution de rendement des cultures.

Ceci étant, ce même article rappelle que les économies d'eau potentiellement réalisables en changeant un matériel d'aspersion pour un système d'apport localisé s'avèrent limitées, voire

⁷¹ Le « nexus » (du latin "lien", "jonction") exprime les rapports de cause à effet entre l'approvisionnement en eau et en énergie et la production alimentaire. Le nexus eau énergie alimentation est dorénavant régulièrement mis à l'ordre du jour des grandes manifestations internationales comme les Forum mondiaux de l'eau (source : mémoire HDR de Sami BOUARFA, Université de Montpellier II, Ecole doctorale Systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosociences, environnement (SIBAGHE), 2013)

⁷² Source : Article « Matériels d'irrigation : les économies d'eau passent par les outils de pilotage », Arvalis, 1er avril 2021, <https://www.perspectives-agricoles.com/materiels-d-irrigation-les-economies-d-eau-passent-par-les-outils-de-pilotage-@/view-3680-arvarticlepa.html>

⁷³ Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N° 34 – 2020. Article « La modernisation des systèmes d'irrigation en France : quelles économies d'eau possibles à la parcelle ? » Claire SERRA-WITTLING, Bruno MOLLE et Bruno CHEVIRON, G-Eau, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, MontpellierSupAgro, Univ Montpellier.

impossibles, si l'année est très sèche. L'explication avancée est que toute l'eau d'irrigation contribue, lors des années sèches, à la reconstitution des réserves en eau du sol. Il en résulte que dans ces conditions, aucune eau n'est perdue, augmentant ainsi l'efficacité globale des systèmes par aspersion qui rejoint alors celle des systèmes d'irrigation localisée.

Plus généralement, on trouvera, en annexe 10, les valeurs d'économie d'eau réalisée lors d'un changement de matériel d'irrigation ainsi que les avantages et inconvénients des trois grands types de systèmes d'irrigation (gravitaire, goutte-à-goutte, aspersion).

A cela, il convient de rajouter le coût de l'irrigation. Selon un tableau d'Arvalis des charges d'irrigation en fonction du matériel utilisé sur une parcelle plane rectangulaire de 30 ha de maïs recevant 200 mm d'irrigation (voir ci-dessous), **les matériels d'irrigation des grandes cultures les moins coûteux à l'hectare sont le pivot puis le canon-enrouleur**, tandis que **les plus onéreux sont de loin le goutte-à-goutte puis la couverture intégrale**. On notera que **le coût de l'eau en lui-même reste marginal dans le coût de l'irrigation** et, de plus, dans une fourchette relativement resserrée selon le type de matériel (entre 62 €/ha pour le goutte-à-goutte – coût de l'eau le moins cher – contre 110 €/ha pour le canon-enrouleur – coût de l'eau le plus cher –).

		Couverture intégrale	Pivot	Enrouleur	Goutte à goutte enterré	Goutte à goutte surface rond	Goutte à goutte surface jetable	Goutte à goutte surface plat
CHARGES FIXES (€/HA)	Amortissement technique et entretien/réparation matériel d'apport	84	155	119	331	362	496	632
	Amortissement technique et entretien/réparation forage, pompage, adduction, compteur	102	78	104	88	90	90	90
CHARGES DE MAIN D'ŒUVRE (€/HA)	Main d'œuvre pose	69	1	-	18	112	112	138
	Main d'œuvre dépose	87	2	-	18	52	35	78
	Main d'œuvre en cours de campagne (hors trajets éventuels)	10	1	57	17	17	17	17
CHARGES VARIABLES (€/HA)	Coût de l'eau (énergie, coût variable d'accès à l'eau, redevance agence de l'eau)	100	96	110	62	62	62	62
TOTAL CHARGES (€/HA IRRIGUE/AN)		452	333	390	534	695	812	1017

Source : Les vrai-faux de l'irrigation, Arvalis, juin 2018

Enfin, on trouvera, en annexe 11, une comparaison synthétique des différents systèmes d'irrigation réalisée par Arvalis. Ce tableau, qui compile 11 critères relatifs à l'adaptation au parcellaire, au temps de travail, à la consommation d'énergie, à la qualité et au coût de l'irrigation, met en évidence :

- pour le goutte-à-goutte, une qualité de répartition et une efficacité d'application de l'eau très performantes, contrebalancées par un coût élevé à l'hectare ;
- pour le canon-enrouleur, une qualité de répartition et une efficacité d'application de l'eau faibles, mais une grande polyvalence dans l'emploi de ce matériel pour un coût très modéré ;
- et pour le pivot, une qualité de répartition et une efficacité d'application de l'eau moyennes à un coût très intéressant, mais sans toute la polyvalence du canon-enrouleur.

4.2.2. Les innovations dans l'aide à la décision

Comme l'indiquent des chercheurs d'INRAE de l'UMR G-EAU⁷⁴, « les économies d'eau sont imputables, certes, à la modernisation du matériel d'irrigation (...), mais également à la conduite de l'irrigation qui consiste à apporter la bonne quantité d'eau au bon moment (...) ». Il s'agit donc, grâce aux outils d'aide à la décision (OAD), d'assurer le pilotage le plus fin possible de l'irrigation pour d'une part, amener de l'eau à la plante quand elle en a besoin et la quantité dont elle a besoin (pilotage tactique), et d'autre part, gérer l'eau pour avoir le meilleur résultat économique compte tenu du volume d'eau prédéterminé dont l'agriculteur dispose (pilotage stratégique).

En ce qui concerne le **pilotage tactique**, les innovations portent sur :

- Les **bilans hydriques** qui permettent de suivre par calcul l'état de la réserve en eau du sol en tenant compte des besoins en eau de la culture et des apports par les pluies ou par l'irrigation. Ces bilans hydriques peuvent être :
 - des documents (exemple : les avertissements d'irrigation des chambres d'agriculture) ;
 - des modèles numériques comme Irré-LIS, modèle développé par Arvalis de calcul en temps réel de la réserve en eau du sol et des dates prévisionnelles des stades de croissance des cultures, Irribet qui indique à quel moment l'irrigation est nécessaire à partir des données météorologiques pluviométriques et d'évapotranspiration (données Météo France), de la réserve utile du sol, des dates de semis et de levée, de la couverture foliaire pour une parcelle donnée...
 - des modèles numériques assistés par télédétection via des drones, des satellites donnant un indice foliaire réel permettant de calculer les prélèvements de la plante.

Ces bilans hydriques permettent de mettre en place une **irrigation de précision** qui consiste à **apporter la bonne dose d'eau au bon endroit au bon moment** en subdivisant une même parcelle en zones plus petites mais plus homogènes pour faire bénéficier chacune d'une irrigation différentielle. L'irrigation de précision suppose donc de connaître la variabilité intraparcellaire de la réserve utile (RU) du sol et de réaliser un bilan hydrique différencié en temps réel. Une telle irrigation est possible avec les différentes techniques d'irrigation

⁷⁴ Source : Rapport « Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation », INRAE UMR G-EAU, Claire Serra-Wittling, Bruno Molle, Septembre 2017.

décrites précédemment comme la couverture intégrale ou la micro-irrigation pilotée automatiquement, l'enrouleur à avancement variable (peu développé) et le pivot à busage télécommandé (en cours d'expérimentation).

Cependant, le Conseil scientifique du Comité de bassin Rhône-Méditerranée⁷⁵ rappelle qu'il manque encore de retours d'expériences à grande échelle sur la résilience à la sécheresse des conduites agronomiques combinant pratiques agro-écologiques et irrigation de précision.

- Les **sondes tensiométriques et capacitatives** qui ont pour intérêt de mesurer in situ la présence d'eau dans le sol. Cette méthode de mesure au champ de l'humidité est toutefois dépendante de la fiabilité des capteurs, de la représentativité réelle de la zone mesurée par rapport à la zone à irriguer et de l'interprétation de l'information.
- Les **capteurs dendrométriques** directement installés au niveau des plantes et qui mesurent les micro-variations de diamètre des organes des cultures en fonction de leur état hydrique. Cette méthode de mesure directement sur la plante soulève les mêmes difficultés que celles évoquées pour les sondes (voir supra) auxquelles s'ajoutent celles relatives à la fragilité du matériel et à sa pose délicate.

Quant au **pilotage stratégique**, il a pour objet de réfléchir à une gestion optimisée de l'irrigation au niveau d'un système de culture quand on est contraint par les volumes d'eau afin de déterminer les assolements qui combineront économies d'eau et performance économique.

Ainsi, l'application en ligne ASALEE⁷⁶, utilisée et conçue sur le secteur de la Boutonne (Charente-Maritime), a pour objectif de comparer des stratégies d'assolement, pluvial et irrigué, selon le volume d'eau disponible, la variabilité climatique et économique. Cet outil propose différents indicateurs technico-économiques et analyse leur variabilité : marge nette, temps de travail, consommation en eau d'irrigation... Il constitue une base de discussion ou de diagnostic pour des groupes d'agriculteurs pour établir les assolements les plus pertinents.

Selon les chercheurs de l'UMR G-EAU⁷⁷, l'utilisation d'outils d'aide à la décision pour optimiser les apports permet une économie d'eau de 10 à 40 % selon les situations.

R2. Favoriser l'accès aux innovations en irrigation (matériels, outils d'aide à la décision) à travers la formation, le conseil et l'aide au financement.

⁷⁵ « Avis et recommandations sur l'intérêt économique à moyen et long terme de la substitution des prélèvements par stockage ou par transfert de l'eau », Conseil scientifique du Comité de bassin Rhône-Méditerranée, mars 2020.

⁷⁶ Outil conçu en collaboration avec INRAE, Terres Inovia et les Chambres d'agriculture des Deux-Sèvres et de Charente-Maritime avec le soutien de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

⁷⁷ Source : Rapport « Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation », INRAE UMR G-EAU, Claire Serra-Wittling, Bruno Molle, Septembre 2017.

4.2.3. Agrivoltaïsme et économies d'eau

L'agrivoltaïsme s'appuie sur le principe des cultures étagées : un étage bas réservé à la production agricole et un étage haut (5 m) réservé à la production d'électricité (voir annexe 12).

En France, les installations agrivoltaïques sont de deux types : soit les serres photovoltaïques, apparues dès les années 2000, soit les installations photovoltaïques en plein champ, qui se sont développées à partir de 2009⁷⁸, sous l'impulsion d'un certain nombre de sociétés⁷⁹. Ainsi, la société Sun'R s'est associée dès 2009 avec INRAE afin de produire des références sur la faisabilité de ces nouveaux systèmes pour certaines cultures (viticulture en particulier, étendue depuis aux grandes cultures, au maraîchage et à l'arboriculture)⁸⁰, à travers le programme de recherche Sun'Agri. Ce programme, qui en est à sa troisième génération, a déjà commencé à produire un certain nombre de résultats :

- une protection de la structure des sols contre les effets de la pluie (battance) et du gel (microclimat sous ombrière, limitation des pertes de chaleur par radiation) ;
- une confirmation de l'amélioration du Land Equivalent Ratio (LER) des cultures, c'est-à-dire du rapport entre la surface usuellement nécessaire pour réaliser la production effective d'un terrain et la surface effectivement utilisée pour réaliser cette production quand elle est associée à du photovoltaïsme dynamique ;
- **une réduction significative de la consommation de la ressource en eau, pouvant aller jusqu'à 30% sur certaines cultures**⁸¹, les panneaux photovoltaïques limitant les pertes par évapotranspiration de par leur ombrage sur la culture sous-jacente, convenablement programmé en fonction des conditions climatiques et des objectifs de production ;
- **une augmentation des rendements agricoles**⁸² ;
- une production d'électricité connexe non négligeable⁸³.

Le programme Sun'agri bénéficie de financements de l'ADEME dans le cadre du Plan d'investissements d'avenir⁸⁴.

L'agrivoltaïsme est une innovation qui encourage la synergie entre une production agricole et une production d'électricité associée sur une même surface dans une logique de développement des énergies renouvelables, de lutte contre le réchauffement climatique, et d'amélioration du revenu des agriculteurs par une production d'électricité connexe. Néanmoins, le milieu professionnel s'inquiète de la possible concurrence entre les deux productions, voire même de la possible substitution de la production électrique à la production agricole, et donc, de fait, d'une nouvelle artificialisation déguisée des sols agricoles⁸⁵. En France, l'ADEME réfléchit actuellement à une définition de

⁷⁸ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Agrivolta%C3%AFque>

⁷⁹ Exemples : Akuo Energy, Tenergie, Sun'R...

⁸⁰ « Vers des systèmes agrivoltaïques conciliant production agricole et production d'électricité », INRAE, Chantal Dorthe, 26 juin 2017

⁸¹ Dossier de Presse – Sun'Agri – Copyright Sun'R – 2017

⁸² <https://www.ombrea.fr/le-systeme>

⁸³ <https://www.vertsun.com/2020/12/avantages-de-agrivoltaique-en-france/>

⁸⁴ <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/1049-sun-agri-3.html>

⁸⁵ <https://www.coordinationrurale.fr/agrivoltaisme/>, Définition de l'agrivoltaïsme, réunion avec l'ADEME, mars 2021

l'agrivoltaïsme qui intègre définitivement les termes de l'association envisagée et lui permette de mieux cibler ses financements au titre des énergies renouvelables, tout en respectant voire valorisant la production agricole associée qui doit rester prioritaire⁸⁶ à la fois en quantité et en qualité.

4.3. Les économies d'eau d'irrigation en Espagne et en Italie

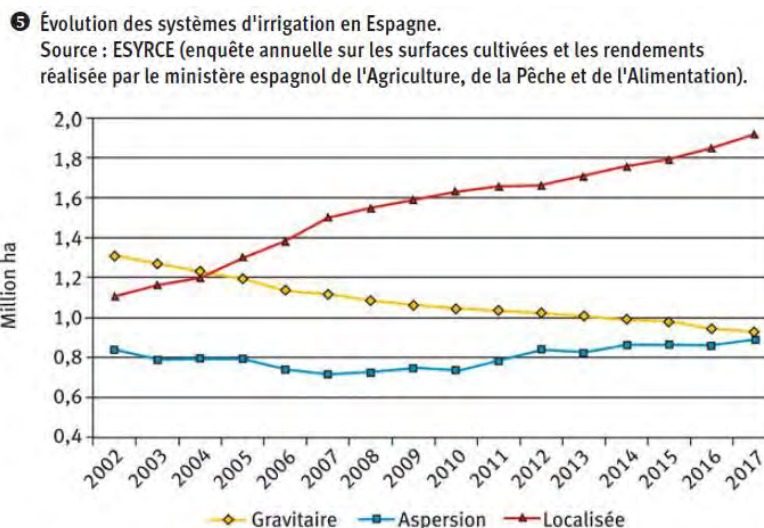
En 2010⁸⁷, l'Europe consomme près de 40 milliards de m³ d'eau pour l'irrigation, avec pour premiers pays irrigants l'Espagne puis l'Italie, qui à elles deux représentent 70 % des prélèvements européens.

Les économies d'eau en Espagne⁸⁸

L'Espagne est le premier pays irrigant européen avec 3,77 millions d'ha de surface irriguée, soit 22 % de la surface totale cultivée.

A la fin des années 1990, l'Espagne a initié un vaste programme de modernisation de l'irrigation avec amélioration des infrastructures, mise en œuvre de nouvelles technologies comme l'irrigation localisée et proposition de nouvelles méthodes de gestion de l'irrigation.

Ce programme s'est traduit notamment par un fort accroissement de l'irrigation localisée qui représente désormais 52 % de la surface irriguée (voir le graphique ci-dessous) et qui concerne principalement les oliveraies, les vignobles, les plantations d'agrumes, les vergers et les légumes.



Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N°34 – 2020.

⁸⁶ « Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles », ADEME, rapport final de mission, février 2018.

⁸⁷ Source : Environnement & agriculture, Les chiffres clés – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.

⁸⁸ Source des informations : Revue Sciences Eaux & Territoires N°34 – 2020. Article « Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les Etats membres pour économiser l'eau ».

Alors qu'au cours de la même période 2002-2017 les surfaces irriguées en Espagne sont en augmentation constante (voir graphique), le programme aurait généré, selon les estimations, des économies d'eau de 3 milliards de m³/an.

Les économies d'eau en Italie⁸⁹

L'Italie est le deuxième pays irrigant en Europe, après l'Espagne, avec plus de 20 % de sa surface agricole utilisée qui est irriguée. L'irrigation par aspersion et l'irrigation de surface (ou gravitaire) couvrent chacune 40 % de la surface totale irriguée, la micro-irrigation (ou irrigation localisée) 20 %.

Le programme national de développement rural (PDR)⁹⁰ a permis de financer des actions d'amélioration des réseaux de distribution et d'installation de compteurs. A défaut d'une évaluation ex ante des économies d'eau potentielles, une évaluation ex post devrait être possible en raison de l'obligation faite aux bénéficiaires des aides de disposer ou d'installer des compteurs.

Des économies d'eau permises par les services de conseil en irrigation ont également été entreprises. Ces économies ont été estimées à 10 %. Parmi les services de conseil, l'outil de pilotage IRRINET, qui repose sur la réalisation d'un bilan hydrique, aurait permis une économie d'eau annuelle d'environ 90 millions de m³ dans la région d'Emilie-Romagne.

4.4. Les notions d'irrigation déficitaire et d'irrigation de résilience

4.4.1. L'irrigation déficitaire

L'« irrigation déficitaire » consiste à n'irriguer une culture que lors des étapes de croissance sensibles à la sécheresse⁹¹. Les stratégies poursuivies par ce type d'irrigation visent une meilleure utilisation de l'eau d'irrigation dans les zones à ressources hydriques limitées (notamment dans les pays du Maghreb), principalement en arboriculture fruitière⁹².

Selon l'INRA de Meknès⁹³, « l'irrigation déficitaire régulée (IDR) consiste à appliquer des restrictions hydriques raisonnées en dehors des stades phénologiques critiques, pendant lesquels les composantes du rendement sont moins sensibles au stress hydrique. L'objectif est d'économiser l'eau d'irrigation sans affecter le rendement, tout en assurant un niveau satisfaisant, voire amélioré, de la qualité de production ». Ce type d'irrigation est l'une des approches recommandées à moyen terme par la FAO pour faire face au manque d'eau en agriculture⁹⁴.

4.4.2. L'irrigation de résilience

En France, où les conditions climatiques n'imposent pas encore de pratiquer l'irrigation déficitaire, on évoque désormais le concept d'« irrigation de résilience ». Le rapport CGAAER/CGEDD de juillet

⁸⁹ Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N°34 – 2020. Article « Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les Etats membres pour économiser l'eau ».

⁹⁰ L'Italie combine un PDR national et 21 PDR régionaux conformément à la politique européenne de développement rural 2014-2020.

⁹¹ <https://cordis.europa.eu/article/id/88490-turning-deficit-irrigation-into-profit/fr>

⁹² Source : Article « Effets de l'irrigation déficitaire contrôlée sur la croissance et le développement foliaire du palmier dattier », Sabri A., Bouaziz A., Hammani A., Kuper M., Douaik A., Badraoui M., Cahiers agricultures, 18 septembre 2017

⁹³ Source : <https://www.inra.org.ma/fr/actualite/C3%A9s/bulletin-d%E2%80%99information> ; voir INRA newsletter N°6, décembre 2021.

⁹⁴ Source : Article « Niveau de rendement et qualité du fruit des rosacées fruitières sous irrigation déficitaire régulée », Dr Razouk R., INRA Meknès, Agriculture du Maghreb N°113, juillet/août 2018

2020 « Changement climatique, eau et agriculture : quelles trajectoires d'ici 2050 ? »⁹⁵ en propose la définition suivante :

- « une irrigation plus économe, centrée sur la sécurisation de la production agricole, contribuant à une plus grande sobriété et résilience de l'agriculture et visant une stabilité des performances dans un contexte climatique plus fluctuant ;
- qui doit s'accompagner d'une évolution des assolements, des variétés et des pratiques culturales (travail du sol en particulier) pour rendre plus efficaces les apports réduits en eau ;
- cette irrigation vise une conduite des cultures non à l'objectif maximum de production mais vers un optimum faisant converger rentabilité agricole et économie de la ressource en eau ».

Le rapport CGAAER/CGEDD ajoute que « cette évolution vers l'irrigation de résilience a vocation à participer et conforter la transition de l'agriculture vers l'agroécologie, dont la mise en œuvre constitue l'un des éléments centraux de sa nécessaire transformation au regard du changement climatique ».

R3. Préciser le concept d'irrigation de résilience, notamment ses bases techniques, agronomiques et économiques, afin d'en permettre l'appropriation par les irrigants.

⁹⁵ Rapport CGEDD N°012819-01 / CGAAER N° 19056

5. LA RECHERCHE DE RESSOURCES OPTIMISEES ALTERNATIVES EN EAU

5.1. L'optimisation de l'ensemble des ouvrages déjà existants

Une première solution envisageable pour répondre aux besoins en eau est de solliciter ou de mieux mobiliser les retenues déjà existantes.

5.1.1. La mobilisation des ressources des concessions hydroélectriques

Le parc hydroélectrique français actuel se compose d'environ 2500 installations pour 25,5 GW de puissance électrique, dont 400 installations en régime concessif représentant 90 % de la puissance totale du parc et un stockage d'eau d'environ 7 milliards de m³.

C'est ainsi que face à un déficit en eau évalué à 1,2 milliard de m³ à l'horizon 2050, le Comité de bassin Adour-Garonne a souhaité mobiliser davantage les retenues hydroélectriques, cette mobilisation accrue constituant un des quatre leviers de sa stratégie⁹⁶ pour sécuriser l'accès à l'eau. Dans ce cadre, le nouveau contrat de coopération avec EDF, conclu en 2020 pour 2 ans et reconductible une 3^{ème} année, prévoit :

- une augmentation de 20 millions de m³ des volumes pour le soutien d'étiage à partir des barrages exploités par EDF, soit une mobilisation de près de 70 millions de m³ ;
- ainsi qu'une augmentation des débits avec le doublement de la capacité d'intervention au plus fort de l'étiage jusqu'à 20 m³/s, pour répondre aux besoins lors des pics de prélèvement en eau (eau potable, industries, agriculture) en période de sécheresse ou de canicule ainsi que pour tenir le DOE (débit d'objectif d'étiage) et permettre un bon fonctionnement des milieux aquatiques.

Cette solution, comme le rappelle le Syndicat mixte d'études et d'aménagement de la Garonne (SMEAG), suppose de trouver un équilibre avec EDF.

5.1.2. La mobilisation des retenues non utilisées

En fait, il existe une multitude de retenues non utilisées sur l'ensemble du territoire, mais celles-ci sont mal connues. Par ailleurs, la mobilisation de ces retenues non utilisées pose de multiples questions (techniques, financières, juridiques), ce qui rend cette solution incertaine.

Pour autant, si l'on considère à nouveau le bassin Adour-Garonne⁹⁷, celui-ci a prévu, toujours dans sa stratégie pour sécuriser l'accès à l'eau, de s'intéresser à cette éventuelle solution. Plus précisément, sa stratégie prévoit une étude des potentialités de mobilisation des retenues d'eau existantes avec :

- une première étape consistant à appréhender à l'échelle du bassin le volume de l'ensemble des **gisements d'eau existants** (plans d'eau naturels, gravières, retenues utilisées ou non) ;
- une deuxième étape visant à affiner localement les **volumes disponibles non utilisés**, en faisant appel notamment à l'analyse d'images satellitaires ;

⁹⁶ La stratégie du bassin Adour-Garonne pour sécuriser l'accès à l'eau à l'horizon 2050 repose sur quatre leviers : l'acquisition de connaissances pour piloter plus finement la gestion de l'eau ; la sollicitation d'autres types de ressources comme la REUT ; la mise en œuvre de projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) ; la mobilisation accrue des retenues hydroélectriques.

⁹⁷ Source : Fiche de l'agence de l'eau Adour-Garonne « Evaluation des potentialités de mobilisation des retenues d'eau existantes pour participer à la reconquête de l'équilibre besoins-ressources ».

- et une troisième étape visant à identifier les aspects techniques, juridiques et financiers en vue d'une mobilisation effective des gisements existants non utilisés sur les territoires et dans le cadre des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE).

Le volume qui pourrait ainsi être remobilisé est évalué approximativement à 30 millions de m³ pour l'ensemble du bassin Adour-Garonne.

5.2. La réalisation de nouveaux stockages d'eau

La question du stockage d'eau par création de nouvelles retenues est âprement discutée.

5.2.1. La notion de retenue d'eau

L'expertise scientifique collective menée en 2016 par IRSTEA, l'INRA et l'ONEMA relative à l'impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique recense un nombre conséquent de types de retenues. Comme le rappelle la note technique de 2020 du SIGAL (Syndicat interdépartemental de gestion de l'Alagnon et ses affluents) s'interrogeant sur les retenues d'eau comme solution d'adaptation au changement climatique⁹⁸, « la sémantique autour du mot "retenue" est large et complexe ».

Le glossaire que l'on retiendra est le suivant :

- retenue : « les installations ou ouvrages permettant de stocker l'eau (réserve, stockage d'eau, plan d'eau, étang, retenue collinaire, retenue de substitution) quel que soit leur mode d'alimentation (par un cours d'eau, une nappe, par une résurgence karstique ou par ruissellement) et quelle que soit leur finalité (agricole, soutien à l'étiage, eau potable, maintien de la sécurité des personnes, autres usages économiques) »⁹⁹.
- retenue collinaire : réserve artificielle d'eau, en fond de terrains vallonnés, fermée par une ou plusieurs digues, qui se remplit par ruissellement des eaux de surface (y compris les eaux de drainage ou de fossés).
- retenue de substitution : « **ouvrage artificiel permettant de substituer des volumes prélevés en période de basses eaux par des volumes prélevés en période de hautes eaux. Les retenues de substitution permettent de stocker l'eau par des prélèvements anticipés ne mettant pas en péril les équilibres hydrologiques, elles viennent en remplacement de prélèvements existants** »¹⁰⁰. Les prélèvements peuvent être réalisés soit dans les eaux de surface, soit dans les eaux souterraines. Ces retenues sont obligatoirement étanches et déconnectées du milieu naturel (cours d'eau, nappe, eaux de ruissellement/fossé/drainage) en dehors de la période de remplissage prévue. Dans ces conditions, une retenue collinaire peut être une réserve de substitution.

⁹⁸ Source : Note technique « Les retenues d'eau comme solution d'adaptation au changement climatique ? », SIGAL (Syndicat interdépartemental de gestion de l'Alagnon et ses affluents), décembre 2020.

⁹⁹ Définition donnée par l'instruction du Gouvernement du 7 mai 2019 relative au projet de territoire pour la gestion de l'eau et reprise du guide juridique de la construction de retenues de 2011.

¹⁰⁰ Définition donnée par l'instruction du Gouvernement du 7 mai 2019 relative au projet de territoire pour la gestion de l'eau et reprise du guide juridique de la construction de retenues de 2011.

5.2.2. Les retenues de substitution, une solution à considérer

Les réserves de substitution présentent un certain nombre d'avantages : pour l'environnement, diminuer la pression sur le milieu naturel en été en évitant l'aggravation des étiages naturels des cours d'eau ou les baisses piézométriques de la nappe ; pour les irrigants, sécuriser l'apport d'eau, l'eau des retenues de substitution déconnectées des cours d'eau et nappes n'étant pas soumise aux mesures de limitation temporaire des usages de l'eau (arrêtés sécheresse).

Ces retenues ne sont cependant pas exemptes d'inconvénients comme la perte de quantités d'eau par évaporation et une détérioration de la qualité de l'eau par eutrophisation. Certains ajoutent que ces retenues incitent à accroître les surfaces irriguées (« effet rebond »). Aussi, certains projets d'ouvrage s'adjoignent un protocole d'accord gelant les surfaces irriguées.

Ces retenues de substitution peuvent être de deux types : les retenues collinaires et les « bassines ».

Pour les retenues collinaires, leur développement éventuel est lié au potentiel topographique du sol (une pente douce (2-3 %) permettant un stockage supérieur à celui permis par une pente élevée), à la nature du sol qui suppose la présence d'un minimum d'argile, à la taille du bassin versant qui doit être suffisante, et au montant des investissements conditionnant la rentabilité de l'ouvrage.

Quant aux « bassines », ce sont des ouvrages de stockage d'eau, creusés, terrassés et dont le fond est étanchéifié à l'aide d'un film d'étanchéité. Elles sont remplies par pompage actif l'hiver dans les rivières ou la nappe phréatique.

La création de ces réserves peut être intégrée dans un projet de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE), dont le concept a été défini dans l'instruction du gouvernement du 4 juin 2015 désormais remplacée par **l'instruction gouvernementale du 7 mai 2019** relative au PTGE.

Plus précisément, comme le rappelle le ministère en charge de l'Environnement dans sa réponse publiée par le Sénat à une question écrite¹⁰¹, l'instruction gouvernementale du 7 mai 2019 « précise le rôle de l'Etat et remobilise les acteurs pour élaborer des PTGE. **Parmi les solutions possibles pour une gestion équilibrée de la ressource en eau figure celle relative aux retenues de stockage de l'eau. La question de la pertinence d'une retenue doit être abordée dans le cadre d'une approche globale tenant compte des économies d'eau, des pratiques agricoles plus résilientes, des innovations technologiques en matière d'irrigation et de la capacité de remplissage des retenues dans le contexte du changement climatique.** (...) Le projet de territoire doit aboutir à un programme d'action qui détaille les volumes d'eau associés aux actions en précisant la période de prélèvement (étiage et hors étiage). En l'absence de schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE) ou de répartition de volumes par le SAGE, le PTGE doit aboutir à la répartition, sur toute l'année, des volumes d'eau par usage. Ces volumes doivent être compatibles avec le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). En tout état de cause, [ces volumes] respectent les équilibres hydrologiques, biologiques et morphologiques ».

¹⁰¹ Réponse du Ministère de la transition écologique et solidaire, publiée dans le JO Sénat du 5 septembre 2019, à la question écrite n° 10099 de M. Henri Cabanel (Hérault – SOCR).

La démarche et les actions portées par les PTGE peuvent mobiliser plusieurs sources de financement : les usagers directs et indirects, les collectivités territoriales, les financeurs privés, les agences de l'eau et les autorités de gestion de fonds européens (FEADER, FEDER). Pour les projets de retenue ou de transfert concernant l'irrigation agricole, seule la partie de l'ouvrage correspondant au volume de substitution est finançable par les agences de l'eau. Pour les ouvrages multi-usages (eau potable, soutien d'étiage, irrigation, autres usages ...), les agences peuvent éventuellement financer des parties d'ouvrage allant au-delà de la substitution dans les conditions fixées par les PTGE et dans le respect de leurs enveloppes financières.

Ces PTGE, qui pourraient faire consensus, présentent deux difficultés : celle de la nature des engagements pris par chacun des acteurs et celle de la sécurisation tant financière que juridique de ces engagements.

5.2.3. Le cas de l'Espagne : les limites d'une politique essentiellement centrée sur l'offre

L'Espagne fait souvent figure de référence dans ce domaine avec une capacité de stockage des flux annuels de 48 % (4,7 % en France).

Comme le rappelle le Conseil scientifique du Comité de bassin Rhône-Méditerranée dans l'un de ses avis de mars 2020¹⁰², l'Espagne de tous temps a fondé son développement économique sur l'eau via la mise en œuvre d'une politique reposant sur la construction de grandes infrastructures (canaux, barrages, ...) permettant de mobiliser les ressources en eaux disponibles et de transférer une partie des eaux des bassins atlantiques vers les bassins méditerranéens déficitaires.

Aujourd'hui, la **capacité cumulée des grands barrages en Espagne est de 54 milliards de m³** pour une pluie efficace de 114 milliards de m³ pouvant se réduire en année de sécheresse à 60 milliards de m³ (à titre de comparaison, la capacité cumulée des grands barrages en France est de 12 milliards de m³ pour une pluie efficace de 185 milliards de m³).

Cette politique a permis le développement d'une agriculture irriguée (l'agriculture représente 68 % des usages de l'eau en Espagne) avec des productions venant concurrencer celles de ses voisins, dont la France.

Ainsi que le souligne le Conseil scientifique du comité de bassin Rhône-Méditerranée, cette politique de l'offre engendre des « difficultés graves et croissantes au plan socio-économique comme au plan environnemental : concurrences territoriales entre agriculteurs traditionnels et nouveaux irrigants, entre activité agricole, urbanisme résidentiel et périurbain, et activité touristique ; défiance entre les régions autour du partage de l'eau ; détérioration dramatique de la qualité de l'eau de rivières ; recul du trait de côte ; affaissement de zones deltaïques ; intrusion d'eau salée dans les terres et les aquifères. »

Toujours selon ce Conseil scientifique, « le risque majeur que court ce "modèle" espagnol est celui de la raréfaction de la ressource. Une faible disponibilité des ressources en eau, induisant, de manière récurrente, un remplissage insuffisant des retenues le conduirait à une crise grave ». A ce

¹⁰² Avis et recommandations sur l'intérêt économique à moyen et long termes de la substitution des prélèvements par stockage ou par transfert de l'eau, Conseil scientifique du comité de bassin Rhône-Méditerranée, mars 2020.

propos, le Conseil scientifique fait état d'un taux moyen de remplissage de 49 % début août 2019, en baisse significative par rapport à celui de l'année précédente et par rapport à la moyenne des dix dernières années. L'idée de fermer le transfert Tage-Segura¹⁰³, emblème de cette politique, commence à être envisagée.

5.3. Le drainage

Selon la revue Sciences Eaux & Territoires¹⁰⁴, le drainage permet d'évacuer l'eau en excès améliorant ainsi les qualités du sol. En Europe, il est d'autant plus pratiqué que l'on remonte vers le Nord, en particulier dans les pays baltes et scandinaves qui ont besoin que leurs terres se ressuient au plus vite après le gel. En France, la superficie drainée s'établirait à un peu plus de 3 millions ha (non compris les installations hors cadre réglementaire), soit 10 % de la SAU. Le drainage est réalisé dans les territoires hydromorphes.

D'après la revue Sciences Eaux & Territoires déjà citée¹⁰⁵, l'état de l'art ne nécessite pas d'évolution sensible et tient déjà compte de technologies avancées (exemple, guidage laser des draineuses ...). En revanche, la remédiation¹⁰⁶ ne s'applique qu'aux installations récentes. Dans ces conditions, **l'innovation en drainage ne concernerait pas « tant (...) la technologie que (...) l'optimisation des dispositifs de remédiation et leur implantation concertée dans un territoire via des outils de dialogue territorial ».**

Le drainage, dont la réalisation est soumise à déclaration ou autorisation (article R.214-1 du code de l'environnement), fait l'objet de nombreux questionnements aujourd'hui, notamment quant à son impact sur la biodiversité.

Pour certains, le drainage en évacuant l'eau vers l'aval de manière très rapide, notamment des zones humides, aboutit à des espaces asséchés.

Pour d'autres, le drainage peut présenter des opportunités très intéressantes notamment dans le cadre de la réutilisation des eaux usées récupérées (voir REUT).

Par ailleurs, le drainage contrôlé¹⁰⁷, très développé et étudié aux Etats-Unis, consiste à contrôler le niveau d'eau dans le fossé de collecte des eaux de drainage afin de maintenir une nappe élevée à certaines périodes de l'année. Son intérêt en France semble actuellement limité du fait du climat et parce qu'il ne peut s'envisager que dans des territoires drainés plats (les Landes, les zones de marais artificialisé, les waterings). L'évolution des conditions climatiques pourrait reposer la

¹⁰³ Le transfert du Tage vers le Segura a été lancé dans les années 60 et a été terminé en 1979. Il permet de mobiliser 250 millions de m³ par an, via un aqueduc de 275 km, en direction des périmètres irrigués de Valence et de Murcie.

¹⁰⁴ Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 – 2020. Article « Principes techniques et chiffres du drainage agricole : de la tuyautique à l'hydro-diplomatie », Bernard Vincent, Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR.

¹⁰⁵ Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 – 2020. Article « Principes techniques et chiffres du drainage agricole : de la tuyautique à l'hydro-diplomatie », Bernard Vincent, Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR.

¹⁰⁶ Comme le rappelle la revue Sciences Eaux & Territoires N°32, « le drainage agricole présente un avantage qui est aussi un de ses défauts : transformer une pollution diffuse en une pollution canalisée à l'exutoire des réseaux de drainage ». Des ouvrages dits de remédiation peuvent être imaginés pour limiter l'impact du drainage sur la qualité des eaux en sortie de collecteur, comme par exemple la mise en place de zone tampon humide artificielle (ZTHA).

¹⁰⁷ Source : Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 – 2020. Article « Gérer les eaux de drainage agricole : du génie hydraulique au génie écologique », Julien Tournebise, Hocine Henine et Cédric Chaumont, Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR.

question de son intérêt afin par exemple de maintenir les sols humides pendant la période printanière.

5.4. Les transferts d'eau entre bassins

Les transferts d'eau entre bassins consistent à renforcer la ressource en eau superficielle insuffisante d'un bassin en transportant vers ce bassin des volumes d'eau prélevés dans un autre bassin où l'eau est abondante.

Les transferts d'eau entre bassins¹⁰⁸ existent depuis des millénaires (Mésopotamie, Empire romain...) et sont présents partout dans le monde avec une tendance à l'augmentation des volumes déplacés et à l'accroissement du nombre des grands transferts. Au début des années 2000, il existait plus de 150 infrastructures de grands transferts inter-bassins dans 26 pays et près de 60 étaient planifiées. Plus de la moitié des transferts existants sont situés en Amérique du Sud et du Nord, sachant que le Canada est le pays qui déplace les plus grandes quantités d'eau artificiellement. En Europe, l'Espagne et le Portugal ont eu recours à des transferts massifs pendant les dictatures et les années 1930. Depuis, en Espagne, en raison de fortes mobilisations, le principal transfert qui était prévu par le Plan Hydrologique National (PHN) de 2001, à savoir celui de l'Ebre¹⁰⁹, a été abandonné et remplacé par des usines de désalinisation. Il en a été de même du projet de transfert d'eau du Rhône¹¹⁰ vers Barcelone et la Catalogne abandonné à la fin de la décennie 2000.

En France, des transferts d'eau entre bassins existent également depuis longtemps, comme le Canal de Marseille amenant les eaux de la Durance à Marseille ou le Canal de Provence captant l'eau du Verdon pour Aix-en-Provence, Marseille, Toulon. Actuellement, le programme Aqua Domitia, porté par la Région Occitanie et réalisé par BRL (concessionnaire du Réseau Hydraulique Régional) prévoit un transfert de plus de 8 millions de m³ d'eau du Rhône ou de la réserve de Jouarres pour permettre la sécurisation de l'alimentation en eau potable du Syndicat Bas-Languedoc et l'irrigation de plus de 6000 ha d'un territoire entre Montpellier et Béziers.

Les transferts d'eau entre bassins font désormais l'objet de questionnements, comme celui posé de « l'impact économique à long terme sur le bassin donneur et du droit des générations futures (transfert de l'Ebre vers le sud de l'Espagne) »¹¹¹.

¹⁰⁸ Source des données : Philippe Roman. L'analyse des transferts d'eau inter-bassins au défi des conflits et de la justice environnementale. Le cas du fleuve Sao Francisco (Nordeste du Brésil). Economies et finances. Université Paris-Saclay, 2015.

¹⁰⁹ Le transfert devait aller de l'Ebre jusqu'à Barcelone et la ligne côtière du Sud-Est de l'Espagne (le Levant), distantes respectivement de 200 et 1 000 km. En termes de volumes d'eau, le prélèvement prévu sur la rivière de l'Ebre était de 1050 Hm³/an (15 % de son débit moyen durant la dernière décennie), au profit de la Catalogne (190 Hm³), Valence (315 Hm³), Murcia (450 Hm³) et Almeria (95 Hm³). Source : https://www.rivernet.org/Iberian/deltaebro/savethedelta_f.htm.

¹¹⁰ Le projet de transfert d'eau du Rhône vers Barcelone prévoyait la construction d'une canalisation enterrée de 330 km (200 km en France et 130 en Espagne), destinée à transférer 15 m³/sec (1.300.000 m³/jour) d'Arles à Barcelone. Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-geopolitique-guerre-eau-622/page/8/>

¹¹¹ Source : MOLLE, François. 22. Transferts d'eau interbassins In : L'eau à découvert [en ligne]. Paris : CNRS Editions, 2015.

5.5. La recharge artificielle de nappes d'eau souterraines, une solution à explorer

Une autre réponse comme ressource alternative en eau consiste à augmenter artificiellement la recharge de nappes d'eau souterraines. Cette solution est largement mise en œuvre dans d'autres pays comme l'Australie, Israël, l'Espagne, mais est encore peu explorée en France alors qu'elle présente, selon le BRGM, des avantages techniques (flexibilité), économiques (coût d'investissement inférieur) et environnementaux (moindre consommation d'énergie).

Les données présentées dans cette partie proviennent en majeure partie de la première phase de l'étude menée par le BRGM sur la faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, et qui a fait l'objet d'un rapport intermédiaire¹¹² en 2018.

5.5.1. Principaux aspects de la recharge artificielle

La recharge ou réalimentation artificielle (RA) d'un aquifère (appelée en anglais Managed Aquifer Recharge - MAR -) consiste à **introduire de manière volontaire et maîtrisée de l'eau dans une nappe pour augmenter sa recharge naturelle**, pour une utilisation ultérieure ou un bénéfice environnemental.

Les eaux utilisées pour la recharge artificielle sont généralement des eaux de surface, des eaux usées traitées ou des eaux de dessalement. En France, les eaux utilisées proviennent essentiellement de cours d'eau, le recours aux eaux usées traitées pour la recharge artificielle n'étant pas autorisé en France, sauf arrêté préfectoral spécifique¹¹³.

Il existe essentiellement trois types de méthodes pour recharger une nappe souterraine :

- la **recharge indirecte par infiltration** qui consiste à faire percoler un volume d'eau depuis la surface jusqu'à la nappe au travers de la zone non saturée. Exemple : le bassin d'infiltration qui est par ailleurs la technique de recharge artificielle la plus répandue de par le monde ;
- la **recharge directe par injection** qui consiste à injecter de l'eau directement dans la nappe par l'intermédiaire d'un forage pour la stocker. Deux dispositifs peuvent être distingués : l'Aquifer Storage and Recovery (ASR) où le même forage est utilisé pour l'injection et le pompage, et l'Aquifer Storage Transfert and Recovery (ASTR) où l'eau est récupérée au niveau d'un autre forage situé à quelques centaines de m au moins du forage d'injection ;
- la **filtration par berge** qui consiste à exploiter un ou plusieurs forages à proximité d'un cours d'eau pour créer une dépression par pompage dans la nappe dans l'environnement du cours d'eau afin d'induire un transfert depuis le cours d'eau et profiter de la filtration horizontale lors de l'écoulement jusqu'au forage.

¹¹² Caballero Y., Moiroux F., Bouzit M., Desprats J-F., Maréchal J-C. (2018) - Analyse de la faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : contexte et analyse cartographique. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-67534-FR, 162 p., 62 fig., 4 ann., 1 CD.

¹¹³ Dans un avis de 2016, l'ANSES considère que la recharge artificielle de nappes à partir d'eaux de surface ou d'eaux usées traitées pourrait être déployée pour lutter contre la diminution des ressources en eaux souterraines sous certaines conditions :

- la recharge artificielle de nappe ne doit pas dégrader la qualité de l'eau de la nappe souterraine, ni imposer, après prélèvement, de traitements des eaux supplémentaires pour un même usage par rapport à une ressource non rechargée,
- toutes les eaux souterraines rechargées doivent être compatibles avec leur utilisation, actuelle ou future, pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine, afin de ne pas hypothéquer ces ressources pour l'avenir,
- la qualité de l'eau de recharge doit être meilleure ou au moins équivalente à la qualité de l'eau de la nappe.

En matière de coûts, une étude¹¹⁴ de comparaison de coût unitaire moyen d'investissement sur la base de quelques opérations de stockage superficiel et souterrain en Espagne tendrait à démontrer l'intérêt économique de la recharge artificielle avec un coût unitaire d'investissement (de 0,21 €/m³ pour des dispositifs de recharge artificielle indirecte à 0,58 €/m³ pour des dispositifs de recharge artificielle directe) inférieur, voire très inférieur à celui du stockage superficiel (0,8 €/m³ pour la réalisation de barrages de taille moyenne à 9,75 €/m³ pour des bassins de stockage d'eau superficielle pour l'irrigation) (voir annexe 13).

A ces coûts d'investissement s'ajoutent les coûts de fonctionnement qui peuvent varier fortement, notamment avec le problème du colmatage plus ou moins rapide des dispositifs de recharge artificielle, et qui peuvent représenter jusqu'à 30 % du coût d'investissement total.

La recharge artificielle de nappe présente un certain nombre d'avantages par rapport à un stockage en surface (voir le tableau ci-dessous), comme la limitation des pertes d'eau par évaporation, le maintien de la disponibilité des terrains au-dessus de la zone de stockage pour des usages urbains ou ruraux, les capacités d'épuration des eaux par le sol et le sous-sol...

Propriétés	Retenue collinaire	Stockage en aquifère
Superficie de terrain requise	Elevé	Très petite
Proximité des zones urbaines	Loin	A l'intérieur
Coûts d'investissements	Elevés	Faibles
Coûts d'études	Elevés	Faibles
Débit de prise et d'approvisionnement en eau	Elevé	Faible
Pertes par évaporation	Modérées	Faibles
Problèmes d'algues toxiques	Modérés	Faibles
Moustiques	Modérés	Faibles
Pertes dans l'aquifère	Aucune	Aucune à élevées
Elimination des pathogènes	Faible	Significative
Potentiel de re-contamination	Modéré	Aucun à modéré
Energie de construction	Elevée	Faible
Energie de fonctionnement	Faible à modérée	Modérée
Milieu naturel nécessaire pour la viabilité	Vallée favorable	Aquifère favorable

Source : Analyse de la faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : contexte et analyse cartographique. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-67534-FR

La recharge artificielle pose aussi des difficultés, comme celles rappelées dans le tableau ci-dessus, avec notamment les risques associés au stockage de l'eau et son devenir dans le sous-sol. Par ailleurs, elle soulève des questions de gouvernance et d'acceptabilité sociale. Toutefois, selon l'étude du BRGM, « cette acceptabilité sociale peut être plus aisée à obtenir pour un dispositif de recharge artificielle que pour un dispositif de stockage d'eau de surface ».

¹¹⁴ Source : Escalante et al., 2014, citée dans l'étude du BRGM mentionnée au début de cette partie, à savoir Caballero et al. 2018 rapport BRGM-67534-FR.

5.5.2. Situation de la recharge artificielle en Europe et en France

En Europe¹¹⁵, 224 sites de recharge artificielle actifs en 2013 ont été recensés, dont 64 en Allemagne, 41 aux Pays-Bas, 21 en France, 14 en Finlande, 11 en Suède, 10 en Suisse et Espagne, les autres pays disposant de moins de 10 sites. **L'ensemble de ces sites est essentiellement voué à l'usage domestique** (AEP, alimentation en eau potable) (de l'ordre de 190 sites), les autres usages étant marginaux (10 sites pour l'agriculture, 6 pour l'environnement et 4 pour l'industrie). L'eau de recharge utilisée provient dans la quasi-totalité des cas d'eau de surface, contre 3 sites faisant appel à de l'eau souterraine, 2 à des eaux usées traitées et 1 à de l'eau potable. Enfin, plus de la moitié des sites (57 %) sont des sites de filtration par berge, et le tiers (34 %) des sites de recharge indirecte.

En Espagne¹¹⁶, le site d'El Prat del Llobregat à Barcelone mérite un point d'attention. Il s'agit d'une recharge artificielle par réutilisation d'eaux usées pour repousser le biseau salé, la REUT (réutilisation des eaux usées traitées) étant cependant à usage multiple, notamment irrigation et environnement. L'eau traitée n'est pas entièrement injectée dans la nappe : une partie est directement rejetée dans la rivière, utilisée pour l'irrigation de zones agricoles ou parcs urbains, le nettoyage des rues et la restauration de zones humides. Pour l'eau injectée dans la nappe, des dispositifs supplémentaires de traitement sont prévus avant son injection : ultrafiltration, osmose inverse et désinfection aux UV. Le budget initial de ce projet de recharge artificielle était de 102 M€, dont 85 % pris en charge par l'Union européenne, le restant par l'Agence de l'eau Catalane.

Concernant la France¹¹⁷, l'étude du BRGM compte 87 sites de recharge artificielle, dont « une cinquantaine seraient actifs ou auraient été actifs par le passé ». Ainsi, sur les 29 sites recensés sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, seuls 5 sont « actifs (ou probablement actifs) ». La plupart de ces sites ont un objectif quantitatif d'alimentation en eau pour un usage d'eau potable. Mais comme le note le BRGM, on manque de données et de connaissances sur l'ensemble des sites en France.

5.6. La REUT, une ressource insuffisamment exploitée

La réutilisation des eaux usées consiste en « l'utilisation d'eaux usées plus ou moins traitées, dans un objectif de valorisation¹¹⁸ ». Elle se déroule en trois étapes¹¹⁹ :

- récupération des eaux usées, en sortie d'une station d'épuration (STEP) ;
- traitement complémentaire de ces eaux usées en fonction des usages envisagés, élimination des impuretés toxiques et/ou dangereuses (pathogènes) ;
- réinjection dans le milieu (petit cycle de l'eau), soit directe (usage immédiat), soit indirectement, pour réutilisation après filtrage par le milieu naturel (sols et végétation).

¹¹⁵ Source : Sprenger et al., 2017, citée dans l'étude du BRGM mentionnée au début de cette partie, à savoir Caballero et al. 2018 rapport BRGM-67534-FR.

¹¹⁶ Source : Caballero et al. 2018 rapport BRGM/RP-67534-FR.

¹¹⁷ Le BRGM indique que le recensement des sites de recharge artificielle qu'il a réalisé dans le cadre de son étude de 2018 « Analyse de la faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : contexte et analyse cartographique » (Caballero et al. 2018 rapport BRGM-67534-FR) est beaucoup plus détaillé que celui réalisé dans le cadre de l'étude de 2017 de Sprenger et al. et présenté juste au paragraphe précédent.

¹¹⁸ Condom N., Lefebvre M., Vandome L. (2012) La réutilisation des eaux usées traitées en méditerranée : retour d'expériences et aide à l'élaboration de projets, Les cahiers du plan bleu 11, BEI et AFD, cités dans le rapport de l'INEC « l'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT », mai 2018

¹¹⁹ Rapport de l'INEC « l'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT », mai 2018

Les eaux usées collectées au niveau des STEP subissent des traitements primaire (décantation) et secondaire (filtrations) classiques, mais elles doivent également subir un traitement tertiaire, dont la nature et l'intensité varient en fonction des usages envisagés pour les eaux usées traitées (EUT).

Ainsi, en fonction du niveau de traitement en station de traitement des eaux usées (STEU, qui peut être intégrée ou non à une STEP), les usages possibles des EUT sont multiples : irrigation agricole, usages municipaux (nettoyage des voiries, arrosages des espaces verts), voire recharge artificielle des nappes ou restauration des milieux naturels.

5.6.1. Situation de la REUT dans le monde

Selon la base AQUASTAT de la FAO¹²⁰, 56 % de l'eau prélevée de par le monde sont rejetés sous forme d'eaux usées, et ces rejets, s'ils étaient récupérés, permettraient d'irriguer 40 millions d'ha de sols agricoles, soit 15 % de toutes les terres irriguées. Or, d'après la FAO, seuls **2 à 7% de la surface irriguée totale dans le monde** le sont à partir d'eaux usées brutes ou traitées.

Même si les chiffres exacts ne sont pas connus, notamment dans les pays en voie de développement, certains pays ont misé sur la réutilisation des eaux usées pour leur développement agricole. Ainsi, la REUT en irrigation est fréquente dans les pays chauds : sud des États-Unis, Mexique, Australie... En Israël, le taux de REUT atteint 80 %, dont 71 % servent aux cultures.

Israël a engagé une politique volontariste de développement de l'utilisation d'eaux usées traitées pour l'irrigation, en « mutualisant » le coût de traitement de l'eau réutilisée avec les autres usagers de l'eau. Israël a ainsi mis en place un ensemble de mesures afin d'inciter au développement de projets de réutilisation des eaux usées dans le domaine agricole :

- la mise en place de quotas de prélèvements non échangeables par exploitation agricole (un quota d'eau prélevée dans le milieu et un quota d'eaux usées traitées) ;
- l'instauration d'un tarif progressif sur la base des quotas alloués par exploitation agricole ;
- une hausse importante du prix de l'eau afin de refléter la rareté locale des ressources en eau. Entre 1995 et 2005, les prix de l'eau à usage agricole ont augmenté de 68 % ;
- des subventions pour la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation permettant de créer un différentiel de prix incitatif entre eau vierge et eaux usées domestiques traitées et recyclées. Le prix des eaux usées domestiques traitées est ainsi trois fois moins élevé que le prix de l'eau vierge (0,34 US\$/m³ contre 1 US\$/m³ en 2010). La différence entre le coût de production des eaux usées traitées et leur prix de vente aux agriculteurs est pris en charge par la facture des usagers domestiques ;
- l'allocation d'un bonus de 20 % du volume d'eaux usées pour les agriculteurs qui acceptent d'échanger une partie de leur quota annuel d'eau prélevée dans le milieu contre un volume d'eaux usées.

Par ailleurs, du côté des ménages, Israël a développé également une politique de réduction de la demande via la mise en place d'une tarification progressive en deux paliers (données 2013) :

- 2,5 US\$/m³ – pour une consommation inférieure à 3,5 m³/pers./mois ;
- 4,0 US\$/m³ – pour une consommation supérieure à 3,5 m³/pers./mois.

Ces réformes ont encouragé la mise en œuvre de techniques d'irrigation plus efficaces, ainsi que des solutions de substitution aux prélèvements d'eau, telles que la réutilisation des eaux usées recyclées et retraitées. 85 % des effluents domestiques sont réutilisés dans le secteur agricole en Israël en 2010. Entre 2000 et 2005, le secteur des fruits a augmenté sa production de 42 % malgré une baisse des volumes d'eau prélevée dans le milieu de 35 %.

Source : « Les politiques de soutien au développement de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation en Israël », OCDE, 2011, *Revue des performances environnementales d'Israël*, cité par CGDD dans « La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation : une solution locale pour des situations critiques à l'avenir », le Point sur, N°191, juin 2014

¹²⁰ Rapport de l'INEC « l'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT », mai 2018

L'Italie et l'Espagne recyclent respectivement 8 % et 14 % de leurs eaux usées.

Selon les estimations, la France réutiliserait entre 0,1 et 1% de ses eaux usées¹²¹. Le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) a publié un état des lieux de la REUT en France en 2017¹²² dans lequel il recense 145 cas de réutilisation des eaux usées, dont seuls 58 sont réellement en activité. Deux exemples de REUT en France sont remarquables :

- le cas de l'**ASA Limagne Noire**¹²³, qui utilise les eaux usées traitées de la ville de Clermont-Ferrand depuis 1996 pour irriguer 750 ha de grandes cultures ;
- la **station expérimentale d'INRAE à Murviel-Lès-Montpellier**¹²⁴, financée par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, qui cherche à étudier les incidences de la REUT sur :
 - o le devenir des polluants et des bactéries pathogènes ;
 - o les conséquences de la REUT sur le sol (salinisation) et les rendements ;
 - o la durée de vie des systèmes d'irrigation (entretien, maintenance) ;
 - o la préservation et la redistribution des nutriments présents dans les EUT.

5.6.2. Les réglementations européenne et française

En Europe, seuls six pays ont adopté une législation spécifique encadrant la REUT, ce sont : Chypre, l'Espagne, la France, la Grèce, l'Italie et le Portugal¹²⁵.

Dans sa communication au Parlement du 2 décembre 2015, la Commission européenne confirme que « la réutilisation sûre et rentable des eaux usées après traitement constitue un moyen très utile mais sous-utilisé d'augmenter l'approvisionnement en eau et d'alléger la pression sur les ressources hydriques surexploitées dans l'UE¹²⁶ ».

La pratique de la réutilisation des eaux usées pour les usages agricoles est désormais encadrée par le règlement (UE) 2020/741 du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau¹²⁷, qui fixe des normes communes sur la qualité sanitaire et physicochimique des eaux de REUT (voir annexe 14).

En France, la REUT est encadrée par l'arrêté du 2 août 2010, modifié le 25 juin 2014, relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduelles urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts¹²⁸ (voir annexe 14).

Même si le règlement européen 2020/741 du 25 mai 2020 ne s'appliquera qu'en 2023, celui-ci impose d'ores et déjà une qualité des eaux de REUT très nettement plus élevée que celle exigée

¹²¹ Terre-net, « Irrigation : quel avenir pour la réutilisation des eaux usées ? », Nicolas Mahey, 15/09/2020, Terre-net Média

¹²² « Un premier panorama des eaux usées traitées en France », an., CEREMA, 15 juillet 2020

¹²³ <https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/article/eaux-usees-de-clermont-ferrand-pour-irriguer-750-ha-de-cultures-2179-149564.html>

¹²⁴ <https://www.inrae.fr/actualites/irriguer-eaux-usees-traitees-plateforme-experimentale>

¹²⁵ Rapport de l'INEC « l'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT », mai 2018

¹²⁶ Communication de la Commission au Parlement Européen, « Boucler la boucle : un plan d'action de l'UE en faveur de l'économie circulaire », 2/12/2015

¹²⁷ RÈGLEMENT (UE) 2020/741 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

¹²⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/jo/2010/08/31/0201>

par la réglementation française, ce qui risque de faire monter le prix de l'eau d'irrigation issue de la REUT, **qui varie actuellement entre 0,8 et 1 €/m³, contre 0,05 à 0,20 €/m³ pour une irrigation « classique ».**

5.6.3. Des difficultés spécifiques

Même si la REUT offre des perspectives intéressantes en matière de gestion de l'eau agricole destinées à l'irrigation des cultures, elle souffre d'un certain nombre de **handicaps réglementaires, techniques et économiques qui freinent son développement** :

- Des normes réglementaires changeantes

La collecte, le traitement et l'épandage d'eaux usées traitées relèvent des codes de l'environnement, de la santé, des collectivités territoriales et du code rural¹²⁹. L'utilisation des EUT est donc soumise à un encadrement strict, passant par :

- le respect de qualités bien définies d'eaux usées traitées en fonction du type de cultures ;
- l'obtention d'un permis d'irriguer, attribué par arrêté préfectoral après avis du Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques ;
- la mise en place d'un programme de surveillance de la qualité des sols ;
- le respect de distances et de modes d'épandage, en fonction de la qualité du voisinage et des conditions d'épandage (vitesse du vent, niveaux de pente des parcelles, types de sols, type d'épandeur – notamment par aspersion).

Ainsi, le CEREMA estime que *« la durée de constitution d'un dossier de REUT est rarement inférieure à 5 ans. Il peut se passer jusqu'à 15 ans entre la première idée du projet et le dépôt du dossier de demande d'autorisation. Face à de tels délais, la réussite de certains projets a sans doute été gênée par l'évolution rapide du cadre réglementaire entre 2010 et 2017 »*¹³⁰.

- Des difficultés d'ordre technique

La REUT met à la disposition de l'irrigant des eaux particulièrement chargées en composants liés à l'activité humaine. Ceux-ci peuvent avoir des effets négatifs :

- **sur les sols irrigués**, en provoquant des cristallisations et remontées de sels par capillarité, pouvant rendre les sols impropres aux cultures suivantes¹³¹ ;
- **sur les équipements**, en provoquant le colmatage des installations, soit par cristallisation des ions transportés par les eaux usées, soit par dépôt de micro-films bactériens (biofilms), freinant les performances des installations et générant des opérations d'entretien importantes¹³² ;
- **sur le voisinage**, par dissémination de polluants, composants volatiles et/ou composants chimiques (métaux lourds) présents dans les eaux insuffisamment traitées.

¹²⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/jo/2010/08/31/0201>

¹³⁰ « Un premier panorama des eaux usées traitées en France », an., CEREMA, 15 juillet 2020

¹³¹ Rapport ECOFILAE « Réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole en zone péri-urbaine de pays en développement », N. Condom et R. Declcq, 63p, (2015)

¹³² « Problématiques de la réutilisation des eaux usées traitées ou non conventionnelle en irrigation », Nassim Ait Mouheb (IRSTEA, UMR G-EAU), 17/02/2017

- Des contraintes économiques

Le coût d'une installation de REUT est variable et dépend de la surface concernée comme des niveaux de traitement subis par l'eau réutilisée, mais est toujours élevé : à titre d'exemple, concernant l'ensemble des installations de traitement et de réutilisation des eaux usées de la ville de Clermont-Ferrand par l'ASA Limagne noire : « *Le projet voit le jour en 1996, après une levée de fonds de 5,4 millions d'euros. Un tiers est financé par les agriculteurs adhérents à raison de 1 800 €/ha. Le reste est pris en charge par la sucrerie et divers organismes publics* »¹³³.

Par ailleurs, la REUT pose la question de son **acceptation sociale** par les usagers.

Compte tenu de toutes ces contraintes administratives et sanitaires, comme techniques et financières qui pèsent sur la REUT, les **innovations** en France portent actuellement sur :

- **les possibilités de traitements tertiaires des eaux usées** : « *Pendant les périodes d'irrigation, l'idée est d'utiliser par exemple avec l'Institut européen des membranes (IEM) un bioréacteur à membrane qui permet de maintenir les exigences sanitaires tout en laissant passer les nutriments pour les plantes, indique INRAE¹³⁴. En période de non irrigation, comme en hiver, les eaux sont rejetées directement dans le milieu et sont sujettes à la réglementation de la station d'épuration, moins restrictive concernant notamment la présence de pathogènes. Le but est d'adapter le traitement en fonction de la saison et des usages. Nous procédons à un suivi de la salinité du sol, qui est une question importante à traiter dans le cas des eaux usées traitées car elles ont une dose supérieure en sel. En collaboration avec des instituts de recherche de la région, nous mesurons également la teneur en pathogènes et en polluants émergents, des systèmes d'irrigation jusqu'à la plante. Nous observons s'il y a une internalisation de ces contaminants et comment cela impacte le sol et la plante. Finalement, nous mesurons aussi les impacts de ce type d'irrigation sur les rendements d'un point de vue agronomique* ».
- **les possibilités d'intégrer la REUT parmi d'autres solutions de gestion et de partage de l'eau, en partant de mesures d'économie d'eau à l'échelon du territoire**, par exemple à travers l'intégration de la REUT dans les PTGE qui se mettent en place actuellement, de manière à en mutualiser les coûts et en concilier les usages.

La REUT apparaît ainsi comme une ressource insuffisamment exploitée, forte de développements potentiels intéressants, mais sous le poids d'importantes contraintes techniques, réglementaires et socio-économiques.

¹³³ <https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/article/eaux-usees-de-clermont-ferrand-pour-irriguer-750-ha-de-cultures-2179-149564.html>

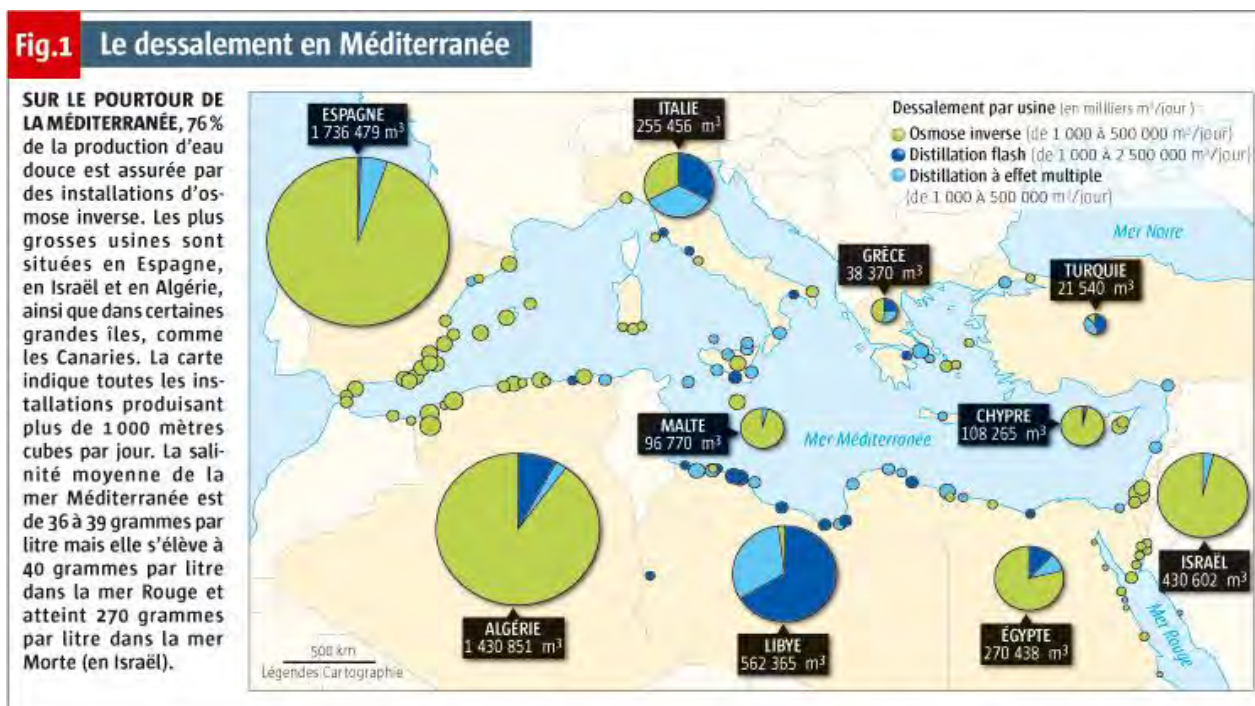
¹³⁴ <https://www.inrae.fr/actualites/irriguer-eaux-usees-traitees-plateforme-experimentale>

5.7. Le dessalement

Le dessalement de l'eau ou désalinisation est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable ou, plus rarement en raison du coût, utilisable pour l'irrigation) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment). Le traitement principal consiste à faire passer la concentration en sels de l'eau de 35 000 ppm (ou 35 g/l) à moins de 500 ppm (ou 0,5 g/l), seuil de potabilité généralement admis.

5.7.1. Une technologie en pleine expansion dans le monde

La production d'eau potable à partir d'eau de mer est apparue dans les années 1950. En 2007, elle atteignait 47 millions de m³ par jour dans le monde, soit environ 8 % de la production totale d'eau potable¹³⁵. **Actuellement, dans le monde, environ 16 000 usines de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles, permettant de produire 95 millions de m³ chaque jour** (35 milliards de m³ chaque année) : cette eau sert à l'industrie, au commerce, aux ménages, au tourisme et à l'agriculture à forte valeur ajoutée¹³⁶. Près de la moitié des capacités de dessalement (44 %) se trouvent sur le marché croissant du Moyen-Orient, mais les marchés des autres régions se développent encore plus rapidement, en particulier en Chine, aux États-Unis et en Amérique latine. L'industrie du dessalement connaît une hausse importante de 15% par an en particulier sur le Bassin méditerranéen, qui concentre à lui seul un quart du dessalement mondial¹³⁷.



Source : Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

¹³⁵ Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

¹³⁶ Organisation des Nations Unies, *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau*. UNESCO, Paris

¹³⁷ Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

L'Espagne a mis en place son programme A.G.U.A en matière de dessalement, de 2005 à 2013, aboutissant à la mise en place de 380 usines en exploitation, portant sa capacité de dessalement cumulée en 2014 à plus de 3,9 millions de m³/jour, dont 22% sont consacrés à l'irrigation agricole¹³⁸. Deux moteurs principaux à ce développement des installations de dessalement peuvent être identifiés :

- **le réchauffement climatique et la raréfaction de la ressource en eau**, qui obligent de nombreux pays à investir dans cette technologie : ainsi, selon « The Times of Israël », « *sans la désalinisation massive de l'eau de mer, jamais Israël n'aurait pu devenir autonome. Si en 2004, les usines de désalinisation fournissaient 4 % de l'eau potable des ménages, aujourd'hui 13 ans plus tard, 75 % de l'eau consommée provient de la Méditerranée, le reste étant majoritairement pompé du lac de Tibériade* »¹³⁹ ;
- **l'évolution des technologies de dessalement**, avec en particulier l'extension de l'osmose inverse, qui a permis des économies énergétiques considérables dans les processus de désalinisation, notamment par rapport aux procédés classiques reposant sur la distillation.

5.7.2. Des obstacles économiques et écologiques

Même si la désalinisation de l'eau de mer peut représenter une opportunité intéressante (voire indispensable, cf. ante) pour augmenter la ressource en eau, notamment pour les pays soumis au changement climatique qui disposent de côtes marines, le procédé présente des inconvénients non négligeables :

- **d'un point de vue économique :**
 - **le coût des installations et le montant des investissements dans les usines de désalinisation**, qui font que, malgré leurs coûts en baisse, la majorité des installations de dessalement se trouvent dans des pays à revenu élevé (67 %), où elles représentent 71 % des capacités mondiales de dessalement. À l'inverse, moins de 0,1 % des installations se situent dans les pays à revenu faible¹⁴⁰ ;
 - **le coût des processus de désalinisation**, qui impacte le prix de l'eau à la consommation : en 2008, il était de 0,4 à 0,8 €/m³ par osmose inverse, et de 0,6 à 1,8 €/m³ par distillation thermique¹⁴¹. La consommation d'énergie étant sensiblement plus grande, cela se traduit par un coût 4 à 5 fois supérieur à celui des eaux de surface traitées¹⁴² ;

¹³⁸ Source des données : « *Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation* », Elias AZZI, Ambassade de France, juillet 2014

¹³⁹ « Comment Israël est devenu autonome en eau potable », The times of Israël, 16 avril 2017

¹⁴⁰ Organisation des Nations Unies, Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau. UNESCO, Paris

¹⁴¹ Salomon, J. (2012). Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ? . Revista de Geografia e Ordenamento do Território, n° 1 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território. Pages 237 à 262

¹⁴² Organisation des Nations Unies, Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau. UNESCO, Paris

- **la sous-exploitation des installations** en raison de cette différence de prix de l'eau, comme cela a pu être dénoncé par l'Union européenne en 2012 pour l'Espagne, compte tenu de l'importance des fonds européens mobilisés¹⁴³, même si les industriels du secteur défendent cette surcapacité au nom de l'anticipation des pénuries à venir.

- **d'un point de vue écologique :**

La désalinisation de l'eau de mer demande de l'énergie. Or, cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles¹⁴⁴. Outre son coût énergétique, la désalinisation produit des rejets d'eaux à forte salinité, les saumures, dont la concentration en sels est supérieure de 5 (usines thermiques) à 30 % (usines à osmose inverse) à celle de l'eau de mer naturelle¹⁴⁵ (voir annexe 15). Par ailleurs, la température des effluents rejetés peut être jusqu'à 3°C supérieure à celle de l'eau de mer dans le cas de certaines usines de désalinisation thermique, et de nombreux éléments indésirables sont présents dans les effluents (chlore, cuivre, produits antitartres...).

Enfin, au niveau des captages d'eau de mer, un autre problème majeur est celui de l'aspiration des organismes vivants dans les circuits d'eau ; en particulier, les effets sur les phytoplanctons et zooplanctons, comme leurs conséquences sur les chaînes trophiques locales restent méconnus¹⁴⁶. En 2017, le programme MED POL a conduit une évaluation des activités de dessalement en Méditerranée, dans le cadre de son Plan d'action pour la Méditerranée (PAM) qui recommande, outre l'éloignement des captages d'eau de mer des zones côtières, l'installation de tambours tamiseurs adaptés, la diminution des vitesses d'aspiration de l'eau de mer, comme l'étude des possibilités de dilution des effluents, par exemple par ceux de centrales électriques couplées¹⁴⁷.

Les pistes d'innovation

Le secteur du dessalement a fortement progressé ces trente dernières années, les principaux défis technologiques portant sur la durabilité des installations, la réduction des coûts énergétiques et la valorisation des déchets, en particulier la potentielle réutilisation des saumures¹⁴⁸.

Ainsi, de nombreuses recherches portent sur la possibilité de coupler le dessalement aux énergies renouvelables non polluantes¹⁴⁹, comme sur de nouvelles membranes, dites biomimétiques, en osmose inverse¹⁵⁰.

¹⁴³ « Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation », Elias AZZI, Ambassade de France, Juillet 2014

¹⁴⁴ Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

¹⁴⁵ Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

¹⁴⁶ Voir la note Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014

¹⁴⁷ UNEP, PAM, réunion des points focaux MED POL, 15 mai 2017 (UNEP(DEPI)/MED WG.439/9)

¹⁴⁸ « Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation », Elias AZZI, Ambassade de France, juillet 2014

¹⁴⁹ https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/mers-et-oceans/existe-t-il-un-moyen-ecologique-pour-dessaler-l-eau-de-mer_151712

¹⁵⁰ https://www.liberation.fr/idees-et-debats/tribunes/dessaler-leau-de-mer-un-procede-plus-rentable-et-plus-ecologique-20210402_3XAEBYCFJBADGLQWEIXTWOJEU/

5.7.3. Une option pas véritablement d'actualité en France

La France n'a pas vraiment franchi le pas du dessalement (comme celui de la réutilisation des eaux usées traitées, cf. ante), essentiellement parce que ses réserves en eau sont encore suffisantes, pour que le sujet ne soit pas vraiment à l'ordre du jour (sauf aux Antilles). Elle est pourtant un des pays leader dans le secteur industriel de la désalinisation avec des groupes comme SUEZ et VEOLIA, et la première installation au monde utilisant l'osmose inverse a été ouverte sur l'île de Houat en Bretagne¹⁵¹. Néanmoins, le pays dispose d'autres alternatives en termes de gestion de l'existant, qui font que les industriels préfèrent faire porter leurs investissements dans les pays où la demande est forte, car la pression sur la ressource exercée par le changement climatique les oblige à intégrer cette solution dans leurs politiques de gestion de l'eau.

R4. En complément de l'inventaire des retenues d'eau en France décidé dans les conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, établir un état des lieux exhaustif des sites, utilisés ou non, de recharge artificielle de nappes et de REUT.

R5. Analyser les dispositifs réglementaires mis en place par les pays utilisateurs d'eaux non conventionnelles leur permettant de les intégrer à la ressource en irrigation.

¹⁵¹ Salomon, J. (2012). *Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ?*. Revista de Geografia e Ordenamento do Território, n.º 1 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território. Pages 237 à 262

CONCLUSION

Le changement climatique est une réalité qui impacte immédiatement l'agriculture dans sa capacité à produire une alimentation saine et durable. En particulier, la ressource en eau est de plus en plus compromise. L'agriculture doit donc s'adapter. Mais, il n'y a pas de « solution miracle » et la réponse unique n'existe pas car chaque exploitation est tributaire d'un sol, d'un climat et d'un environnement spécifiques. La recherche d'économies d'eau agricole passe par une approche globale mobilisant simultanément un ensemble de leviers disponibles ou « panier de solutions », dans lequel il revient de chercher la combinaison la mieux adaptée localement.

L'agriculture peut s'appuyer sur un ensemble de solutions agronomiques alternatives comme sur l'arsenal des nouvelles technologies qui sont désormais à sa disposition pour diminuer sa consommation en eau. Dans cette démarche, il importe déjà d'essayer de diminuer la demande en eau d'irrigation des cultures en considérant les solutions apportées par l'agronomie et plus généralement par la nature. L'irrigation doit de son côté évoluer pour aller vers plus d'économies d'eau grâce aux innovations permises par la technologie et le numérique. Quant au renforcement de l'offre en eau, celui-ci doit être conduit de façon coordonnée entre tous les usagers potentiels à travers l'évaluation précise de l'existant et sa réhabilitation éventuelle, avant d'examiner la possibilité de recourir à d'autres ressources alternatives en eau (constitution de réserves de substitution, REUT...).

Même si les pays du Sud de l'Europe sont confrontés depuis plus longtemps que la France au problème de la pénurie d'eau, ils mobilisent les mêmes leviers et se tournent vers les mêmes innovations. Pour autant, leurs politiques peuvent être différentes, telles celle de l'Espagne très centrée sur l'augmentation de l'offre.

Des économies d'eau sont effectivement possibles, mais elles supposent du savoir-faire, de la formation, des investissements ainsi qu'un accompagnement. Pour cela, il est nécessaire d'appuyer les agriculteurs engagés dans une démarche agroécologique pour économiser l'eau et de favoriser leur accès aux innovations en irrigation à travers la formation, le conseil et l'aide au financement. Face à la pression exercée par le changement climatique sur la ressource en eau, il conviendrait également de préciser de façon plus opérationnelle le concept d'irrigation de résilience (optimum et non maximum de production) afin d'en permettre son appropriation et son développement. Enfin, il importe d'améliorer la connaissance de l'état des lieux des ressources alternatives en eau effectivement disponibles si l'on veut en favoriser le recours.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de mission



L'évolution des usages vers une moindre consommation d'eau appelle une implication de toutes les familles utilisatrices de cette ressource. Dans le domaine agricole, diverses techniques répondent déjà à cette préoccupation (irrigation au goutte-à-goutte ou sous pression, agriculture de précision...) et diverses initiatives incitent financièrement les usagers de l'eau, agriculteurs notamment, à faire évoluer leurs pratiques. À l'exemple de l'appel à projets « Rebond Eau Biodiversité Climat 2020-2021 » de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. Au-delà des outils existants, il importe que l'innovation technologique poursuive ses avancées au service de l'évolution des pratiques agricoles et de l'adaptation des systèmes d'exploitation dans un double objectif d'utilisation économe de l'eau et de sécurisation des productions.

Il vous est demandé de mettre en place une mission d'étude et de conseil qui, en liaison avec les établissements de Recherche et de Développement (R&D) et les milieux professionnels agricoles, établira un état des lieux des technologies et des pratiques mobilisables en faveur d'une gestion économe de l'eau à usage agricole, puis analysera les perspectives de leur développement.

Dans une première phase, la mission s'intéressera, en France et dans d'autres pays d'Europe, aux innovations techniques et numériques, en ciblant plus particulièrement les projets relatifs au stockage de l'eau, au drainage et à l'irrigation. Elle veillera à présenter l'intérêt technique des équipements et outils identifiés. Elle cherchera à préciser dans chaque cas la performance économique attendue, la compatibilité avec les exigences environnementales, ainsi que les liens entre efficacité de l'eau et efficacité énergétique. Elle examinera la faisabilité d'un déploiement à grande échelle de ces innovations et s'attachera à poser les bases de leur évaluation multicritère, pour anticiper leur insertion dans un agrosystème complexe.

Dans une seconde phase, la mission se penchera, en France et dans les autres pays d'Europe, sur les pratiques agricoles économes en eau et les évolutions à envisager pour adapter les systèmes de production à la rarefaction de l'eau ou à sa nouvelle répartition temporelle au cours de la campagne culturale. La mission cherchera à montrer quelle peut être la contribution de l'innovation technologique à l'évolution de l'agriculture vers des systèmes de production peu consommateurs d'eau. Elle examinera la capacité des outils et démarches d'innovation à produire et à collecter des informations de terrain susceptibles d'être bancarisées et partagées. Elle identifiera les prérequis et les freins ou obstacles au déploiement, qu'ils soient techniques, économiques, sociétaux ou réglementaires.

Elle formulera toute recommandation utile pour intégrer les innovations identifiées comme leviers de la transition agro-écologique et tracera, dans la continuité de la revue effectuée, les grandes perspectives proposées en matière de R&D pour répondre aux enjeux de gestion économe de l'eau et d'adaptation corrélatrice des systèmes d'exploitation agricole.

Vous pourrez disposer de l'appui de la Direction Générale de la Performance économique et environnementale des Entreprises.

Une note intermédiaire vous est demandée pour septembre 2021. Le rapport final est attendu pour décembre 2021.



Fabrice ROULET-ROZE

Annexe 2 : Note de cadrage

1. CADRE DE LA MISSION

Par lettre de mission du 13 avril 2021, le CGAAER a été chargé par le Directeur de Cabinet du Ministre chargé de l'Agriculture, d'une mission de parangonnage sur les techniques et pratiques innovantes de gestion de l'eau en agriculture.

1.1 Contexte de la mission

Le changement climatique est une réalité à laquelle l'agriculture doit faire face, notamment en termes de gestion raisonnée et d'économie d'eau alors que l'accès à la ressource et le partage de l'eau entre les différents usages sont déjà sous tension.

Un environnement juridique spécifique à l'eau s'est mis progressivement en place. Aujourd'hui, il repose principalement sur :

- la directive cadre européenne sur l'eau (DCE 2000/60/CE du 23 octobre 2000), qui vise à prévenir et réduire la pollution de l'eau, promouvoir son utilisation durable, protéger l'environnement, améliorer l'état des écosystèmes aquatiques (zones humides) et atténuer les effets des inondations et des sécheresses,
- et la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, transposant en droit français la DCE afin d'arriver aux objectifs qu'elle a posés, dont le bon état des eaux d'ici 2015, l'amélioration des conditions d'accès à l'eau pour tous, ...

Un ensemble d'initiatives politiques ont été prises pour lutter contre les effets du changement climatique, dont dernièrement :

- au niveau européen, le Pacte vert pour l'Europe (11/12/2019) proposé par la Commission européenne dans le but de rendre l'Europe climatiquement neutre en 2050,
- en France, les Assises de l'Eau (novembre 2018 – juin 2019) afin de faire émerger des solutions concrètes pour répondre aux défis de la gestion de l'eau face au changement climatique. Trois objectifs principaux étaient ciblés : protéger les captages d'eau potable pour garantir une eau de qualité à la source, économiser l'eau pour préserver cette ressource vitale (baisser les prélèvements d'eau de 10% d'ici 2025 et de 25% d'ici 2035) et préserver nos rivières et nos milieux humides.

Le rapport¹ conjoint du CGAAER et du CGEDD de juillet 2020 intitulé « Changement climatique, eau, agriculture : quelles trajectoires d'ici 2050 ? » considère que « la réponse au changement climatique nécessite un changement de modèle agricole, plus économe en eau et protecteur des sols ». Ce rapport « prône (également) la transition vers un modèle d'irrigation dite "de résilience", plus économe en eau et visant la stabilité des productions dans un contexte climatique fluctuant, plutôt que leur maximisation ». En effet, les tensions augmentent entre les différents usages de l'eau tandis que se confrontent différents modèles agricoles, l'un considérant la ressource en eau comme un « facteur de production à développer, notamment pour l'irrigation, quitte à accepter certaines

¹ Rapport CGEDD n° 012819-01 et CGAAER n° 19056

dégradations des écosystèmes » et l'autre comme un « patrimoine commun qui ne peut être mobilisé que dans le strict respect des équilibres naturels et de l'approvisionnement en eau potable ».

C'est dans ce contexte que le Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation et la Secrétaire d'Etat à la Biodiversité ont lancé le 28 mai 2021 le « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique » qui s'inscrit en continuité des travaux des Assises de l'Eau et qui a pour ambition d'« engager une réflexion collective et [de] construire des politiques durables pour la résilience du modèle agricole face aux aléas climatiques ».

1.2 Objectifs de la mission

Sur la base de la lettre de mission citée précédemment (ci-jointe en annexe), les objectifs de la mission sont les suivants :

- Faire un état des lieux des principales innovations technologiques et numériques, plus particulièrement en matière de stockage d'eau, drainage et irrigation, mais aussi de réutilisation d'eaux usées, dessalement, transfert d'eau et recharge de nappe, en France et dans d'autres pays d'Europe.

Réaliser, pour chaque exemple retenu, une évaluation portant en particulier sur :

- . son intérêt technique,
- . la performance économique attendue,
- . sa compatibilité avec les exigences environnementales,
- . les liens entre efficacité de l'eau et son efficacité énergétique,
- . ses possibilités de déploiement et d'intégration dans les systèmes culturels existants.

- Faire un état des lieux des techniques et pratiques agricoles innovantes, en France et dans d'autres pays d'Europe, permettant d'économiser l'eau et d'adapter les cultures à la raréfaction de l'eau et aux nouvelles distributions des pluies liées au changement climatique.

Réaliser, pour les exemples retenus, une analyse des conditions nécessaires à leur déploiement en termes :

- . techniques,
- . économiques,
- . sociétaux,
- . réglementaires.

- Formuler des recommandations pour intégrer les innovations identifiées comme levier de la transition agro-écologique (TAE).

Examiner la capacité des innovations identifiées à servir de modèle de développement agricole via la production et le recueil des données de terrain collectées.

Tracer les perspectives de développement de ces innovations en termes de recherche et de développement, afin de concilier économies d'eau et adaptation corrélative des systèmes de production.

2. DEROULEMENT DE LA MISSION

2.1 Méthodologie générale

La mission confiée au CGAAER est une mission de conseil.

La méthodologie retenue reposera sur des interviews qualitatives avec les principaux acteurs concernés en France et, autant que faire se peut, dans d'autres pays d'Europe, notamment du Sud, voire hors Europe comme le Maghreb, la Turquie, ou encore Israël ...

Un questionnaire pourra être envoyé à ces autres pays.

La mission procédera également à une analyse documentaire sur les innovations techniques et numériques en ciblant plus particulièrement les projets relatifs à l'irrigation, au stockage de l'eau et au drainage. Elle effectuera de même une analyse documentaire sur les pratiques agricoles économes en eau.

Elle pourra utilement s'appuyer, d'une part, sur le suivi des projets lauréats des appels à projet d'innovation dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir (PIA), d'autre part, sur les groupes, projets et travaux en lien avec la gestion quantitative de l'eau en agriculture, mis en place dans le cadre du Partenariat Européen pour l'Innovation (PEI).

Un lien sera fait avec le « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique », notamment avec la thématique 2 « Renforcer la résilience de l'agriculture dans une approche globale en agissant notamment sur les sols, les variétés, les pratiques culturales et d'élevage, les infrastructures agroécologiques et l'efficacité de l'eau d'irrigation » et la thématique 3 « Partager une vision raisonnée des besoins et de l'accès aux ressources en eau mobilisables pour l'agriculture sur le long terme : réalisations, avancées et perspectives ».

2.2 Déplacements

Dans le cas où les déplacements hors frontières seraient possibles, la mission envisage de se rendre dans d'autres pays d'Europe, notamment du Sud.

Des échanges téléphoniques pourront être réalisés avec des autres pays d'Europe non visités et éventuellement des pays hors d'Europe.

2.3 Entretiens au plan national et international

Des entretiens seront organisés avec les principaux acteurs intéressés :

- En France : l'INRAE, le CIHEAM (Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes), l'ACTA et des instituts techniques, Irrigants de France, l'AFEID (Association Française pour l'Eau, l'Irrigation et le Drainage) et la CIID (Commission Internationale des Irrigations et du Drainage), l'association des ASA (Associations Syndicales Autorisées), des agences de l'eau, l'APCA, des syndicats agricoles, les directions centrales du MAA concernées (DGPE, DGER, Centre d'Etudes et de Prospective), le ministère chargé de l'environnement (DEB...), des associations de protection de l'environnement, des conseillers agricoles et/ou économiques dans les ambassades étrangères, l'OCDE ...
- A l'étranger : les ambassades de France (conseiller économique et/ou agricole), les ministères concernés (agriculture et/ou environnement ...), l'AFD, l'IRD, la FAO ...

2.4 Composition de l'équipe et supervision

La mission est composée de Pierre AUTISSIER et Geneviève JOURDIER, IGPEF.

Le travail de la mission est supervisé par Emmanuelle BOUR-POITRINAL, IGPEF, présidente de la section « forêts, eaux et territoires » du CGAAER.

2.5 Production de la mission et calendrier

La mission se rapprochera des rapporteurs des thématiques 2 et 3 du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique pour définir la nature et la date de sa contribution intermédiaire.

Elle remettra un rapport final pour décembre 2021.

Annexe 3 : Liste des personnes rencontrées

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de l'entretien
Gérard FALLON	CGAAER	Membre	18/05/2021 07/06/2021 01/07/2021
Emmanuelle BOUR-POITRINAL	CGAAER	Présidente de la section forêts, eaux et territoires	01/07/2021
Dominique ROLLIN	AFEID	Membre du bureau et du conseil d'administration	21/06/2021
Éric ZUNINO	MAA/DGPE/SDPE	Sous-directeur de la performance environnementale et de la valorisation des territoires	01/07/2021
Gilles CROSNIER	MAA/DGPE/SDPE	Expert Eau	01/07/2021
Fanny HERAUD	MAA/DGPE/SDPE	Chef de bureau eau, sols et économie circulaire	01/07/2021
Hugues AYPHASSORHO	CGEDD	Membre	05/07/2021
François CHAMPANHET	CGAAER	Membre	06/07/2021 14/09/2021
Nicola LAMADDALENA	CIHEAM Bari Institute (Italie)	Directeur adjoint	12/07/2021
Michel SALLENAVE		Ancien membre du CGAAER	22/07/2021
Bruno GRAWITZ	Société du Canal de Provence	Directeur de l'ingénierie et des services Président de l'AFEID	27/07/2021
Alice RACT-MADOUX	Société du Canal de Provence	Directrice de projet AgriTECH	27/07/2021
Bart SCHULTZ	CIID	Vice-président	28/07/2021
Sophie GENDRE	Arvalis	Ingénieur R&D Gestion quantitative de l'eau	06/09/2021
Philippe DEBAEKE	INRAE UMR AGIR	Directeur de recherche	08/09/2021

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de l'entretien
Marcel KUPER	INRAE UMR G-Eau	Directeur	10/09/2021
Claire SERRA-WITTLING	INRAE UMR G-Eau	Ingénieure de recherche	10/09/2021
Mohamed NAAIM	INRAE UAR AQUA	Chef du département des sciences aquatiques	14/09/2021
Stéphane OLIVIER		Agriculteur en Charente	16/09/2021
Lionel ALLETTO	INRAE UMR AGIR	Directeur de recherche	23/09/2021
Jean-Paul BORDES	ACTA	Directeur général	28/09/2021
Sami BOUARFA	INRAE UAR AQUA	Chef de département adjoint	29/09/2021
Dominique DALBIN	DGER	Animateur Réso'them transition agroécologique	30/09/2021
Thierry CAQUET	INRAE	Directeur scientifique Environnement	30/09/2021
Chantal GASCUEL	INRAE	Chargée de mission à la direction Environnement	30/09/2021
Philippe HINSINGER	INRAE département AgroEcoSystem	Chef de département	06/10/2021
Sylvain PELLERIN	INRAE département AgroEcoSystem	Chef de département adjoint	06/10/2021
Pierre BENOIT	INRAE unité ECOSYS	Directeur de recherche	06/10/2021
Gaëtan LOUARN	INRAE UR P3F	Chargé de recherche	06/10/2021
Guillaume MARTIN	INRAE UMR AGIR	Chargé de recherche	06/10/2021
Bruno MOLLE	INRAE UMR G-Eau	Responsable du projet PReSTI	12/10/2021
Thomas PELTE	Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse	Chef du service Ressources en eau, milieux et fleuve Rhône	15/10/2021
Maxime BERTEAU	Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse	Chargé de mission sur la gestion quantitative	15/10/2021
Marie GOSME	INRAE UMR ABSys	Chargée de recherche	19/10/2021
Guillaume CHOISY	Agence de l'eau Adour-Garonne	Directeur général	09/11/2021

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de l'entretien
Aude WITTEN	Agence de l'eau Adour-Garonne	Directrice générale adjointe	09/11/2021
Laurent RENÉ	Agence de l'eau Adour-Garonne	Référent régional en agro-écologie et PSE	09/11/2021
André BERNARD	APCA	Vice-Président et Président de la CRA Sud PACA	10/11/2021
Frédéric ERNOU	APCA	Responsable Instances et réseaux	10/11/2021
Ka-Ho YIM	APCA	Chargé de mission	10/11/2021
Philippe JOUGLA	FNSEA	Elu référent Gestion quantitative de l'eau	23/11/2020
Sabine BATTEGAY	Irrigants de France	Animatrice	23/11/2021 24/11/2021
Olivier THIBAUT	MTE/DGALN/DEB	Directeur de l'eau et de la biodiversité	23/11/2021
Amélie COANTIC	MTE/DGALN/DEB	Sous-directrice de la protection et de la gestion de l'eau, des ressources minérales et des écosystèmes aquatiques	23/11/2021
Éric FRETILLERE	Irrigants de France	Président	24/11/2021
Charles PUJOS	CGAAER	Membre	03/12/2021
Dominique DARMENDRAIL	BRGM	Directrice Programmes eaux et Changements globaux	07/12/2021
Marie PETTENATI	BRGM	Cheffe de projet	07/12/2021
Luciano MATEOS	Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC (Espagne)	Chercheur	25/01/2022
Hervé LÉVITE	FAO (Rome)	Fonctionnaire principal	26/01/2022

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de l'entretien
Jorge TARCHITZKY	Faculty of Agriculture, Food and Environment at the Hebrew University of Jerusalem (Israël)	Enseignant-chercheur et consultant	01/02/2022
Gonçalo Caleia RODRIGUES	Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa (Portugal)	Enseignant-chercheur	02/02/2022

Annexe 4 : Liste des sigles utilisés

AB	Agriculture biologique
AC ou ACS	Agriculture de conservation des sols
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AEP	Alimentation en eau potable
APCA	Assemblée permanente des chambres d'agriculture
ASA	Association syndicale autorisée
ASR	Aquifer storage and recovery
ASTR	Aquifer storage transfert and recovery
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CETMEF	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CIHEAM	Centre international des hautes études agronomiques méditerranéennes
CIID	Commission internationale de l'irrigation et du drainage
CGAAER	Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux
CGDD	Commissariat au développement durable
CGEDD	Conseil général de l'environnement et du développement durable
CIVAM	Centre d'initiative pour valoriser l'agriculture et le milieu rural
CO ₂	Dioxyde de carbone
DCE	Directive cadre sur l'eau
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DGPR	Direction générale de la prévention des risques
DOE	Débit d'objectif d'étiage
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EDF	Electricité de France
EUT	Eaux usées traitées
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEADER	Fonds européen agricole pour le développement rural
FEDER	Fonds européen de développement régional
GES	Gaz à effet de serre

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Gis Sol	Groupement d'intérêt scientifique sur les sols
GW	Gigawatt
ha	hectare
IEM	Institut européen des membranes
INRA	Institut national de la recherche agronomique
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
ITAB	Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques
LER	Land equivalent ratio
MAEC	Mesure agro-environnementale et climatique
OAD	Outil d'aide à la décision
OFB	Office français de la biodiversité
ONEMA	Office national de l'eau et des milieux aquatiques
PAC	Politique agricole commune
PAM	Plan d'action pour la Méditerranée
PDR	Plan de développement rural
PHN	Plan hydrologique national
ppm	Partie par million
PTGE	Projet de territoire pour la gestion de l'eau
RA ou RAN	Recharge ou réalimentation artificielle de nappe
RCP	Representative Concentration Pathways (ou Profils représentatifs d'évolution de concentration)
REUT	Réutilisation des eaux usées traitées
RMC	Rhône-Méditerranée-Corse
RU	Réserve utile
SAGE	Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau
SafN	Solutions d'adaptation fondées sur la nature
SAU	Surface agricole utilisée

SfN	Solutions fondées sur la nature
SIGAL	Syndicat interdépartemental de gestion de l'Alagnon et ses affluents
SMEAG	Syndicat mixte d'études et d'aménagement de la Garonne
STEP	Station d'épuration des eaux usées
STEU	Station de traitement des eaux usées
TAE	Transition agro-écologique
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UMR	Unité mixte de recherche
UV	Ultraviolet

Annexe 5 : Liste des textes de référence et bibliographie

- *Sixième Rapport d'évaluation, Groupe de travail I, Rapport Climat 2021 : points clés*, GIEC, Valérie Masson-Delmotte
- *Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante*, Communiqué de presse du GIEC du 9 août 2021
- *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*, Météo France
- *Explore 2070, Synthèse du projet Explore 2070, Hydrologie de surface*, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE)
- *Explore 2070, Synthèse du projet Explore 2070, Hydrologie souterraine*, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE)
- *Explore 2070, Bilan du projet Explore 2070 – Résultats et premiers enseignements, Groupe de travail national SAGE du 4 juin 2015*, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE)
- *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Nadine Brisson, Frédéric Levrault, 2010. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010)
- *Synthèse de l'état des sols en France*, Groupement d'intérêt scientifique (GIS) sur les sols, 24p, 2011
- « *Perspectives agronomiques et génétiques pour limiter ou réguler la demande en eau d'irrigation* », Debaecke P., Bergez J.E., Leernhardt D., La Houille blanche N°6, 2008
- « *Quelles stratégies agronomiques pour une gestion optimale de la ressource en eau du sol en système pluvial ?* », Constantina J., Debaecke P., Willaumeb N., INRAE UMR AGIR, Académie d'agriculture de France, 05/11/2014
- *Projet BAG'AGES, GT2, Bilan*, juin 2021
- « *Economiser l'eau en changeant les pratiques agricoles : retours d'expériences en Europe* », Menet L., Leplay S., Deniel E., Bureau d'études Oréade Brèche, CEP, Analyse N°124, juin 2018
- « *Blé tendre et sécheresse, de nouvelles variétés à venir* », INRAE, Chantal Mollier, 27/08/2020
- <https://www.agencebio.org/questions/en-quoi-lagriculture-biologique-respecte-t-elle-la-qualite-de-leau/>
- *Quelles agricultures résilientes face au changement climatique ?* Webinaire n°3 du 30 novembre 2021 dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique – Thématique 2 –
- « *Le tripode de l'agriculture de conservation* », INRAE, Pascale Mollier, 06/11/2013, <https://www.inrae.fr/actualites/tripode-lagriculture-conservation>

- « *L'agriculture de conservation* », CEP, analyse 61, Noémie Schaller, septembre 2013
- « *La gestion des graminées d'automne en ACS* », APAD, 17/09/2021, <http://www.apad.asso.fr/172-l-instant-technique/388-la-gestion-des-graminees-d-automne-en-systeme-acs>
- « *Glyphosate et agriculture : à la vie, à la mort* », Entraïd, Pascal Bordeaux, 06/12/2018 <https://www.entraid.com/articles/glyphosate-et-agriculture-a-la-vie-a-la-mort-alternatives-sante#>
- « *Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française* », rapport INRA à la saisine Ref TR507024, Reboud X. et al, 2017
- « *L'ACS préserve la ressource en eau* », l'Anjou agricole, 15/12/2020
- « *L'agriculture de conservation en Wallonie, diversité et verrouillages* », Jérôme Braibant et Max Morelle, mémoire de fin d'études de bioingénieur, Université catholique de Louvain, 2018
- *Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030*, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions, SWD(2021) 323 final, 17/11/2021
- *Plan de développement de l'agroforesterie*, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, décembre 2015
- « *Agroforesterie : des arbres pour une agriculture durable* », Foucaud-Scheunemann C., Bertrand I., INRAE, 06/01/2022, <https://www.inrae.fr/actualites/agroforesterie-arbres-agriculture-durable>
- « *L'agroforesterie représente un dixième des terres agricoles de l'UE* », Loury Romain, Journal de l'environnement, Euractiv, 24/05/2016
- « *Agroforesterie des pays tempérés, des systèmes plurispécifiques pour plus de durabilité* », Gosme M., Mézière D., INRAE UMR System, Journée de formation de l'Agence Adour Garonne, 16/06/2017
- « *De la forêt à l'agroforesterie* », EVENO M., QUINTELA C., ROBERT M., SAUVADET L., projet d'élèves ingénieurs n°19, 2017, Montpellier SupAgro, 55 pages, page 12
- « *Agroforesterie des pays tempérés, des systèmes plurispécifiques pour plus de durabilité* », Gosme M., Mézière D., INRAE UMR System, Journée de formation de l'Agence Adour Garonne, 16/06/2017
- *Programme « Plantons des haies » - 50 M€, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation*, 22/12/2021, <https://agriculture.gouv.fr/francerelance-50-meu-pour-planter-7-000-km-de-haies-en-2-ans>
- « *Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques liés à l'eau en France* », UICN Comité français (2019), Paris, France.
- *Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030, Etude réalisée par BRL Ingénierie pour le Centre d'Analyse Stratégique*, Rapport final, septembre 2012
- *Sécheresse et agriculture, Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau, Expertise scientifique collective*, Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, octobre 2006

- « *Environnement & agriculture, les chiffres clés* » – Edition 2018, Commissariat général au développement durable, juin 2018
- Revue Sciences Eaux & Territoires N°34 « *Economies d'eau en irrigation* » - 2020
- Revue Sciences Eaux & Territoires N°11 « *L'irrigation en France* » - 2013
- « *Irriguer les grandes cultures en agriculture biologique* », ProFilBio N°7, juin 2019
- « *Economiser l'eau pour l'irrigation par les changements de pratiques agricoles : analyse comparée de politiques publiques et pistes d'amélioration en France, Rapport final* », Etude Oréade-Brèche, janvier 2018
- « *Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000* », Agreste Primeur N°292, novembre 2012
- « *Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation* », Etude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, IRSTEA UMR G-EAU, Claire Serra-Wittling et Bruno Molle, septembre 2017
- « *Matériels d'irrigation des grandes cultures* », Editions Arvalis, juin 2017
- « *Matériels d'irrigation : les économies d'eau passent par les outils de pilotage* », Perspectives agricoles, 1^{er} avril 2021
- « *Maîtriser son irrigation en maraîchage biologique* », Sud & Bio Languedoc-Rousillon Association interprofessionnelle, 2016
- « *Les vrai-faux de l'irrigation* », Editions Arvalis, juin 2018
- « *La modernisation des systèmes d'irrigation en France : quelles économies d'eau possibles à la parcelle ?* » Claire SERRA-WITTLING, Bruno MOLLE et Bruno CHEVIRON, G-Eau, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, MontpellierSupAgro, Univ Montpellier, Revue Sciences Eaux & Territoires N° 34 – 2020.
- « *Avis et recommandations sur l'intérêt économique à moyen et long terme de la substitution des prélèvements par stockage ou par transfert de l'eau* », Conseil scientifique du Comité de bassin Rhône-Méditerranée, mars 2020.
- « *Vers des systèmes agrivoltaiques conciliant production agricole et production d'électricité* », INRAE, Chantal Dorthe, 26 juin 2017
- *Dossier de Presse – Sun'Agri – Copyright Sun'R – 2017*
- <https://www.ombrea.fr/le-systeme>
- <https://www.vertsun.com/2020/12/avantages-de-agrivoltaique-en-france/>
- <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/1049-sun-agri-3.html>
- « *Définition de l'agrivoltaïsme* », Coordination rurale, réunion ADEME, mars 2021, <https://www.coordinationrurale.fr/agrivoltaisme/>,
- « *Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles* », ADEME, rapport final de mission, février 2018
- *Environnement & agriculture, Les chiffres clés* – Edition 2018, Commissariat général au développement durable.
- « *Adaptation de l'irrigation au changement climatique dans l'Union européenne : les actions engagées par les Etats membres pour économiser l'eau* ». Revue Sciences Eaux & Territoires N°34 – 2020

- <https://cordis.europa.eu/article/id/88490-turning-deficit-irrigation-into-profit/fr>
- « *Effets de l'irrigation déficitaire contrôlée sur la croissance et le développement foliaire du palmier dattier* », Sabri A., Bouaziz A., Hammani A., Kuper M., Douaik A., Badraoui M., Cahiers agricultures, 18 septembre 2017
- <https://www.inra.org.ma/fr/actualite/C3%A9s/bulletin-d%E2%80%99information> ; voir INRA newsletter N°6, décembre 2021.
- « *Niveau de rendement et qualité du fruit des rosacées fruitières sous irrigation déficitaire régulée* », Dr Razouk R., INRA Meknès, Agriculture du Maghreb N°113, juillet/août 2018
- « *Changement climatique, eau, agriculture : Quelles trajectoires d'ici 2050 ?* », rapport CGEDD N°012819-01 / CGAAER N° 19056, Hugues Ayphassorho, Nathalie Bertrand et François Mitteault (CGEDD), Charles Pujos, Dominique Rollin et Michel Sallenave (CGAAER)
- « *Les retenues d'eau comme solution d'adaptation au changement climatique ?* », note technique, SIGAL (Syndicat interdépartemental de gestion de l'Alagnon et ses affluents), décembre 2020.
- Instruction du Gouvernement du 7 mai 2019 relative au projet de territoire pour la gestion de l'eau
- *Réponse du Ministère de la transition écologique et solidaire*, publiée dans le JO Sénat du 5 septembre 2019, à la question écrite n° 10099 de M. Henri Cabanel (Hérault – SOCR).
- « *Drainage agricole : enjeux, connaissances, perspectives* », Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 - 2020
- « *Principes techniques et chiffres du drainage agricole : de la tuyautique à l'hydro-diplomatie* », Bernard Vincent, Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 – 2020
- « *Gérer les eaux de drainage agricole : du génie hydraulique au génie écologique* », Julien Tournebize, Hocine Henine et Cédric Chaumont, Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR., Revue Sciences Eaux & Territoires N°32 – 2020.
- « *L'analyse des transferts d'eau inter-bassins au défi des conflits et de la justice environnementale. Le cas du fleuve São Francisco (Nordeste du Brésil)* », Economies et finances, Philippe Roman, Université Paris-Saclay, 2015.
- « *Transferts d'eau interbassins In : L'eau à découvert [en ligne]* », MOLLE François, Paris, CNRS Editions, 2015
- *Analyse de la faisabilité de la recharge artificielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : contexte et analyse cartographique*, Caballero Y., Moiroux F., Bouzit M., Desprats J-F., Maréchal J-C. (2018) - Rapport intermédiaire. BRGM/RP-67534-FR, 162 p., 62 fig., 4 ann., 1 CD.
- « *Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe : historical development, current situation and perspectives* », Sprenger C., Hartog N., Hernandez M., Vilanova E., Grützmacher G., Scheibler F., Hannappel S., 16 mars 2017.
- « *La réutilisation des eaux usées traitées en méditerranée : retour d'expériences et aide à l'élaboration de projets* », Condom N., Lefebvre M., Vandome L. (2012) Les cahiers du plan

bleu 11, BEI et AFD, cités dans le rapport de l'INEC « l'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT », mai 2018

- « *L'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la REUT* », rapport de l'INEC, mai 2018
- « *Irrigation : quel avenir pour la réutilisation des eaux usées ?* », Terre-net, Nicolas Mahey, 15/09/2020, Terre-net Média
- « *Un premier panorama des eaux usées traitées en France* », an., CEREMA, 15 juillet 2020
- <https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/article/eaux-usees-de-clermont-ferrand-pour-irriguer-750-ha-de-cultures-2179-149564.html>
- <https://www.inrae.fr/actualites/irriguer-eaux-usees-traitees-plateforme-experimentale>
- « *Les politiques de soutien au développement de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation en Israël* », OCDE, 2011, Revue des performances environnementales d'Israël, cité par CGDD dans « La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation : une solution locale pour des situations critiques à l'avenir », le Point sur, N°191, juin 2014
- « *Boucler la boucle : un plan d'action de l'UE en faveur de l'économie circulaire* », Communication de la commission au Parlement Européen, 2/12/2015, p. 14
- RÈGLEMENT (UE) 2020/741 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)
- Arrêté du 2 août 2010, modifié le 25 juin 2014, relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts
- « *Réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole en zone péri-urbaine de pays en développement* », Rapport ECOFILAE, N. Condom et R. Declecq, 63p, (2015)
- « *Problématiques de la réutilisation des eaux usées traitées ou non conventionnelle en irrigation* », Nassim Ait Mouheb (IRSTEA, UMR G-EAU), 17/02/2017
- <https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/article/eaux-usees-de-clermont-ferrand-pour-irriguer-750-ha-de-cultures-2179-149564.html>
- <https://www.inrae.fr/actualites/irriguer-eaux-usees-traitees-plateforme-experimentale>
- Ecotoxicologie.fr/impacts-eau-de-mer, Vivien Lecomte, octobre 2014
- « *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : la valeur de l'eau* », Organisation des Nations Unies, UNESCO, Paris
- « *Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation* », Elias AZZI, Ambassade de France, juillet 2014
- « *Comment Israël est devenu autonome en eau potable* », The times of Israël, 16 avril 2017
- « *Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ?* » Salomon, J., Revista de Geografia e Ordenamento do Território, n° 1 (Junho), Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, (2012). Pages 237 à 262
- « *Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation* », Elias AZZI, Ambassade de France, Juillet 2014
- UNEP, PAM, réunion des points focaux MED POL, 15 mai 2017 (UNEP(DEPI)/MED WG.439/9)

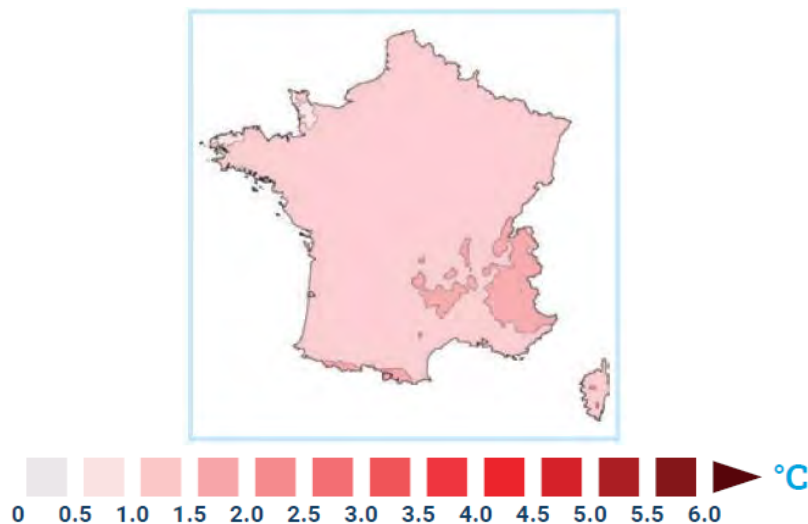
- https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/mers-et-oceans/existe-t-il-un-moyen-ecologique-pour-dessaler-l-eau-de-mer_151712
- https://www.liberation.fr/idees-et-debats/tribunes/dessaler-leau-de-mer-un-procede-plus-rentable-et-plus-ecologique-20210402_3XAEBYZFJBADGLQWEIXTWOJEU/

Annexe 6 : Extraits des projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole

Source : Météo France

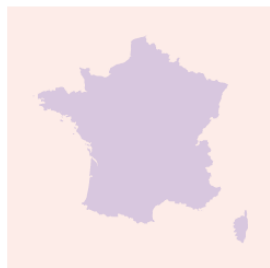
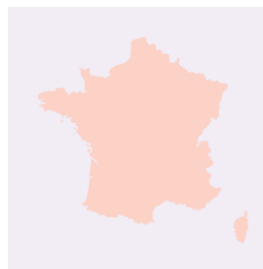
Evolution des températures

Carte des écarts de température pour le scénario RCP8.5 à l'horizon H1 (2021-2050)



RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES

- La température moyenne est en hausse pour les trois scénarios. Le réchauffement est continu jusqu'en fin de siècle pour le RCP4.5 et RCP8.5, avec des valeurs médianes atteignant respectivement +2,1 °C et +3,9 °C, et jusqu'à +2,7 °C et +4,9 °C dans l'enveloppe haute de la distribution.



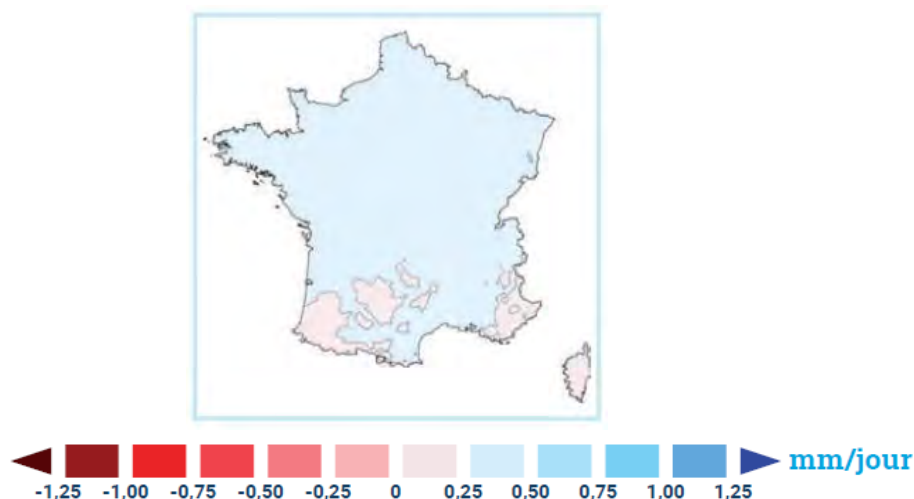
- La hausse de température est plus forte l'été dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec respectivement +2,2 °C et +4,5 °C en valeur médiane et jusqu'à +3,3 °C et +6 °C dans l'enveloppe haute de la distribution.

- Le réchauffement présente un gradient sud-est/nord-ouest sur la métropole avec une différence de 1 °C entre ces deux zones. Le réchauffement est également plus marqué en montagne : Alpes et Pyrénées notamment.



Evolution des précipitations

Carte des écarts de cumul annuel de précipitation pour le RCP8.5 à l'horizon H1 (2021-2050)



RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

- Le cumul de précipitation, moyennée à l'échelle de la France, est annoncée en légère hausse pour les trois scénarios entre +2 % et +6 % selon les horizons et scénarios. Cette hausse faible est cependant assortie d'une grande incertitude selon les modèles, pouvant inverser le signe de la tendance quel que soit le scénario. Cette incertitude est à mettre en relation avec la position particulière de notre pays dans une zone de transition climatique à l'échelle continentale, entre hausse des précipitations au nord et baisse au sud. On note une incertitude plus forte avec le RCP8.5 où en fin de siècle l'enveloppe (5 % -95 %) de notre ensemble dépasse 20 % du cumul annuel (entre -6 % et +15 %).



- Cette évolution connaît une forte modulation saisonnière avec une hausse systématique en hiver, souvent supérieure à +10 % (atteignant même 40 % dans l'enveloppe supérieure du RCP8.5) et à l'inverse, une baisse quasi systématique en été, se renforçant au cours des horizons pour atteindre -10 à -20 % en fin de siècle avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. À noter que l'enveloppe basse du RCP8.5 prévoit même une baisse d'un facteur 2 du cumul de précipitation en été.

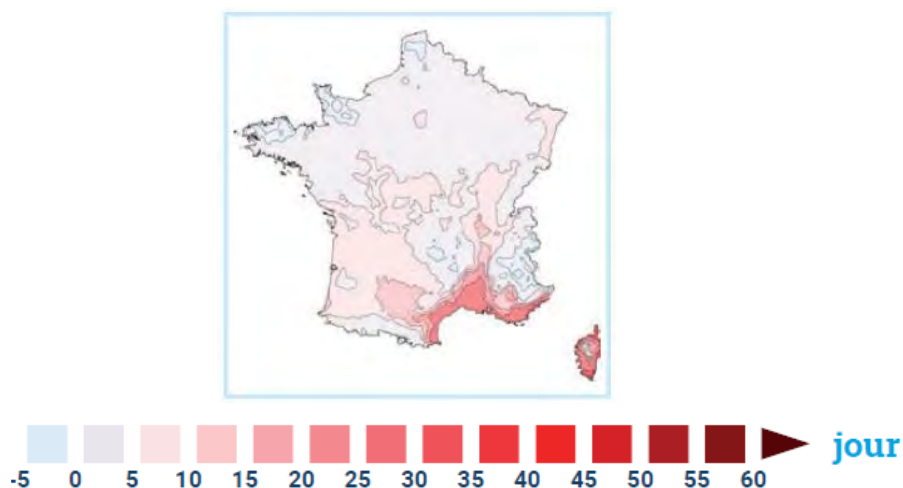
- Cette évolution des précipitations présente aussi une variabilité géographique sensible avec un gradient nord/sud ou nord-est/sud-ouest se traduisant par une hausse plus marquée sur la moitié nord et une baisse sur certaines régions de la moitié sud.



Evolution des évènements extrêmes

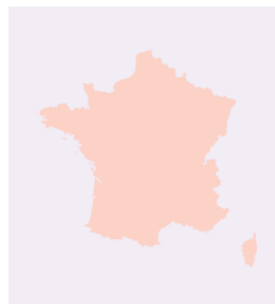
Evolution des vagues de chaleur et canicules

Carte des écarts de nombre de nuits tropicales pour le scénario RCP8.5 à l'horizon H1 (2021-2050)



RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES VAGUES DE CHALEUR ET CANICULES

- Le nombre de jours de vagues de chaleur ou de canicules est annoncé en hausse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel. En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de chaleur pourra doubler avec un scénario RCP2.6 mais être multiplié par un facteur 3 à 4 en RCP4.5 et 5 à 10 en RCP8.5.



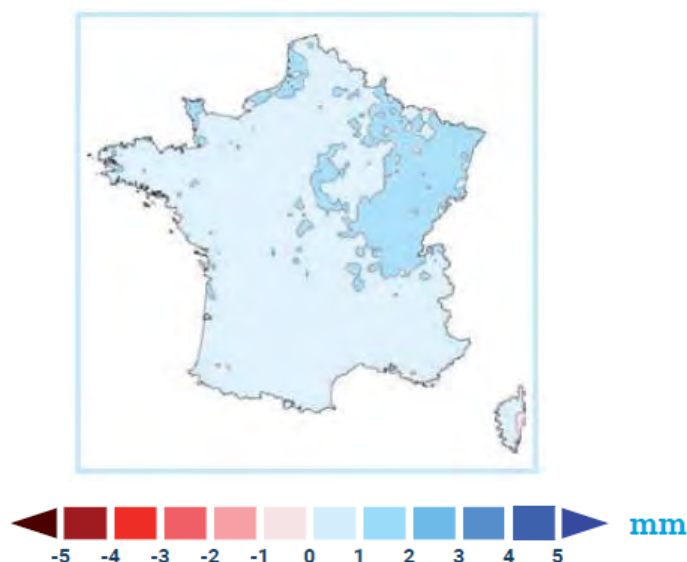
- Les nuits tropicales quasi inconnues dans le nord de la France pourront revenir régulièrement en scénario RCP2.6 tandis que leur nombre pourra atteindre (hors région méditerranéenne) 15 à 25 jours en scénario RCP4.5 et 30 à 50 jours en RCP8.5.

- Cette évolution est exacerbée dans les régions actuelles les plus chaudes, notamment l'arc méditerranéen, le couloir rhodanien et la vallée de la Garonne. Sur ces régions, les vagues de chaleur et journées caniculaires pourront s'étaler sur des périodes supérieures à un ou deux mois en été.



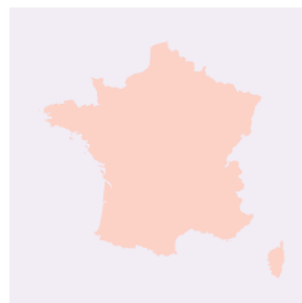
Evolution des pluies extrêmes

Carte des écarts de cumul de pluies extrêmes pour le scénario RCP8.5 à l'horizon H1 (2021-2050)



RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES PLUIES EXTRÊMES

► L'indicateur utilisé met en évidence les pluies quotidiennes les plus fortes se produisant en moyenne trois jours par an, de l'ordre de 30 à 60 mm. Il n'est pas forcément représentatif de l'évolution des pluies des épisodes méditerranéens pouvant dépasser souvent 150 mm en un jour.



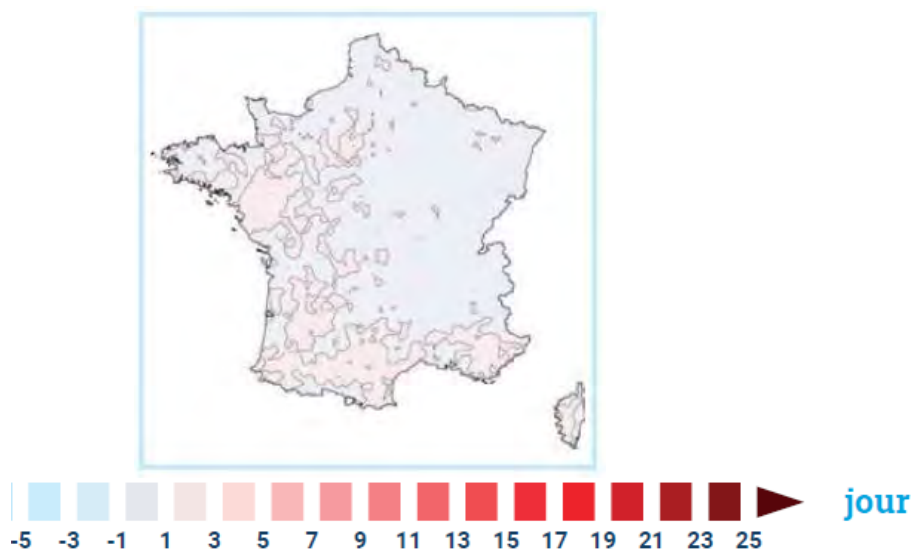
► L'intensité de ces pluies extrêmes augmente légèrement tout au long du siècle sur pratiquement tout le territoire et avec les trois scénarios RCP considérés. Les régions les plus exposées sont celles de la moitié nord, notamment les frontières du Nord et Nord-Est et le littoral de la Manche. L'intensité de la hausse attendue de 3 à 6 mm correspond à une variation de l'ordre de 10 %.

► Il est à noter que l'incertitude principale de l'évolution de ce paramètre est plus liée aux modèles climatiques qu'au choix du scénario RCP considéré.



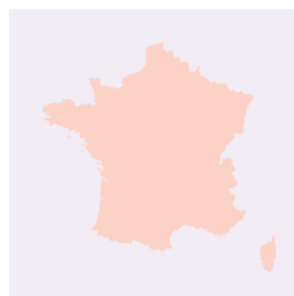
Evolution des sécheresses météorologiques estivales

Carte des écarts du nombre maximum de jours secs consécutifs en été pour le scénario RCP8.5 à l'horizon H1 (2021-2050)



RÉSUMÉ POUR L'ÉVOLUTION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUES ESTIVALES

- Il est rappelé que l'indicateur considéré ne concerne que les sécheresses estivales dues au déficit de précipitation sans prise en compte des effets de l'évaporation sur le sol et autres composantes hydrologiques :



- L'évolution attendue de la durée des épisodes des sécheresses météorologiques est fortement dépendant du scénario considéré et de l'horizon temporel considéré. En scénario RCP2.6, la durée de ces épisodes évolue peu, voire diminue. Avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, ces épisodes augmentent en fin de siècle respectivement de l'ordre de 5 à 10 jours soit une augmentation de 30 à 50 %.

- Les régions les plus concernées par ces évolutions sont celles de la moitié sud-ouest du pays, et notamment le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et l'Ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire).



Annexe 7 : Impacts sur l'agriculture du réchauffement climatique selon CLIMATOR

Les principales évolutions favorables ou atouts sont :

- des opportunités de nouvelles cultures liées à l'augmentation des températures, notamment cultures d'été dans le nord de la France et en moyenne montagne ;
- une accélération des rythmes phénologiques qui permettra une esquivé partielle des stress hydriques accrus et du nombre croissant de jours échaudants de printemps et d'été ;
- une moindre humidité des sols à l'automne qui conduira à davantage de jours disponibles pour les travaux d'automne ;
- une réduction des accidents liés au gel automnal pour les cultures d'hiver ;
- une augmentation des rendements dans les cas où les stress hydriques sont évités ou compensés par une croissance à des périodes hors stress : cultures d'hiver, prairie et cultures pérennes.

Les principales évolutions défavorables ou vulnérabilités sont :

- une augmentation de la durée d'interculture en monoculture, qui accroîtra les risques de lessivage et d'érosion ;
- une augmentation du nombre de jours échaudants au printemps, dont l'effet sera partiellement réduit par l'avancement des calendriers culturels ;
- une diminution des rendements dans les cas où les stress hydriques aggravés ne sont pas évités : vigne non irriguée, tournesol non irrigué ;
- une augmentation des besoins en eau d'irrigation des cultures d'été ;
- une augmentation de la variabilité interannuelle des cultures d'été non irriguées, tournesol en particulier ;
- un risque de dégradation de la qualité du raisin en raison de l'anticipation de la période de maturation.

Source : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces.
Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

Annexe 8 : Compléments sur l'agriculture de conservation des sols

La surface cultivée dans le monde en agriculture de conservation des sols (ACS) est estimée à 106 millions d'hectares en 2008/2009 et a atteint environ **180 millions d'hectares en 2015/2016, soit environ 12,5 % des terres cultivées**¹⁵². Historiquement, c'est aux Etats-Unis que, dès les années 1930, les premières techniques de semis directs ont été initiées à grande échelle afin de lutter contre l'érosion éolienne (dust bowl) ; mais leur développement a réellement commencé dans les années 1960, avec celui des herbicides de synthèses¹⁵³. En Europe, le développement de l'ACS est plus modeste, et seuls 636 000 ha sont recensés en 2006 pour la France¹⁵⁴.

Cependant, même si la pratique du non-labour semble se répandre, les techniques de conservation des sols ne sont pas toujours associées entre elles : le non-labour n'est pas systématiquement accompagné de couverts végétaux ou d'un maintien de résidus, ni de rotations longues et diversifiées¹⁵⁵. Dès lors, il est difficile d'établir clairement les performances de systèmes dont toutes les composantes ne sont pas simultanément réunies, et dont les résultats dépendent de facteurs locaux.

Néanmoins, des consensus émergent sur les performances générales de ces nouveaux systèmes de production :

- diminution du temps de travail et de la consommation d'énergie fossile associés au labour ;
- amélioration de la vie biologique et de la biodiversité des sols ;
- diminution de l'érosion (éolienne et hydrique) d'un facteur de 2 à 10 ;
- accroissement du taux de matière organique du sol, surtout en surface, et stockage de carbone dans le sol (estimé de 0,1 à 0,4 tonne de carbone par hectare et par an pour l'horizon superficiel 0-20 cm) ;
- une réduction de l'évaporation pouvant aller de 10 à 50%.

L'agriculture de conservation présente cependant un handicap technique, qui est celui de la gestion des adventices.

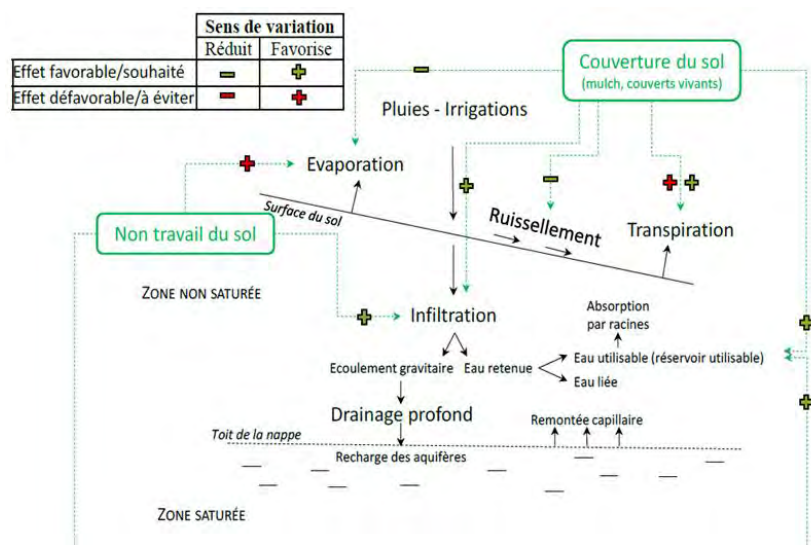
¹⁵² International Journal of Environmental Studies, Global spread of Conservation Agriculture, A. Kassam, T. Friedrich, R. Derpsch, pages 29-51, 06 Aug 2018

¹⁵³ Voir référence citée précédemment : «Le tripode de l'agriculture de conservation », INRAE, Pascale Mollier, 06/11/2013, <https://www.inrae.fr/actualites/tripode-lagriculture-conservation>

¹⁵⁴ Voir référence citée précédemment : L'agriculture de conservation, CEP, analyse 61, Noémie Schaller, septembre 2013

¹⁵⁵ L'agriculture de conservation et sa diffusion en France et dans le Monde », Cybergeog, European Journal of Geography, François Laurent, N°747, 2015, <https://journals.openedition.org/cybergeog/27284>

Le graphique ci-dessous récapitule les effets favorables (en vert) et ceux défavorables (en rouge) de l'ACS vis-à-vis du cycle de l'eau.



Source : INRAE, Effets de pratiques agroécologiques sur le fonctionnement physique, chimique et biologique de sols du bassin Adour-Garonne, résultats provisoires GT1 BAG'AGES

Annexe 9 : Compléments sur l'agroforesterie

Table 1 – Key agroforestry practices in some European countries, by system, country and area covered

System	Country	Extent (hectares)
Mediterranean oak tree agroforestry	Dehesa in Spain	3 606 151
	Montado in Portugal	1 059 000
	Grazed woodlands and oak and other agroforestry on agricultural land in Greece	1 895 583
	Pyrenean oak (<i>Quercus pyrenaica</i>) in Spain and Portugal	122 000
	Grazed oak woodlands in Italy	279 263
	Sub-total	6 961 997
Other wood pastures and meadows	<i>Larix decidua</i> (European larch) in Italy	102 319
	Lövångar, hagmarker in Sweden	100 000
	Other parkland, woodland, wood-pasture, Hudewald, Haka and metsäläidun in the UK, Germany, Austria, Switzerland, Hungary, Finland	200 320
	Sub-total	402 639
Reindeer husbandry	Finland, Sweden, Norway	41 400 000
Hedges and scattered trees	France and parts of the UK and Belgium	472 074
Agroforestry with fruit trees	Germany, Switzerland, Austria, Romania, Croatia, Czechia, France, the UK, Denmark, Italy, Greece, Poland, Portugal	1 226 867
with olives	Portugal, Greece, France, Italy and Spain	538 865
with pine-trees	Italy and Portugal	535 842
with vines	Italy, Spain and Portugal	275 635
with chestnuts	Portugal, France, Italy, Greece, Hungary, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain and Switzerland	111 083
with carob trees	Italy, Portugal, Spain and Greece	92 200
	Sub-total	2 780 492
Shelterbelts (windbreaks)	Hungary	16 415
Alley cropping	France	6 300
Trees with livestock	Netherlands	3 000
Total		52 042 917
Total (excluding reindeer)		10 642 917

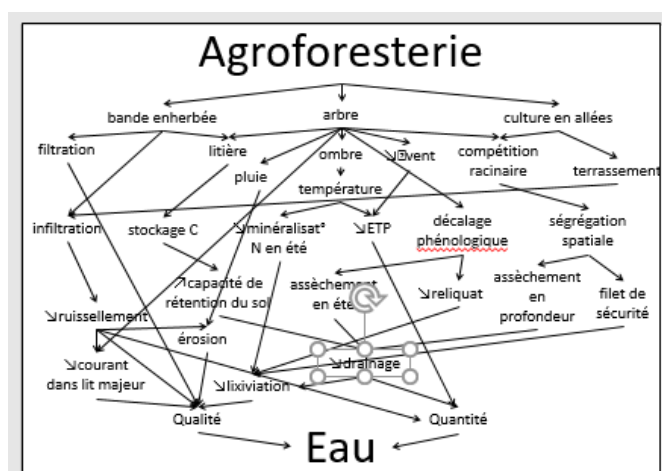
Source: [Aforward](#) project, Stratification of agroforestry.

La Dehesa (Montado au Portugal) est le plus important système agro-silvo-pastoral en Europe. Il se rencontre en Espagne et au Portugal, et couvre environ 3 millions d'hectares de chênes espacés avec des pâturages et des cultures de fourrages ou de céréales.

Source : « l'agroforesterie dans les autres pays européens », APCA Paris, Gerry Lawson, 26/01/2005



Effets de l'agroforesterie sur l'eau



Source : INRAE, UMR System, Marie Gosme, 2017

Annexe 10 : Economies d'eau, avantages et inconvénients des trois grands systèmes d'irrigation

Tableau 1. Valeurs d'économie d'eau couramment reconnues et admises (issues de dires d'experts)

Modernisation du système	Economie d'eau potentielle
Gravitaire → aspersion	60 %
Aspersion → irrigation localisée	20 – 30 %
Enrouleur → pivot	25 %

Source : Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par modernisation des systèmes d'irrigation, Claire Serra-Wittling et Bruno Molle, IRSTEA, septembre 2017

Système d'irrigation	Avantages	Inconvénients
Gravitaire	- Ne mouille pas les parties aériennes des plantes - Limite la poussée des adventices - Méthode empirique, mais présentant de bons résultats	- Nécessite des parcelles nivelées - Débit d'eau important nécessaire (pour compenser l'évaporation et les infiltrations de l'eau dans le sol) - Temps d'arrosage long - Risque d'apports d'adventices et de pollutions par les canaux
Goutte-à-goutte	- Répartition uniforme de l'eau dans la parcelle - Basse pression et économie d'énergie - Economie en eau - Ne mouille pas le feuillage des plantes et réduit ainsi certaines maladies cryptogamiques - Limite l'évaporation et le refroidissement du sol - Est compatible avec l'utilisation de paillage - Défavorise la poussée des mauvaises herbes entre les rangs	- Temps d'installation long au départ - Complique le sarclage des cultures - Nécessite une eau de bonne qualité et un système de filtration performant - Présente un débit irrégulier sur les terrains en pente (sauf si gouteur auto-régulant) - Nécessite de fractionner les apports - Risque de rupture de capillarité dans le sol - Risque d'obturation nécessitant un entretien et un nettoyage réguliers
Aspersion	- Facile et rapide à installer - Facile à déplacer d'une culture à l'autre - Limite la présence des acariens qui sont gênés par une ambiance humide - Peut servir de protection contre le gel des cultures	- Investissement de départ important - Favorise le développement des adventices - Mouille le feuillage (risque de maladies) - Sensible au vent - Pertes en eau importantes par évaporation - Débit et pression plus importants que dans un système de goutte-à-goutte - Nécessite un système de filtration

Source : « Maîtriser son irrigation en maraîchage biologique », Sud & Bio Languedoc-Roussillon Association interprofessionnelle, 2016

Annexe 11 : Comparaison synthétique des différents systèmes d'irrigation

Ce chapitre récapitule de manière synthétique la comparaison des différents types de systèmes d'irrigation sous la forme d'un tableau de 11 critères relatifs à l'adaptation au parcellaire, au temps de travail, à la consommation d'énergie, au coût et à la qualité de l'irrigation.

Il faut néanmoins toujours garder à l'esprit que tous les systèmes ne s'adaptent pas à toutes les parcelles ni à tous les besoins.

Pour chaque critère, chaque type de matériel d'irrigation est évalué selon une notation qualitative à 3 niveaux :

- Pour le temps de travail : + = beaucoup de temps, +++ = peu de temps
- Pour le coût : + = cher à l'hectare, ++ = peu coûteux à l'hectare
- Pour la qualité de répartition et l'efficacité d'application : + = peu performante, +++ = très performante
- Pour la pluviométrie instantanée : +- = forte, ++ = faible
- ++ intermédiaire

	Canon-enrouleur	Pivot/Rampe frontale	Rampe tractée par enrouleur	Couverture intégrale	Goutte à goutte de surface	Goutte à goutte enterré
Type de parcellaire adapté	tous types	bien adapté aux grandes parcelles	parcelles plutôt rectangulaires	tous types	tous types	tous types
Pente	tous types	pas plus de 15%	pas plus de 15%	tous types	dépend du débit des goutteurs	tous types
Possibilité de déplacement de l'appareil sur autre parcellaire	+++	+	++	+	+	non
Possibilité d'irrigation à la levée	oui	oui	oui	oui	non	non
Temps de travail avant et après la campagne	++	+++	++	+	+	+++
Temps de travail pendant la campagne	++	+++	+ / +++ ⁽¹⁾	+++ (si automatisée)	+++	+++
Consommation énergétique ⁽²⁾	+	++	++	++	+++	+++
Qualité de répartition	+	++	++	++ ⁽³⁾	+++	+++
Efficacité d'application	+	++	++	+	+++	+++
Pluviométrie instantanée	+	++	+	++	++	++
Coût à l'hectare	++	+++	+	+	+	+

1 : déplacement de la rampe tractée par enrouleur plus long que déplacement du canon-enrouleur seul

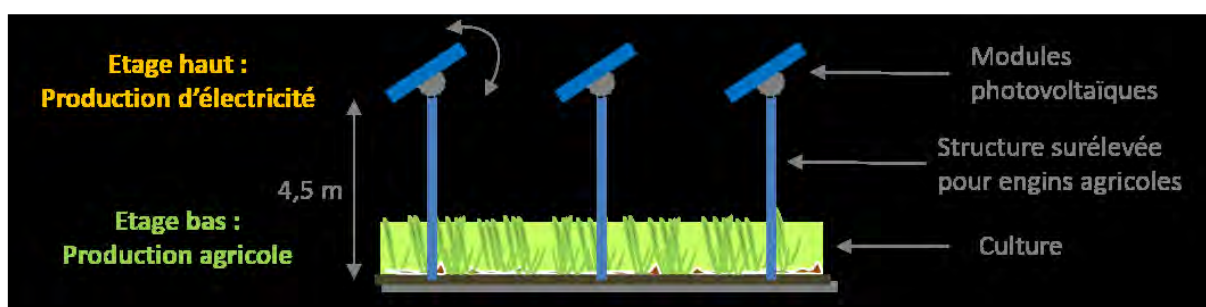
2 : si pompe adaptée au système

3 : pour la qualité de répartition de la couverture intégrale : ++ si distance maximum entre deux asperseurs est de 21 m, sinon +

Source : Matériels d'irrigation des grandes cultures, Arvalis – Institut du végétal, juin 2017.

Annexe 12 : Compléments sur l'agrivoltaïsme

La notion d'agrivoltaïsme a été établie pour la première fois en 1981 par Adolf Goetzberger et Armin Zastrow¹⁵⁶, qui ont étudié la possible cohabitation d'une production électrique photovoltaïque et d'une production agricole. Le terme agrivoltaïque (parfois orthographié agrivoltaique ou remplacé par agrivoltaïsme, agriphotovoltaïque, agriphotovoltaïsme) a été utilisé pour la première fois dans une publication en 2011¹⁵⁷, désignant des systèmes agricoles, produisant de l'électricité, tout en préservant une activité agricole associée. Plusieurs secteurs sont concernés, notamment les élevages ovins, de volailles et de chèvres, les productions fourragères, l'horticulture, la viticulture, l'arboriculture voire même l'apiculture et l'aquaculture¹⁵⁸. L'agrivoltaïsme s'appuie sur le principe des cultures étagées : un étage bas réservé à la production agricole et un étage haut (5m) réservé à la production d'électricité.



Source : Dossier de Presse – Sun'Agri – Copyright Sun'R – 2017

Dans le monde, l'agrivoltaïsme a commencé à se développer dès 2004 au Japon, avec la mise en place de panneaux photovoltaïques fixes et démontables, susceptibles de récupérer l'énergie solaire incidente non utilisée pour la photosynthèse des cultures (agrumes, arachides, aubergines, concombres, choux, riz, vignes...), afin de la convertir en énergie électrique, réutilisée sur les exploitations et/ou commercialisée auprès d'une société partenaire¹⁵⁹.

¹⁵⁶ GOETZBERGER, Adolf et ZASTROW, A, 1981. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. 15 février 1981. Harwood Academic Publishers

¹⁵⁷ C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot et L. Dufour, « Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes », Renewable Energy, vol. 36, no 10, 2011, p. 2725–2732

¹⁵⁸ « Analyse de la concurrence entre les parcs photovoltaïques au sol et les autres usages des sols, Focus sur les solutions de l'agrivoltaïsme, Premier Rapport », ENCIS Environnement, 24/10/2020

¹⁵⁹ « Japanese Farmers Producing Crops and Solar Energy Simultaneously » [archive], sur i-sis.org.uk, 16 octobre 2013



Parcelle agrivoltaïque, préfecture de Chiba (Japon)

En Europe, après l'apparition de serres photovoltaïques dans les années 2000, c'est en Autriche puis en Italie que sont apparues, à partir de 2007, les premières installations de panneaux photovoltaïques mobiles, suspendus par des câbles à 6m au-dessus du sol¹⁶⁰.

Plus précisément, en Italie, la société REM TEC est la première société à installer des panneaux mobiles à double orientation sur vignobles à partir de 2009¹⁶¹, puis en plein champs à partir de 2011¹⁶², avec un taux d'occupation des sols inférieur à 15%, ce afin de ne pas pénaliser le rendement des cultures.



Source : <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaico/installations/30-monticelli-dongina?/en/agrovoltaico/monticelli-dongina-plant/>

REM TEC est également la première compagnie à proposer des filets de protection anti-grêle intégrés à la structure porteuse¹⁶³.

¹⁶⁰ « A rope rack for PV modules », PV Europe, 28 août 2017

¹⁶¹ <http://www.freshplaza.it/article/9903/Mola-di-Bari-realizzato-primo-impianto-fotovoltaico-su-un-un-vigneto-di-uva-da-tavola>

¹⁶² <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaico/installations/30-monticelli-dongina?/en/agrovoltaico/monticelli-dongina-plant/>

¹⁶³ « shading nets », remtec.energy, septembre 2016



Source : <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaico/26-shading-nets?/en/agrovoltaico/shading-nets/>

Annexe 13 : Compléments sur la recharge artificielle de nappes

Comparaison du coût unitaire moyen d'investissement de la recharge artificielle et d'opérations de stockage superficiel et souterrain en Espagne

Dispositif de stockage d'eau	Nombre de projet	Coût unitaire d'investissement (€ ₂₀₁₄ /m ³)
Bassin d'irrigation	18	9,75
Barrage/retenue d'eau (taille moyenne)	16	0,8
Dispositifs de recharge artificielle indirecte (bassin, canaux, fossés, ...)	8	0,21
Recharge directe par forages profonds	4	0,58
Recharge directe par forage de profondeurs moyenne à profonds	25	0,36

Source : Escalante et al. 2014

Annexe 14 : Compléments sur la réutilisation des eaux usées traitées



L'usine de Barcelone, la plus grande d'Europe

Les ressources naturelles en eau dans la zone métropolitaine de Barcelone (4 millions d'habitants) sont soumises à des pressions importantes tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

L'usine de traitement des eaux usées produit 100 000 m³/j d'eau réutilisable de deux qualités différentes :

- 97 500 m³/jour après traitement par décantation, filtration et désinfection sont utilisés pour l'irrigation, l'arrosage des espaces verts et la recharge des zones humides du delta de Llobregat.
- 2 500 m³/jour après un traitement complémentaire par osmose inverse sont utilisés pour éviter les intrusions dans les nappes.

Source : fiches Synteau, fiche n°5 « Eaux usées », novembre 2012

En Europe, le règlement (UE) 2020/741 du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau¹⁶⁴, qui fixe des normes communes sur la qualité sanitaire et physicochimique des eaux de REUT, a pour objectifs :

- d'augmenter fortement l'utilisation d'eaux usées traitées en Europe, dont le volume est actuellement de 1,1 milliard de m³/an¹⁶⁵, et de compenser ainsi l'extraction d'eau ;
- de prévenir les obstacles potentiels à la libre circulation des produits agricoles irrigués avec de l'eau usée traitée, tout en garantissant le maintien d'un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement ;
- de renforcer la confiance du public dans la REUT.

Ainsi, le règlement UE 2020/741 :

- définit des niveaux d'exigences minimales applicables à l'eau de récupération destinée à l'irrigation agricole, qui aboutit à la classification des eaux usées traitées en 4 classes (A à D) en fonction de leurs qualités sanitaires et biochimiques¹⁶⁶ ;
- rappelle les productions agricoles éligibles à la REUT pour chaque classe d'eaux usées ;
- conditionne la REUT à l'obtention d'un permis, délivré par l'autorité compétente de chaque Etat membre ;

¹⁶⁴ RÈGLEMENT (UE) 2020/741 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

¹⁶⁵ « Un premier panorama des eaux usées traitées en France », an., CEREMA, 15 juillet 2020

¹⁶⁶ Annexe 1 du RE 2020/741 du 20 mai 2020, JO de l'UE du 5/6/2020

- assujettit la délivrance de ce permis à la présentation d'un plan de gestion des risques, couvrant toute l'installation de REUT (récupération, traitement en STEU, distribution et épandage) ;
- impose la réalisation de contrôles de surveillance de routine (toutes catégories) et de validation (catégorie A) ;
- demande aux Etats membres de mettre en place un système d'information et de surveillance de la REUT sur l'ensemble de leur territoire.

En France, l'arrêté du 2 août 2010, modifié le 25 juin 2014, relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts¹⁶⁷, définit :

- quatre catégories d'eaux usées éligibles à la REUT, en fonction de leurs qualités physico-chimiques et biologiques ;
- les cultures éligibles pour chaque classe d'eau de REUT ;
- les conditions d'usage de la REUT (vent et types de sols) ;
- les conditions d'attribution d'un permis de REUT ;
- les contrôles de routine et de surveillance à effectuer.

Ce texte est complété par l'instruction ministérielle aux Préfets du 26 avril 2016¹⁶⁸.

Le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) a publié un état des lieux de la REUT en France en 2017¹⁶⁹ dans lequel il recense 145 cas de réutilisation des eaux usées, 128 cas de REUT sur tout le territoire français et 17 cas d'infiltration. Parmi les 128 cas de REUT, on dénombre :

- **113 cas** de REUT directe,
- **2 cas** de REUT indirecte,
- **3 cas de micro-irrigation** des espaces situés dans l'emprise même de la STEU,
- **10 cas de réutilisation** d'eau usée industrielle ou domestique issue de STEU privées (non exhaustif car hors périmètre d'étude).

A date de réalisation de l'étude (mai 2017), sur ces 118 cas (hors STEU privées), seuls 58 étaient en activité. Sur les 60 autres, 25 cas étaient encore en projet, 29 avaient avorté (après 4 ans d'instruction des dossiers en moyenne) et 6 étaient définitivement abandonnés, après 2 à 20 ans de fonctionnement¹⁷⁰.

¹⁶⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/jo/2010/08/31/0201>

¹⁶⁸ INSTRUCTION INTERMINISTERIELLE N° DGS/EA4/DEB/DGPE/2016/135 du 26 avril 2016 relative à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts

¹⁶⁹ « Un premier panorama des eaux usées traitées en France », an., CEREMA, 15 juillet 2020

¹⁷⁰ Voir référence citée précédemment : « Un premier panorama des eaux usées traitées en France », an., CEREMA, 15 juillet 2020

Annexe 15 : Compléments sur le dessalement

En Europe, la plus importante usine de dessalement d'eau de mer est celle d'El Prat del Llobregat, installée à Barcelone, permettant de produire 200 000 m³/jour d'eau potable, pour couvrir la consommation de 5,5 millions de personnes.



Source : Le dessalement de l'eau de mer en Espagne, un secteur en réorientation, Elias AZZI, août 2014

La question du rejet des saumures

Une étude de Sabine Lattemann (2008)¹⁷¹ a permis d'estimer les quantités de produits chimiques rejetés dans la mer rouge via **les effluents de 21 usines de dessalement** dont la capacité totale dépassait 1,5 millions de m³ par jour (dont environ 1,2 millions produits par procédé thermique). D'après ces travaux, bien que les concentrations en polluants soient faibles, le débit de ces usines est tel qu'environ **2,7 tonnes de chlore, 36 kg de cuivre et 9,5 tonnes de produits antitartres sont rejetés chaque jour à la mer par ces installations.**

Les rejets des usines de dessalement sont soumis aux réglementations du « protocole tellurique » de la convention de Barcelone¹⁷² à laquelle ont adhéré de nombreux pays européens côtiers de la méditerranée : France, Espagne, Israël, Egypte, Liban, Lybie, etc. Cette convention prévoit des valeurs limites de rejets pour de nombreux éléments (sels, chlore, température, etc.) et l'obligation de réaliser une étude d'impact avant construction de l'usine¹⁷³.

¹⁷¹ Cités par Vivien Lecomte, Ecotoxicologie.fr, octobre 2014

¹⁷² <https://www.unep.org/unepmap/fr/who-we-are/barcelona-convention-and-protocols>

¹⁷³ Voir la note « Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation », Elias AZZI, Ambassade de France, Juillet 2014