

Rédaction

Nathalie Dörfliger (Brgm, Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies) et Bénédicte Augeard (Onema, Direction de l'action scientifique et technique)

Edition

Véronique Barre (Direction de l'action scientifique et technique de l'Onema) et Claire Roussel (Délégation à l'information et à la communication)

Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

Citation

Dörfliger N. et Augeard B. 2013. Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ? Onema. 12 pages

Remerciements

Dumon A., Aunay B., Picot G., Moynot C., Bollard M., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Chatelier M., Croiset N., Szurdyk N. et Maugis P.

Réalisé avec le concours de l'OIEau.

La collection « **Comprendre pour agir** » accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

- 1- **Eléments d'hydromorphologie fluviale**
(octobre 2010)
- 2- **Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière**
(mai 2011)
- 3- **Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels**
(décembre 2011)
- 4- **Evolutions observées dans les débits des rivières en France**
(décembre 2012)
- 5- **Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?**
(décembre 2012)
- 6- **Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ?**
(avril 2013)

ISBN 979-10-91047-16-6

Mai 2013

Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ?

Nathalie Dörfliger
et Bénédicte Augeard

Sommaire

N°6

- Le biseau salé au sein des aquifères côtiers
- Quels outils pour caractériser l'intrusion saline ?
- Estimation de la vulnérabilité des aquifères côtiers français à l'intrusion saline par cartographie
- Estimation des conséquences du changement global sur les aquifères littoraux par modélisation
- Conclusion
- Pour en savoir plus

Les aquifères littoraux constituent des ressources d'eau souterraine importantes tant pour les activités humaines (alimentation en eau potable, usages agricoles, industriels et touristiques) que pour l'environnement (zones humides littorales, marais et lagunes cotières situés à l'exutoire de ces nappes). En France métropolitaine, sur les 5 500 km de côte, 95 aquifères superficiels et 17 aquifères profonds ont été inventoriés. Dans les milieux insulaires (notamment dans les départements et régions d'outre-mer), les aquifères sont en général tous littoraux.

La salinisation partielle des eaux souterraines des aquifères littoraux est un phénomène naturel, dont l'importance et l'extension sont variables et fonction de la nature des matériaux constituant les réservoirs souterrains. Cette salinisation peut être amplifiée d'une part par une exploitation par pompage et d'autre part par la modification du niveau marin, par exemple lié au changement climatique (Werner et Simmons, 2009). Or, une intrusion saline de manière naturelle conjuguée ou non à une influence anthropique menace la quantité d'eau douce disponible dans ces réservoirs souterrains.

L'objectif de ce document est de proposer, à travers des exemples, des outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel d'une remontée du niveau marin sur la salinisation des aquifères littoraux.



© N. Dörfliger - BRGM

Après un bref rappel sur le phénomène d'intrusion saline, différentes méthodes de caractérisation sont présentées et deux d'entre elles sont détaillées et illustrées. La première méthode s'appuyant sur le développement d'indicateurs est utilisée pour réaliser une cartographie de la sensibilité actuelle des

aquifères littoraux français vis-à-vis de l'intrusion saline. La deuxième approche, une modélisation permettant d'estimer les impacts potentiels du changement global sur les aquifères côtiers, est illustrée à travers des exemples en métropole et dans les départements d'outre-mer.

Le biseau salé au sein des aquifères côtiers

Les aquifères littoraux prennent place au sein de formations géologiques variées : bassin sédimentaire, alluvions, socle fissuré, formations volcaniques et formations carbonatées karstifiées.

Ils sont le lieu de rencontre de deux types d'eaux souterraines :

- des eaux douces provenant de l'infiltration des précipitations et des eaux de ruissellement au niveau de la surface continentale ;
- des eaux salées qui imprègnent les terrains au voisinage des côtes ou pénètrent les cours d'eau au niveau des estuaires, pouvant ainsi donner lieu à la salinisation des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface (océan, rivières).

Les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre que l'eau salée « flottant » sur l'eau salée (Figure 1).

L'intrusion d'eau salée prend la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément « biseau salé », et constitue une interface entre l'eau salée et l'eau douce. Cette interface va évoluer au cours du temps en fonction de la recharge par les précipitations, de l'exploitation de l'aquifère et du niveau marin.

Le niveau piézométrique est l'altitude du niveau d'eau souterraine à l'équilibre avec la pression atmosphérique mesurée dans un forage. Il s'élève vers l'intérieur des terres, sous l'influence de la recharge par les précipitations, de la topographie et des propriétés physiques des terrains. Ce niveau peut être modifié par les pompages, créant localement des cônes de dépression piézométrique autour des forages et faisant remonter le biseau salé (Figure 2).

De manière simplifiée, la position de cette interface eau douce/eau salée peut être approximée en considérant les rapports de masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée (solution analytique développée par Ghyben 1888, et Herzberg 1901). Ainsi, en un point quelconque de l'aquifère, l'interface se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique situé au-dessus du niveau de la mer (Figure 1). D'autres estimations plus réalistes (Glover, 1959) prennent en compte la présence d'un écoulement d'eau vers la mer et conduisent à situer le biseau salé à une profondeur légèrement différente. De plus, pour un débit de nappe donnée, plus la perméabilité est faible, plus le biseau salé est profond. Cette propriété est utilisée pour caractériser la sensibilité actuelle des aquifères à l'intrusion saline.

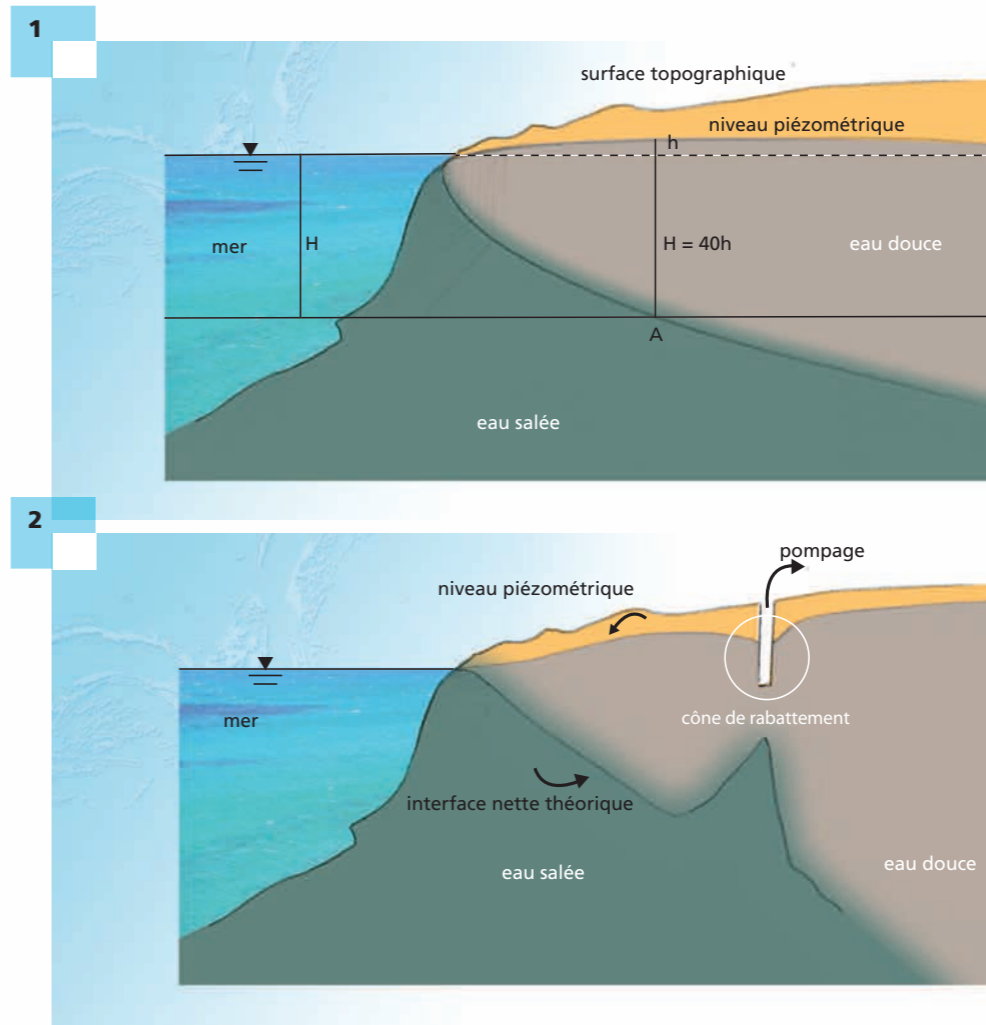


Figure 1. Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'intrusion saline selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant 2005). Le biseau d'eau salée rentre à l'intérieur des terres et atteint une profondeur H sous le niveau de la mer au point A où la cote piézométrique h est telle que $H = 40h$.

Figure 2. Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline selon le schéma de Ghyben Herzberg (extrait de Frissant et al. 2005).

Quels outils pour caractériser l'intrusion saline ?

L'intrusion saline au sein des aquifères littoraux peut être caractérisée en ayant recours à différents outils utilisés en hydrogéologie. Quatre approches sont présentées ici, elles répondent à des objectifs différents :

■ **détecter la salinité et suivre son évolution.** La mesure régulière des chlorures (le chlorure de sodium étant le sel majoritaire de l'eau de mer) ou de la conductivité électrique (dépendant de la quantité de sels dissous dans l'eau) des eaux souterraines constitue un premier

outil de surveillance au niveau d'un aquifère, de manière spatiale et temporelle ; un réseau de forages existants ou dédiés peut permettre ces analyses en plus du suivi du niveau piézométrique ; plusieurs options de suivi sont possibles : mesures ponctuelles en continu de la conductivité électrique, mesures périodiques sur des profils verticaux ou encore mesures en continu de la conductivité électrique sur une verticale à partir d'observatoires géophysiques développés récemment ;

■ **identifier l'origine de la salinité.** Lorsqu'une salinité est détectée, l'utilisation des outils géochimiques et isotopiques sur des analyses d'échantillons prélevés dans des forages permet de déterminer l'origine de la salinité. En particulier, cette méthode permet de distinguer une salinité d'origine marine d'une salinité liée à la présence de formations géologiques salifères dans le réservoir souterrain ou d'une salinité associée à des eaux usées ;

■ **évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline.** Lorsque les données de salinité d'un aquifère sont limitées, la vulnérabilité à l'échelle d'un aquifère peut être estimée de façon simplifiée à l'aide d'une cartographie intégrant les différentes composantes ayant une influence sur l'intrusion du biseau salé. Cette approche sera illustrée au plus loin ;

■ **tester des scénarios.** Enfin, la modélisation hydro-géologique d'un aquifère littoral peut être utilisée pour comprendre l'intrusion saline et tester différents scénarios. Ces scénarios permettent par exemple d'explorer l'impact des modifications de changement de niveau marin ou l'impact d'une évolution des prélèvements. Cependant, la réalisation d'une modélisation nécessite de disposer d'une connaissance suffisante tant du point de vue de la géométrie que des paramètres physiques du réservoir souterrain. L'acquisition de données nécessite des investigations géophysiques ou la réalisation de forage avec des essais de pompages et des caractérisations hydrochimiques ; elle peut donc, en fonction des connaissances initiales et des enjeux, être coûteuse en temps et en argent.

Estimation de la vulnérabilité des aquifères côtiers français à l'intrusion saline par cartographie

A l'heure actuelle, l'impact du biseau salé s'observe sur certains aquifères littoraux français même s'il n'y a globalement pas de grandes zones d'invasion d'eau salée.

La salinité des aquifères littoraux français peut être ainsi :

■ d'origine naturelle comme on peut l'observer par exemple au niveau de la Camargue, du Nord-Pas-de-Calais et de la Picardie dans des zones de faible altitude, de la Bretagne, de l'île de Noirmoutier, dans les sources karstiques des Calanques ou les aquifères alluviaux du Languedoc Roussillon ;

■ d'origine anthropique liée à l'exploitation des forages par pompage pouvant affecter des aquifères alluviaux méditerranéens (en Provence-Alpes-Côte-d'Azur par ex.), les zones d'estuaires en Haute Normandie, ou encore dans les formations aquifères en relation avec le Marais Poitevin.

Pour avoir une évaluation de la sensibilité des aquifères vis-à-vis de l'intrusion saline sur l'ensemble du linéaire côtier, un exemple de cartographie croisant différentes composantes ayant une influence sur l'intrusion du biseau salé est donné. Les observations de salinité ont été

cartographiées et complétées par une caractérisation de la sensibilité des aquifères à l'intrusion saline (en lien avec la nature des formations) croisée avec des données sur les prélèvements anthropiques.

● Sensibilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine

La sensibilité des aquifères côtiers à l'échelle métropolitaine vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle a été estimée à partir des informations sur la nature des formations géologiques rencontrées, notamment leur perméabilité (informations issues de la base de données des systèmes aquifères – BDLISA). Cinq classes de sensibilité sont distinguées (encadré).

Les cinq classes de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle utilisées dans l'étude

■ **« Sensibilité faible » :** cette classe regroupe les entités de nature imperméable. Ces formations non aquifères sont en général des couches argileuses pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacent ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.

■ **« Sensibilité faible à moyenne » :** les entités de nature semi-perméable comprises dans cette classe sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation d'eau restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multi-couches présentes dans des zones de deltas ou de bassins sédimentaires. Des formations de socle, avec des perméabilités faibles ainsi que des aquifères compartimentés, mais localement semi-perméables font également partie de cette classe. Ces aquifères sont en général sensibles à des intrusions salines par biseau salé, qui peuvent être multiples et superposées en fonction de la configuration de la géométrie du multicouche.

■ **« Sensibilité moyenne » :** les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élevée, peuvent correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux avec une forte perméabilité), ou à des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.

■ **« Sensibilité variable – karstique » :** les aquifères karstiques de cette classe sont caractérisés par une forte hétérogénéité de la distribution des vides et des fissures ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace. Du fait des variations du niveau moyen des mers par rapport au continent au cours des temps géologiques, des conduits peuvent être présents à plusieurs dizaines de mètres sous le niveau marin actuel. Ces conduits donnent lieu à des émergences – sources pouvant fonctionner comme source et comme point d'engouffrement, en fonction des variations de la charge hydraulique au sein de l'aquifère (fonction de la recharge et de l'exploitation). Un aquifère karstique côtier constitue un aquifère d'une sensibilité variable d'autant plus s'il y a des sources sous-marines étagées, mais il peut aussi être dans la classe "forte-avérée". Une sensibilité forte peut être attribuée à des zones particulières, zones de cavités et de sources (ex. source de Port Miou dans les Calanques de Marseille). L'exploitation de forages ou de puits en zones karstiques induit des phénomènes imprévisibles en terme d'intrusion saline, certains pompages étant sans effet alors que d'autres provoqueront des intrusions conséquentes. Il faut donc étudier ces zones de manière spécifique.

■ **« Sensibilité forte-avérée » :** cette classe comprend les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière. Ces secteurs sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre. De plus cette classe comprend les aquifères pour lesquels les intrusions salines sont existantes et où il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation selon les informations des études régionales.

● Données sur les prélèvements anthropiques

Les prélèvements des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie ont été cartographiés et croisés avec les données sur la sensibilité des aquifères. Les données de prélèvements utilisées sont

extraites des bases de données des agences de l'eau (données de 2009 pour le bassin Loire-Bretagne, données de 2008 pour les autres bassins, les prélèvements en nappe profonde n'étant pas retenus pour cette étude).

Carte de vulnérabilité croisant sensibilité et prélèvements anthropiques

La carte de vulnérabilité des nappes souterraines vis-à-vis d'une intrusion saline pour une bande littorale de 5 km de large est présentée sur la Figure 3. Elle intègre les données relatives à la nature des terrains réservoirs souterrains et à la pression de prélèvement. Elle met en évidence les zones les plus vulnérables à l'échelle des côtes métropolitaines dans les régions suivantes : la côte

orientale de la Corse ; une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ; la partie septentrionale de la côte du Poitou-Charentes ; la côte nord-est de la Bretagne et la côte du Calvados. A noter que les zones méditerranéennes sont les plus marquées par une influence anthropique qui peut accentuer les risques d'intrusion saline.

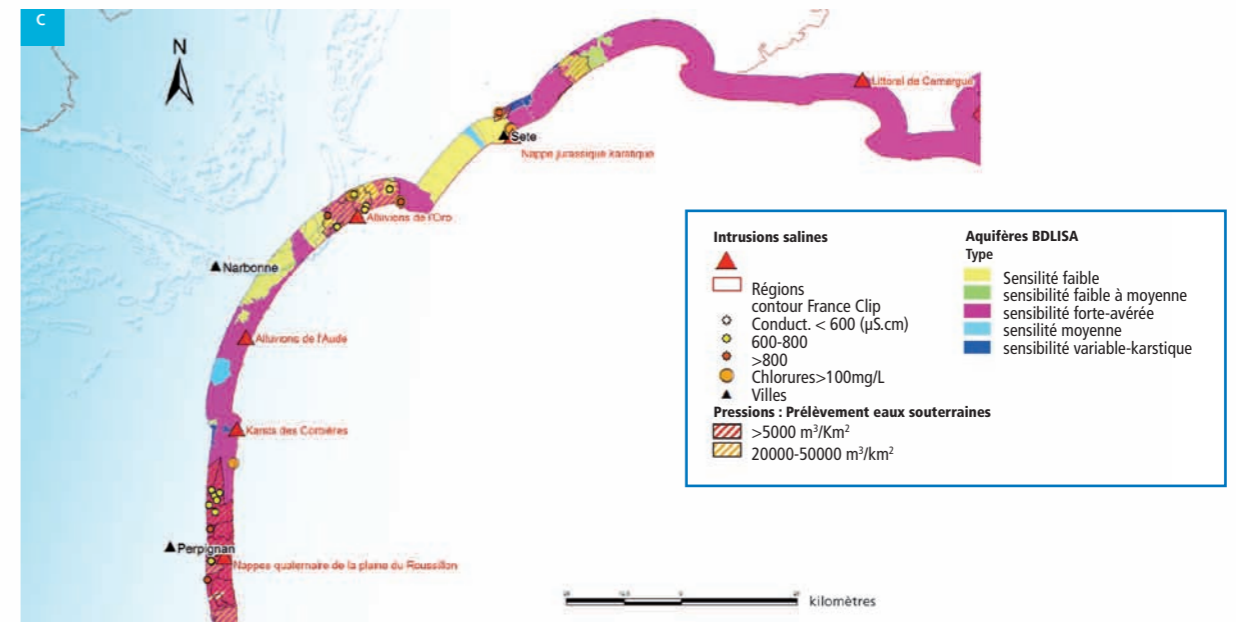
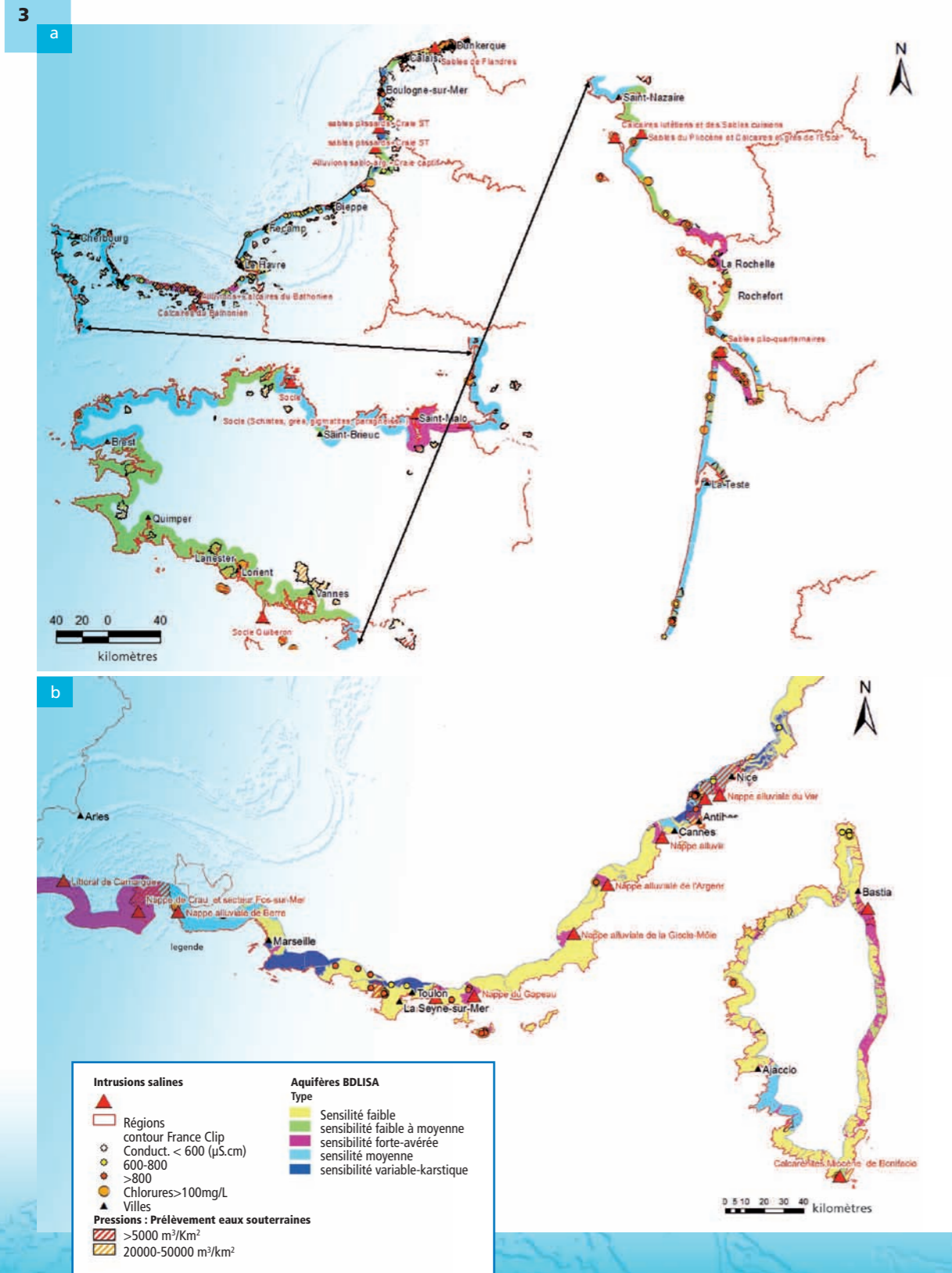


Figure 3. Carte de vulnérabilité des nappes souterraines vis-à-vis d'une intrusion saline pour une bande littorale de 5 km de large.

Estimation des conséquences du changement global sur les aquifères littoraux par modélisation

Le changement global désigne l'ensemble des changements induits dans la dynamique de la biosphère par les activités humaines, directement ou non. L'influence du changement global sur l'intrusion saline des aquifères littoraux est associée d'une part à l'augmentation de

la demande en eau liée notamment à la pression démographique (augmentation de la demande en eau potable et en eau à usage agricole), d'autre part à l'augmentation du niveau de la mer (encadré) et plus globalement aux conséquences du changement climatique sur le cycle de l'eau.

Changement climatique et montée du niveau marin

L'élévation séculaire du niveau marin moyen est influencée par différentes composantes qui sont, selon l'ordre d'importance, l'expansion thermique, la fonte des glaciers et des couvertures glacées, et la fonte des calottes (Arctique et Groënland). Elle n'est pas uniforme à l'échelle du globe, ses variations sont liées à la variabilité de la température et de la salinité.

Selon les auteurs, la fourchette de la hausse du niveau marin envisagée d'ici 2100 est comprise entre 0,2 m (GIEC 2007) et 5 m (Hansen 2007), même si une valeur supérieure à 2 m n'est pas plausible du point de vue de la physique (Pfeffer 2008). Les estimations les plus récentes sont assez concordantes entre elles, donnant des valeurs comprises entre 0,8 m et 1,8 m pour la valeur haute. Considérant les incertitudes importantes des différentes méthodes, des valeurs plausibles d'augmentation du niveau marin peuvent être retenues pour l'étude de l'impact sur les aquifères littoraux : 0,6 m et 1 m. A noter que dans les départements et régions d'outre-mer, ces valeurs peuvent être supérieures lors des cyclones, avec des submersions de 1 m avec des périodes de retour de seulement 10 ans. Ainsi une valeur haute plus importante de 2 m peut également être prise en considération, dans l'analyse des conséquences de remontée du niveau marin.

● Evolution de la pression démographique sur les zones côtières

L'évolution de la population entre 2007 et 2040, estimée selon les tendances observées par l'INSEE sur les départements littoraux et leurs communes, permet d'évaluer la densité attendue des communes littorales en 2040 (Dörfliger 2011b). Ainsi, les communes dont la population

doublerait en 2040 se concentrent surtout sur la côte sud-ouest de la Méditerranée (Languedoc-Roussillon), en région Aquitaine et dans le sud de la Bretagne. Les prélèvements d'eau pour ces populations peuvent accentuer les risques d'intrusion saline.

● Impact du changement climatique sur les aquifères littoraux

Le changement climatique peut affecter les aquifères littoraux en modifiant le niveau marin ainsi que la distribution spatio-temporelle des précipitations efficaces constituant la recharge des réservoirs souterrains. Les impacts potentiels sur les ressources en eau souterraine des aquifères côtiers peuvent être :

- une modification des intrusions salines et une migration dans des proportions variables de l'interface eau douce – eau salée due à une remontée du niveau marin ;
- une inondation des zones basses par de l'eau de mer et infiltration des aquifères libres par de l'eau de mer ; si on considère une bande littorale de 5 km de large,

quelque 600 km² de surface situés dans la tranche d'altitude inférieure à 1 m sont potentiellement vulnérables à la montée du niveau marin ; ces zones sont principalement localisées sur la façade méditerranéenne, en Vendée ainsi qu'au niveau de l'estuaire de la Gironde (Dörfliger 2011b) ;

- une modification de la recharge des aquifères due à une variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'évapotranspiration ainsi que du volume d'eau douce et de la répartition d'eau douce dans les aquifères ;
- une modification des zones de décharge des aquifères pouvant impacter les écosystèmes des zones humides.

● Modélisation hydrogéologique caractérisant l'intrusion saline liée à une augmentation du niveau marin sous changement climatique

Des tests de modélisation numérique de l'effet de la remontée du niveau de la mer sur l'intrusion saline ont été effectués au niveau de l'estuaire de la Gironde, de l'aquifère du Dogger du Marais Poitevin, ainsi que de Grande Terre en Guadeloupe (Dörfliger 2011a, Dörfliger 2011b) :

- la modélisation montre que l'effet d'une remontée du niveau marin et de la salinité au niveau de l'estuaire de la Gironde est faible, l'avancée du biseau salin étant surtout contrôlée par les prélèvements ;
- dans le cas du Marais Poitevin, l'influence peut se faire sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Si le déplacement du biseau salé reste faible (inférieur à 20 m) pour une augmentation du niveau marin de 0,6 et de

1 mètre, la sensibilité est en revanche plus prononcée pour une remontée du niveau marin de 2 mètres dans les conditions d'exploitation actuelle (Figure 4) ;

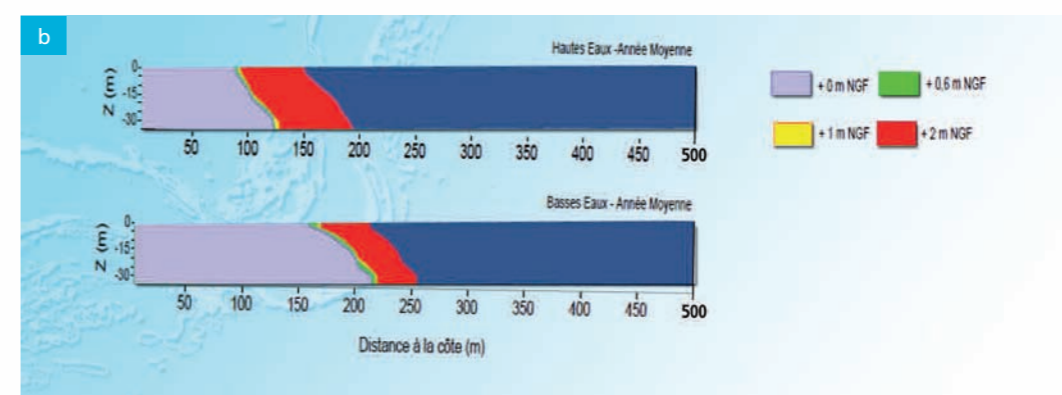
- les simulations effectuées à l'échelle de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe montrent que la salinisation augmente légèrement sur tout le territoire de Grande-Terre, du littoral vers les terres ; les secteurs dont le niveau piézométrique est inférieur à 2 m d'altitude et où la pente du niveau piézométrique est faible, sont les secteurs les plus sensibles identifiés par modélisation ainsi que par une approche simplifiée de cartographie de la vulnérabilité (Figure 5). Deux secteurs peuvent ainsi être définis : les plateaux du nord et la partie orientale des plateaux de l'est de Grande Terre.

4



Figure 4. Avancée du biseau salé pour différents scénarios de remontée océanique sur un transect du Marais Poitevin (Le front équivalent à une concentration de 100 mg.L⁻¹ de chlorures).

Le biseau salé le long du transect AB localisé sur la carte 4a est représenté sur la figure 4b en hautes eaux (en haut) et basses eaux (en bas) pour quatre niveaux de remontée océanique (+0, +0,6, +1 et +2 mètre NGF, nivellement général de la France). Les figures montrent le biseau salé selon l'altitude (z) et la distance à la côte. Les résultats sont obtenus à partir du modèle hydrogéologique régional couvrant la zone indiquée en gris sur la figure 4a.



5

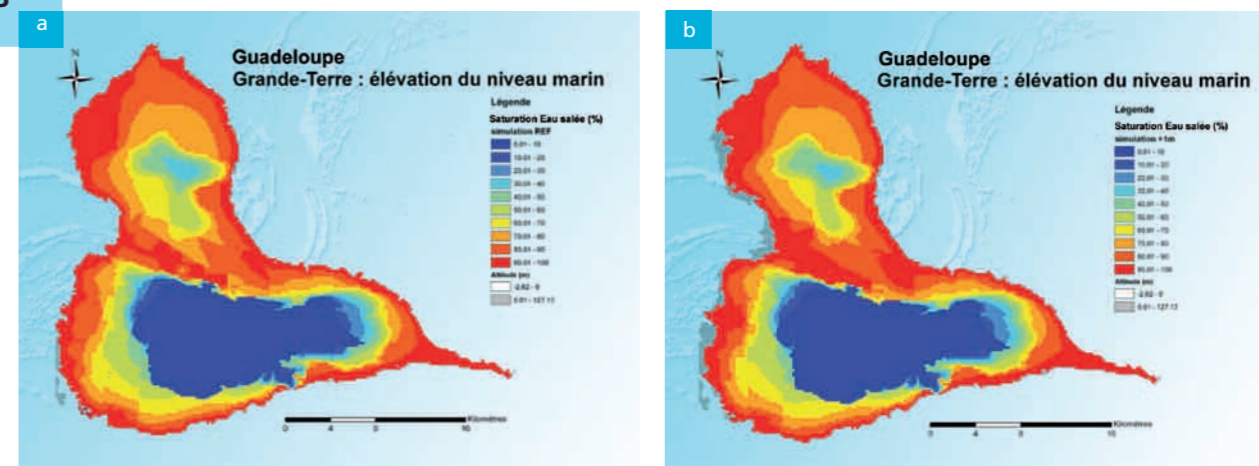


Figure 5. Saturation de l'aquifère en eau salée pour la situation de référence et pour une élévation du niveau marin de 1 m NGG (niveau général guadeloupéen) en Guadeloupe. La figure (a) montre la situation actuelle (situation REF), la figure (b) montre la simulation avec une élévation du niveau marin de 1 m NGG

Conclusion

Plusieurs types d'outils sont disponibles pour caractériser l'intrusion saline des aquifères côtiers : utilisation de réseaux de mesures, d'indicateurs de fonctionnement ou de modélisation hydrogéologique.

Ces outils sont illustrés à travers plusieurs exemples en métropole et dans les départements d'outre-mer. Les résultats montrent que s'il n'y a actuellement pas de grandes zones d'invasion d'eau salée dans les aquifères côtiers français, certaines régions sont plus vulnérables que d'autres. De plus, dans le futur, la remontée du niveau marin conjuguée avec la modification des régimes des précipitations et de l'évapotranspiration, et la pression anthropique avec les prélèvements en eau souterraine pourrait engendrer une accentuation de l'extension des intrusions salines dans les aquifères côtiers.

Au vu de l'utilisation actuelle ou future des ressources en eau souterraine des aquifères littoraux caractérisés comme

sensibles à une remontée du niveau marin et à la pression démographique, une gestion de la ressource en eau est indispensable pour permettre la durabilité des différents usages.

La gestion des aquifères côtiers passe par le recours à un réseau de surveillance avec la définition de niveaux piézométriques d'alerte pour lesquels il est nécessaire de modifier les prélèvements pour des périodes données en adaptant les besoins en eau ou en ayant recours à d'autres ressources en eau. Ce réseau de surveillance du niveau d'eau souterraine doit être associé à un réseau d'alerte concernant la variation de salinité des eaux souterraines sur des niveaux aquifères ciblés. Ce réseau d'alerte à la salinité passe par l'enregistrement en continu de la conductivité électrique de façon globale ou distribué dans des forages. Une gestion coordonnée des eaux souterraines et de surface (par exemple la recharge artificielle des nappes pour constituer une barrière hydraulique afin de limiter l'intrusion du biseau salé) peut être nécessaire pour des aquifères très sensibles et à enjeux. Il faut ainsi avoir recours à un outil de gestion. Un tel outil de gestion intègre un modèle numérique permettant de simuler pour différents scénarios (recharge par les précipitations, ré-infiltration d'eau de surface, prélèvements, niveau marin) la position du biseau salé.

1- Dörfliger N., Dumon A., Aunay B., Picot G., avec la collaboration de Moynot C. et de Bollard M. 2011a. Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM. Rapport final, BRGM RP-60828-FR, 285 p., 125 ill., 23 ann.

2- Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Chatelier M., Croiset N., Szurdyk N. 2011b. Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM RP-60829-FR, 294 p., 122 ill., 4 ann.

3- Frissant N., René-Corail C., Coll. Bonnier J. et De La Torre Y. 2005. Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64p., 27 ill., 4 tabl. (Rapport BRGM)

4- Ghyben, W.B. 1888. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift Kon. Inst. Ing., pages 8–22.

5- GIEC 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri]

6- Glover RE. 1959. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. Journal of Geophysical Research 64(4): 457–459.

7- Hansen J. E. 2007. Scientific reticence and sea level rise, Environmental research letter 2, April June 2007, http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/eri7_2_024002.html

8- Herzberg, A. 1901. Die Wasserverzorgung einiger Nordseebaden. Z. Gasbeleucht. Wasserverzorg., (44):815–819, 824–844.

9- Pfeffer, WT., Harper, JT., O'Neel, S. 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. Science 321:1340–1343.

10- Werner, A.D., Simmons, C.T. 2009. Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers. Ground Water 47(2) : 197-204.

Pour en savoir plus

Dörfliger N., Dumon A., Aunay B., Picot G., avec la collaboration de Moynot C. et de Bollard M. 2011a. *Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM. Rapport final, BRGM RP-60828-FR, 285 p., 125 ill., 23 ann.*

Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Chatelier M., Croiset N., Szurdyk N. 2011b. *Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM RP-60829-FR, 294 p., 122 ill., 4 ann.*

Contact

benedicte.augeard@onema.fr
n.dorfliger@brgm.fr