

**Partenariat 2010**  
Savoirs  
Action n° 5



***Montée du niveau marin  
induite par le  
changement climatique :  
conséquences sur  
l'intrusion saline dans  
les aquifères côtiers en  
Métropole***

Rapport intermédiaire

*Dörfliger N., Schonburgk S., Bouzit M.,  
Petit V., Caballero Y., Durst P. Douez o.  
(BRGM)*

**Janvier 2011**



**Partenariat 2010**  
Savoirs  
Action n° 5

**Contexte de programmation et de réalisation**

---

Dans le cadre de l'action N° 26 « Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM » de la convention ONEMA-BRGM 2010, des premières actions ont été menées et font l'objet de ce rapport d'avancement.

**Les auteurs**

---

Nathalie Dörfliger – Hydrogéologue - [n.dorfliger@brgm.fr](mailto:n.dorfliger@brgm.fr)  
EAU/NRE, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier

Suzanne Schomburgk – Hydrogéologue - [s.schomburgk@brgm.fr](mailto:s.schomburgk@brgm.fr)  
BRGM – EAU/AVD – Centre scientifique et technique, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

Madjid Bouzit – Economiste de l'environnement - [m.bouzit@brgm.fr](mailto:m.bouzit@brgm.fr)  
BRGM – EAU/NRE – Centre scientifique et technique, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

Vincent Petit et Yvan Caballero – Hydrogéologues - [v.petit@brgm.fr](mailto:v.petit@brgm.fr)  
BRGM – SGR/LRO – 1039, rue de Pinville – 34000 Montpellier

Pierre Durst – Hydrogéologue modélisateur - [p.durst@brgm.fr](mailto:p.durst@brgm.fr)  
BRGM – SGR/AQI – Parc technologique Europarc, 24 avenue Léonard de Vinci, 33600 Pessac

Olivier Douez – Hydrogéologue modélisateur - [o.douez@brgm.fr](mailto:o.douez@brgm.fr)  
BRGM - SGR/POC – 5 rue de la Goélette, 86280 Saint Benoit

**Les correspondants**

---

Onema : Pascal Maugis, Direction de l'Action Scientifique et Technique - Chargé de mission en Hydrologie, [pascal.maugis@onema.fr](mailto:pascal.maugis@onema.fr)  
Référence du document : Fiche Action BRGM ONEMA N° 4 2010

Partenaire :

Référence du document :

<b>Droits d'usage :</b>	Accès libre
<b>Couverture géographique :</b>	France métropolitaine
<b>Niveau géographique</b> [un seul choix] :	National
<b>Niveau de lecture</b> [plusieurs choix possibles] :	Professionnels, experts
<b>Nature de la ressource</b> [plusieurs choix possibles] :	Notice, tableau de données, couche information géographique,



# Montée du niveau marin induite par le changement climatique

Conséquences sur l'intrusion saline  
dans les aquifères côtiers en Métropole

Rapport intermédiaire

**BRGM/RP-59456-FR**

Janvier 2011

Étude réalisée dans le cadre de la convention  
ONEMA-BRGM 2010

**Dörfliger N., Schomburgk S., Bouzit M., Petit V.,  
Caballero Y., Durst P., Douez O.**

**Vérificateur :**

Nom : Delphine Allier

Date : 16 mars 2011

Signature :

**Approbateur :**

Nom : N. Dörfliger

Date : 10 mai 2011

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots clés** : Aquifères côtiers, France Métropolitaine, Changement climatique, Intrusion saline, Vulnérabilité, Modélisation hydrodynamique, Montée du niveau marin.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O.** (2010) - Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles (en fonction de leur structure, géométrie et hétérogénéités) aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique, sur le littoral ou dans l'environnement des cours d'eau envahis par l'eau salée. Selon les scénarios du GIEC, le changement climatique aura divers impacts : modification des températures et précipitations, augmentation du niveau de la mer (entre 0,2 et 0,6 m en 2100 selon les scénarios ; surcote de 1 m lors de tempêtes avec période de retour de 10 ans), étiage sévère et plus long qui aurait comme conséquence de favoriser l'invasion marine dans les fleuves. Dans les zones côtières, une pression démographique pourra également conduire à une augmentation des besoins en eau. Une cartographie de la vulnérabilité de ces aquifères est importante, accompagnée de recommandations concernant leur suivi et leur gestion.

Les objectifs de cette action sont les suivants : disposer d'une carte de vulnérabilité des aquifères côtiers français de Métropole vis-à-vis d'une montée de niveau marin.

Dans le cadre de l'action menée au cours de l'année 2010, les principales tâches ont été menées :

- synthèse de l'état de l'art concernant les intrusions salines au niveau des aquifères côtiers ;
- synthèse de l'état de l'art concernant la montée du niveau marin induite par le changement climatique. Plusieurs estimations co-existent actuellement pour l'élévation du niveau marin. Les estimations basses (Meehl, 2007) vont de 0,18 à 0,59 m pour 2100. D'autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l'ordre du mètre (Rahmstorf, 2007 ; Grinsted, 2009) ou au-delà (Hansen, 2007). Dans tous les cas, il convient de noter que l'on passe d'un mode dans lequel le niveau marin moyen a peu évolué depuis 5000 ans à un mode dans lequel le niveau marin variera de manière plus ou moins accélérée pendant plusieurs siècles. Cette remarque conduit à recommander de prendre en compte le fait que l'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement après 2100. À partir de cette synthèse, on peut retenir les scénarios suivants :
  - pour la façade Atlantique : scénarios avec 60 cm et 1 m d'augmentation du niveau marin,
  - pour la façade Méditerranéenne : scénarios de 0,35 m et 1 m d'augmentation du niveau marin, se traduisant pour ce dernier en considérant les marées, vagues... par une augmentation de 1,6 m ;
- synthèse de l'état de l'art des différentes approches de cartographie de la vulnérabilité. Seule une méthode est dédiée aux aquifères côtiers, à savoir la méthode GALDIT ;
- le développement d'une approche à l'échelle de la Métropole d'une cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une montée du niveau marin, en considérant une carte de la sensibilité basée sur la structure et le type des

aquifères, la carte des zones basses concernées par une montée du niveau marin, la carte des pressions anthropiques. Cette approche doit encore être finalisée au cours de l'année 2011. Elle tiendra compte des résultats de la cartographie de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT à l'échelle régionale ainsi que des résultats des modélisations et des approches simplifiées selon le principe de Ghyben-Herzberg ;

- un recensement des modèles hydrogéologiques distribués développés sous MARTHE a été effectué ; les modèles actualisés disponibles concernent uniquement la façade atlantique, avec en particulier le modèle nord aquitaine (MONA) au niveau de l'estuaire de la Gironde et le modèle Poitou Charentes. Il n'existe pas de modèles numériques mis à jour récemment et utilisables pour les besoins du projet au niveau de la façade méditerranéenne, mis à part le modèle de l'aquifère du Gapeau (région PACA) développé dans le cadre d'un projet de recherche en partenariat industriel avec VEOLIA (projet RECHARGE). Ce modèle 3D a été développé sous MARTHE pour modéliser le comportement de l'aquifère vis-à-vis de différents scénarios de gestion, et de l'intrusion saline. Le modèle n'est pas accessible à ce jour au vu du contrat de recherche, mais pourrait l'être courant 2011. La nappe de l'Argens dispose d'un modèle, mais non accessible par le BRGM, et non développé sous MARTHE. Les autres modèles, concernant la nappe de la Crau et l'aquifère Plio-Quaternaire du Roussillon sont obsolètes, datant de 20 à 30 ans et nécessitent de nouveaux développements ;
- les premiers tests de simulation concernent le modèle du marais de Saint-Ciers-sur-Gironde au niveau de l'estuaire de la Gironde et la partie Nord du marais Poitevin. Les modélisations ont été effectuées à l'aide du logiciel MARTHE (version 7.0) avec prise en compte du transport de masse et de la salinité pour le premier uniquement. Pour le modèle du marais de Saint-Ciers-sur-Gironde, il s'avère donc qu'aussi bien en période de repos qu'en période de prélèvement, les conséquences du changement climatique sur l'aquifère des graves sont faibles. Le front salé progresse d'une distance inférieure à 100 mètres environ, ce qui est certes le double de l'extension actuelle, mais l'augmentation de la salinité dans la zone de progression est très faible puisqu'elle est de l'ordre de la centaine de milligrammes par litre tout au plus. Toutefois le calage approximatif du modèle concernant les flux entrants et sortants peut avoir des conséquences sur les simulations en régime transitoire. S'il s'avère que les rabattements observés sont nettement plus importants que les rabattements simulés, alors il se peut que la progression du front salé en période de prélèvement soit plus importante. Il est donc possible que le modèle sous-estime légèrement l'extension du front salé. Concernant le Marais Poitevin, la remontée océanique n'impacte pas le niveau de hautes eaux du fait vraisemblablement des cotes des eaux superficielles (à proximité d'un des piézomètres de référence) qui sont en hiver nettement supérieures au niveau de base simulé. C'est également le cas sur la période d'étiage en année humide ou le maintien en eaux des canaux vient soutenir le niveau du piézomètre. Pour les années humides, en périodes de hautes-eaux, la remontée océanique semble impacter légèrement le littoral dans les secteurs où le cordon dunaire est assez restreint et ne joue donc pas ou peu le rôle de barrière hydraulique. Le niveau de la nappe serait égal à celui de l'Océan au maximum de la remontée (+ 1 mètre) à un peu plus d'un kilomètre au nord de la ligne de rivage actuelle. En période de basses

eaux, ce constat se dégrade largement puisque la charge de la nappe est inférieure ou du moins égale au niveau de l'Océan jusqu'au piézomètre de Longeville sur la simulation + 1 mètre. Au cours des années sèches et en période de hautes eaux, les niveaux de nappe sont à l'équilibre avec celui de l'Océan très à l'intérieur des terres (plus de 3 kilomètres pour la simulation avec hypothèse + 1 m). En période de basses eaux, dans le modèle initial (calage) les niveaux de nappes sont inférieurs, voire en équilibre avec l'Océan, jusqu'à une limite située entre les piézomètres de Longeville et des Caillettes. Ceci est à relier aux dépressions engendrées par les nombreux pompages d'irrigation dans le secteur (charge dans le piézomètre de Longeville atteignant en période sèche des hauteurs situées entre -1,5 et - 1 m NGF). Les simulations de l'augmentation du niveau marin, en maintenant les volumes prélevés actuels, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres.

Les perspectives pour l'année 2011 de cette action sont les suivantes : (i) Finalisation de l'état des connaissances selon la méthodologie appliquée en utilisant le référentiel BDLISA en particulier sur la côte Méditerranéenne, avec une mise à jour des connaissances en particulier pour la région Provence Alpes Côte d'Azur ; (ii) Finalisation du développement méthodologique de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en contexte actuel et en contexte de remontée de niveau marin influencée par le changement climatique, à l'échelle de l'ensemble des côtes de la Métropole ; (iii) Application de la méthode de cartographie GALDIT sur les régions où la vulnérabilité identifiée à l'aide de l'échelle de la Métropole est la plus élevée et où les données nécessaires à l'application sont disponibles ; (iv) Acquisition de données complémentaires en termes de salinité pour la zone d'étude modélisée au niveau du Marais Poitevin et modélisation avec prise en compte de l'effet de densité ; (v) Interprétation des résultats de la modélisation, adaptation de la méthode GALDIT, validation sur des zones bien caractérisés par des approches numériques et rédaction de recommandations pour les zones les plus vulnérables.



## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Synthèse de l'état de l'art concernant l'intrusion saline des aquifères côtiers .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Synthèse de l'état de l'art concernant la remontée du niveau marin induite par le changement climatique .....</b>	<b>21</b>
3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ÉLEVATION SÉCULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITÉ RÉGIONALE DU NIVEAU MARIN .....	21
3.2. PRÉDICTIONS À PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODÈLES CLIMATIQUES.....	22
<b>4. Synthèse bibliographique concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers.....</b>	<b>31</b>
4.1. NOTIONS GÉNÉRALES DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES .....	31
4.2. BREF APERÇU DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES.....	34
4.3. VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS PAR RAPPORT À L'INTRUSION SALINE .....	36
4.3.1. Méthode GALDIT .....	36
4.3.2. Exemple d'application de la méthode GALDIT .....	41
4.4. AUTRES APPROCHES (GLOBALES) DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ .....	42
4.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	44
<b>5. État des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle de la France Métropolitaine et cartographie des scénarios de remontée de niveau marin..</b>	<b>45</b>
5.1. DESCRIPTION DE LA BD BIBLIOGRAPHIQUE .....	45
5.2. ÉTAT DE L'INTRUSION SALINE MARINE PAR RÉGION .....	49
5.2.1. La façade atlantique .....	49
5.2.2. La façade méditerranéenne.....	49

<b>6. Test de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers à différentes échelles : nationale et régionale.....</b>	<b>57</b>
6.1. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS À L'ÉCHELLE NATIONALE .....	57
6.1.1. Démarche méthodologique.....	57
6.1.2. Exemples d'application à l'échelle de trois secteurs littoraux métropolitains .....	67
6.2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ À L'ÉCHELLE RÉGIONALE.....	80
6.2.1. Des tests de la méthode GALDIT .....	80
6.2.2. Une approche originale à l'échelle du Languedoc-Roussillon .....	87
6.2.3. Conclusion et perspectives.....	101
6.3. RECENSEMENT DES MODÈLES HYDROGÉOLOGIQUES NUMÉRIQUES .....	102
6.3.1. Tests de simulation.....	103
6.3.2. Saint-Ciers-sur-Gironde.....	103
6.3.3. Marais Poitevin.....	120
<b>7. Conclusion et Perspectives .....</b>	<b>131</b>
7.1. CONCLUSION.....	131
7.2. PERSPECTIVES GÉNÉRALES .....	132
7.3. PERSPECTIVES POUR LA MODÉLISATION .....	132
<b>8. Principales Références .....</b>	<b>133</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant <i>et al.</i> , 2005). .....	16
Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover, 1959).....	17
Illustration 3 : Interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse (Werner & Simmons, 2009). .....	19
Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave <i>et al.</i> , 2008).....	21
Illustration 5 : Explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué (Source : GIEC, 2007).....	22

illustration 6 :	Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave <i>et al.</i> , 2008). .....	23
Illustration 7 :	Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC. ....	24
Illustration 8 :	Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000). .....	25
Illustration 9 :	Scénarios d'émissions mondiales de Gaz à effet de Serre, et du réchauffement moyen prévisible en surface (à droite) (d'après GIEC, 2007). .....	25
Illustration 10 :	Projections pour le niveau moyen de la mer pour le XXI <sup>e</sup> siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. ....	26
Illustration 11 :	Projections de hausse du niveau marin pour la période 1990-2100, basées sur les projections de températures du GIEC pour les scénarios B1, A2 et A1FI. ....	27
Illustration 12 :	Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la hausse du niveau marin d'ici 2100 par différents auteurs en utilisant les scénarios de températures du GIEC .....	28
Illustration 13 :	Modèle conceptuel de la vulnérabilité des aquifères (action COST 620, 2004). .....	32
Illustration 14 :	Méthode de vulnérabilité intrinsèque à index. ....	35
Illustration 15 :	Tableau de synthèse des poids et rang de la méthode GALDIT .....	41
Illustration 16 :	Exemple de carte de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour (A) le niveau de la mer actuel et (B) pour une élévation du niveau marin de 0,5 m (Lobo Ferreira <i>et al.</i> , 2005). ....	42
Illustration 17 :	Carte de vulnérabilité intrinsèque et anthropique des aquifères cotiers de la région Bretagne (Petit, 1996). .....	42
Illustration 18 :	Carte de vulnérabilité des masses d'eau vis-à-vis de l'intrusion saline en région Corse (Frissant et Bodéré, 2009). ....	43
Illustration 19 :	Nombre de références bibliographiques par région cotière .....	47
Illustration 20 :	Type d'approche pour l'investigation de l'intrusion saline. ....	47
Illustration 21 :	Conclusion des études compte à l'existence d'une intrusion saline récente par la mer .....	48
Illustration 22 :	Aquifères côtiers de la partie ouest du Languedoc-Roussillon. ....	50
Illustration 23 :	Aquifères cotiers de la partie centrale du Languedoc-Roussillon. ....	50
Illustration 24 :	Aquifères cotiers de la partie sud du Languedoc-Roussillon. ....	51
Illustration 25 :	Schéma de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale .....	58
Illustration 26 :	Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte	

de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale.....	59
illustration 27 : Cartographie et tableau de la répartition des surfaces par altitude (0 à 1 m : risque de submersion permanente et temporaire (retour d'un événement tous les 20 ans) pour l'ensemble des côtes de Métropole .....	62
Illustration 28 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi-décennales.....	63
Illustration 29 : Exemple de la plaine de Caen (MNT sur 5 km).....	63
illustration 30 : Exemple de la plaine de Caen (pente sur 5km) et sensibilité des aquifères .....	64
Illustration 31 : Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine.....	66
illustration 32 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la région Nord Pas de Calais et Picardie.....	67
Illustration 33 : Carte des principaux aquifères – Région Nord Pas de Calais .....	68
Illustration 34 : Carte de dépassement des normes de potabilité sur des captages AEP (concentrations en chlorures et en conductivité) dans la zone de Caen .....	71
Illustration 35 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne.....	73
Illustration 36 : Carte géologique simplifiée, Sud de la Vendée (Extrait du Rapport BRGM/RP-55505-FR).....	75
illustration 37 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine.....	78
Illustration 38 : Carte des entités BDLISA : Calcaires du Bathonien affleurants, couverts par les Argiles à silex et les Marnes du Callovo-Oxfordien .....	80
Illustration 39 : Carte des 3 classes de type d'aquifère méthode GALDIT .....	81
Illustration 40 : Carte des 3 classes de conductivité hydraulique de l'aquifère méthode GALDIT .....	82
Illustration 41 : Carte des 4 classes de hauteur de la piézométrie par rapport au niveau marin selon la méthode GALDIT.....	83
Illustration 42 : Carte des 4 classes de distance par rapport à la côte méthode GALDIT .....	84
illustration 43 : Carte des mesures de salinité dans la zone d'étude .....	85
Illustration 44 : Carte des épaisseurs de la nappe des calcaires du Bathonien.....	86
Illustration 45 : Carte résultant des 6 paramètres GALDIT : 3 classes de vulnérabilité aux intrusions salines.....	87
Illustration 46 : Description schématique de la caractérisation de la vulnérabilité d'un forage à l'intrusion saline. ....	89
Illustration 47 : Schématisation de l'impact théorique du déplacement du trait de côte sur la piézométrie.....	89
Illustration 48 : Situation de la nappe contenue dans les calcaires jurassiques de la Gardiole au cours des basses eaux de 2002 et des forages exploitant cette nappe. ....	90

Illustration 49 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les calcaires jurassiques de la Gardiole, au cours des basses eaux de 2002. ....	91
Illustration 50 : Localisation des ouvrages implantés dans les calcaires jurassiques et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente. ....	91
Illustration 51 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel, en 2003. ....	93
Illustration 52 : Localisation des ouvrages implantés dans la nappe de Mauguio-Lunel et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente. ....	93
Illustration 53 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Hérault, en 1972. ....	95
Illustration 54 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Hérault et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente. ....	96
Illustration 55 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Orb, en 1976. ....	97
Illustration 56 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Orb et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente. ....	98
Illustration 57 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Aude, en 1965. ....	100
Illustration 58 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Aude et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente. ....	100
Illustration 59 : Situation géographique de la zone d'étude. ....	105
Illustration 60 : Coupe schématique est-ouest. ....	106
Illustration 61 : Représentation 3D de la géométrie du modèle. ....	108
Illustration 62 : Diagramme de dispersion. ....	109
Illustration 63 : Chronique piézométrique entre 2006 et 2010 au piézomètre PGE3B (Centrale EDF). ....	110
Illustration 64 : Répartition des ouvrages exploitant la nappe des graves et celle de l'Eocène. ....	112
Illustration 65 : Diagramme de dispersion obtenue suite au processus de calage en régime transitoire. ....	113
Illustration 66 : Sens d'écoulement de la nappe au repos. ....	114
Illustration 67 : Sens d'écoulement de la nappe en pompage. ....	114

Illustration 68 : Évolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge. ....	115
illustration 69 : Répartition de la salinité dans la couche 3 au repos. ....	116
Illustration 70 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.....	117
Illustration 71 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.....	118
Illustration 72 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.....	119
Illustration 73 : Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin.....	120
Illustration 74 : Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude .....	122
Illustration 75 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger).....	123
Illustration 76 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger) .....	123
Illustration 77 : Potentiels imposés au niveau de l'Océan .....	124
Illustration 78 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville .....	125
Illustration 79 : Localisation des piézomètres virtuels. ....	126
Illustration 80 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels. ....	127
Illustration 81 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide) .....	129
Illustration 82 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2005 (année sèche) .....	130

## Liste des annexes

Annexe 1 : Références de la BD Bibliographique .....	139
Annexe 2 : Cartographie des forages pour l'AEP et des conductivités électriques .....	147

# 1. Introduction

Les aquifères côtiers ou littoraux sont en contact avec la mer ou l'océan qui constitue leur limite aval ; ils sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles tout comme sous influence anthropique. Cette sensibilité est donc liée à des facteurs internes (le type d'aquifère, les propriétés hydrodynamiques, l'hétérogénéité) et à des facteurs externes : l'exploitation pour différents usages (alimentation en eau potable, tourisme, agriculture, industrie), la recharge (précipitation efficace), le niveau marin.

Les zones côtières font partie des secteurs les plus prisés par le tourisme ; elles sont également le lieu de sédentarisation des retraités français ou nord-européens. Elles constituent également des secteurs fortement convoités pour le maraîchage, l'arboriculture, en particulier sur la façade méditerranéenne (douceur climatique). Les aquifères y représentent très souvent des ressources en eau importantes, tandis que les eaux de surface peuvent être sujet à des forts étiages en été. Les enjeux de développement économique sont importants sur ces territoires.

En particulier, une augmentation du niveau marin associée aux changements climatiques (modification de la pression atmosphérique, expansion des océans et mers lors de leur réchauffement, modification de leur salinité et fonte des calottes glaciaires et des glaciers) constitue un des processus significatifs qui va jouer un rôle sur l'intrusion saline (Werner et Simmons, 2009). Ainsi selon les travaux du GIEC (2007), le réchauffement planétaire conduirait en 2100 à une augmentation du niveau marin comprise entre 110 et 880 mm, et à une migration du biseau salé. Les conditions d'exploitation ainsi que les conditions climatiques (selon les différents scénarios considérés de changement climatique : des modifications du niveau marin (augmentation du niveau marin, avec recul de la ligne de rivage et réduction de la surface émergée), des précipitations, de la température) auront comme conséquence de modifier les conditions aux limites des aquifères côtiers.

L'impact d'une remontée de niveau marin et des modifications des conditions de recharge sur les aquifères côtiers nécessitent de procéder à un diagnostic à l'échelle métropolitaine. Or aucune analyse selon une approche systématique généralisée n'existe à ce jour, seul des cas d'études particuliers (Werner et Simmons, 2009). Ainsi, ce diagnostic passe d'une part par une mise à jour de l'état des lieux concernant les aquifères côtiers, par une recherche bibliographique, une cartographie de la vulnérabilité et d'autre part par des simulations sur un ou deux aquifères tests, afin d'apprécier les conséquences d'une remontée de niveau marin. A l'issue de cette étude, il s'agit de proposer des recommandations en termes de suivi et de gestion des aquifères les plus vulnérables, mais également en termes de solutions techniques de type gestion active, sur la base des analyses effectuées au niveau de deux aquifères, un sur la côte atlantique et l'autre sur la côte méditerranéenne. Des modalités pour généraliser ces recommandations pour les différentes configurations possibles d'aquifères côtiers seront formulées.

Dans le cadre de l'action n° 4 « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole » de la convention ONEMA-BRGM 2010, des premières actions ont été menées et font l'objet de ce rapport d'avancement.

## 2. Synthèse de l'état de l'art concernant l'intrusion saline des aquifères côtiers

Dans les zones littorales, les aquifères sont 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 celle de l'eau salée « flotte » au-dessus de l'eau marine souterraine. L'eau salée d'une densité moyenne de 1,025 kg/l a ainsi tendance à pénétrer vers les terres sous l'action du gradient de densité.

Dans le cadre d'un aquifère libre de type poreux, les écoulements dominants sont horizontaux, conséquences d'un gradient hydraulique faible dans des zones basses. Le niveau piézométrique est influencé par la géométrie et donc la topographie ainsi que par les propriétés hydrodynamiques et les conditions d'exploitation. La mise en place des dépôts littoraux (cône de déjection, prismes d'accrétion) ne favorise pas, de plus l'existence d'une forte anisotropie et la présence d'écoulements à composante dominante verticale. Les écoulements d'eau souterraine sont orientés en direction de la mer ; l'eau douce repose ou « flotte » sur l'eau marine souterraine. L'intrusion d'eau salée a de manière générale la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, d'où son appellation commune de « biseau salé ». Ce contact entre ces eaux de densité différentes va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique mais également suivant l'exploitation de l'aquifère et sa recharge par les précipitations. Ce contact ne constitue par une interface nette, et du fait de la miscibilité des fluides de densité différente, une zone de transition va prendre place.

Des solutions analytiques ont été développées afin de représenter cette interface eau douce / eau salée. On citera en première approximation le modèle de Ghyben-Herzberg, qui permet d'examiner le cas d'un aquifère côtier libre, isotrope, soumis à une recharge en régime permanent (Illustration 1).

Selon les travaux de Ghyben (1888) et Herzberg (1901), la profondeur  $H$  de l'interface sous le zéro (référentiel, NGF en France métropolitaine), est déterminée comme suit, considérant que :

- les deux fluides ne sont pas miscibles ;
- les deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux, dans un aquifère unique ;
- leur contact est supposé être représenté par une interface nette.

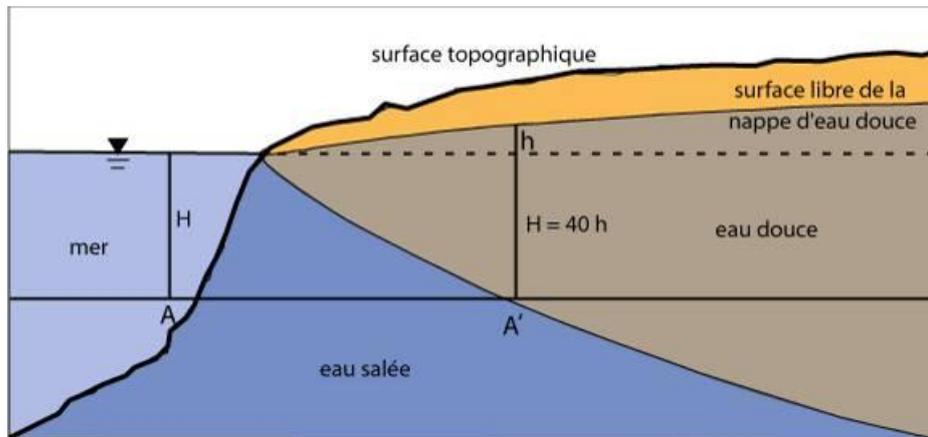


Illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al., 2005).

Sur une ligne horizontale AA' (illustration 1), l'égalité des pressions de l'eau salée et de l'eau douce s'écrit :

$$H \cdot d_s = (H + h) \cdot d \quad \text{Eq. 1}$$

avec  $d_s$ , la masse volumique de l'eau salée ;  
 $d$  la masse volumique de l'eau douce ;  
 $h$  la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point A ;  
 $H$  la hauteur de l'interface

La densité de l'eau douce étant égale à 1, on obtient :

$$H \cdot (d_s - 1) = h \quad \text{Eq. 2}$$

et

$$H = \frac{h}{d_s - 1} \quad \text{Eq. 3}$$

La masse volumique de l'eau de mer varie en fonction de sa salinité. Pour une concentration équivalente de NaCl de 36 g/l, elle est égale à 1,025. Cette valeur représente la moyenne de salinité des mers et des océans.

Aussi, si  $d_s = 1,025$ , on a :

$$H = \frac{h}{0,025} = 40h \quad \text{Eq. 4}$$

Ainsi, en un point quelconque de l'aquifère, l'interface entre l'eau douce et l'eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer.

Si elles donnent une approximation pratique de la position du biseau salé, les hypothèses du principe de Ghyben-Herzberg présentent les limites suivantes :

- les fluides, l'eau douce et l'eau salée, sont miscibles ;
- ces fluides sont soumis à des mouvements hydrodynamiques ;
- les écoulements de la nappe ne sont pas pris en compte ;
- un aquifère est rarement homogène et unique.

Les limites évoquées ci-dessus conduisent à la mise en défaut de l'approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg à proximité du bord de mer ou d'océan.

En effet, la présence d'un écoulement vers la mer dans une nappe libre côtière est susceptible de provoquer un déplacement vers la mer de la position de l'interface, pour permettre au flux d'eau douce de s'écouler (Illustration 2).

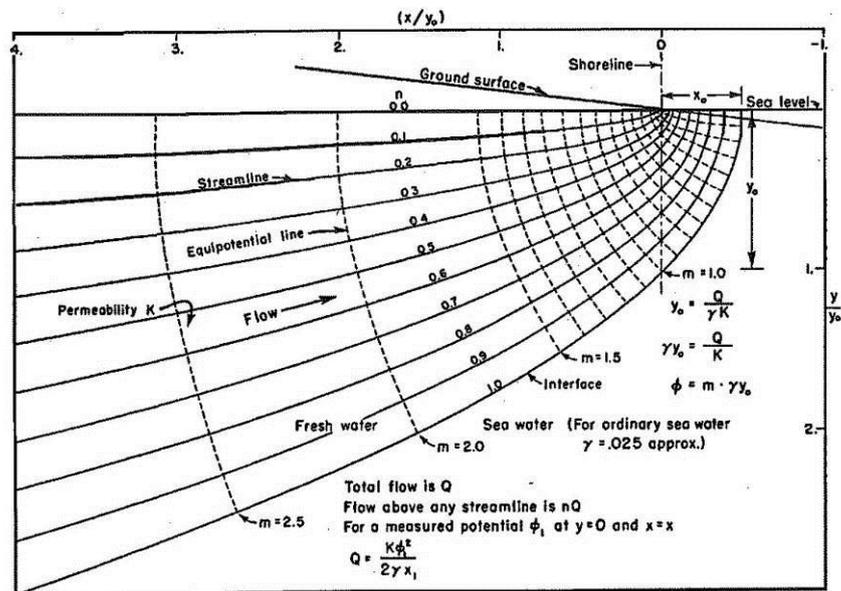


Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover, 1959).

Glover (1959) a proposé une description mathématique de ce phénomène qui permet de déterminer la position du biseau salé dans cette configuration et, en particulier, de calculer la distance à la côte de l'interface eau douce-eau salée, en mer ( $x_0$  sur Illustration 2). Ce formalisme est fonction de la perméabilité de l'aquifère et du débit de la nappe.

À partir de l'expression d'un potentiel de vitesse  $\Phi$  d'écoulement dans la nappe :

$$\Phi = \frac{d_s - d_d}{d_d} Kh \quad \text{Eq. 5}$$

où  $d_d$  est la densité de l'eau douce et  $K$  est la perméabilité de l'aquifère, la position de l'interface peut être déduite de l'équation suivante :

$$y^2 = \frac{2Qx}{K\left(\frac{d_s - d_d}{d_d}\right)} + \frac{Q^2}{K^2\left(\frac{d_s - d_d}{d_d}\right)^2} \quad \text{Eq. 6}$$

d'où il tire la distance à la côte de l'exutoire en mer de l'eau douce :

$$x_0 = \frac{Q}{2K\left(\frac{d_s - d_d}{d_d}\right)} \quad \text{Eq. 7}$$

avec  $Q$  le débit de la nappe par unité de longueur.

Ce formalisme permet donc une description théorique plus réaliste de la position du biseau salé pour une nappe côtière libre, au sein d'un aquifère homogène. Il conduit aussi à situer le biseau salé à une profondeur moindre que celle obtenue avec le formalisme de Ghyben-Herzberg.

Les équations proposées font cependant appel à des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères pas toujours connues comme la perméabilité et le débit d'écoulement de la nappe. De plus, les approches de Ghyben-Herzberg et celles du type de Glover se différencient surtout à proximité du bord de mer, comme le montre Van der Veer (1977). Ce dernier montre que pour un aquifère de perméabilité de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s, alimenté par une pluie de 730 mm/an, la position du biseau salé donnée par la formulation de Ghyben-Herzberg est à peine 0,5 % plus profonde que celle de Glover (considérée comme une solution exacte). La valeur du  $x_0$  de l'illustration 3 obtenue est égale à 25 m.

Werner & Simmons (2009) indique que l'influence d'une augmentation du niveau marin sur les aquifères côtiers a été abordée uniquement à ce jour sous un angle d'étude de site spécifique et non sous un angle d'analyse systématique généralisée. Malgré l'importance potentielle des conséquences d'une remontée de niveau marin sur les aquifères côtiers, peu d'études quantitatives ont porté sur ce sujet (Meisler *et al.*, 1984 ; Oude Essink 1999 ; Sherif & Singh 1999 ; Bobba, 2002). Ces études sont basées sur des études de modélisations numériques sur des sites spécifiques, sans pouvoir facilement conduire à des conclusions générales sur la nature des impacts. Les conséquences d'une même augmentation du niveau marin selon Sherif & Singh (1999) sont différentes en termes d'impact sur la modification de la progression du biseau salé dans les terres. Ainsi, l'article de Werner & Simmons (2009) s'est attaché à étudier la nature de l'amplitude de la migration de l'interface eau douce-eau de mer et des contrôles hydrogéologiques, à l'aide de deux modèles conceptuels :

- « systèmes à flux contrôlé » : l'écoulement de la nappe vers la mer est maintenu constant, malgré l'élévation du niveau de la mer ; ceci implique donc que l'augmentation du niveau de l'aquifère est concomitante à la montée du niveau de la mer (= maintien des gradients hydrauliques) ;

- « systèmes à charge hydraulique contrôlée » :  $h$  est constant malgré l'augmentation du niveau marin. C'est évident que sous ces conditions, une modification du niveau marin va induire une réduction du flux d'eau souterrain en direction de la mer, le gradient hydraulique étant réduit. L'hypothèse est faite de plus, que la charge hydraulique est constante à une distance de 2 km de la côte, dans ce cas.

La migration de l'interface est quantifiée à partir des variables suivantes : la puissance de l'aquifère, le taux de recharge compris entre 40 et 120 mm/an, sa conductivité hydraulique ( $10^{-4}$  m/s) et le taux de décharge de l'aquifère vers la mer.

Les conditions aux limites considérées dans le cas de l'analyse de ces deux types de système sont :

- une hauteur piézométrique donnée sur la côte ;
- pas d'écoulement à une certaine distance de la côte ;
- une recharge uniforme ;
- un écoulement à l'interface,
- une position méconnue de l'interface.

L'illustration 3 ci-dessous représente le modèle conceptuel de Werner & Simmons (2009).

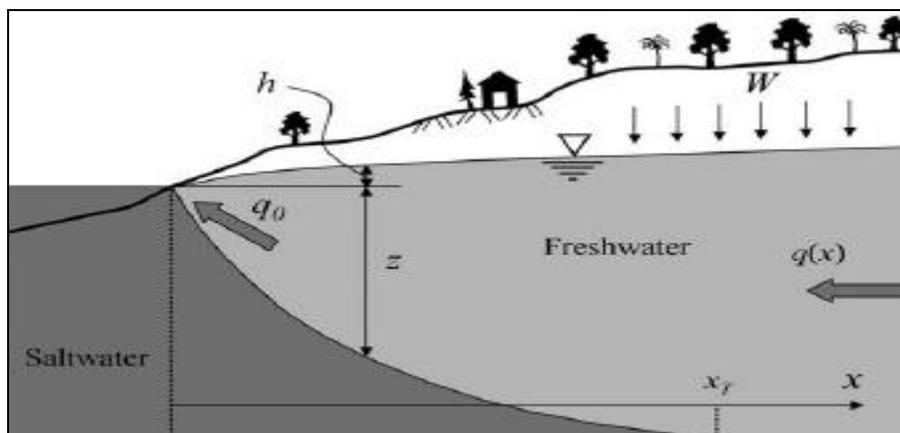


Illustration 3 : Interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse (Werner & Simmons, 2009).

$q_0$  est la décharge de l'aquifère vers la mer par unité de longueur,  $W$  est la recharge uniforme de l'aquifère (en m/s)

Dans le cas des « systèmes à flux contrôlé », la valeur maximum de  $x_T$ , distance maximale de pénétration saline (Illustration 3), est de 45 m pour une élévation du niveau marin de 1,5 m, avec des valeurs de recharge comprise entre 40 et 120 mm/an, une conductivité hydraulique de  $1,16 \cdot 10^{-4}$  m/s et une profondeur d'aquifère (30 et 50 m).

Dans le cas de « systèmes avec une charge hydraulique sous contrôle », l'augmentation du niveau marin est à l'origine dans ce cas, d'une diminution du

gradient hydraulique vers la mer ; la migration de l'interface eau douce/eau salée serait alors de l'ordre de plusieurs centaines de mètres à 1 km pour une élévation de 1,5 m du niveau marin.

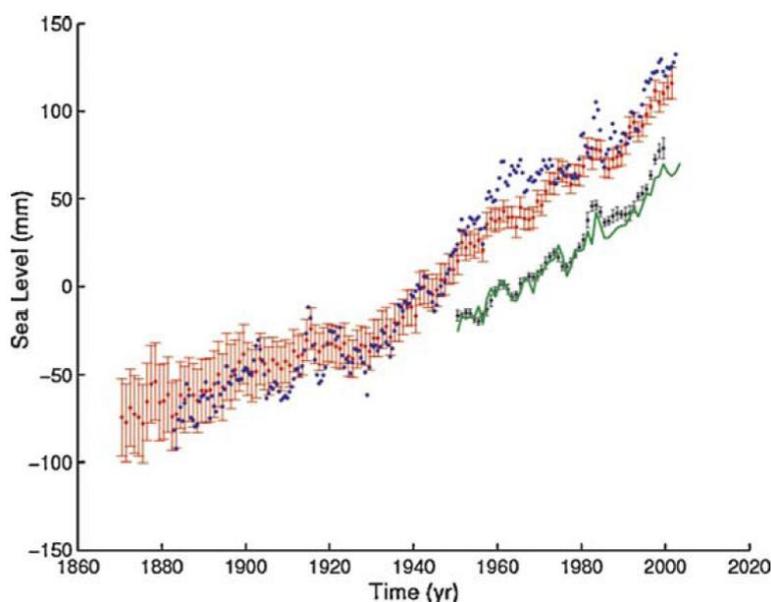
La simulation de deux cas à partir d'une modèle conceptuel permet ainsi de montrer qu'une faible remontée du niveau marin, peut entraîner une progression significative de l'interface eau douce/eau salée, sans prendre en compte une influence anthropique. L'évaluation des hétérogénéités spatiales et temporelles des paramètres des aquifères côtiers vis-à-vis d'une augmentation du niveau marin n'a pas été envisagée selon cette approche. Si ces analyses sont intéressantes conceptuellement, de par leur analyse de sensibilité, elles ne permettent pas de proposer une méthode facilement généralisable et applicable à l'échelle de la France métropolitaine, comportant 5 500 km de côtes sur les façades de la Manche, atlantique et méditerranéenne.

### 3. Synthèse de l'état de l'art concernant la remontée du niveau marin induite par le changement climatique

Dans le rapport BRGM/P-58289-FR du BRGM « Contribution au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral » pour le compte du MEEDDM en 2010, une synthèse concernant l'évaluation du niveau marin en contexte actuel et dans un contexte de changement climatique a été rédigée. Cette synthèse sert de base de rédaction de ce chapitre. De plus, les travaux du GIEC (2000 et 2007) ont été consultés.

#### 3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ÉLEVATION SÉCULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITÉ RÉGIONALE DU NIVEAU MARIN

Entre 1870 et 2004, le niveau marin moyen global aurait augmenté de 1,7 mm/an ( $\pm 0,3$  mm/an). Cette tendance à l'augmentation n'est pas linéaire ; des accélérations de l'augmentation sont observées en particulier entre 1993 et 2005 avec une élévation du niveau marin moyen de 3,3 mm/an, alors qu'entre 2005 et 2008, elle est très faible (Cazenave & Nerem, 2004) (Illustration 4).



*Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al., 2008).  
 en rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006)  
 et en vert : données de Holgate et al. (2006).*

Les causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen observée s'explique par : (i) une dilatation thermique des océans liée à leur réchauffement et par (ii) des décharges de masses entre les différents lieux de stockage d'eau : glaciers, calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, eaux continentales.

À noter que la fonte de la banquise ne participe pas directement à l'élévation du niveau marin moyen, la contribution la plus significative étant celle liée à la fonte des glaciers de montagne, suivie par l'expansion thermique des océans, comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous issus des travaux du GIEC de 2007.

<b>Cause de l'élévation séculaire du niveau marin moyen</b>	<b>1961-2003</b>	<b>1993-2003</b>
Expansion thermique	25%	30%
Fonte des glaciers et des couvertures glacées	45%	28%
Fonte de la calotte du Groenland	5%	8%
Fonte de la calotte arctique	13%	8%
<b>Total expliqué</b>	<b>1,1 mm/an</b>	<b>2,8 mm/an</b>
<b>Total observé</b>	<b>1,8 mm/an</b>	<b>3,1 mm/an</b>

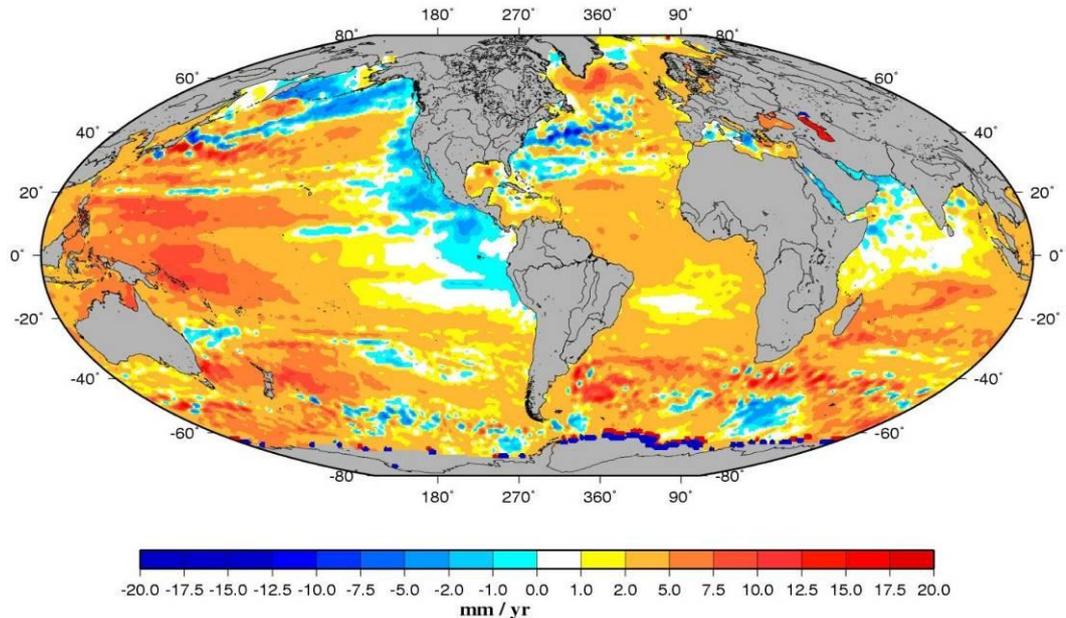
*Illustration 5 : Explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué (Source : GIEC, 2007).*

Entre 2003 et 2008, en dépit du ralentissement de l'élévation du niveau marin moyen observée, la composante associée à la fonte des calottes polaires aurait augmenté de 80 % (Rignot *et al.*, 2008 ; Cazenave *et al.*, 2009). De plus, les récents travaux de Wada *et al.* 2010, à l'échelle des zones arides à semi-arides, ont permis d'estimer la contribution des eaux souterraines liés à leur exploitation, à l'augmentation du niveau marin. Une partie des eaux souterraines utilisées principalement pour l'irrigation va terminer sa course dans les océans, par ruissellement, mais aussi principalement via l'évaporation et les précipitations ; la contribution à l'augmentation du niveau des océans est estimée à 0,8 ( $\pm$  0,1) mm par an, ce qui correspond à 25 ( $\pm$  3) % de l'augmentation totale des océans (3,1 mm/an).

### **3.2. PRÉDICTIONS À PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODÈLES CLIMATIQUES**

L'élévation séculaire du niveau marin n'est pas uniforme à l'échelle du globe. Les mesures effectuées à l'aide des satellites au cours de la période 1996 à 2006, mettent en évidence une variabilité spatiale et temporelle. La variation régionale est essentiellement liée aux variations de température, et plus localement de salinité de l'océan (Lombard *et al.*, 2008) (illustration 6).

Pour estimer l'élévation du niveau marin, la modélisation du climat cherche à représenter les processus physiques de fonte des calottes polaires et d'accumulation de glace, quitte à paramétrer certains phénomènes. Ces modélisations indiquent que le changement climatique s'accompagnerait de plus de précipitations sur l'Antarctique (Krinner, 2007). On peut d'ailleurs noter qu'entre 1993 et 2003, la calotte Antarctique a moins fondu qu'entre 1961 et 2003, ce qui est une manifestation de la forte variabilité décennale de ces phénomènes de fonte.



*illustration 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) (d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave et al., 2008).*

Le GIEC a publié en 2000 (GIEC, 2000) un rapport décrivant différents scénarios équiprobables d'émissions futures de gaz à effet de serre : les différents scénarios climatiques sont regroupés en 4 « canevas » : A1, A2, B1 et B2 (Illustration 7). Ils diffèrent de plus en plus au cours du temps, et de manière irréversible.

Le canevas A1 : Croissance économique très rapide dans le futur, avec un pic démographique vers la moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Il est lui-même scindé en trois groupes décrivant les directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique.

- A1FI: prédominance des combustibles fossiles ;
- A1B : équilibre entre combustibles fossiles et non fossiles ;
- A1T : prédominance des combustibles non fossiles.

Le canevas A2 : monde très hétérogène (autosuffisance et préservation des identités locales). Il y a un accroissement continu de la population mondiale : la croissance économique et le développement technologique sont plus lents que dans les autres canevas.

Le canevas B1 : même scénario démographique que pour le canevas A1 mais avec une orientation vers une économie de services et d'information, et une meilleure utilisation des technologies propres et des ressources. Des solutions mondiales sont orientées vers la viabilité économique, sociale et environnementale.

Le canevas B2 : Le monde décrit met l'accent sur des solutions locales vers la viabilité économique sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans le canevas A2. L'évolution technologique est moins rapide que dans les canevas B1 et A1.

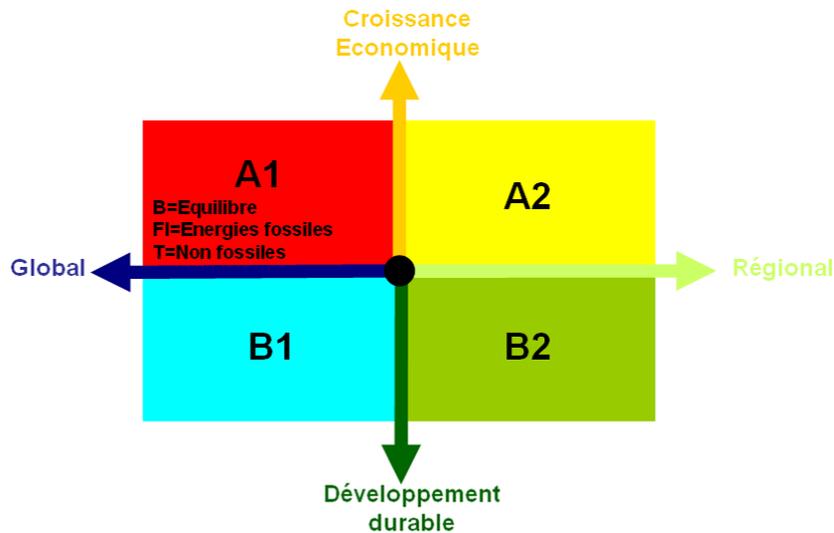


Illustration 7 : Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC.

Ces 4 canevas décrivent des futurs divergents représentés par 40 scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios).

Ils englobent les incertitudes concernant les paramètres naturels de la globosphère (réponse des océans et de la biosphère continentale), les caractéristiques anthropiques futures (augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub>, démographie, développement économique et technologique). Le GIEC précise que ces 40 scénarios ont la même probabilité de réalisation future.

Parmi tous ces scénarios, certains sont dits harmonisés (mention SH) : ils partagent des hypothèses harmonisées sur la population mondiale, le produit mondial brut et l'énergie finale. L'indication SO signifie que ces scénarios sont basés sur des incertitudes dans les forces motrices, au-delà de celles harmonisées. Pour chacun des 6 groupes de scénarios, un scénario d'illustration (toujours harmonisé) est fourni. Il y a enfin, pour chacune des 4 familles de scénarios un « scénario d'illustration marqueur » (Illustration 8).

La représentation de l'évolution future des émissions mondiales de gaz à effet de serre ainsi que du réchauffement associé à chacun des canevas est représenté ci-dessous (Illustration 9).

Il faut noter que certains auteurs estiment qu'à l'heure actuelle (Canadell *et al.*, 2007) les émissions de gaz à effet de serre suivent de près le scénario le plus pessimiste (A1FI).

Les différentes modélisations (précipitations, élévation du niveau marin...) effectuées dans les publications décrites dans ce rapport, utilisent ces scénarios climatiques du GIEC afin de proposer un ordre de grandeur de valeurs s'échelonnant entre le scénario le plus optimiste (B1) et le scénario le plus pessimiste (A1FI).

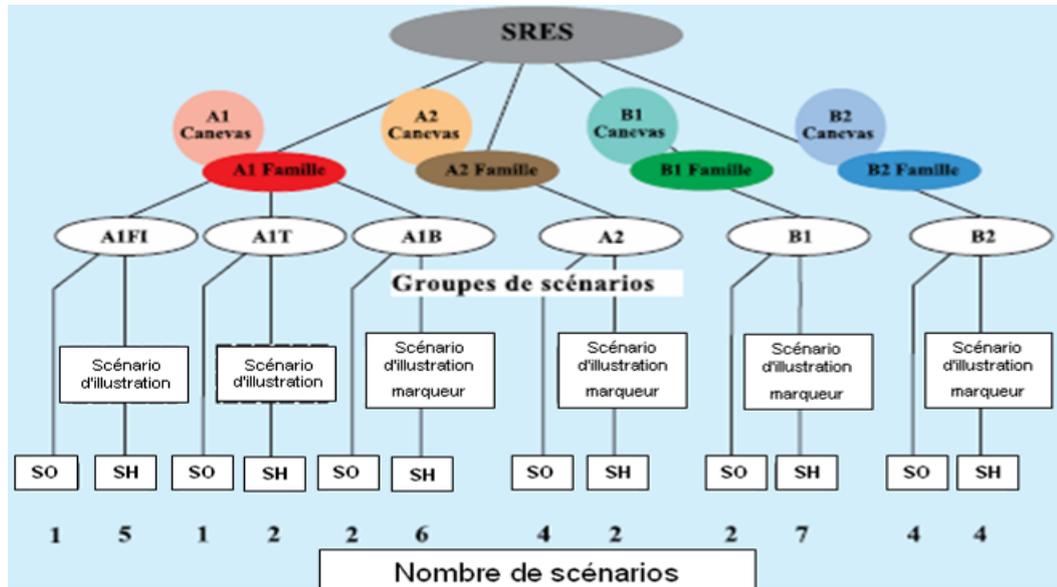


Illustration 8 : Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000).

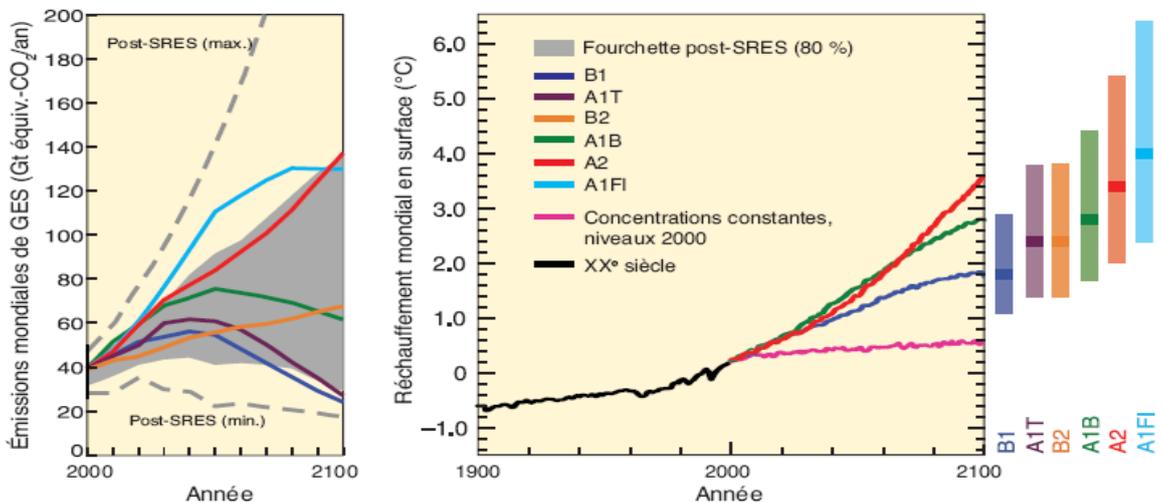


Illustration 9 : Scénarios d'émissions mondiales de Gaz à effet de Serre, et du réchauffement moyen prévisible en surface (à droite) (d'après GIEC, 2007).

La connaissance de ces scénarios est importante, pour un objectif de sélection à la fois des scénarios optimistes et pessimistes pour la hausse du niveau marin et l'évolution des conditions atmosphériques.

Ces modélisations conduisent le GIEC (2007) à prédire une élévation modérée du niveau de la mer en 2100, allant de 18 à 59 cm selon les scénarios (Meehl *et al.*, 2007) (Illustration 10). Il faut cependant noter le traitement très approximatif de la fonte des calottes dans ces modèles, dont aucun ne prenait en compte une accélération des processus de fonte liée à la dynamique des calottes.

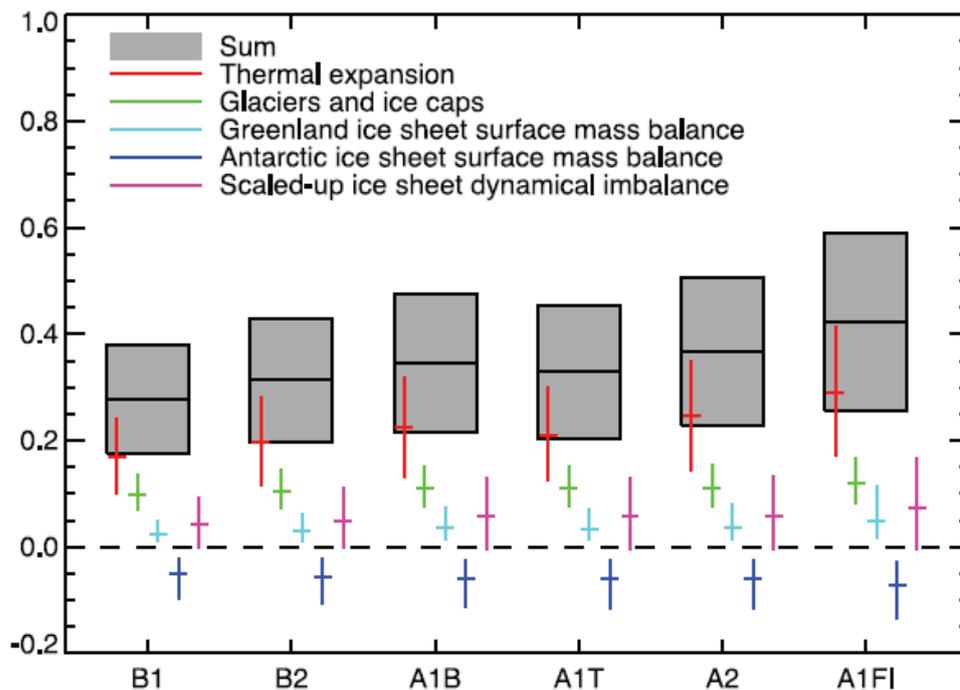


Illustration 10 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le XXI<sup>e</sup> siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques.

Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grisées représentent les incertitudes (5 % et 95 %) liées à la modélisation climatique. Source : Meehl *et al.*, 2007

Ces approches de modélisation du climat permettent de régionaliser l'élévation du niveau marin moyen liée aux effets thermiques. On peut noter que pour ce qui concerne les côtes françaises, l'écart par rapport à la moyenne n'excéderait pas 10cm en Atlantique (Meehl *et al.*, 2007). En Méditerranée, les résultats de Tsimplis *et al.* (2009) indiquent qu'il pourrait ne pas y avoir de hausse du niveau marin par dilatation thermique sur les côtes françaises méditerranéennes, compte tenu des effets renforcés d'évaporation. Ce résultat repose sur une seule modélisation et appelle donc d'autres études, mais il est révélateur de la situation particulière de la Méditerranée.

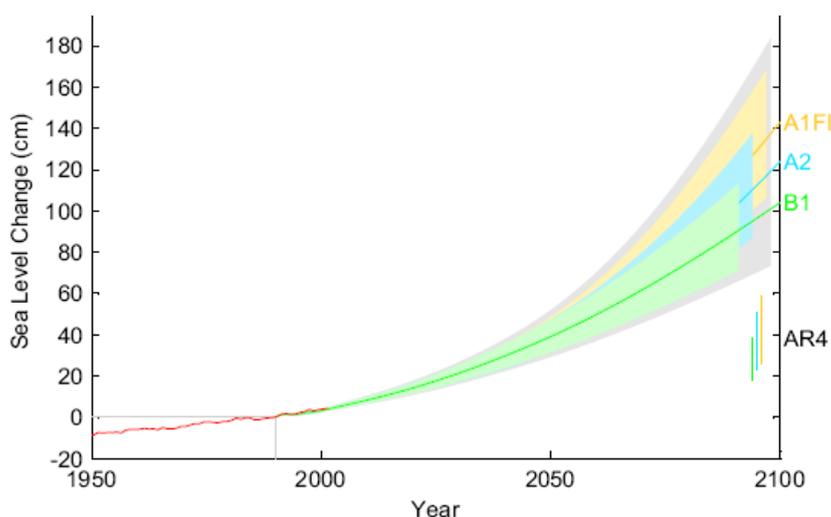
Ainsi, plusieurs estimations coexistent actuellement pour l'élévation du niveau marin. Les estimations basses (Meehl, 2007) vont de 0.18 à 0.59 m pour 2100. D'autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l'ordre du mètre (Rahmstorf, 2007 ; Grinsted, 2009) ou au-delà (Hansen, 2007). Dans tous les cas, il convient de noter que l'on passe d'un mode dans lequel le niveau marin moyen a peu évolué depuis 5 000 ans à un mode dans lequel le niveau marin variera de manière plus ou moins accélérée pendant plusieurs siècles. Cette remarque conduit à recommander de

prendre en compte le fait que l'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement après 2100 (pendant encore 1 000 ans *a priori* selon AR5).

Vermeer et Rahmstorf (2009) présentent une amélioration de leurs modélisations, afin d'obtenir des valeurs révisées de hausse du niveau marin d'ici 2100. Etant donné que certaines composantes du niveau marin s'ajustent rapidement au changement de température, ils proposent d'étendre leur méthode semi-empirique avec un terme supplémentaire caractérisant la réponse rapide.

En testant ce nouveau modèle en comparaison avec les données d'un modèle climatique du dernier millénaire ainsi qu'avec les données de niveau marin et de température de 1880-2000, il semblerait qu'il soit plus performant que leur premier modèle de 2007.

Le modèle est appliqué au XXI<sup>e</sup> siècle en utilisant les projections de températures du GIEC (4<sup>e</sup> rapport). Les projections varient entre 75 et 190 cm pour la période 1990-2100, elles sont donc supérieures à celles effectuées précédemment en 2007 par Rahmstorf (Illustration 11).



*Illustration 11 : Projections de hausse du niveau marin pour la période 1990-2100, basées sur les projections de températures du GIEC pour les scénarios B1, A2 et A1FI.*

Les projections du GIEC dans leur 4<sup>e</sup> rapport (AR4) sont indiquées par des barres en bas à droite. (Vermeer & Rahmstorf, 2009).

Les réponses non-linéaires de l'écoulement glaciaire durant le XXI<sup>e</sup> siècle seront sans doute en augmentation : ainsi l'approche linéaire présentée ici par Vermeer et Rahmstorf (2009) sous-estime peut-être l'élévation du niveau marin.

Pfeffer *et al.* (2008) ont utilisé une approche cinématique afin de déterminer les vitesses d'écoulement des glaciers antarctiques et groenlandais nécessaires pour atteindre différents niveaux marins d'ici 2100. Suivant les conditions glaciologiques considérées (fonte plus ou moins rapide de glaciers), ils suggèrent une augmentation du niveau marin comprise entre 0,8 et 2,0 m. La limite supérieure de 2 m correspondrait au cas où toutes les variables accéléreraient rapidement, et une valeur

supérieure à 2 m serait, d'après leur approche, non concevable physiquement. La valeur de 80 cm qui tient déjà compte de conditions accélérées serait plus plausible.

Certains auteurs mentionnent également un impact possible de la surexploitation des aquifères dans les régions arides sur la hausse du niveau marin. Domingues et al. (2008) estiment une contribution possible de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm/an soit d'un peu plus de 3 cm d'ici 2100 et Wada *et al.* (2010) une contribution pouvant atteindre 25 % de l'augmentation annuelle du niveau marin.

Aux vues des différentes publications sur le sujet (Illustration 12) ainsi que des rapports du GIEC, il est possible de donner une fourchette de l'estimation de l'élévation du niveau marin en 2100 : de 0,2 à 2 m. La valeur de 5m proposée par (Hansen, 2007) ne sera pas retenue dans cette étude. Sa méthode a en effet été rejetée par le travail de Pfeffer *et al.* (2008), qui montre qu'une valeur supérieure à 2 m n'est pas concevable physiquement. Quant aux estimations du GIEC (0,2 à 0,6 m) elles sont souvent jugées minimalistes par les auteurs cités précédemment puisque leur modèle linéaire ne tient pas compte d'un éventuel emballement des écoulements glaciaires.

Les estimations les plus récentes (2008, 2009) sont assez concordantes entre elles et considèrent en moyenne une limite inférieure (suivant un scénario optimiste des émissions futures de gaz à effets de serre) de l'ordre de 0,8m et une limite supérieure de 1,8 m (scénario A1FI : le plus pessimiste). Il faut également souligner qu'à l'heure actuelle les émissions de gaz à effet de serre suivent le scénario le plus pessimiste du GIEC (A1FI).

Auteurs	Fourchette de la hausse du niveau marin envisagée d'ici 2100 par l'auteur	Commentaires sur la méthode, et incertitudes
GIEC, 2007	0,2 à 0,60 m (0,6 m n'est pas une limite supérieure)	-Processus linéaires. -Ne prend pas en compte : incertitudes des rétroactions du cycle du carbone ni les modifications futures des écoulements glaciaires.
Rahmstorf, 2007	0,5 à 1,4 m	Méthode semi-empirique : -élévation du niveau marin proportionnelle à l'augmentation de T. -L'accélération observée de la fonte de la banquise n'est pas prise en compte.
Hansen, 2007	5 m	-Méthode empirique : Il considère que le taux de contribution de la banquise à l'élévation du niveau marin double chaque décade. -Valeur peu concevable physiquement
Pfeffer <i>et al.</i> , 2008	0,8 et 2 m	Approche cinématique des écoulements des glaciers groenlandais et antarctiques : 2 m constitue une valeur maximale.
Rahmstorf, 2009	0,75 et 1,9 m	Rajout d'un terme à réponse rapide (quasi instantanée) à l'augmentation de température.
Grinsted, 2009	0,9 à 1,6 m	Reconstitution du niveau marin et calage du modèle sur 2000 ans.

*Illustration 12 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la hausse du niveau marin d'ici 2100 par différents auteurs en utilisant les scénarii de températures du GIEC.*

Cependant les incertitudes sont encore très nombreuses (temps de réponse des océans, rétroactions, phénomènes d'emballement des écoulements glaciaires, élévation non homogène à l'échelle de la planète, etc.).

Ainsi, à partir de cette synthèse, on peut retenir les scénarios suivants dans le cadre de cette action :

- pour la façade Atlantique : scénarios avec 60 cm et 1 m d'augmentation du niveau marin ;
- pour la façade Méditerranéenne : scénarios de 0,35 m et 1 m d'augmentation du niveau marin, se traduisant pour ce dernier en considérant les marées, vagues... par une augmentation de 1,6 m (résultats du projet ANR MISEEVA).



## 4. Synthèse bibliographique concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers

### 4.1. NOTIONS GÉNÉRALES DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES

Le terme « générique » de vulnérabilité est défini de différentes manières selon les disciplines et les auteurs. Il n'y a donc de définition unique et standardisée. En général, la vulnérabilité est définie par le degré d'exposition subi par un élément par rapport à un aléa donné (changement climatique, risques naturels, pollution...). L'élément exposé peut-être une entité/ territoire économique (ex. population, ville, agriculture...) ou un milieu naturel (sol, rivière, aquifère...). La notion de vulnérabilité doit être distinguée de celle du risque qui résulte d'un croisement d'un aléa et des enjeux exposés à cet aléa. Dans ce sens, la vulnérabilité d'un milieu donné par rapport à un aléa donné est évaluée de manière déterministe, indépendamment des autres milieux et/ou autres aléas.

C'est particulièrement le cas en hydrogéologie où la vulnérabilité des aquifères a été définie par Margat dès 1968, comme étant le degré d'exposition de la nappe d'eau souterraine à une pollution exogène. Le CNFSH<sup>1</sup>, opte pour un sens opposé pour définir le terme comme « *le défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales* ». L'agence américaine de l'environnement (US-EPA) fait la distinction entre les notions de sensibilité et de vulnérabilité d'un aquifère. Elle définit la sensibilité comme « la facilité relative avec laquelle un contaminant appliqué en surface peut atteindre un aquifère » et la vulnérabilité comme la sensibilité d'un aquifère en fonction des caractéristiques du milieu et de la nature du contaminant et de son mode d'application en surface.

Il existe d'autres définitions du concept de vulnérabilité dans la littérature hydrogéologique, elles sont le plus souvent basées sur le modèle conceptuel « source – écoulement – cible » (Illustration 13).

La distinction, souvent binaire, de la notion de vulnérabilité est souvent faite par rapport aux trois composantes du modèle conceptuel.

---

<sup>1</sup> CNFSH : Comité National Français des Sciences Hydrogéologiques.

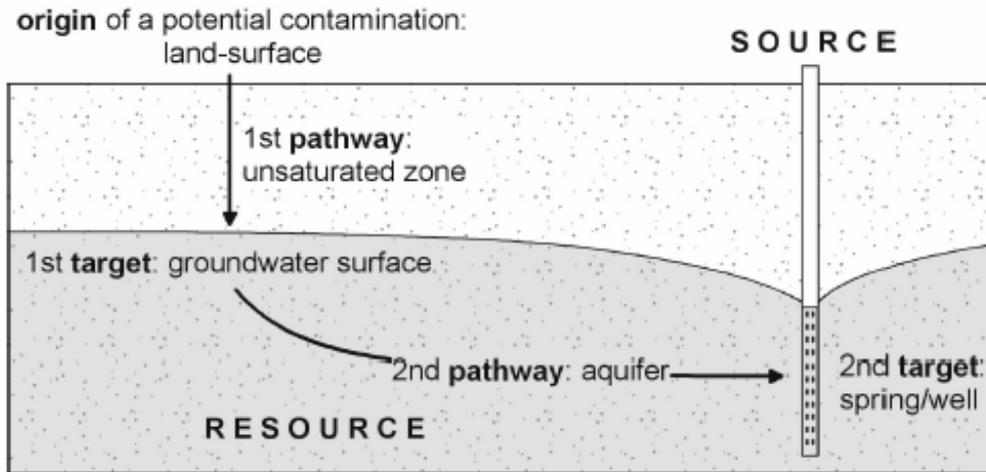


Illustration 13 : Modèle conceptuel de la vulnérabilité des aquifères (action COST 620, 2004).

- **Source**

Il est courant de faire la distinction, équivalente à celle de l'agence environnementale des Etats-Unis d'Amérique (US-EPA), entre la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique. La première notion ne prend en compte que des facteurs physiques influençant le transfert d'un polluant « quelconque » ou « théorique » au sein de l'aquifère en direction de la surface piézométrique. La deuxième notion considère à la fois les caractéristiques des aquifères et les propriétés du polluant ou d'un groupe de polluants (ex. pesticides, fertilisants azotés, hydrocarbures...). Cette distinction entre les deux types de vulnérabilité est importante, car elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps – en d'autres termes, les conditions *hydrogéologiques ne changent pas*, alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

- **Écoulement**

La vulnérabilité et son évaluation doit aussi intégrer les processus d'écoulement des polluants dans l'aquifère selon : (i) la rapidité suivant lesquelles les matières polluantes peuvent atteindre l'eau souterraine et se dégrader, en fonction des défauts de protection de la structure de l'aquifère et des conditions hydrodynamiques, hydrochimiques ou biochimiques en zone non saturée en particulier ; (ii) la résilience de l'aquifère, c'est-à-dire la capacité et la difficulté de retour à un bon état concernant la qualité de l'eau souterraine.

- **Cible**

Le groupe de travail COST 620 (Cartographie de la vulnérabilité et du risque des aquifères karstiques) introduit la distinction entre deux différentes « cibles », la première est la « ressource en eau » et la deuxième le captage de la ressource pour l'alimentation en eau potable. Dans ce cas, la vulnérabilité de la « ressource en eau »

est inhérente aux conditions géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude, mais indépendante de la nature de son usage (le forage d'eau).

Pour étudier la vulnérabilité des ressources en eaux face à diverses sources de pollutions diffuses, de nombreuses méthodes ont été développées, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone saturée, à des méthodes de cartographie et de pondération de différents critères pouvant affecter la vulnérabilité. Elles peuvent être classées selon trois grandes familles de méthodes (Mardhel *et al.*, 2005) :

- **les modèles de simulation** : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert des polluants dans l'aquifère. Ils donnent une représentation de la vulnérabilité spécifique de la nappe car le « calage » des modèles dépend des caractéristiques des polluants pris en compte ;
- **les méthodes statistiques** : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration de polluants ou d'une probabilité de distribution des polluants. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants dans l'aquifère et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination. Elles donnent une représentation de la vulnérabilité spécifique de la nappe ;
- **les méthodes de cartographies à index** : elles se basent sur la superposition de cartes de divers paramètres caractérisant l'aquifère (critères de vulnérabilité), en donnant une note numérique à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen des outils de traitement multicritères et sous SIG. La représentation du degré de vulnérabilité en classes (intervalles de valeurs) permet une visualisation rapide concernant une zone donnée, et la comparaison aisée de la vulnérabilité de différentes zones.

À ces méthodes, on peut ajouter une approche plus ancienne basée sur les « dires d'experts hydrogéologues ». Dans une démarche d'expertise, les critères considérés explicitement ou implicitement varient selon l'expertise et sont souvent intuitifs. Dans certain cas, une matrice de décision pour l'analyse du problème de pollution est utilisée pour pallier à l'oubli possible de critères déterminants ou pour simplifier l'expertise. L'expertise est une approche plus ou moins subjective, dont la validité doit beaucoup à l'expérience et aux connaissances qu'ont les experts de la zone d'étude.

Les deux premières familles de méthodes (modèles de simulation et méthodes statistiques) sont plutôt utilisées pour l'étude de la vulnérabilité spécifique. Les méthodes de cartographies à index sont les plus couramment utilisées dans la littérature hydrogéologique. Elles concernent principalement la vulnérabilité intrinsèque (indépendamment des polluants éventuels). Le principe et les méthodes de cartographie à index sont décrits dans plusieurs ouvrages et rapports, elles sont brièvement revues dans la section suivante.

Parmi ces différentes familles d'approches d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à une pollution donnée, le choix pour l'une des approches dépend principalement d'une part de l'objectif visé et, d'autre part, du concept rattaché à la notion de vulnérabilité.

À noter que dans le cadre de cette revue bibliographique, seule une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers, vis-à-vis du contexte d'intrusion saline et de l'augmentation du risque lors d'une remontée du niveau marin, a été recensée. Il s'agit de la méthode GALDIT développée dans le cadre d'un projet européen. Cette méthode sera présentée plus en détail ci-dessous.

#### **4.2. BREF APERÇU DES MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES**

La plupart des méthodes de cartographies à index sont basées sur l'affectation de pondérations ( $p$ ) à quelques paramètres ou critères, préalablement sélectionnés pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. En fonction de la variabilité naturelle des paramètres, des intervalles ou classes de valeurs sont prédéfinis. Des index, appelés aussi notes ou rangs ( $R$ ), sont attribuées à chaque intervalle selon son importance dans le système aquifère étudié. L'index final de vulnérabilité est évalué par la somme pondérée des notes attribuées aux différents paramètres :

$$index\_vuln\acute{e}rabilit\acute{e} = \sum_{i=1}^n p_i R_i$$

Les méthodes de vulnérabilité à index se différencient essentiellement par le choix des paramètres (ou indicateurs ou critères) et la procédure de pondération des paramètres. Cependant, à ce jour il n'existe pas de méthode standardisée aussi bien en termes de choix des paramètres qu'en termes de procédure de pondération.

Dans les cas de la vulnérabilité intrinsèque, les paramètres sélectionnés prennent en compte, les trois milieux : le sol, la Zone Non Saturée (ZNS) et la Zone Saturée. Les paramètres les plus utilisés pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères sont les suivants :

- paramètres liés au sol : nature du sol (texture, structure), épaisseur, topographie (ruissellement/infiltration), nature lithologie de couverture au sens large y compris des formations géologiques sus-jacentes à l'aquifère ;
- paramètres liés à la zone non saturée : épaisseur de la ZNS, approximation de la conductivité hydraulique, nature lithologique, fracturation ;
- paramètres liés à la zone saturée : transmissivité/conductivité hydraulique, direction d'écoulement, lithologie

Les méthodes les plus couramment utilisées sont résumées dans l'illustration 14. Une description détaillée de ces méthodes se trouve dans plusieurs ouvrages et rapports, tel que par exemple dans le rapport BRGM de Vernoux *et al.* (2007).

Les méthodes de cartographie à index ont pour objectif de représenter les différents niveaux de vulnérabilité potentiels des eaux souterraines sur un support cartographique. Cette représentation utilise différentes échelles (nationale, régionale ou locale), selon les objectifs recherchés (communication, gestion de la ressource, protection de la ressource ou protection de captage) et la précisions des différents paramètres de la vulnérabilité.

Méthode	Paramètres (ou indexes) de vulnérabilité	Méthode développée par :	Remarques
DRASTIC	D : Depth to groundwater (distance à la nappe) ; R : Recharge (recharge) ; A : Aquifer media (nature de la zone saturée) ; S : Soil type (nature du sol) ; T : Topography (topographie, pente en %) ; I : Impact in vadose zone (impact) ; C : hydraulic Conductivity (perméabilité de l'aquifère)	US-EPA (Environmental Protection Agency) - Aller <i>et al.</i> en 1985, 1987	Utilisé essentiellement aux Etat-Unis pour évaluer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Plutôt adaptée pour la cartographie à petite échelle.
SINTACS	S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ; I : Infiltrazione (infiltration) ; N : Azione del Non Saturato ; T : Tipologia della Copertura (sol) ; A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ; C : Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique) ; S : Acclività della Superficie Topografica	Développée en Italie par Civita et Benacchio, 1988 ; Civita, 1990, Civita et Maio, 1997.	Dérivée de la méthode DRASTIC et adaptée à la cartographie à moyenne et grande échelle.
AVI	La méthode AVI (Aquifer Vulnerability Index) utilise 2 paramètres : (i) la conductivité hydraulique et (ii) l'épaisseur des couches aquifères	National Hydrology Research Institute (NHRI, Canada)	Appliquée pour la protection des eaux souterraines de la région frontalière entre le Saskatchewan et l'Alberta (Canada)
EPIK	E : Epikarst ; P : Protection cover (couverture protectrice du sol) ; I : Infiltration condition ; K : Karst network development (développement du réseau karstique)	Dorfliger, 1996 Spécifique aux aquifères karstiques,	Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, utilisé en Suisse.
RISKE	R : Roche aquifère ; I : Infiltration, S : Sol, K : Karstification ; E : Epikarst	Petelet-Giraud <i>et al.</i> , 2000.	Dérivée de la méthode EPIK, spécifique pour les aquifères karstiques
RISK	R : Roche aquifère ; I : Infiltration, S : Sol ; K Karstification	Dörfliger <i>et al.</i> , 2004	Dérivée de la méthode RISKE, sans prise en compte du critère Epikarst
COP	C : concentration of flow (concentration du flux) ; O : Overlying flow (couverture protectrice du sol) ; P : Precipitation	Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Malaga (Espagne), Vias <i>et al.</i> , 2002	Proposé comme méthode européenne par COST 650 pour les aquifère karstique.
DISCO	DIS : discontinuity (discontinuités) ; CO : protection Cover and rainfall (couverture protectrice et ruissellement)	Pochon & Zwahlen, 2003	Développée pour délimiter les zones de projection des eaux souterraines et pour les aquifères fissurés très hétérogènes
GODS	G : Groundwater type ; O : Overlying lithology (Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques ; D : Depth to groundwater ; S Soil type	Foster, 1987	Permet une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée
GLA	Couverture protectrice du Sol ; taux de percolation ; type de roches ; épaisseur du sol ; type d'aquifère ; condition de pression hydraulique (condition artésienne)	Développée en Allemagne par Hoelting, 1985	Prend en compte uniquement les caractéristiques du sol et de la zone saturée
PI	P : couverture protectrice du sol ; P : Précipitation	BGR et université de Karlsruhe (Allemagne) - (Goldscheider, 2002)	Adaptation de la méthode GLA. Proposé comme méthode par COST 650
IDPR/ZNS	IDPR : indice de développement et de persistance des réseaux ; ZNS : épaisseur de la zone non saturée (ZNS)	Mardel et Gravier, 2005	Applicable à grande échelle
GALDIT	Voir ci-dessous		

Illustration 14 : Méthode de vulnérabilité intrinsèque à index.

Le choix des méthodes de cartographie de la vulnérabilité dépend donc du contexte de l'étude visée, de ses objectifs, de l'échelle et de la disponibilité des données. Par exemple, certaines méthodes sont plus adaptées pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un captage et/ou pour la délimitation des bassins d'alimentation de captage (BAC), alors que d'autres seront plus utilisées pour la cartographie de la ressource en eau.

Toutes ces méthodes concernent la vulnérabilité intrinsèque et présentent le point commun d'être fortement subjectives et qualitatives (définition des poids et indexes). Contrairement aux approches de simulation (i.e. modèles hydrodynamiques couplées aux processus de transport des polluants), la validation des méthodes de cartographies restent encore problématique. Néanmoins, elles permettent de fournir des éléments pour la gestion et la protection de la ressource, notamment dans un contexte de gestion de l'aménagement du territoire.

### **4.3. VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS PAR RAPPORT À L'INTRUSION SALINE**

L'analyse de la vulnérabilité d'un aquifère par rapport à l'intrusion saline est un cas particulier à la fois de la vulnérabilité spécifique et de la vulnérabilité intrinsèque, d'une certaine manière. Des critères de salinisation doivent être pris en compte en plus des critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. Dans ce sens, il s'agit d'une vulnérabilité spécifique. En termes de méthode de cartographie à index, la méthode GALDIT est la seule méthode dédiée à la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline.

#### **4.3.1. Méthode GALDIT**

La méthode GALDIT est une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers, dédiée aux risques d'intrusion saline. Elle a été initialement développée par *Chachadi et Lobo-Ferreira (2001)* dans le cadre du projet euro-indien COASTIN (programme INCO DEV du 4<sup>e</sup> PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de Goa en Inde et d'Algarve au Portugal (*Lobo-Ferreira et al, 2005a 2005b*).

GALDIT est une approche de « cartographie à index » simple d'utilisation, nécessitant peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle :

- le type d'aquifère : libre, captif et semi-captif (**G**roundwater occurrence) ;
- la conductivité hydraulique de l'aquifère (**A**quifer hydraulic conductivity) ;
- la profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (depth to groundwater **L**evel above sea) ;
- la distance par rapport à la côte (**D**istance from the shore) ;
- l'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area) ;

- l'épaisseur de l'aquifère (**Thickness of the aquifer**).

Une indexation de la vulnérabilité et une classification des potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique donné sont établis à partir des six paramètres de GALDIT.

Le principe d'attribution de classe de vulnérabilité repose sur trois composantes :

- **pondération** : un poids est attribué à chacun des six paramètres en considération son importance relative par rapport à l'intrusion saline. Un poids allant typiquement de 1 (influence faible moindre) à 4 (grande influence) est proposé par les auteurs ;
- **notation** (ou rang) : une valeur de 1 à 10 est attribuée à chaque paramètre en fonction de ses attributs (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande). Par exemple, les valeurs attribuées sont obtenues à partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre ;
- **classification** : la classification des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline est déterminée par un indice de vulnérabilité final correspondant à la somme pondérée et normée des notes de rang attribuées aux six paramètres GALDIT, selon la formule suivante :

$$indice\_GALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i R_i}{\sum_{i=1}^6 p_i}$$

où  $p_i$  est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre  $i$ ,  
 $R_i$  est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2,5 à 10).

Les poids ( $p_i$ ) et les notations ( $R_i$ ) des attributs des six paramètres de la méthode GALDIT par rapport à l'intrusion saline sont décrits ci-dessous :

- **Paramètre G (type d'aquifère)**

Dans le contexte naturel, les eaux souterraines prennent place généralement au sein de formations géologiques qui donnent naissance à des aquifères libres, captifs ou semi-captifs. Le contexte géologique des aquifères côtiers (géométrie, organisation des formations perméables et imperméables) a une influence indéniable sur la présence et sur l'extension d'une intrusion saline. En général, la valeur du paramètre G est attribuée sur la base suivante :

Paramètre G	Poids	Attributs du paramètre	Valeur rang
Type d'aquifère	1	Aquifère captif	10
		Aquifère libre	7,5
		Aquifère semi-captif	5
		Aquifère contraint <sup>(1)</sup>	2,5
<sup>(1)</sup> Recharge et/ou barrière alignée parallèlement à la côte			

Ainsi, un aquifère libre, en conditions naturelles serait plus affecté par une intrusion saline qu'un aquifère semi-captif, ce dernier étant soumis à une pression pas uniquement atmosphérique. De même, un aquifère libre est plus sujet à l'intrusion

saline en comparaison d'un aquifère semi-captif, la semi-captivité maintenant la pression hydraulique au minimum, à cause des pertes associées à des aquifères adjacents. L'aquifère captif est plus vulnérable du fait de l'existence de cônes de dépression plus grands et de l'expulsion immédiate d'eau des puits lors des pompages ; dans ce cas la valeur du rang est le plus élevée (10).

Dans le cas d'un système aquifère multicouche, la valeur la plus importante devrait être adoptée (note de 10). Ainsi, lors de l'attribution des poids relatifs au paramètre G, il est important d'examiner avec attention la position et le type d'aquifères présents dans la zone d'étude.

- **Paramètre A (conductivité hydraulique de l'aquifère)**

Le paramètre A est utilisé pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'eau au sein de l'aquifère. Par définition, la conductivité hydraulique traduit l'aptitude du milieu à transmettre l'eau au sein de l'aquifère. La conductivité hydraulique résulte de l'interconnectivité des pores dans les sédiments non consolidés et des fractures pour les milieux consolidés. L'importance du front d'intrusion saline est influencé par la conductivité hydraulique – plus la conductivité est grande, plus le front de pénétration de l'intrusion saline est important. Une conductivité hydraulique faible a pour conséquence également un grand cône de dépression lors d'un pompage pour un débit donné, par rapport à un aquifère caractérisé par une conductivité hydraulique élevée. Ainsi, il est aussi nécessaire de prendre en considération la présence de barrières hydrauliques telles que des niveaux argileux et des dykes imperméables parallèles à la côte, qui peuvent constituer des obstacles à l'intrusion saline. Des valeurs caractéristiques pour le paramètre L sont données ci-dessous.

Paramètre A	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
conductivité hydraulique de l'aquifère	3	Elevée	> 40	10
		Moyenne	10 – 40	7,5
		Faible	5 – 10	5
		Très faible	< 5	2,5

Pour les aquifères karstiques côtiers, une description spéciale de la valeur de l'indice pour ce facteur devrait être développée, prenant en considération les discontinuités, la présence de phénomènes morphologiques de l'endo et l'exokarst qui peut constituer des chemins préférentiels pour l'intrusion saline.

- **Paramètre L (Profondeur de la nappe par rapport au niveau de la mer)**

Le niveau piézométrique par rapport au niveau moyen de la mer est un paramètre important (poids maximal de 4) pour évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline dans une zone donnée, car il détermine le potentiel hydraulique capable de repousser le front d'intrusion saline. Tel que défini par l'équation de Ghyben-Herzberg, pour chaque mètre d'eau douce stockée au-dessus du niveau de la mer, ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie. L'attribution des notes du paramètre L doit prendre en considération les variations du niveau piézométrique sur le long terme. De manière générale, il est important de ne pas

considérer uniquement une valeur piézométrique moyenne, mais d'examiner avec attention les périodes pour lesquelles le niveau piézométrique est le plus bas, au-dessus du niveau de la mer, correspondant à la plus grande vulnérabilité potentielle. Pour l'attribution des valeurs, les auteurs proposent la notation suivante.

Paramètre L	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang (m)	
Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer (m)	4	Elevée	< 1,0	10
		Moyenne	1,0 – 1,5	7,5
		Faible	1,5 – 2,0	5
		Très faible	> 2,5	2,5

- **Paramètre D (distance perpendiculaire à la côte)**

La distance de l'aquifère par rapport à la mer est aussi un critère important de la vulnérabilité (poids maximal de 4). En général, l'impact de l'intrusion saline décroît en s'éloignant de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être fixée à 10 pour des distances de la côte inférieures à 500 m. Cette valeur est dégressive. Une valeur de 2,5 est acceptable pour des distances supérieures à 1 000 m.

Paramètre D	Poids	Attributs du paramètre		note
		Classe	Rang (m)	
Distance par rapport à la côte (m)	4	Très courte	< 500	10
		Courte	500 – 750	7,5
		Moyenne	750 – 1 000	5
		Eloignée	> 1 000	2,5

Il faut noter que ce paramètre doit être pris en considération avec prudence dans le cas d'aquifères karstiques côtiers; l'intrusion saline dépend de la présence de conduits karstiques. Ce paramètre n'est peut-être pas directement transposable pour ce type d'aquifère.

- **Paramètre I (impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée)**

La zone d'étude considérée peut être plus ou moins déjà affectée par une intrusion saline et l'équilibre hydraulique naturel entre l'eau douce et l'eau salée peut être ainsi déjà modifié. Cet état doit être pris en compte lors de la cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion saline. Dans cette méthode, il est proposé d'utiliser le ratio  $Cl^- / (HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$  comme critère d'évaluation de l'intrusion saline dans l'aquifère côtier. L'ion chlorure ( $Cl^-$ ) est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines alors que c'est l'inverse pour le bicarbonate ( $HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}$ ). Si le ratio est supérieur à 2 ppm (ou milliéquivalent par million), une note maximale de 10 est attribuée au paramètre I. Un ratio inférieur à 1 montre que l'intrusion saline est très faible.

Le ratio chlorure/Bicarbonate peut être utilisé uniquement si des données chimiques des eaux souterraines sont disponibles. Des logs de température et de conductivité électrique au niveau de forages situés dans la zone côtière de l'aquifère permettent également de déterminer la variabilité spatiale de l'intrusion saline, les variations

saisonniers ainsi que la distribution verticale. Ce type de mesures avec une représentation cartographique peut permettre également de distinguer des classes d'indice en fonction des ordres de grandeurs de la conductivité électrique.

Paramètre I	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang (ppm)	
Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude : $Cl^- / (HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$	1	Elevé	> 2	10
		Moyen	1,5 – 2	7,5
		Faible	1 – 1,5	5
		Très faible	< 1	2,5

• **Paramètre T (épaisseur de l'aquifère)**

L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans l'extension et l'ampleur de l'intrusion saline en zones côtières. Selon Bear et Verrujit (1987), les équations suivantes permettent de définir la longueur de l'extension d'un biseau salé pour un aquifère captif et un aquifère libre :

*Aquifère libre :*

$$L = K B^2 / 2q (\delta) \text{ pour } L > B \quad \text{Eq. 8}$$

avec K, la conductivité hydraulique, B l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère et  $\delta = (\rho_{\text{eau douce}} / \rho_{\text{eau de mer}} - \rho_{\text{eau douce}}) = 4$  avec  $\rho$  la densité de l'eau.

*Aquifère captif :*

$q = [KB^2/2L] [(1 + \delta)/\delta^2] - WL/2$  où W est la recharge naturelle de l'aquifère. L'intrusion saline est prédominante au cours des périodes où la recharge est nulle. Ainsi lorsque  $W=0$ , il est possible d'écrire l'équation comme suit :

$$q = [KB^2/2L] [(1+\delta)/\delta^2] \text{ ou } L = [KB^2/2q] * 0,0257 \quad \text{Eq. 9}$$

Considérant des valeurs identiques de K et B dans les deux équations (Eq. 8 et Eq. 9), les longueurs calculées L sont pratiquement identiques.

Ainsi plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline l'est. Suivant ce principe, des valeurs de rang correspondantes à différentes épaisseurs d'aquifère sont attribuées comme suit :

Paramètre T	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
Epaisseur de l'aquifère (m)	2	Large	> 10	10
		Moyenne	7,5 – 10	7,5
		Petite	5 – 7,5	5
		Très petite	< 5	2,5

Ce paramètre peut être utilisé pour les aquifères karstiques côtiers, pour autant que l'information géologique relative à la géométrie de l'aquifère est disponible. La variation de l'épaisseur de l'aquifère peut être directement lié au gradient hydraulique. Celui-ci

peut être variable au sein d'un aquifère karstique en fonction de la présence d'hétérogénéités (par exemple présence de cavités ou de conduits dans la zone saturée) plus importantes à proximité de la côte.

Paramètres	Poids	Rangs			
		Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2,5	5	7,5	10
G : Type d'aquifère	1	contraint	semi-captif	libre	captif
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5 - 10	10-40	> 40
L : Profondeur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	>2,5	1,5 – 2	1 – 1.5	<1
D : Distance de la côte (m)	4	> 1 000	750-1 000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline (ppm)	1	< 1	1 – 1,5	1,5 - 2	> 2
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5 – 7,5	7,5-10	> 10

Illustration 15 : Tableau de synthèse des poids et rang de la méthode GALDIT

Considérant les poids et les notes proposés ci-dessus (illustration 15), la valeur minimale de l'indice GALDIT est de 2.5 et la valeur maximale de 10. La vulnérabilité d'un aquifère côtier par rapport à l'intrusion saline peut être répartie en 3 classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7,5
Vulnérabilité moyenne	5 – 7,5
Vulnérabilité faible	< 5

#### 4.3.2. Exemple d'application de la méthode GALDIT

La méthode GALDIT a été appliquée à l'aquifère de Monte Gordo (Algarve, Portugal) (Lobo Ferreira *et al.*, 2005) pour étudier l'impact de l'élévation du niveau de la mer induit par le changement climatique. Un exemple des cartes de vulnérabilité, à deux classes, est reproduit dans l'illustration 16.

En conclusion, la méthode GALDIT est une méthode simple d'utilisation, qui nécessite un nombre de données restreint. Cependant, elle ne prend pas en compte l'existence des points d'exploitation des eaux souterraines à proximité de la côte. Il est ainsi possible d'avoir un aquifère à haut indice de vulnérabilité, mais sans risque d'intrusion saline, car il n'y aurait pas d'exploitation importante de la ressource à proximité de la côte. Une évolution de la recharge de l'aquifère peut également impacter la vulnérabilité de l'aquifère, dans le cadre de scénarios de changement climatique. Des adaptations sont ainsi nécessaires et seront effectuées au cours de l'année 2011.

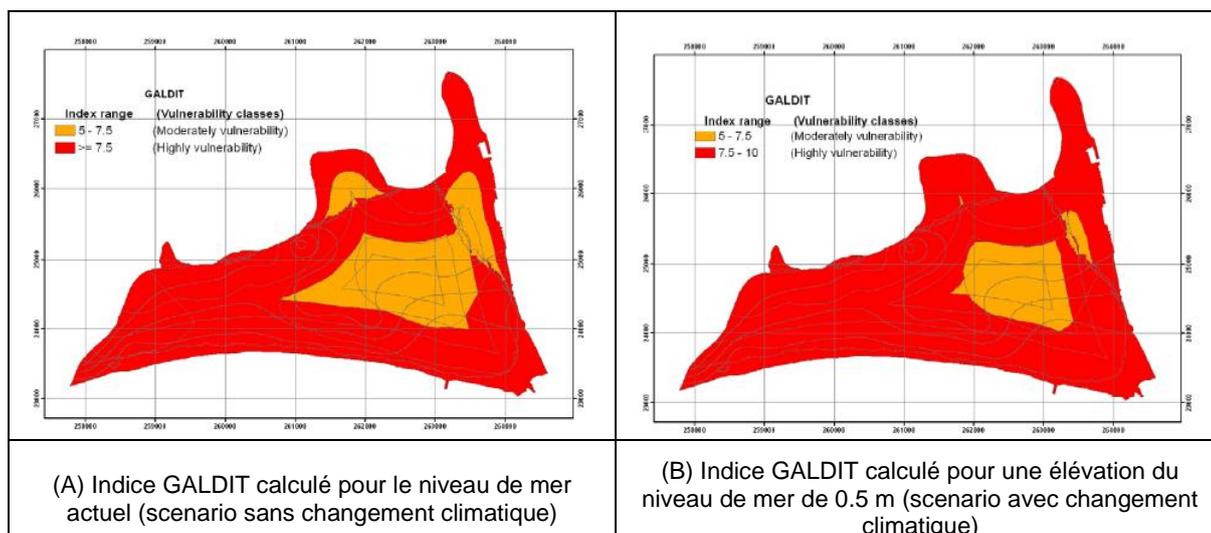


Illustration 16 : Exemple de carte de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour (A) le niveau de la mer actuel et (B) pour une élévation du niveau marin de 0,5 m (Lobo Ferreira et al., 2005).

#### 4.4. AUTRES APPROCHES (GLOBALES) DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ

D'autres approches pour l'évaluation de la sensibilité ou vulnérabilité des aquifères côtiers vis-vis des intrusions salines ont été suggérées pour des échelles plus globales. En France, on peut notamment citer l'étude de Petit (1996) pour la Bretagne et l'étude de Frisant et Bodéré (2009) pour la Corse.

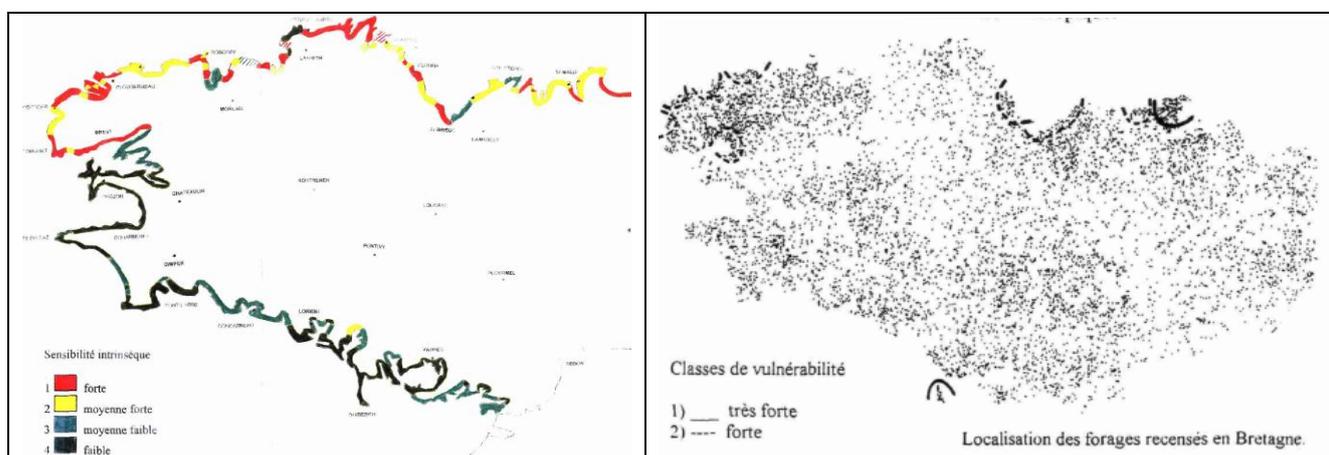


Illustration 17 : Carte de vulnérabilité intrinsèque et anthropique des aquifères côtiers de la région Bretagne (Petit, 1996).

Pour définir la vulnérabilité des aquifères en Bretagne, Petit (1996) se base sur les données de 9 400 forages (localisation, contexte géologique, profondeur du forage, débit instantané...). À partir d'une analyse statistique de ces données, il définit quatre classes d'intérêt géologique et une carte de vulnérabilité intrinsèque, qui est par la

suite croisées avec la une carte de densité de forage (vulnérabilité anthropique) dans la zone d'étude.

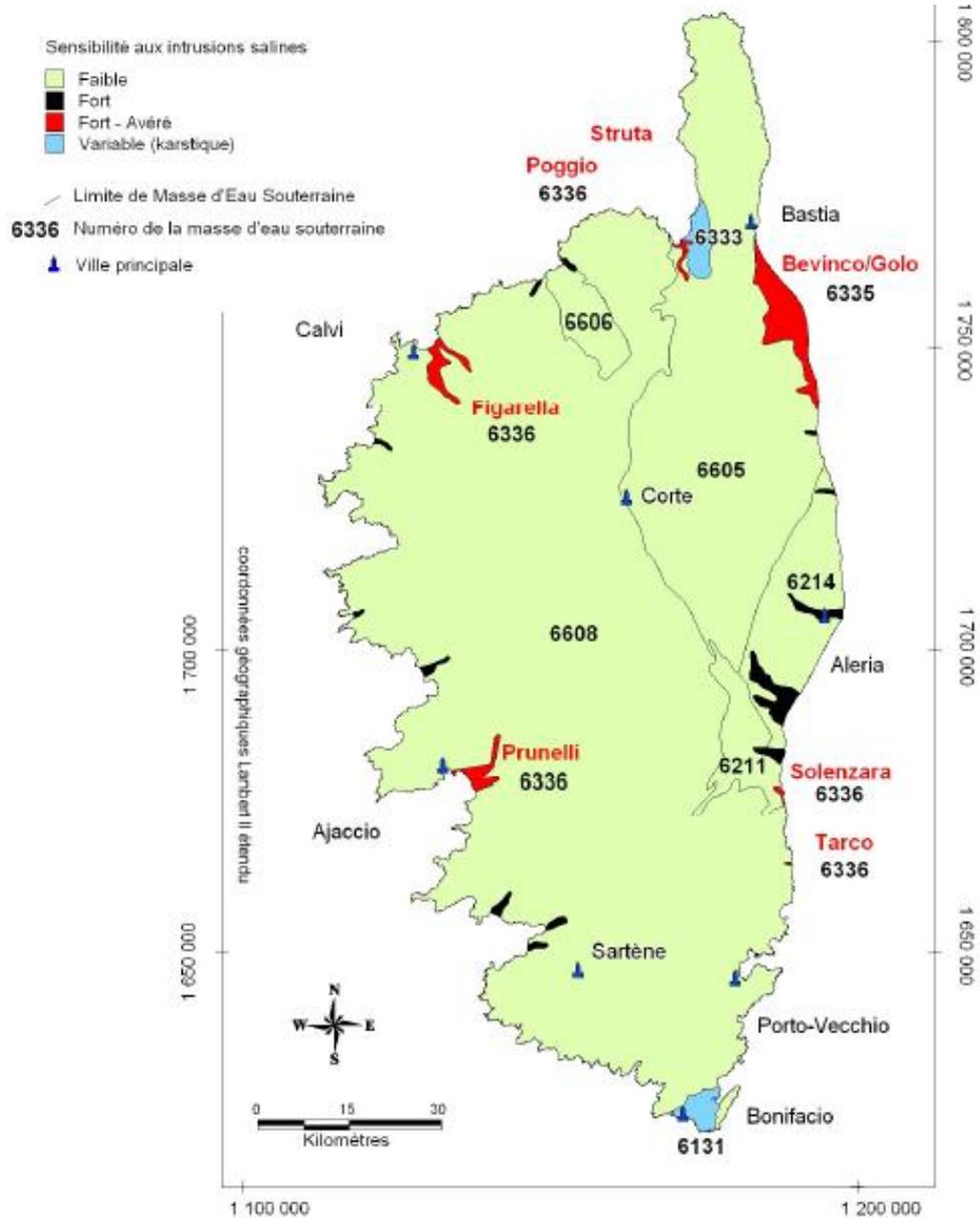


Illustration 18 : Carte de vulnérabilité des masses d'eau vis-à-vis de l'intrusion saline en région Corse (Frissant et Bodéré, 2009).

Frissant et Bodéré (2009) ont étudié la sensibilité des aquifères côtiers corses et s'appuient sur des « dires d'experts ». Quatre critères et cinq classes de sensibilités sont retenus :

Classe de sensibilité	géologie dominante	la perméabilité des terrains	morphologie associée	l'existence d'intrusions salines
Sensibilité faible	formations de socle granitique ou métamorphique	perméabilités hydrauliques	aquifères compartimentés	existantes
Sensibilité forte	alluvions perméables		l'existence de nappes d'accompagnement de rivière	intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé
Sensibilité forte – avérée				intrusions salines observées au moins une fois
Sensibilité variable karstique	formations karstiques			intrusions possibles sous l'effet de pompage

#### 4.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

À l'issue de cette revue bibliographique concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères, on constate que seulement une méthode spécifique a été développée pour les aquifères côtiers, la méthode GALDIT. Cette méthode n'a jamais été testée et appliquée à des aquifères côtiers en France. Cette méthode nécessite des adaptations, qui seront effectuées en 2011. Ces adaptations sont relatives à la meilleure prise en compte de l'impact de l'exploitation actuelle et doivent préciser la définition des critères pour les aquifères karstiques en particulier. Des premiers tests ont été réalisés de manière globale à l'échelle des aquifères côtiers du Languedoc Roussillon pour poser un premier diagnostic, ainsi qu'au niveau d'un aquifère situé en Haute-Normandie. Ces tests sont présentés dans le chapitre 6 de ce document.

## **5. État des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle de la France Métropolitaine et cartographie des scénarios de remontée de niveau marin**

### **5.1. DESCRIPTION DE LA BD BIBLIOGRAPHIQUE**

Les études traitant de l'intrusion saline dans les aquifères côtiers métropolitains sont peu nombreuses. Un premier état des connaissances concernant les aquifères côtiers a été réalisé dans différentes régions en 1996, par le BRGM ; il a fait l'objet d'un rapport de synthèse (BRGM/RP-39298-FR).

En 2010, dans le cadre de cette action, une recherche bibliographique concernant la France métropolitaine a été réalisée en collaboration avec les Services Régionaux du BRGM, afin d'actualiser cet état des connaissances des aquifères côtiers vis-à-vis des intrusions salines. Cette recherche bibliographique a permis de rassembler près de 75 documents, hors documents à caractère national (3 références) et ceux portant sur les territoires d'outre-mer (19 références).

La liste complète des références bibliographiques est placée en annexe 1. Les références collectées ont été organisées au sein d'une base de données bibliographiques sous Excel. Pour chaque référence les items suivants sont autant que possible, renseignés:

- référence complète du document (auteur, titre, année...) ;
- région (administrative) côtière concernée (11 régions, y compris la Corse) ;
- zone d'étude (département, commune(s) ou bassin versant) ;
- maître d'ouvrage et maître d'œuvre de l'étude ;
- type de référence (étude, article scientifique, thèse de doctorat, ou note d'expertise) ;
- type et nom de l'aquifère côtier concerné par l'étude ;
- codes des masses d'eau et/ou référentiel BDLISA (finalisée 2011) ;
- approches d'investigations utilisées pour l'étude de l'intrusion saline. Quatre types d'approches sont distingués :
  - modèle hydrodynamique : permet de modéliser les aquifères, d'identifier les influences chimiques et le contact hydrodynamique entre les aquifères et la mer,
  - étude géophysique : il s'agit de prospection par sondage électrique, la surface du biseau salé est déterminée par une coupe verticale,

- suivi hydro-chimique : les mesures des chlorures et de la conductivité permettent de connaître le taux de salinité de l'aquifère,
- analyse isotopique : permet de dater les eaux souterraines et d'identifier l'origine de la salinité ;
- problématique d'intrusion saline marine (existence ou non de la problématique à partir des conclusions du document) ;
- cause de l'intrusion saline, s'il y a lieu (anthropique ou naturelle) ;
- carte de vulnérabilité (dans le cas où elle a été développée) ;
- commentaires et remarques des hydrogéologues régionaux ;
- lien internet vers un site pour télécharger le document si public et disponible au format électronique.

Il faut noter toutefois que cette base de données n'est pas exhaustive :

- les documents à caractères méthodologiques et les documents ne portant pas spécifiquement sur la problématique d'intrusion saline n'ont pas été comptabilisés dans cette base de données ;
- certaines zones d'intrusion saline ont fait l'objet de plusieurs études, les références les plus pertinentes ou les plus récentes ont été retenues dans la base bibliographique. Cependant dans certains cas, le choix a été fait de maintenir toutes les références lorsqu'il s'agissait d'études complémentaires.

Parmi les 75 documents contenus dans cette base de données bibliographiques, 34 portent sur les aquifères côtiers méditerranéens et 41 documents sont consacrés aux aquifères côtiers de l'Atlantique et de la Manche. L'illustration 19 présente le nombre de références par région côtière métropolitaine. Les régions du Sud (PACA, Corse, LR et Aquitaine) sont les plus représentées, avec par exemple 6 références, en lien avec l'intrusion saline, concernant la nappe profonde de Gironde ou de l'estuaire de Gironde.

Cette liste comporte différents types de documents, majoritairement des rapports d'études (46 études) mais inclut également des notes d'expertise ou des bulletins de situation (7 documents pour les régions de Bretagne et de Normandie), des articles scientifiques ou des thèses de recherche (22 documents).

Les études et rapports ont été réalisés pour le compte de différents maîtres d'ouvrage, incluant notamment les agences de l'eau (RM&C et Adour-Garonne, notamment), les ex-Diren et les Conseils régionaux et généraux.

En termes d'approche d'investigation de la problématique d'intrusion saline, le suivi hydro-chimique est l'approche la plus souvent utilisée avec 32 documents, puis viennent ensuite les études géophysiques (16 documents). La modélisation hydrodynamique et les analyses isotopiques sont représentées respectivement par 10 et 11 documents. Le reste des références concerne essentiellement des investigations à dire d'experts ou d'enquêtes de terrains/ documentaires (Illustration 20). Il faut noter que très peu d'études utilisent plus d'une seule approche. Seule une étude combine

trois approches d'investigation : la modélisation, la géophysique et le suivi hydrochimique. Il s'agit du travail de thèse de B. Aulnay (2007) sur la plaine du Roussillon.

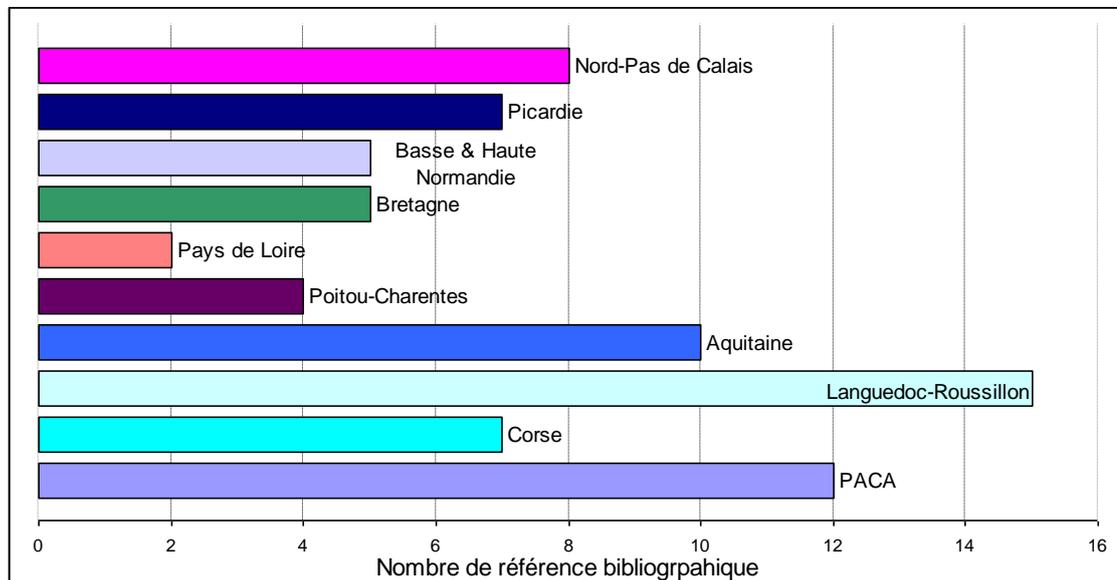


Illustration 19 : Nombre de références bibliographiques par région cotière.

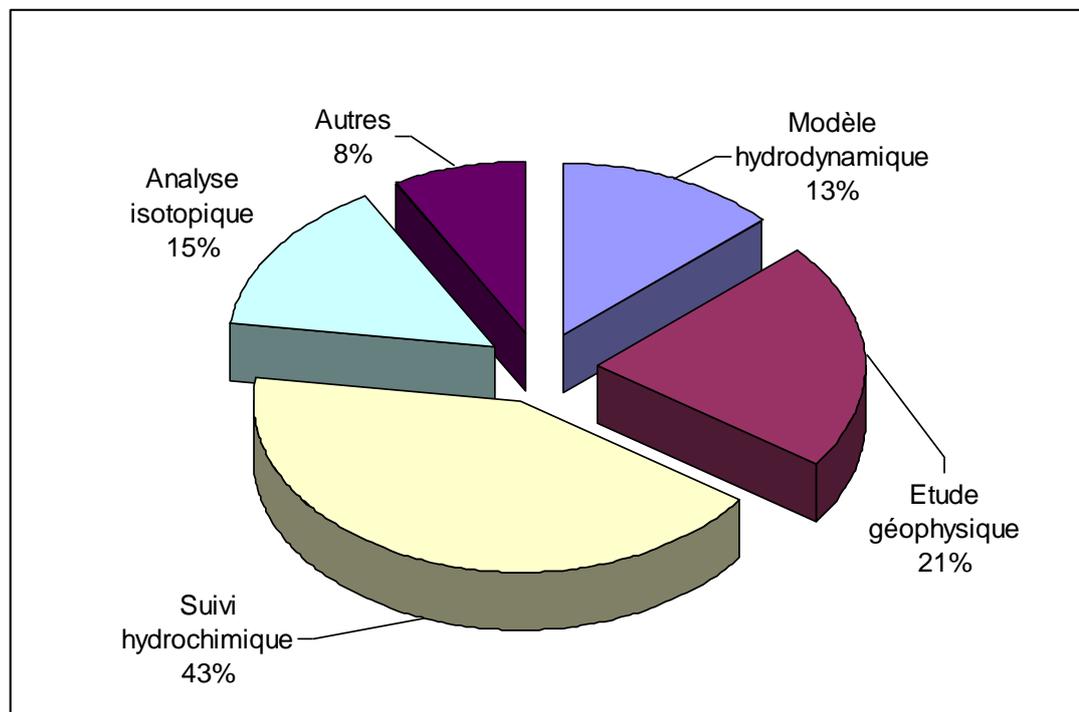


Illustration 20 : Type d'approche pour l'investigation de l'intrusion saline.

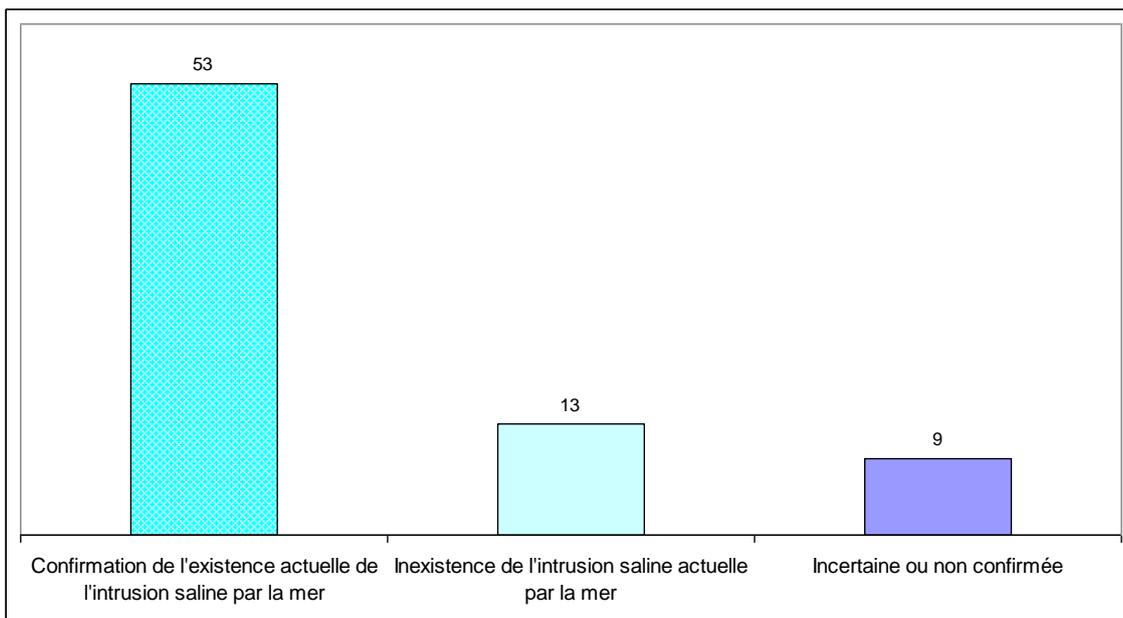
Le biseau salé est généralement cartographié par les approches de modélisation et de géophysiques. Par contre, peu d'études ont développé des cartes de vulnérabilité aux

sens des méthodes de vulnérabilité à index, comme présentées au chapitre précédent. Seules deux études présentent des cartes de vulnérabilité à grande échelle : N. Frissant, G. Bodéré (2009) pour la région Corse, P. Corbier (2005) pour un atlas de zone à risque dans le cadre du SAGE de la nappe profonde de Gironde et Vallet-Coulomb *et al.* (2009) pour la nappe alluviale de la Camargue en région PACA.

L'objectif des études recensées porte principalement sur l'identification de l'intrusion saline dans la zone d'investigation. Parmi les 75 études identifiées, 53 confirment l'existence d'une intrusion saline récente par la mer. Pour 13 études, les résultats des investigations montrent qu'il s'agit soit d'une intrusion saline ancienne et/ou remontée d'eau saline d'aquifères profonds, soit d'une intrusion haline (apport d'eau de mer par le vent). Pour le reste des études (9 documents), il subsiste encore une incertitude quant à la nature de la salinisation des eaux souterraines (Illustration 21).

Les aquifères concernés par l'intrusion saline sont revus en détail dans les sections suivantes de ce chapitre.

À ce stade, il faut noter que la base de donnée bibliographique ne fait pas la distinction entre les études concernant quelques points (cible = forage) et les études relatives à un aquifère ou une masse d'eau dans son ensemble.



*Illustration 21 : Conclusion des études compte à l'existence d'une intrusion saline récente par la mer.*

Enfin, l'origine anthropique de l'intrusion saline n'est pas toujours clairement identifiée dans ces documents. Seulement une vingtaine d'études concluent avec certitude sur l'origine anthropique de l'intrusion saline.

## **5.2. ÉTAT DE L'INTRUSION SALINE MARINE PAR RÉGION**

### **5.2.1. La façade atlantique**

En 2010 comme en 1996, on constate que les aquifères côtiers concernés par le phénomène d'intrusion saline ne sont pas très nombreux, en comparaison avec les aquifères côtiers espagnols par exemple, dont la surexploitation favorise l'intrusion saline. La plupart des études montrent des zones d'intrusion saline très locales, liée d'une part à des exploitations non adaptées (surexploitation) et d'autre part à la proximité de la côte. Le lecteur se rapportera au chapitre 6, pour des informations détaillées concernant l'état des connaissances des aquifères côtiers vis-à-vis des intrusions salines de nos jours.

### **5.2.2. La façade méditerranéenne**

En 2010, seul l'ensemble des aquifères de la région Languedoc-Roussillon a été examiné rapidement sur la base d'informations directement exploitables à partir de synthèses disponibles en bibliographie. Le but est d'identifier les aquifères vulnérables à l'élévation du niveau marin. Ensuite, le programme de l'année 2011 aura pour but de mieux caractériser cette vulnérabilité, et d'attribuer un indice d'incertitude par rapport aux données disponibles. Des recommandations pourront être faites concernant l'acquisition de données complémentaires pour une sélection d'aquifères les plus vulnérables. La mise à jour de la synthèse 1996 concernant la région Provence Alpes Côtes d'Azur sera effectuée en 2011. Concernant la région Corse, le rapport BRGM de Frissant et Bodéré de 2009 fait office de mise à jour de cette synthèse.

Les aquifères de la bordure côtière de la région Languedoc-Roussillon sont examinés systématiquement de l'Est vers la frontière espagnole (Illustration 22 à Illustration 24). La référence des aquifères est celle de la BDLISA qui, sur ce secteur, reste très proche du précédent référentiel (BDRHF).

L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères côtiers a été effectuée à l'aide des paramètres de la méthode GALDIT telle que décrit au chapitre précédent, en l'appliquant de manière globale afin de poser un premier diagnostic.

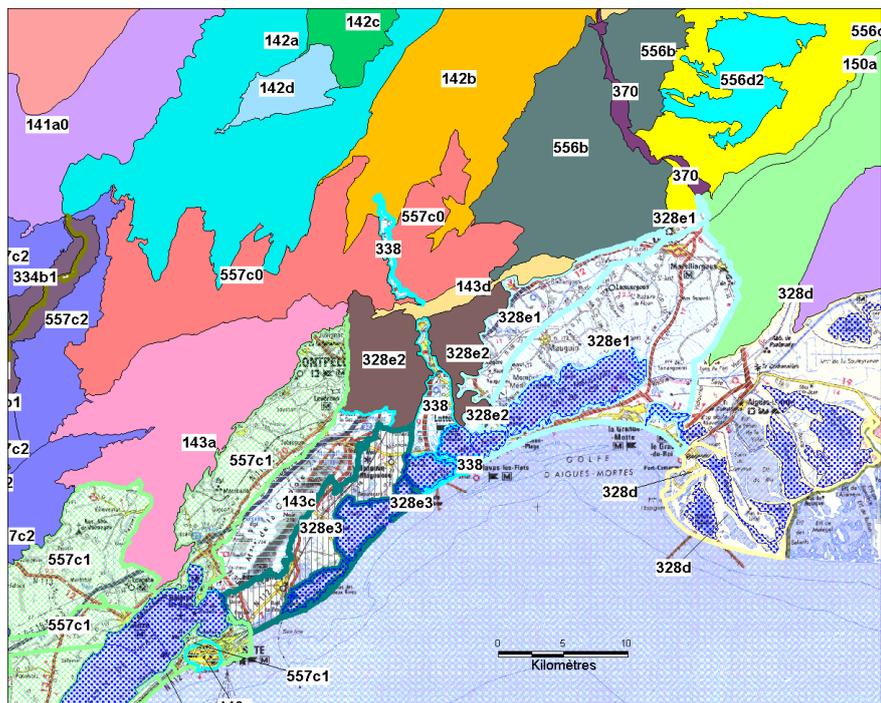


Illustration 22 : Aquifères côtiers de la partie ouest du Languedoc-Roussillon.

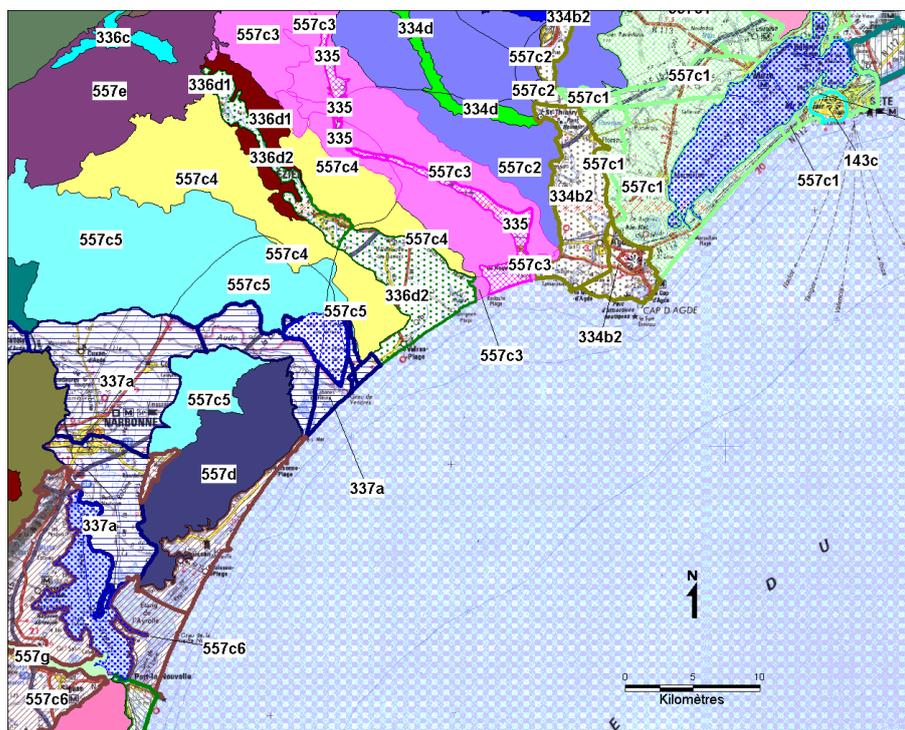


Illustration 23 : Aquifères cotiers de la partie centrale du Languedoc-Roussillon.

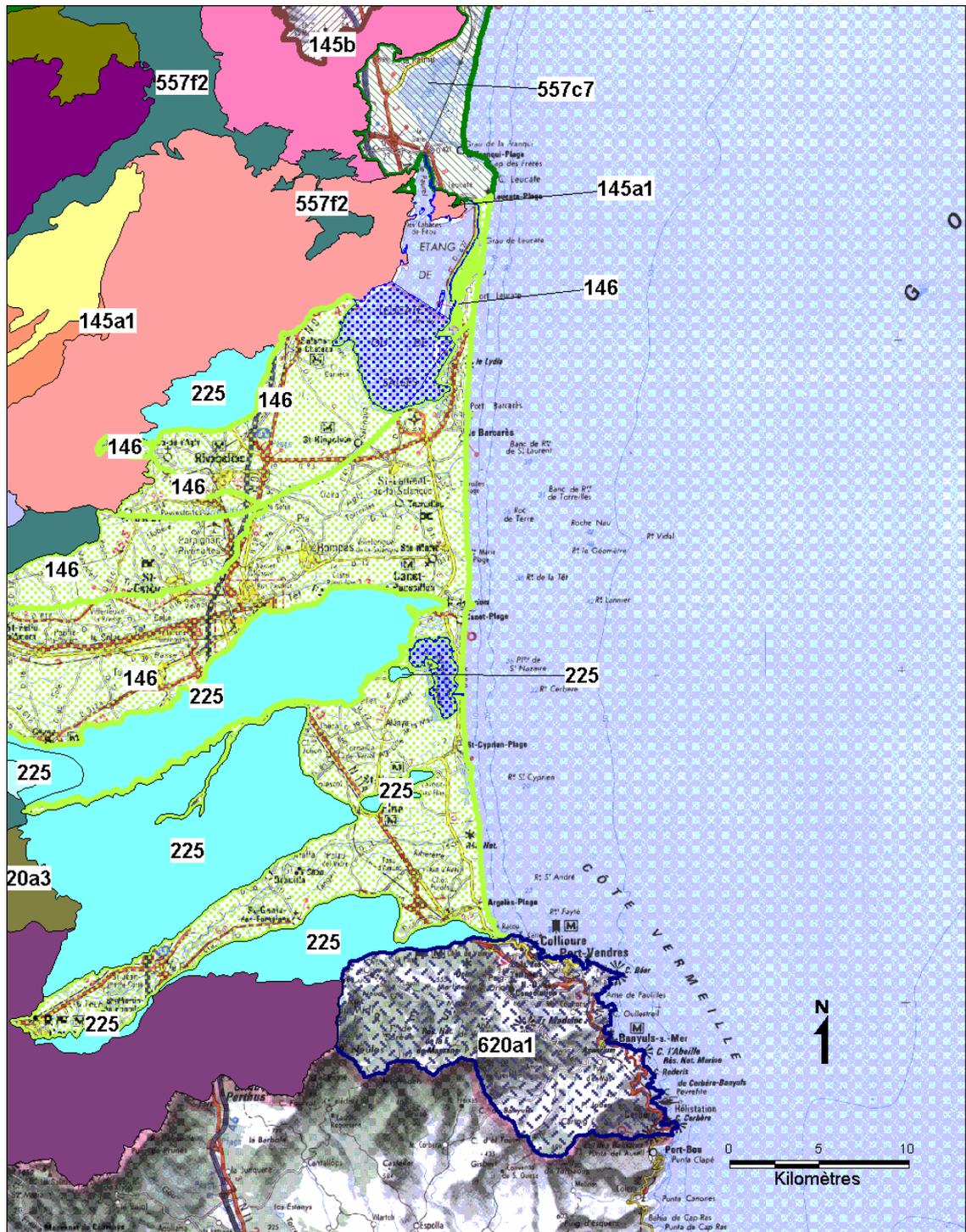


Illustration 24 : Aquifères cotiers de la partie sud du Languedoc-Roussillon.

**Aquifère 328d : Alluvions quaternaires du Bas-Rhône entre Beaucaire et Aigues-Mortes**

G	La nappe est libre en amont et devient rapidement captive.
A	La perméabilité élevée (maximum de $10^{-2}$ m/s) et une épaisseur notable expliquent la forte exploitation de cette nappe.
L	La charge hydraulique est faible à proximité de la mer.
D	La première douzaine de km en bordure de mer est couverte en grande partie par des étangs
I	Dans la partie méridionale, l'eau est saumâtre du fait des eaux superficielles des étangs et de la proximité de la mer qui remonte les canaux et les cours d'eau en étiage, malgré un mur se situant entre 40 et 50 m de profondeur. L'eau présente donc un faciès chloruré-sodique.
T	L'épaisseur moyenne est comprise entre 15 et 25 m, mais pouvant atteindre 30 à 40 m dans la partie sud.

Vulnérabilité : bien que les eaux soient saumâtres dans sa partie aval, l'aquifère 328d est fortement exploité. *Il est possible que l'élévation du niveau de la mer se fasse sentir loin à l'intérieur des terres, via les canaux et les cours d'eau.*

Étude complémentaire de cet aquifère : l'étude de la sensibilité de cet aquifère à une élévation du niveau de la mer peut être intéressante si la profondeur de pénétration de la mer vers l'intérieur des terres est importante.

**Aquifère 328e1 : Alluvions quaternaires et villafranchiennes entre le Vidourle et le Lez**

G	La nappe est libre sur une grande partie de sa surface mais devient captive à proximité de l'étang de l'Or.
A	C'est une nappe dont les caractéristiques hydrauliques permettent une forte exploitation de cette nappe (eau pour l'AEP et pour l'industrie). Les débits ponctuels peuvent dépasser 200 m <sup>3</sup> /h. Un niveau holocène marin (argiles grises lagunaires et argiles à galets) protège l'aquifère au niveau du trait de côte.
L	La charge en bord de mer est peu élevée.
D	L'étang de l'Or repousse le bord de mer à 3 km.
I	Il n'y a pas de problèmes de qualité ayant pour origine la mer. Il y a néanmoins des problèmes liés à des teneurs élevées en nitrates et en pesticides.
T	L'épaisseur des alluvions est importante, mais dépasse rarement les 40 m.

Vulnérabilité : la nappe n'est pas spécialement concernée par l'élévation du niveau de la mer : présence d'un écran argileux, de l'étang de l'Or. La qualité de la nappe n'est pas pour l'instant affectée par la présence de la mer.

Étude complémentaire de cet aquifère : c'est un aquifère fortement exploité. Cependant, on ne note aucun problème de qualité lié à la mer. La présence d'un écran argileux augmente la protection de cet aquifère. Dans ces conditions, il ne constitue

pas un aquifère prioritaire. Cependant, des forages captent la nappe des alluvions villafranchiennes pour des besoins en eau potable ou pour l'agriculture. Parmi ceux-ci, seuls ceux en bordure de l'Étang seront susceptibles de subir un impact en lien avec le biseau salé.

***Aquifère 338 : Alluvions quaternaires du Lez***

C'est un aquifère étroit, étiré le long du Lez. Son côté sud, en bordure de l'étang de l'Or est à 3 km de distance de la mer. Cet aquifère ne constitue pas un aquifère prioritaire pour une étude de sa vulnérabilité par rapport à l'élévation du niveau de la mer : éloignement de la mer, autres sources de pollution (urbaine).

***Aquifère 328e3 : Alluvions quaternaires et villafranchiennes entre Montpellier et Sète***

G	Aquifère libre et captif
A	La productivité de cet aquifère est faible et localisé. Il n'y a pas en amont de captages destinés à l'AEP.
L	
D	
I	Les eaux sont contaminées en chlorures et en sulfates en bordure du littoral
T	

Vulnérabilité : cet aquifère est vulnérable aux eaux salées de la mer.

Étude complémentaire de cet aquifère : la faible étendue de cet aquifère et son importance économique limitée ne justifient pas de le retenir comme aquifère prioritaire.

***Aquifère 143c (Calcaires jurassiques de la Gardiole) et 143a (Marnes et calcaires du Crétacé au Miocène du Bas Languedoc dans le bassin versant de l'étang de Thau)***

Ce sont des aquifères karstiques caractérisés par des écoulements particulièrement complexes au niveau des exutoires : mélanges d'eaux de nature et d'origine différentes (eau douce, eau salée, eau thermale).

143c : les sources, issues de la Gardiole sont saumâtres ou salées. Des mesures de conductivité dans les ouvrages du secteur de Frontignan montrent une progression du biseau salé qui affecte l'eau souterraine du karst de la Gardiole vers l'intérieur des terres.

143a : la source sous-marine de la Vise subit des phénomènes d'inversac (intrusion d'eau de mer pendant des périodes s'étendant de quelques jours à plusieurs mois). Les eaux sont de type saumâtre sous le cordon littoral et à proximité de la lagune.

Ces aquifères karstiques sont donc déjà affectés par des venues d'eau salée en provenance de la mer. Il est très probable que l'élévation du niveau de la mer les affectera encore davantage. Cependant, en raison de leur complexité et de leur spécificité, la méthode GALDIT nécessitera une adaptation.

**Aquifère 334b2 : Alluvions quaternaires récentes de l'Hérault entre le Pont du Diable et la mer**

G	Aquifère libre dans sa partie amont, puis captif en aval de Bessan à proximité du littoral, du fait de la présence d'un niveau de limons de couverture dont l'épaisseur augmente vers l'aval, provoquant une mise en charge de la nappe. Les relations hydrauliques sont fortes avec l'Hérault ; des flux de drainance existent avec les sables astiens sous-jacents.
A	Les productivités sont bonnes : de 150 à 200 m <sup>3</sup> /h par forage. Les 12 puits du champ captant de Florensac captent cette nappe en rive gauche de l'Hérault ; c'est le deuxième champ captant de l'Hérault.
L	On ne dispose que d'une piézométrie datant de 1972 ; sa représentativité actuelle est à contrôler.
D	
I	Les eaux sont de bonne qualité jusqu'en amont d'Agde, puis sont polluées par l'intrusion marine au-delà (concentration en chlorures et en sulfates supérieures à 350 mg/l).
T	Les alluvions sont épaisses de 20 à 30 m en bordure littorale, avec un toit situé entre 30 et 40 m d'épaisseur.

Vulnérabilité : malgré la présence d'une couverture de limons, cet aquifère n'est pas protégé de venues d'eau salée en provenance de la mer.

Étude complémentaire de cet aquifère : cet aquifère est productif, se situe dans un secteur où la demande en eau est importante. Il présente *a priori* une vulnérabilité marquée à une élévation du niveau de la mer qu'il serait intéressant d'étudier plus précisément.

**Aquifère 557c : Alluvions quaternaires du Libron**

G	Aquifère libre à captif
A	Les ressources en eau sont limitées. C'est un aquifère hétérogène.
L	
D	
I	Les eaux sont saumâtres au niveau du cordon littoral. Les eaux sont par ailleurs polluées par les nitrates et les pesticides.
T	

Vulnérabilité : la qualité médiocre de l'eau en bordure littorale montre sa vulnérabilité aux eaux salées de la mer.

Étude complémentaire de cet aquifère : la faible productivité de cet aquifère ainsi que sa mauvaise qualité actuelle conduisent à ne pas retenir cet aquifère pour des études complémentaires sur sa vulnérabilité à une élévation du niveau de la mer.

**Aquifère 336d2 : Alluvions quaternaires récentes de l’Orb entre Réals et la mer**

Le contexte de cet aquifère est proche du 334b2 (Alluvions quaternaires récentes de l’Hérault entre le Pont du Diable et la mer).

G	Libre dans sa partie amont, la nappe devient captive à proximité du littoral, du fait de la présence d’une couche de limons de couverture dont l’épaisseur augmente vers l’aval provoquant une mise en charge de la nappe.
A	Les débits d’exploitation ponctuels peuvent aller jusqu’à 100 m <sup>3</sup> /h quand la nappe est réalimentée par la rivière.
L	La piézométrie datant de 1976 nécessite d’être actualisée.
D	L’Orb facilite la remontée de la mer vers l’intérieur des terres en période d’étiage.
I	Cette nappe est sollicitée pour l’AEP de Béziers sans problème d’intrusion saline. Le biseau salé est situé à l’aval de Sérignan.
T	L’épaisseur de la nappe varie de 6 m (en amont) à 30 m (en bordure littorale)

Vulnérabilité : malgré la présence d’une couverture de limons, cet aquifère n’est pas protégé de venues d’eau salée en provenance de la mer.

Étude complémentaire de cet aquifère : cet aquifère est productif, se situe dans un secteur où la demande en eau est importante. Il présente a priori une vulnérabilité marquée à une élévation du niveau de la mer qu’il serait intéressant d’étudier plus précisément.

**Aquifère 337a : Alluvions quaternaires de l’Aude en aval d’Olonzac**

G	L’aquifère évolue d’un régime semi-captif en amont à captif en aval où les alluvions sont recouvert d’une couverture limoneuse.
A	La productivité est plus élevée en amont. C’est un aquifère très exploité dont les ressources sont liées aux écoulements de surface par réalimentation induite à partir de l’Aude. En aval, la transmissivité est de l’ordre de 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s, et les ressources en eau présentent moins d’intérêt.
L	Carte piézométrique datant de 1965. Elle montre un gradient piézométrique élevé.
D	Aquifère à une dizaine de km du bord de mer.
I	Une zone de qualité médiocre remonte le long de l’Aude mais ne concerne que la zone de faible perméabilité.
T	L’épaisseur mouillée varie de 0 à 20 m en aval.

Vulnérabilité : on peut considérer que la vulnérabilité future de la nappe contenue dans les alluvions de l’Aude entre Coursan et Narbonne sera réduite à cause de la position en retrait par rapport à la mer et du gradient hydraulique élevé.

Étude complémentaire de cet aquifère : l'étude complémentaire de cet aquifère ne se justifie pas compte tenu sa vulnérabilité relativement faible.

***Molasses, calcaires, grès et marnes tertiaires des bassins de Bages-Sigean et de la Berre (557c6) de la plaine de La Palme-Caves (557c7)***

G	Aquifère libre à captif
A	Aquifère peu productif, hétérogène et les ressources en eau sont très peu utilisées. Il n'y a pas d'AEP.
L	Niveau proche du niveau de la mer
D	Faible extension vers l'intérieur des terres
I	Les eaux sont saumâtres le long du littoral, ainsi que certaines émergences littorales
T	Les caractéristiques de cet aquifère sont très hétérogènes.

Vulnérabilité : cet aquifère est allongé le long de la mer et plusieurs étangs le recouvrent. Il est déjà vulnérable comme le montre la qualité des eaux.

Étude complémentaire de cet aquifère : cet aquifère ne présente pas d'atout aussi bien en quantité qu'en qualité ; il ne sera donc pas retenu pour une étude complémentaire de sa vulnérabilité à une élévation du niveau de la mer.

***Aquifère 225 : Sables et argiles pliocènes du Roussillon***

C'est une ressource en eau relativement peu vulnérable en raison de la présence de niveaux argileux dans les horizons supérieurs. Néanmoins, des problèmes de vulnérabilité se posent ; ils sont liés :

- au risque d'intrusion d'eau salée sur le littoral ;
- à la percolation d'eau contaminée par les forages mettant en connexion plusieurs niveaux aquifères ;
- à des inversions de drainance en raison de l'exploitation de plus en plus poussée du Pliocène marin sableux.

Les intrusions d'eau salée seront favorisées par une élévation du niveau de la mer. Cependant, pour l'aquifère du Plio-Quaternaire, les risques liés aux forages et à l'exploitation ont une importance dominante par rapport à l'élévation du niveau de la mer. La connaissance de la vulnérabilité à une élévation du niveau de la mer apparaît donc comme secondaire.

## **6. Test de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers à différentes échelles : nationale et régionale**

La cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion marine en contexte de surélévation de niveau marin, peut être abordée à l'échelle nationale – de la France Métropolitaine - ainsi qu'à l'échelle régionale. Ce sont deux approches complémentaires.

### **6.1. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES CÔTIERS À L'ÉCHELLE NATIONALE**

#### **6.1.1. Démarche méthodologique**

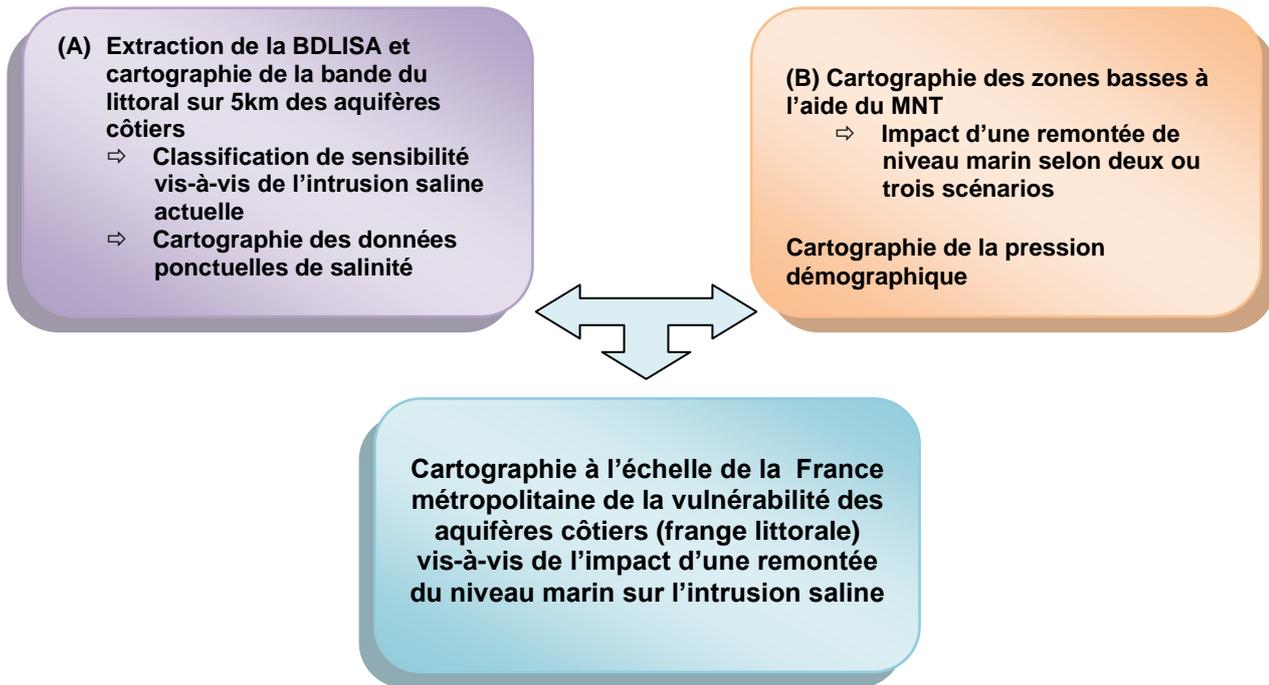
La première permet d'avoir un aperçu général de la situation actuelle et future des aquifères côtiers. Cette approche propose une classification de la sensibilité actuelle des aquifères vis-à-vis des intrusions marines, intègre des informations spatialisées en tant qu'indicateurs de salinité, issues essentiellement des bases de données ADES et des différentes études locales comprenant des données non bancarisées mais attestant d'intrusions salines. Une cartographie des zones basses à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ainsi que de la pression démographique sur ces zones, fournissent des éléments à assembler afin d'obtenir une carte de vulnérabilité pour différents scénarios de surélévation du niveau marin.

La démarche peut être schématisée comme décrit en illustration 25.

Cette démarche est en cours de développement ; l'assemblage des deux parties A et B, n'est pas encore finalisé. Des tests doivent encore être réalisés et seront finalisés en 2011. En 2010, les différentes cartes ont été réalisées mais non assemblées, pour la façade atlantique : de la région Nord-Pas-de-Calais jusqu'en Aquitaine. La façade méditerranéenne n'a pas été traitée en 2010, le référentiel BDLISA n'étant pas mis à jour pour ce secteur. Ce sera le cas en 2011. Des questions restent posées sur l'assemblage de ces différentes cartes : a-t-on recours à des pondérations, si oui lesquelles et selon quels critères ?

Le référentiel des systèmes aquifères BDLISA comprend un classement des entités :

- selon la NATURE des aquifères, traduite en notion de perméabilité/conductivité hydraulique: unité imperméable, semi-perméable ou perméable ;
- selon le TYPE de milieux aquifères : milieu poreux, milieu fissuré, karstique ou à double porosité.



*Illustration 25 : Schéma de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale.*

Sur la base du référentiel BDLISA disponible à la fin 2010, les hydrosystèmes côtiers ont été cartographiés sur une bande de 5 km le long de la côte. Les zones non couvertes par le référentiel à la fin 2010 correspondent aux zones de la côte méditerranéenne ; cette couverture sera complétée en 2011 ; à défaut, les masses d'eau sont utilisées.

Le référentiel est basé sur un système de superposition des entités; il permet de caractériser en chaque endroit l'ORDRE de l'aquifère ou de la couche imperméable. Il est possible ainsi d'identifier facilement si un aquifère est libre ou non, s'il est situé sous une couverture de type couche imperméable. Ce référentiel reste en dimension « 2D1/2 » ; il n'intègre ni l'épaisseur de chaque entité, ni l'altitude de la base de l'entité.

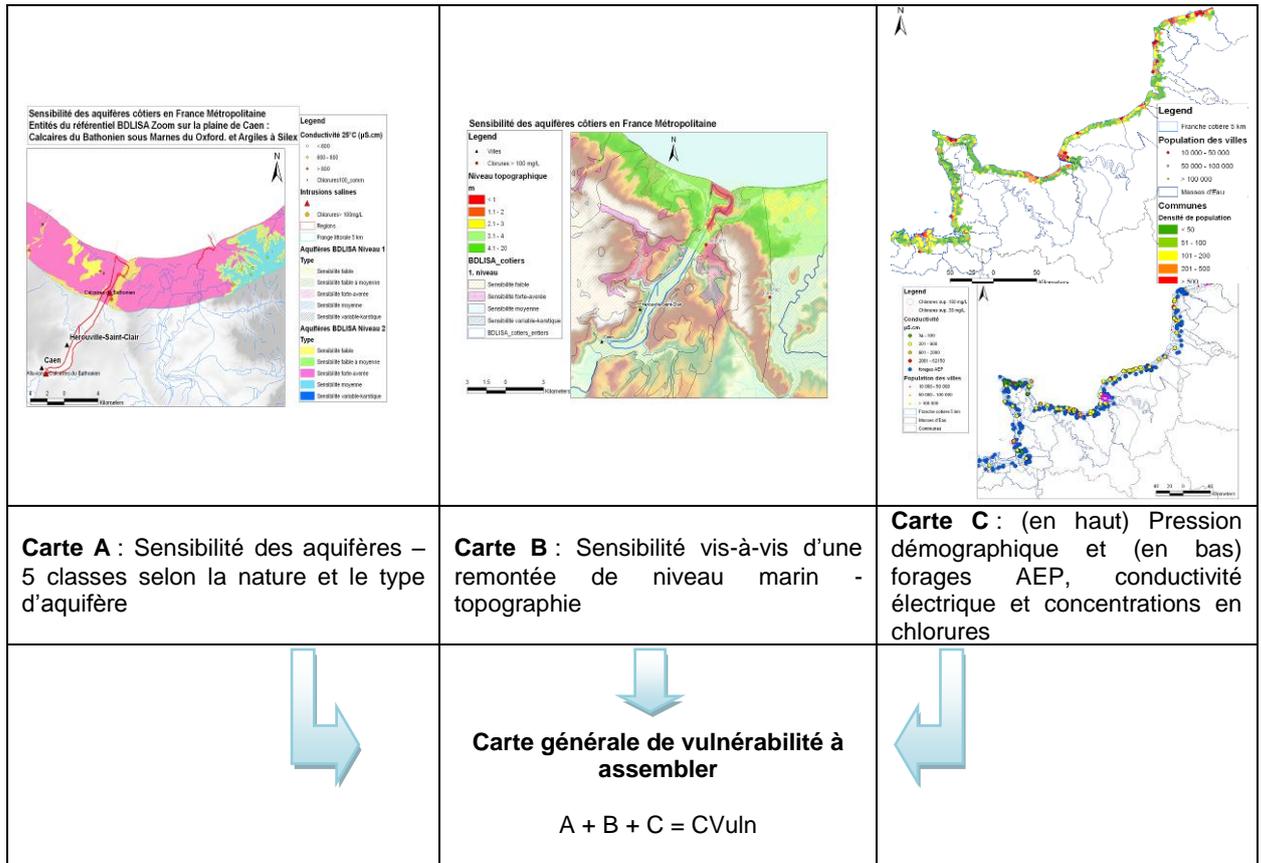


Illustration 26 : Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale.

La caractérisation de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline – carte A – a été menée selon la classification proposée dans le cadre d'une étude réalisée en 2009 en Corse (BRGM-RP-56165-FR). La cartographie est effectuée à partir des informations de la BDLISA, des entités hydrogéologiques. Les cinq classes sont les suivantes :

- **Classe « Sensibilité faible »** : les entités de nature imperméable sont classées sous le vocable de « sensibilité faible ». Secteur caractérisé par des formations imperméables non aquifères : en général couche argileuse pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacent ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.
- **Classe « Sensibilité faible à moyenne »** : les entités de nature semi-perméable sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multi-couches comme on peut les trouver dans des zones de deltas, 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 une intrusion saline par biseau salé, pouvant être multiples et superposés, en fonction de la configuration, de la géométrie du multi-couche.

- **Classe « Sensibilité moyenne »** : les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élevée, pouvant correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux caractérisés par une K moyenne de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s), des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.
- **Classe « Sensibilité variable – karstique »** : les aquifères karstiques sont caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale des zones de perméabilité hydraulique variable ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace (en x et en z). Du fait des variations du niveau eustatique au cours de temps géologiques, des conduits peuvent être présent 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, d'autant plus s'il y a des sources sous-marines étagées, un aquifère d'une sensibilité variable, pouvant être forte et avérée également. 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.
- **Classe « Sensibilité forte »** : les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière **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.**

À noter que la classification « sensibilité forte » n'a pas encore été attribuée aux aquifères, dans le cadre de l'action de 2010. Ces entités n'ont pas encore été identifiées sous BDLISA et seront traités en 2011. De plus, en croisant les informations de la bibliographie des études régionales, il est possible de qualifier une sixième classe, la **Classe « Sensibilité forte-avérée »** : les intrusions salines sont existantes et il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation.

Dans la plupart des cas, les zones d'intrusion saline sont des zones très localisées. Dans ce cas, il n'est pas envisageable d'attribuer la classe de « sensibilité forte avérée » pour un aquifère côtier de grande extension. Seules les localisations d'intrusion salines connues sont représentées. Cette manière de faire permet de mieux discriminer la sensibilité des aquifères.

Les différentes classes sont représentées sous forme de cartes selon leur niveau d'ordre ou d'apparition (du haut vers le bas).

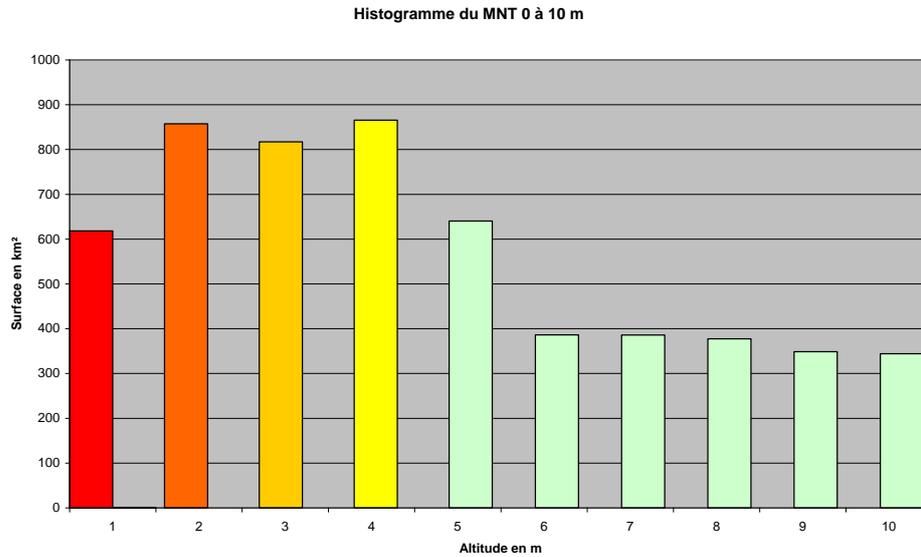
Les cartes concernant trois régions de la France Métropolitaine, rassemblent les entités de trois ordres (avec la prise en compte de la superposition des aquifères) ; les

aquifères de surface en contact direct avec la mer classés en « sensibilité forte avérée » sont représentés au-dessus des autres entités. Ces cartes sont présentées accompagnées d'un commentaire sur l'état des connaissances.

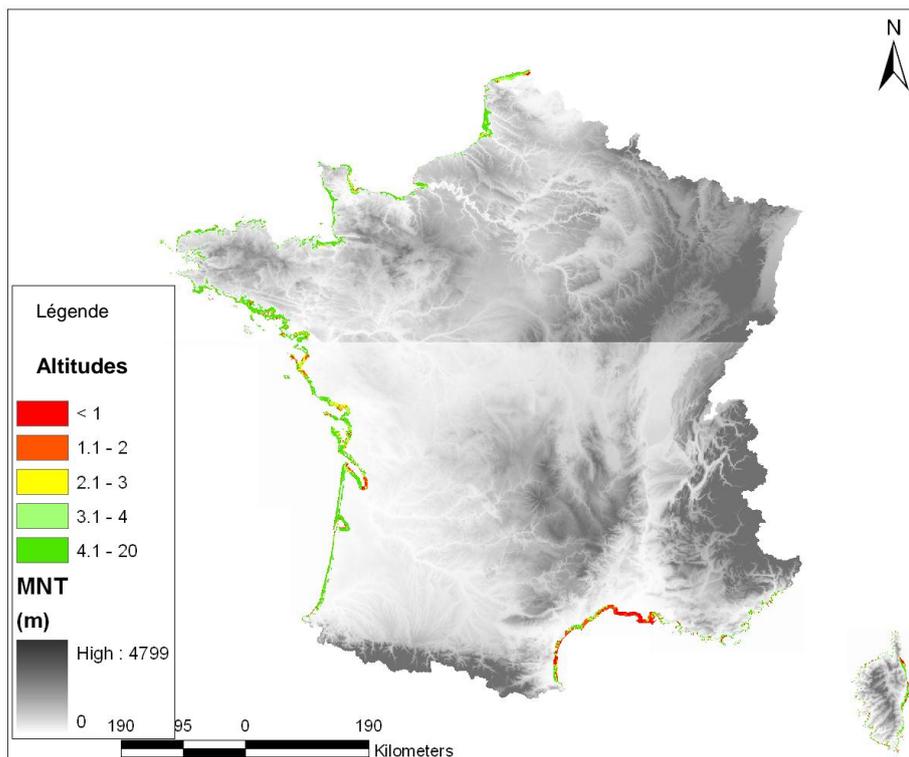
Sur ce type de carte de sensibilité des aquifères côtiers, (carte A, cf. illustration 26) figurent également les ouvrages contaminés par des intrusions salines ; pour ce faire, les données de concentrations en chlorures et de conductivité électrique sont extraites de la base de données ADES. Une classification est proposée pour les conductivités électriques : > 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 600 à 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et > 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Considérant la variabilité spatio-temporelle des valeurs de conductivité électrique au sein des aquifères et pour différents types d'aquifères : (i) de 500 à 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les calcaires et la craie, (ii) 100 à 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les aquifères du socle et (iii) 400 à 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les sables et les informations suivantes : les valeurs inférieures à 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de manière générale correspondent à des aquifères dont les eaux souterraines ne sont à priori pas influencées par des contaminations naturelles et anthropiques ; des valeurs comprises entre 900 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondent à des eaux souterraines probablement influencées par des intrusions salines et d'autres contaminations et finalement pour des valeurs supérieures à 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , les eaux souterraines de ces aquifères sont très probablement influencées par une intrusion saline ; les valeurs supérieures à 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  cartographiées correspondent très vraisemblablement à des points d'eau concernés par des intrusions salines et/ou une contamination forte aux nitrates. Pour rappel, la conductivité électrique de l'eau de mer est d'environ 30 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (pour quelques 20 g/l).

La cartographie des zones sensibles à une submersion liée à une élévation du niveau marin est réalisée en considérant le modèle numérique de terrain (carte B). Les aquifères situés dans les zones littorales comprenant des zones basses topographiques sont à priori les plus sensibles vis-à-vis d'une submersion et donc d'une intrusion saline de manière générale. Ces zones peuvent avoir une superficie importante au niveau des zones d'estuaire par exemple. Ces zones sont soumises aux intrusions salines, avec un transfert des eaux saumâtres au travers des alluvions vers les aquifères sous-jacents. Ces intrusions salines dépendent de la pente de la ligne d'eau et du débit de la rivière, et indirectement du MNT.

Une analyse de sensibilité des nappes vis-à-vis d'une élévation du niveau marin sur l'intrusion saline des aquifères a été réalisée en utilisant le MNT de l'IGN, disponible à l'échelle métropolitaine. La grille du MNT de 50 m de côté est dérivée des courbes de niveau, ces courbes pouvant avoir une précision de 1 m, 5 m, 10 m ou 20 m. La précision de la grille, interpolée à partir de ces données diminue avec la résolution métrique du z. (Source : BD ALTI, descriptif technique). Cependant, la précision des données influencera les incertitudes concernant les surfaces des zones submergées. Selon les scénarios du GIEC, le niveau de la mer augmentera de 0,2 à 0,6 m, voire 1 m. Une précision de un à deux mètres est considérée sur les zones des côtes. Ainsi, des zones de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m et supérieur à 4 m ont été cartographiées.



**Niveaux topographiques sur les côtes en France Métropolitaine**



*illustration 27 : Cartographie et tableau de la répartition des surfaces par altitude pour l'ensemble des côtes de Métropole.  
(0 à 1 m : risque de submersion permanente et temporaire - retour d'un événement tous les 20 ans).*

Dans le cadre des travaux menés par le groupe de travail thématique Risques Côtiers du GT nationale « Risques naturels, assurance et changement climatique (RNACC) », les submersions permanentes sont distinguées des submersions temporaires, ces dernières pouvant atteindre 3 mètres. En prenant en compte la précision du MNT, l'évaluation des zones submergées permanentes a été faite selon la simplification suivante : augmentation de l'altitude des zones côtière de +1 m NGF.

Élévation du MNT IGN	Surface	Submersion permanente (SP) Submersion temporaire bi-décennale (ST 20ans)
1 m	786 km <sup>2</sup>	SP et ST
2 m	993 km <sup>2</sup>	ST
3 m	926 km <sup>2</sup>	ST

Illustration 28 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi-décennales.

Un exemple est donné pour la plaine de Caen (Illustration 29).

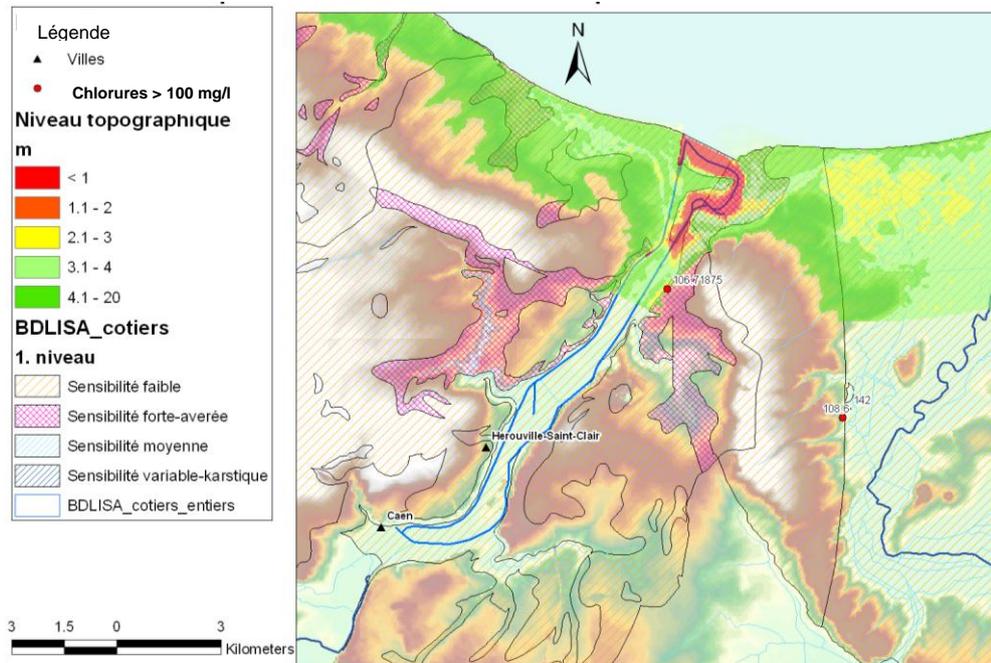


Illustration 29 : Exemple de la plaine de Caen (MNT sur 5 km).

Les zones de faibles élévations sont sensibles à l'intrusion saline si la piézométrie n'est pas affectée par un fort gradient. S'il n'existe pas de piézométrie pour un aquifère sédimentaire de surface, une première approche est de considérer la pente de la surface topographique. Dans les zones basses, en particulier dans les grands deltas alluvionnaires, le gradient hydraulique est faible. Dans ces zones de faible élévation et de faible pente, une pente piézométrique faible peut être soupçonnée. Ces zones seront les plus sensibles vis-à-vis d'une intrusion saline.

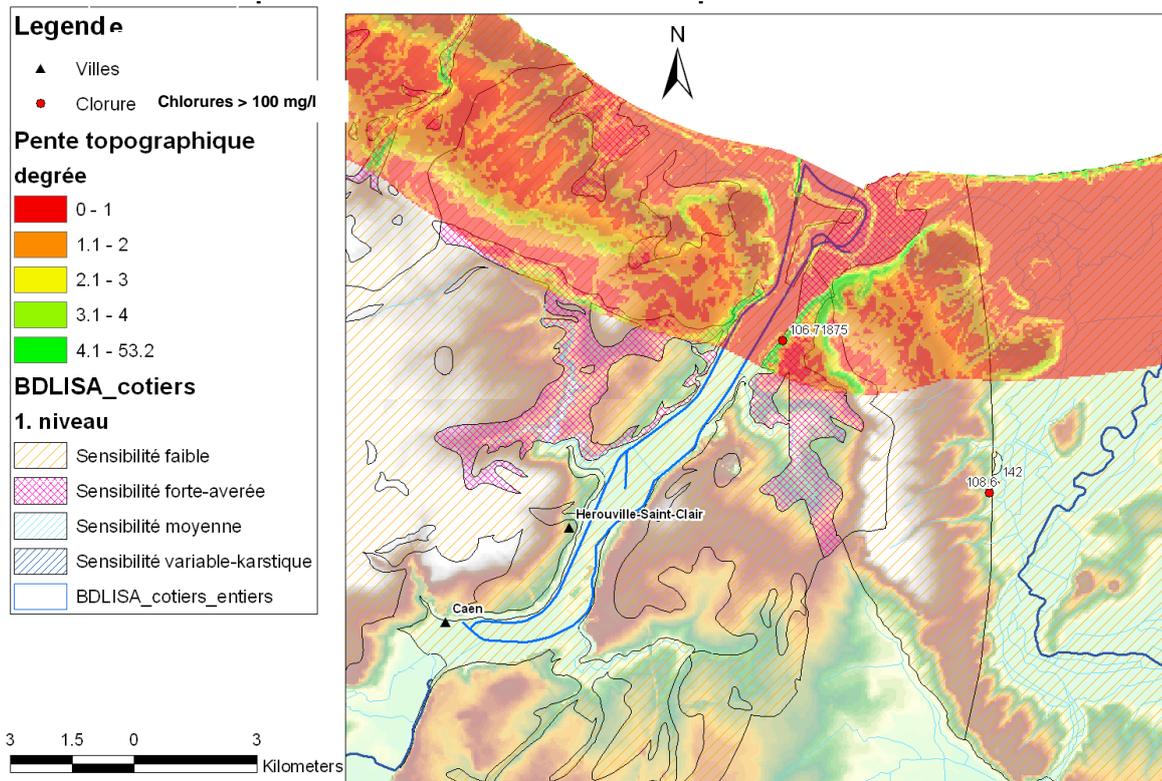
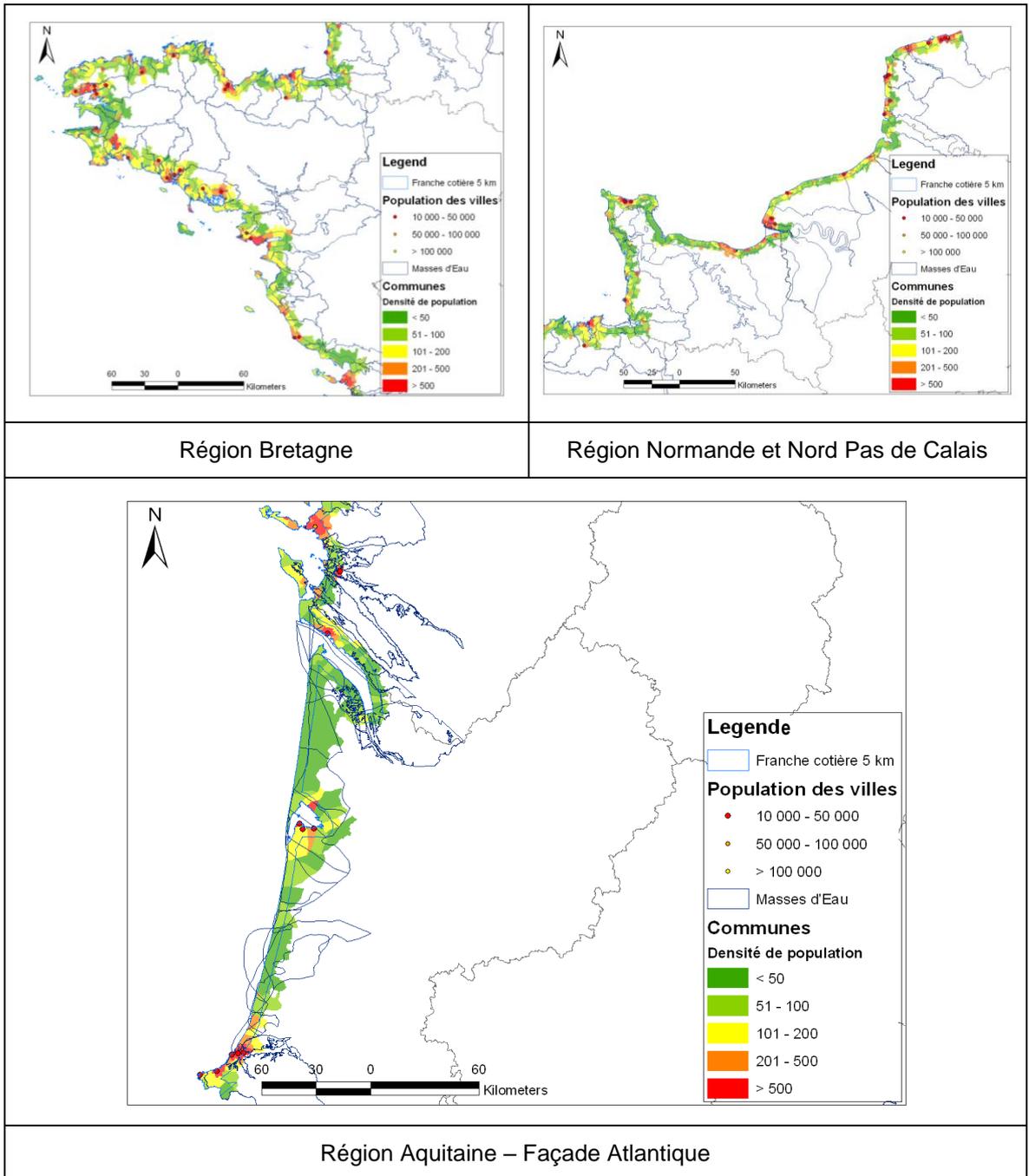


illustration 30 : Exemple de la plaine de Caen (pente sur 5 km) et sensibilité des aquifères.

La cartographie de la **pression anthropique** est également un élément de la **carte B** de la méthode.

La pression anthropique est importante sur les zones littorales. Cette pression a bien évidemment des répercussions potentielles sur les ressources en eau – augmentation des prélèvements pour l'alimentation en eau potable de manière saisonnière liée au tourisme, aux résidences secondaires par ex. ; elle constitue un des facteurs externes impactant les aquifères côtiers.

Selon l'IFEN, 785 communes sont situées en bord de mer ou d'océan et 87 communes sur des estuaires ou deltas. Ces dernières sont définies par décret de 2004, comme étant situées sur les cours d'eau littoraux. L'urbanisation des côtes françaises se poursuit, la population résidentielle est en croissance continue notamment dans les villes de 10 000 à 50 000 habitants. À cela, il faudrait bien évidemment rajouter la densité de population saisonnière liée à l'activité touristique, pour qualifier la pression sur la ressource en eau. La densité de la population est cartographiée sur les cartes suivantes et les villes de 10 000 à 50 000 hab. distinguées par des points rouges.



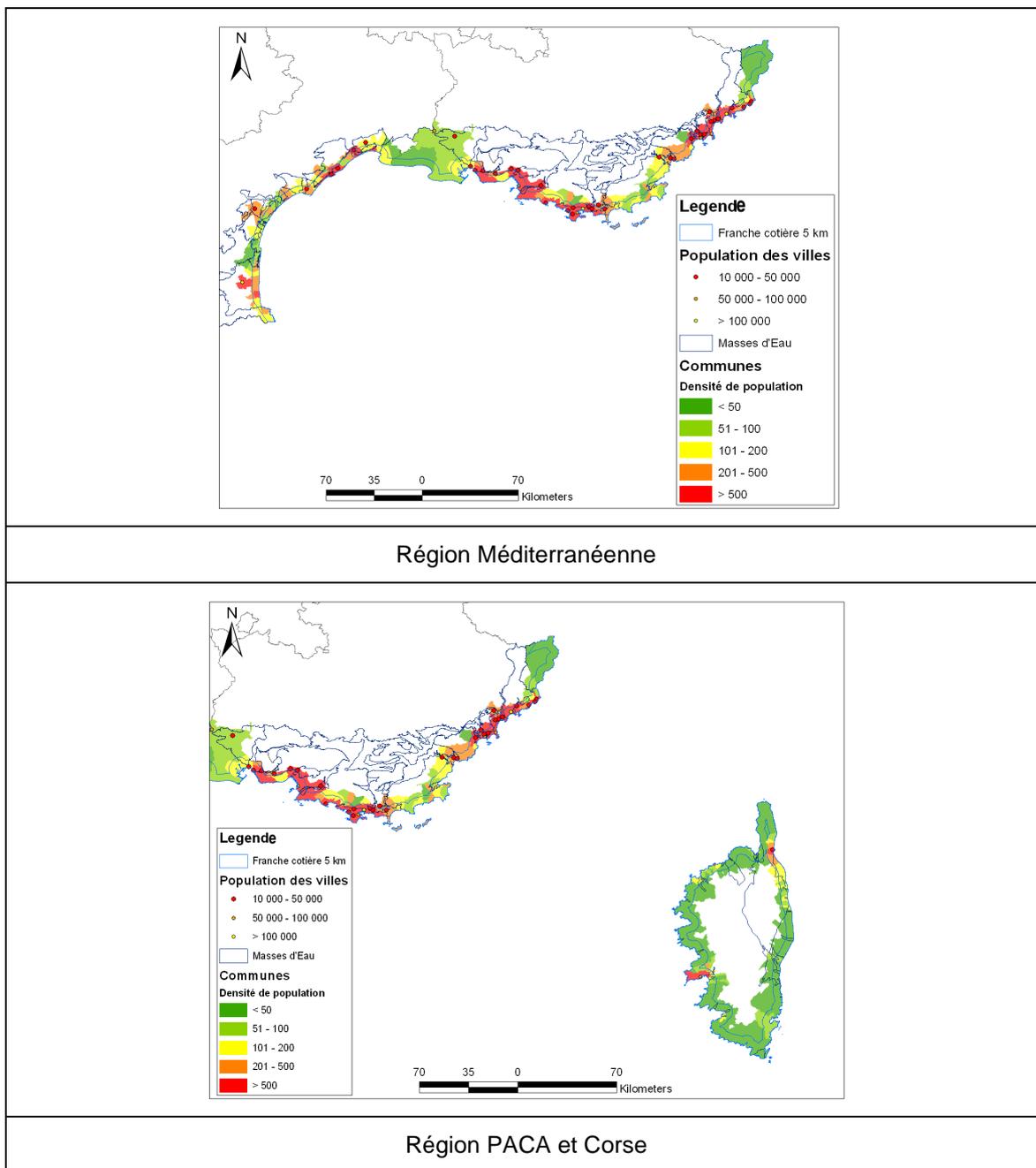


Illustration 31 : Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine.

À la lecture de ces cartes, on peut constater que la pression anthropique est la plus forte sur la façade méditerranéenne. Il est important de voir quel impact cela pourra représenter sur une sensibilité d'aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion saline en contexte naturel et de changement climatique.

D'autres cartes ont été réalisées, mais pas encore exploitées à ce jour, à savoir des cartes de représentation des forages destinées à l'alimentation en eau potable et des classes de conductivité électrique. Ces données permettront d'apporter un crédit ou une forme de validation du résultat final de la carte de vulnérabilité à l'échelle des côtes de la France Métropolitaine (annexe 2).

L'agriculture domine notamment sur les littoraux de la Somme, de l'Hérault et du Calvados à la Charente-Maritime. Une recherche des données de prélèvements d'irrigation serait à réaliser en 2011 pour quantifier ces prélèvements et leur évolution.

### 6.1.2. Exemples d'application à l'échelle de trois secteurs littoraux métropolitains

#### *Régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie*

La façade littorale des deux régions, de 230 km de long, est constituée de quatre aquifères principaux.

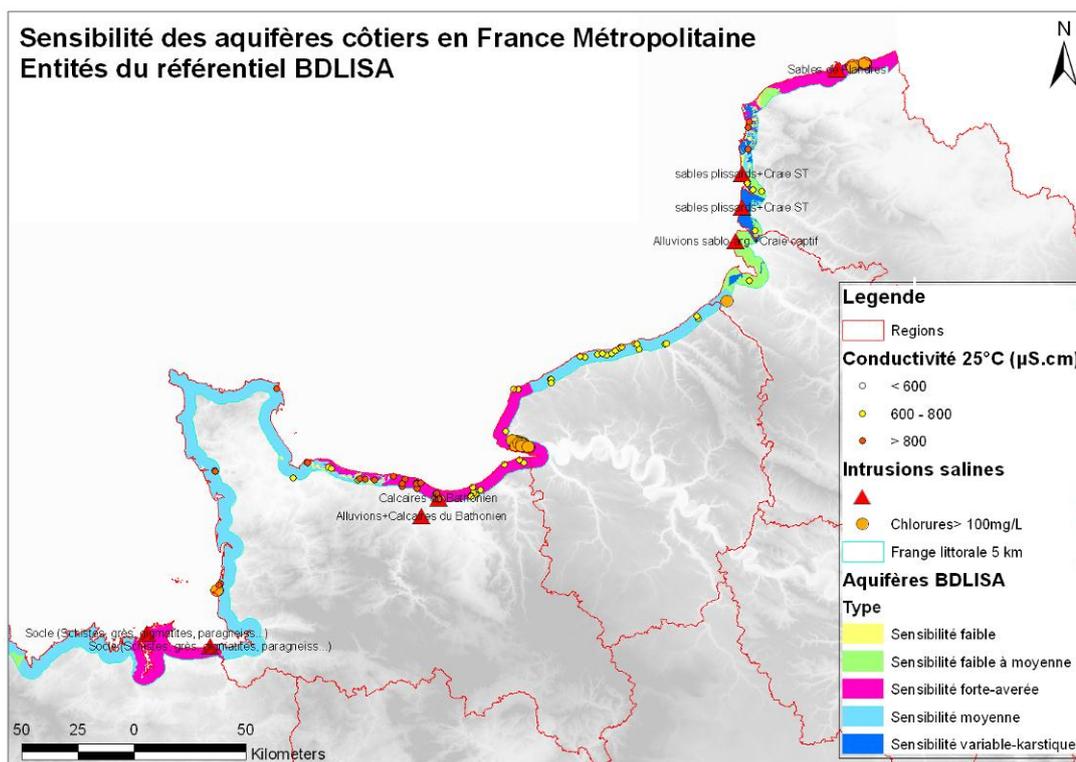


illustration 32 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la région Nord-Pas-de-Calais et Picardie.

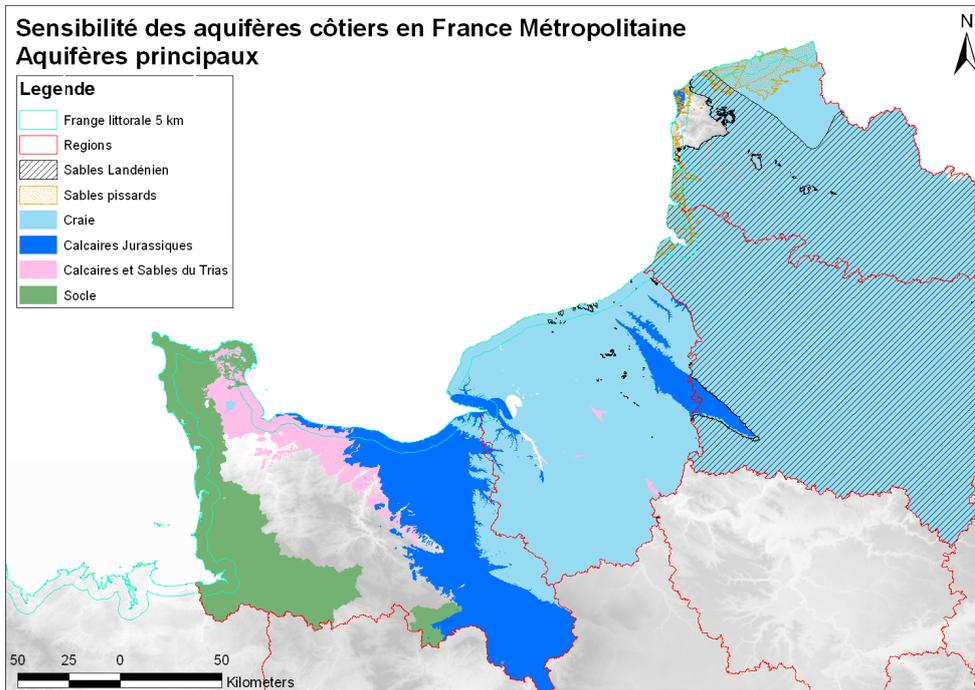


Illustration 33 : Carte des principaux aquifères – Région Nord-Pas-de-Calais.

- **1) Les Craies séno-turonniennes (cf. Illustration 33)**

Au Nord de la région Picarde et au Sud de la région Nord-Pas-de Calais, au droit de la plaine maritime, la nappe de la craie se situe en charge sous les formations sablo-argileuses des Bas Champs, alors qu'elle est libre sous le plateau picard. Cet aquifère est peu perméable sous couverture et de ce fait captif. Le niveau piézométrique peut être égal à celui de l'aquifère des graviers des « foraines » très perméable et se retrouver ainsi en équilibre hydrodynamique. Les variations inter-saisonnières du niveau piézométrique de cet aquifère sont très faibles (inférieures à 1 m), du fait du régime captif. De plus, les marées n'influencent pas les battements de la nappe.

- **2) Les sables du Landénien supérieur**

L'aquifère est constitué par les sables du Landénien supérieur (reposant sur les argiles du Landénien inférieur). Le toit de cet aquifère est situé sous les argiles yprésiennes vers 120 -130 mètres de profondeur : son régime hydraulique est donc captif. Compte tenu de cette profondeur, l'aquifère du Landénien, peu ou pas productif est peu exploité. Du fait de la présence de la couverture argileuse, cet aquifère est peu vulnérable.

- **3) Les sables pissards ou sables flandriens (ou nappe des Bas Champs)**

Cet aquifère renferme une nappe libre à proximité de la mer. La nappe s'écoule dans les alluvions sablo-argileux récents. L'aquifère est constitué par une plaine maritime

dont la faible altitude (+3 à +5 m NGF) et la quasi-platitude du relief lui confèrent le nom de « Bas Champs ». La nappe libre des sables est sub-affleurante (- 1 à - 2 m) et peut même être légèrement artésienne et affleurer dans les mares, les zones marécageuses et le réseau de drainage. Les fluctuations sont étroitement liées aux variations climatiques et aux phénomènes de marée à proximité du littoral. Les eaux souterraines s'écoulent très peu et très faiblement et sont drainées par le réseau de canaux. La nappe est directement alimentée par les eaux météoriques. Son exploitation est rendue difficile en raison d'une faible productivité de l'aquifère, associée à une faible granulométrie des éléments qui entraînent des difficultés techniques d'exploitation (venue de sables). Etant proche de la surface, cet aquifère est extrêmement vulnérable à la contamination par intrusion saline, et ne reste exploité que très localement pour des besoins domestiques, agricoles ou industriels.

- **4) L'aquifère des dunes côtières**

D'extension très limitée, en position haute par rapport à la mer et donc pas en contact avec l'eau salée, les sables des dunes renferment une nappe perchée. Elle est alimentée par les eaux météoriques ; le mur est constitué par les formations quaternaires moins perméables des Bas Champs. Cette nappe n'intervient pas dans le problème d'intrusions salines du fait de son caractère perché.

*État des eaux souterraines et pression anthropique*

L'habitat est de type rural, avec toutefois quelques stations balnéaires qui attirent de nombreux touristes chaque été.

Les besoins en eau sont principalement assurés par des captages isolés en dehors de la zone littorale, sur le plateau dans l'arrière-pays. Aucun problème de venue d'eau salée, due à une migration du biseau salé, n'a pour l'instant été détecté sur le plateau.

La nappe perchée des dunes est localement utilisée pour l'arrosage, elle n'est pas en contact avec l'eau de la mer.

Les aquifères littoraux du Nord-Pas-Calais et de la Picardie sont très peu exploités du fait d'une mauvaise productivité mais également d'une qualité parfois médiocre (teneurs élevées en fer, en chlorure et biseau salé). De ce fait, il n'existe que très peu d'informations sur l'intrusion d'eau de mer dans ces aquifères, si ce n'est que le contact eau douce/eau salée dans la nappe de la craie semble avoir une pente très prononcée.

De nombreux projets de captages ont dû être abandonnés sur le littoral picard, car la nappe captive peut atteindre des valeurs élevées dépassant largement les limites de potabilité de 250 mg/l pour les chlorures et être supérieures à 10 mg/l pour le fer. Le fer provient essentiellement des dépôts quaternaires sus-jacents.

Cependant, si l'on devait l'exploiter plus intensément, il faudrait éviter de créer un champ captant dans la vallée de la Somme car l'effet des marées y est sensible jusqu'à Abbeville et toute dépression dans la nappe de la craie risquerait par moment d'entraîner des venues d'eau salée.

Plusieurs intrusions salines locales sont connues dans les deux régions du Nord ; de plus il y a un aquifère à sensibilité forte – avérée :

- entre le Port Est et Dunkerque, les Sables flamands superficiels sont très sensibles ; grand nombre de mesures montrent des concentrations en chlorures largement supérieures à 100 mg/L ;
- les sables pissards en contact avec la craie séno-turonienne : 3 zones ponctuelles d'intrusion saline existent ;
- sur la plage d'Hardelot, des eaux saumâtres ont été détectées à faible profondeur (< 30 m) dans des puits à plusieurs kilomètres à l'intérieur de la terre et sur la plage de Merlimont. Le niveau d'eau douce a été mesuré proche de la surface tout au long du transect. En revanche, la profondeur du niveau salé est variable : il s'enfonce rapidement au niveau de la côte, mais fluctue dans l'intérieur des terres.
- la zone du « Bas Champs » est une zone vulnérable du fait de son niveau bas, une zone inondable par grandes marées, protégée par des digues et drainée par un réseau complexe de canaux. Une zone située dans les « Bas Champs » en Picardie sur la commune de Quend a été étudiée en 2010. La présence de résidus de sel stagnant à la surface de l'eau de la mare et détruisant la végétation pourrait être liée à un nouvel ouvrage captant la nappe captive de la craie depuis 2010 (V. Bault, 2010) ;
- des zones de concentrations en chlorures et en conductivité élevées sont mises en évidence, au niveau de la commune de Dunkerque et de Grande-Synthé, dans l'aquifère des Sables pissards (sables du Landénien des Flandres) ; plusieurs forages montrent des concentrations en chlorures supérieur à 100 mg/L.

### ***Régions de Haute-Normandie et de Basse-Normandie***

La longueur des côtes des deux régions de la Normandie est de 650 km. Dans le département de la Manche, les aquifères du socle prédominent. Au nord du département et au nord-ouest de la région, les Calcaires, Sables et Argiles du Trias affleurent. Les différents calcaires du Jurassique sont en contact avec la franche littorale de l'ouest au nord-est : des Calcaires du Jurassique inférieur aux calcaires du Jurassique supérieur (Oxfordien) dans le département du Calvados. La Craie du Crétacé (Turonien) au Nord de la région de la Haute-Normandie s'étend également vers la région de Picardie. Ces aquifères sont couverts en grand partie par les argiles à silex. Des aquifères alluviaux dans des vallées basses et estuaires de la Normandie forment également des réservoirs importants.

Un zoom est apporté sur la plaine nord de Caen : sous les calcaires de Caen au sens strict, les couches du Bathonien inférieur évoluent en fond de vallée de l'Orne vers des faciès plus marneux, formant les couches dites des Bancs Bleus. En-dessous on retrouve l'aquifère multicouche dit du Bajocien, qui comprend les différentes couches calcaires allant du Toarcien moyen au Bajocien Supérieur. Les argiles à Poissons du Toarcien inférieur constituent le plancher imperméable de cet aquifère du Bajocien. Ces deux unités aquifères carbonatés sont des aquifères à porosité de fissures marquée. C'est donc en bonne partie l'état de la fissuration (densité, ouverture, état de

colmatage, karstification, etc.) qui va déterminer la conductivité et la réactivité de ces aquifères carbonatés. Ce sont des aquifères à fluctuation libre.

Les aquifères superficiels tels que le système alluvial de l'Orne, sont constitués par une succession d'alluvions fluviales récentes, de dépôts fluvio-marins flandriens et des alluvions anciennes. L'inversion quotidienne des sens d'écoulement par effet des marées favorise le brassage des eaux à l'intérieur des nappes alluviales comme celui de l'Orne, ce qui accentue encore la vulnérabilité de la nappe superficielle, sans compter les effets directs liés aux intrusions salines.

• **État des eaux souterraines et pression anthropique**

De nombreux captages pour l'alimentation en eau potable et des pompages industriels se trouvent à proximité des côtes. Les aquifères exploités sont surtout les calcaires du Bajocien et du Bathonien ainsi que les alluvions dans les estuaires et basses vallées de la Touques, de la Dives et de l'Orne, notamment dans la plaine de Caen. L'aquifère de la Craie du Crétacé est essentiellement exploité à l'intérieur des terres.

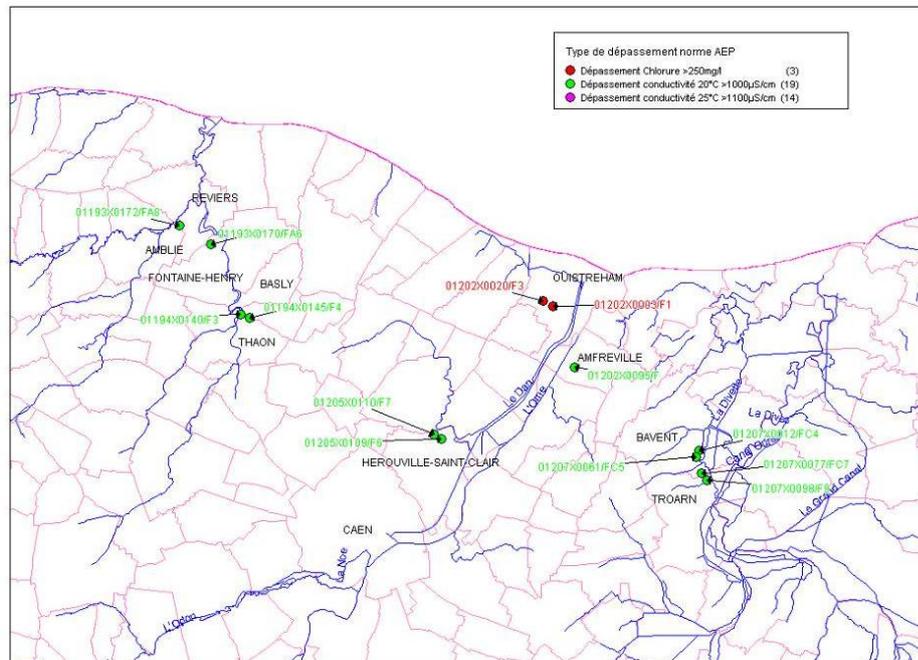


Illustration 34 : Carte de dépassement des normes de potabilité sur des captages AEP (concentrations en chlorures et en conductivité) dans la zone de Caen.

Des zones d'intrusions salines sont mises en évidence au niveau de la vallée de l'Orne. Certains forages sont caractérisés par une conductivité et/ou un taux de chlorure important.

On note que des zones influencées par une intrusion saline affectent une zone plus importante que la frange littorale de 5km de large, jusqu'à 8 km à l'intérieur des terres. Notamment au niveau de la zone située entre Caen et la mer le long du canal maritime ; ce dernier entaille profondément les Alluvions quaternaires et atteint

localement les calcaires bathoniens. L'apport des eaux douces sont insuffisants en période d'étiage pour repousser les eaux salées. Des prélèvements avec d'importants rabattements peuvent accentuer également ce phénomène.

Des mesures de chlorures ou de conductivités électriques élevées sont constatées dans différents secteurs :

- dans la commune de Béthencourt-sur-Mer, un forage dans la craie montre des valeurs élevées en Chlorures supérieures à 100 mg/L ;
- entre le Havre et Sandouville, 35 forages indiquent des concentrations en chlorures supérieures à 100 mg/L ;
- dans les Calcaires du Bathonien notamment sur la côte au nord de Bayeux à Caen, une quinzaine de forages indiquent des mesures de conductivité élevée avec des valeurs supérieures à 800  $\mu$ S/cm. On remarque aussi, qu'ils existent des mesures de chlorures élevées qui ne concernent pas des ouvrages situés en bordure de mer ou du canal maritime, mais dans des zones de marais dont les canaux de drainage sont envahis à marée haute ;
- au nord de Granville, dans l'aquifère de socle, 4 forages indiquent des valeurs en Chlorures supérieures à 100 mg/L et des conductivités élevées (supérieurs à 800  $\mu$ S/cm).

### ***Les Aquifères littoraux du Massif Armoricaïn (régions Bretagne et Pays-de-la-Loire)***

Les côtes du socle du Massif Armoricaïn s'étendent sur environ 1 900 km, ou 2 900 km si on inclut tous les estuaires intérieurs.

Le sous-sol de la Bretagne et de la partie nord des Pays-de-la-Loire est constitué par des formations indurées du Massif armoricaïn. Dans les aquifères du socle, notamment les granites, les schistes, les gneiss et quartzites se forment de petits systèmes aquifères locaux et hétérogènes. Ces aquifères sont caractérisés par une hétérogénéité et une anisotropie, les eaux souterraines circulant à travers des fractures, fissures et au sein des zones d'altération. Au Sud de la région du Pays-de-la-Loire, apparaissent les Sables du Pliocène et Calcaires et grès de l'Éocène sus-jacents aux formations du socle.

La nature du socle a été définie en considérant le pourcentage majoritaire des secteurs perméables, semi-perméables ou imperméables :

- si les surfaces sont majoritairement perméables → l'unité est classée en perméable → sensibilité moyenne ;
- si les surfaces semi-perméables sont supérieures aux surfaces perméables ET la somme des deux est supérieure aux surfaces peu perméables → l'unité est classée en semi-perméable → sensibilité faible à moyenne ;
- aucune entité n'est composée uniquement de zones majoritairement imperméables.

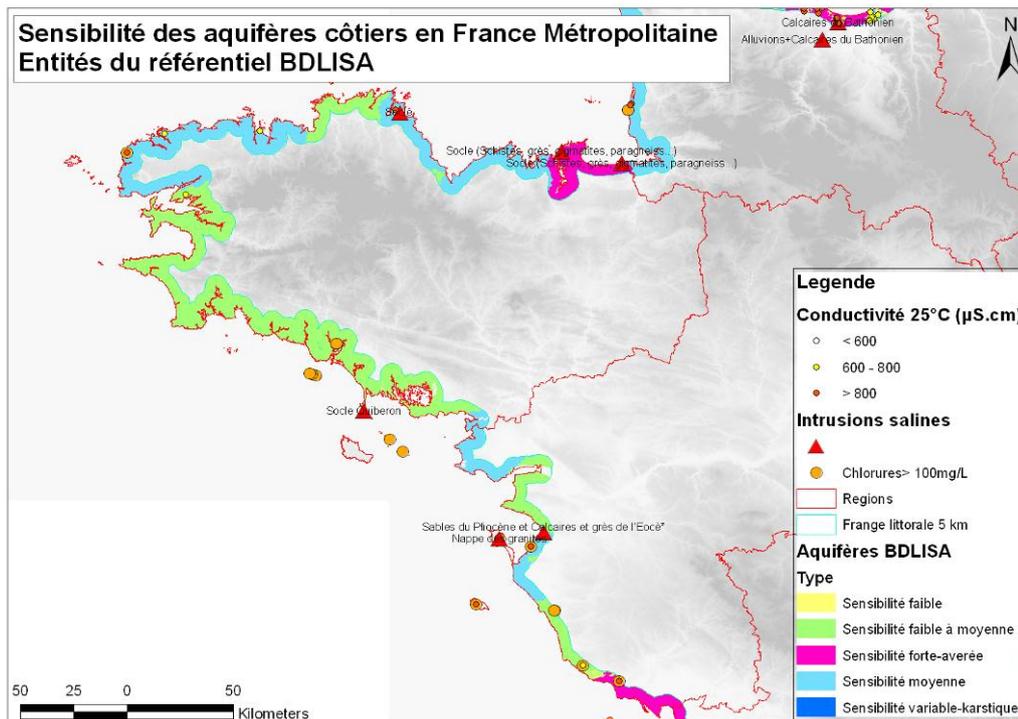


Illustration 35 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne.

En Bretagne, les Rias (exutoires des rivières en milieu de socle) peuvent présenter des zones sensibles aux intrusions salines, même si les entités sont plutôt de type semi-perméable. Une analyse à dire d'expert le long de la côte devrait permettre de définir ces zones pour les classer en « sensibilité forte », comme les aquifères alluviaux.

### • État des eaux souterraines et pression anthropique

Dans les conditions hydrogéologiques de la région avec des aquifères de petites superficies, même si les fractures créent des axes de circulations privilégiés, une avancée du front salé en cas de surexploitation ne peut être que locale. Cependant, au droit des presqu'îles et des îles, les circulations privilégiées dans des milieux fracturés peuvent créer de nombreuses zones très vulnérables, dès que les forages sont installés en profondeur ou exploités avec des rabattements importants (niveau piézométrique descendant sous « le zéro maritime »). La vulnérabilité est très fortement liée à l'exploitation, pour ces aquifères de socle.

Dans le cadre de l'étude des aquifères littoraux de France en 1996, une sensibilité des aquifères au risque d'invasion salée et vulnérabilité anthropique avait été réalisée, permettant de différencier 4 classes de sensibilité « intrinsèques » à partir de l'analyse des débits de 9400 forages (recensés à fin 1994). La densité des forages AEP a permis d'attribuer un indice pour la vulnérabilité anthropique. On obtient une zone

plutôt perméable sur la côte nord de la Bretagne et plutôt peu perméable et peu sensible sur la côte sud.

L'analyse des types de roches réalisées dans le cadre de l'étude du référentiel BDLISA a permis de classer les aquifères suivant une perméabilité la plus représentative de l'entité. Cette dernière analyse confirme le résultat de 1996 avec des aquifères plutôt perméables au nord et plutôt peu perméables au sud de la Bretagne.

Les zones d'intrusions salines reconnues sont :

- aussi bien dans le secteur de Quiberon que celui de Paimpol, certains forages, soit mal réalisés, soit mal exploités, produisent de l'eau saumâtre ;
- les aquifères situés en Ille-et-Vilaine entre Saint-Malo et Roz-sur-Couesnon sont exploités pour l'alimentation en eau potable des communes riveraines et par les exploitants agricoles (500 forages recensés à fin 2005). Compte tenu de leur densité et de leur profondeur, (nombreux sont très profonds, entre 100 et 202 m) se pose l'éventualité d'une invasion marine par rabattement excessif des niveaux piézométriques ;
- beaucoup de forages sont globalement peu sollicités. Par contre, la période estivale peut conduire à une forte consommation « instantanée » sur quelques semaines ;
- dans le nord du Finistère sont répertoriés des cas d'eaux saumâtres, qui sont reconnues comme des résidus fossiles ;
- en Bretagne, les rias peuvent présenter des zones sensibles aux intrusions salines : ces exutoires des rivières, avec un contact eau douce- eau-salée sur des longueurs importantes peuvent présenter des surfaces importantes de sensibilité à l'intrusion saline, notamment si la pente de la surface piézométrique des eaux douces est faible.

- **Des mesures de chlorures ou conductivités élevés**

- La mesure de la conductivité de l'eau des forages du secteur de Saint-Malo-Roz-sur-Couesnon réalisée dans le cadre d'une étude en 2005 montre des valeurs supérieures à ce qui est observé habituellement dans les eaux du socle du Massif Armoricaïn (de 408 à 40 908  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , alors qu'on trouve généralement des valeurs comprises entre 200 et 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans les aquifères de socle).
- Sur l'île d'Yeu (Vendée), des valeurs élevées des concentrations des chlorures et de la conductivité électrique sont enregistrées au niveau des eaux du socle en profondeur (370 mg/L).
- Dans la commune de Plourin, des mesures de chlorures et de conductivité élevées sont enregistrés (moyenne de 325 mg/L).
- Sur l'île de Groix et les petites îles d'Houat et Hoëdic, les concentrations en chlorures dépassent largement les 100 mg/L.

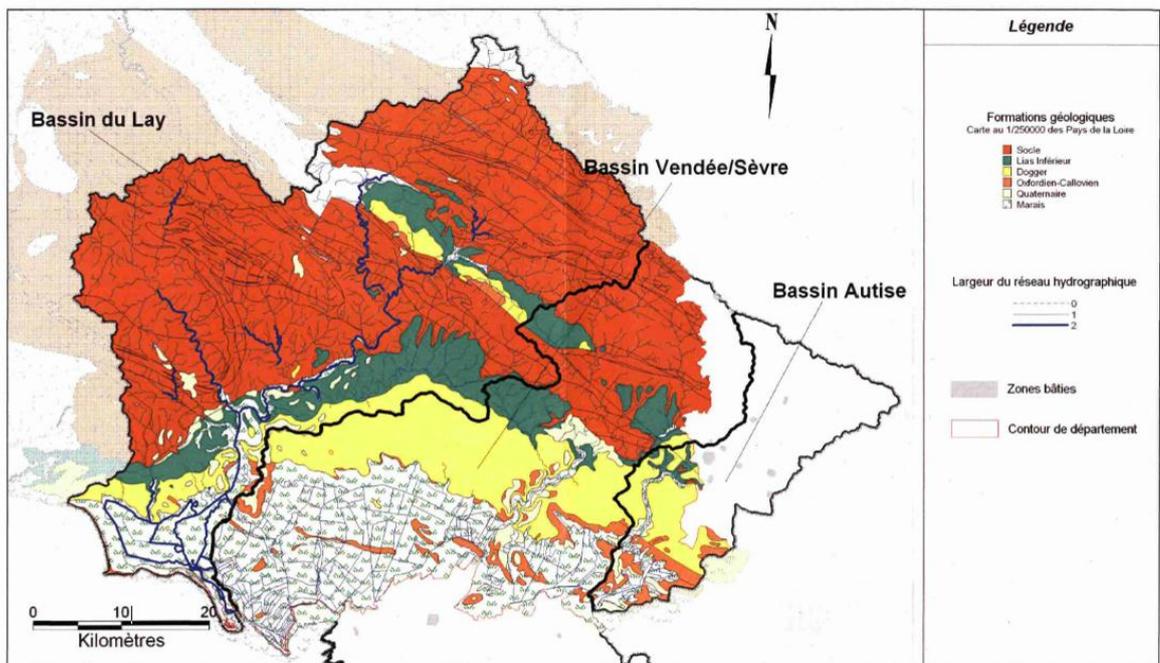
### **Les aquifères sédimentaires de la côte atlantique au Sud du Massif armoricain (Régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes )**

Au Nord de la Vendée, les principaux aquifères du littoral sont ceux du Marais Breton et de Noirmoutier. Dans ces secteurs, les formations sédimentaires sont structurées en remplissages de panneaux de socle plus ou moins affaissés. Elles correspondent à des successions de roches d'âge secondaire ou tertiaire de nature variée : sables, calcaires, grès, argiles. Certaines de ces formations constituent des aquifères importants : sables du Cuisien, calcaires et grès du Lutétien.

Les sables dunaires et surtout les argiles quaternaires (appelées « Bri ») couvrent en grande partie ces aquifères.

Le Sud de la Vendée (plaine Sud Vendéenne) correspond à l'extrémité Nord du Bassin aquitain. Les formations sédimentaires du Jurassique renferment deux grands systèmes aquifères d'importance régionale séparés par les marnes du Toarcien

- le Dogger : aquifère des calcaires du Bathonien-Bajocien ;
- le Lias (ou Infra-Toarcien) : aquifère multicouche correspondant aux calcaires, dolomies et grès de l'Hettangien au Pliensbachien.



*Illustration 36 : Carte géologique simplifiée, Sud de la Vendée (Extrait du Rapport BRGM/RP-55505-FR).*

Ces deux grands aquifères sont affleurants sur le littoral Vendéen.

Par ailleurs, le Dogger affleure en bordure Nord du Marais Poitevin où il contribue à son alimentation en période hivernale (sources de débordement contribuant aux

apports d'eau douce du Marais). Sous le Marais Poitevin, l'aquifère du Dogger est maintenu captif par les marnes du Callovien et les formations quaternaires (Sédiments argileux marins dits « Bri »). Cette nappe captive sous le Marais Poitevin est salée. Cette salinité est ancienne, du moins en dehors de la bande littorale, et témoigne d'un grand confinement de l'aquifère.

Au Sud du Marais Poitevin (Région Poitou-Charentes), et en îlots au sein du Marais, l'aquifère du Jurassique supérieur est affleurant ou sub-affleurant. Il est constitué par une frange d'altération des calcaires marneux superficiels, fissurés sur une épaisseur de 15 à 25 m (30 m au maximum), sous le sol. La piézométrie de la nappe du Malm suivrait la topographie. Comme en bordure Nord du Marais, la relation de cet aquifère calcaire avec les eaux du marais est très forte. En effet, en hiver, la nappe des calcaires alimente le marais (exutoire de la nappe du Malm).

Sur l'île de Ré, 2 aquifères se superposent :

- l'aquifère semi-perméable des marnes et calcaires argileux fracturés du Kimméridgien supérieur affleure ;
- en dessous, le système aquifère des calcaires du Dogger parties profondes captives reconnu par de rares forages.

Plus au Sud, se superposent les calcaires du Crétacé avec de haut en bas de l'empilement sédimentaire :

- l'unité aquifère des calcaires bioclastiques du campanien supérieur/Maastrichtien présent surtout en bordure de l'Estuaire de la Gironde ;
- unité aquifère des calcaires et sables du Coniacien et du Turonien à l'affleurement ou sub-affleurant ;
- unité aquifère des sables, grès et calcaires du Cénomaniens à l'affleurement ou sub-affleurant qui surmonte l'unité aquifère des sables de l'Infra-Cénomaniens en général captif.

#### • **État des eaux souterraines et pression anthropique**

En Vendée, sur l'île de Noirmoutier et la bordure du Marais Breton, l'exploitation des eaux salées pour l'aquaculture est très importante. L'ensemble hydraulique constitué par les nappes superposées des calcaires lutétiens et des sables cuisien forme un système sensible à l'intrusion saline. L'aquifère très perméable des calcaires du Lutétien est en relation hydraulique avec l'Océan et renferme une nappe d'eau salée. (V. Petit, 1996).

Vers le Sud, la région est caractérisée par plusieurs zones de marais (Marais Poitevin), où la pente et l'altitude sont particulièrement faibles (les marais se trouvent à une altitude inférieure à celle des plus hautes mers). Les eaux salées entrent alors à travers des chenaux depuis la mer vers l'intérieur de la terre, qui est proche du niveau actuel de la mer. Avec une augmentation du niveau de la mer, les marais seront alors en partie inondés.

En bordure du Marais poitevin, les risques d'invasion saline aujourd'hui sont limités à condition de ne pas surexploiter les aquifères jurassiques sous le marais :

- dans la partie nord du Marais poitevin, ce sont essentiellement les niveaux du Dogger qui sont captés. L'exploitation de la nappe pour les besoins agricoles impacte de façon non négligeable la piézométrie de la nappe en période estivale. Par ailleurs, il a été constaté que les eaux du Dogger sont salées sous le marais mais que cette salinité est fossile (datée de quelques milliers d'années). La partie aquifère du Dogger envahie par de l'eau impropre à l'irrigation débute sous le marais à quelques centaines de mètres du contact plaine-marais. « Sur une bande de 400 à 500 m de large en bordure du marais où on rencontre l'interface eau douce/eau salée, le risque de formation d'un dôme salin à l'aplomb d'un forage d'exploitation est réel » ;
- au sud de la Sèvre, la nappe du Malm (des marnes et calcaires argileux fracturés du Kimméridgien supérieur) est captée. Il semble exister le long de la côte des petits bassins versants superficiels et souterrains qui débouchent vers la mer et limitent l'intrusion des eaux salines à l'intérieur des terres, tout au moins en ce qui concerne le niveau superficiel capté.

Sous le marais, cette nappe apparaît également salée, confinée et peu productive.

Sur l'île de Ré, l'exploitation de la nappe superficielle d'eau douce (par la ferme marine d'Ars-en-Ré notamment) contenue dans les formations du Jurassique supérieur a conduit à une salinisation progressive de cette nappe.

• **Mesures de chlorures ou de conductivité élevées :**

- Sur l'île de Noirmoutier (Vendée), les calcaires lutétiens et des sables cuisiens superposés renferment des nappes salées en relation hydraulique avec l'Océan (V. Petit, 1996). 3 points de mesures détectent des concentrations en Chlorures entre 370 et 19 600 mg/L.
- Dans les sables et calcaires du Tertiaire dans la commune de Bouin (Vendée), des valeurs très élevées en Chlorures ont été enregistrées (19 600 mg/L), mais également d'autres anions et cations liés probablement à une autre source de pollution.
- Deux autres zones dans les granites situés plus au Sud montrent des concentrations en Chlorures élevées (communes de Talmont-Saint-Hilaire, 117 mg/L, et Givron, 400-1 300 mg/L).

En Charente-Maritime, toutes les analyses dont on dispose sur des forages le long du littoral montrent des conductivités assez élevées témoignant d'un impact des eaux salées. Ce phénomène touche également des nappes relativement profondes. Parmi les points on peut citer :

- la commune de la Rochelle (Charente-Maritime), une vingtaine de points montrent des concentrations élevées en Chlorures et des valeurs élevées en Conductivité ;
- = sur l'île d'Oléron, 3 points de mesures montrent des concentrations en Chlorures élevées dans l'aquifère des sables, grès, argiles et calcaires du Cénomaniens ;

- dans le marais de la commune de Marennes, 2 forages indiquent des concentrations élevées en Chlorures dans l'aquifère calcaire du Crétacé supérieur.

### Les aquifères littoraux de la côte Aquitaine

Le système des aquifères littoraux de la côte aquitaine est une superposition de couches sédimentaires, la plupart constituent des aquifères captifs sur les côtes. L'aquifère des sables du Plio-quaternaire forment un aquifère libre. Sur l'ensemble des aquifères captifs, seul le miocène moyen possède potentiellement un exutoire en mer au niveau du talus continental, les autres étant oblitérés. D'après les résultats d'une étude, à prendre avec prudence au vu du peu de données disponibles, l'extrémité du biseau salé se situerait à 25 km au large (étude menée dans le cadre du SAGE Nappe Profonde de Gironde).

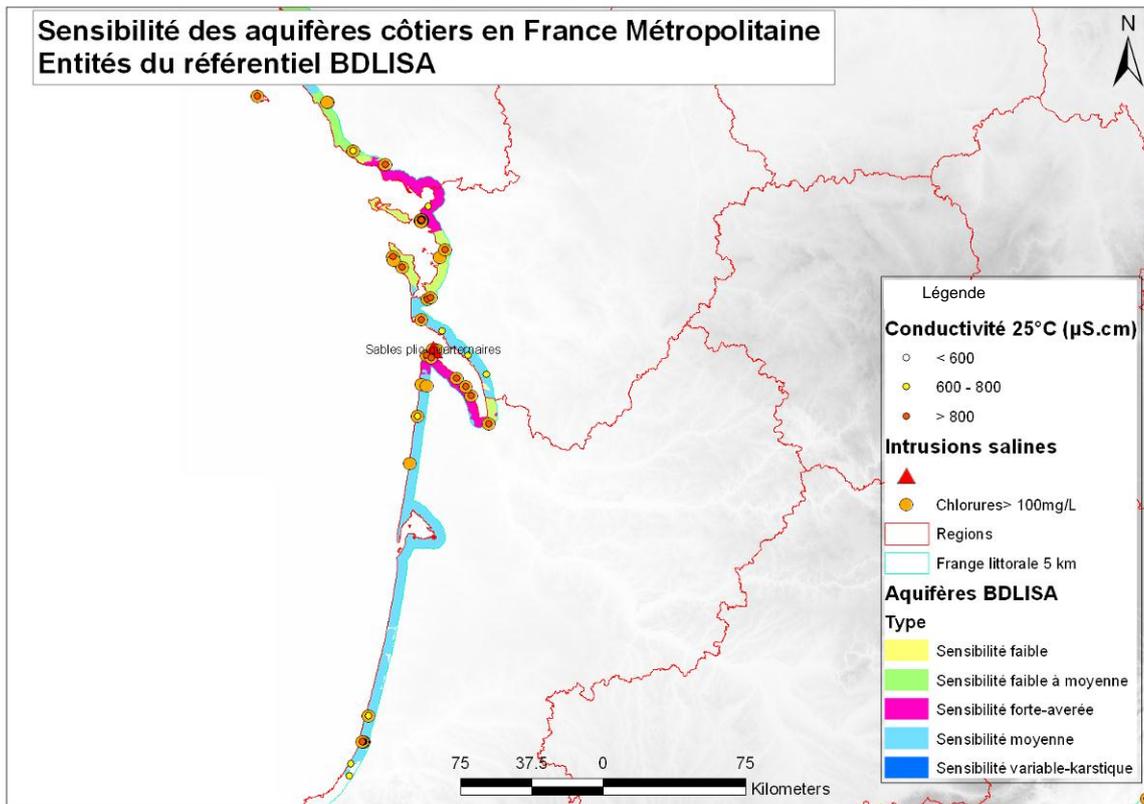


illustration 37 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine.

- **État des eaux souterraines et pression anthropique**

Les aquifères en Gironde sont fortement exploités à l'intérieur du pays. De ce fait, les équilibres des nappes sont déstabilisés par un cône de rabattement important et il existe un risque de pollution par infiltration d'eau saumâtre et polluées de l'estuaire et des rivières, en particulier dans l'Éocène au niveau de l'estuaire de la Gironde (cf.

SDAGE Adour Garonne et modèle hydrodynamique régional). Toutefois, la salinité actuellement observée dans ce secteur semble provenir d'eaux salées fossiles plutôt que d'une intrusion marine actuelle. Sur la carte de sensibilité, cette zone est néanmoins classée sous « sensibilité forte-avérée ».

L'aquifère des sables du Plio-Quaternaire pourrait être plus sensible au phénomène d'intrusion saline puisque qu'il est en contact avec l'océan au niveau du trait de côte. La sensibilité forte est reconnue sur la pointe de Grave, une presqu'île entre l'estuaire de la Gironde et la mer. Néanmoins, les prélèvements proches sont relativement faibles. Dans une bande de deux kilomètres de large le long du littoral, la grande majorité des points d'eau captant cet aquifère sont destinés à la défense contre les feux de forêts.

Le cordon dunaire engendre une légère crête piézométrique tout le long de la côte, à l'exception du bassin d'Arcachon, et limite ainsi les risques d'intrusions d'eau de mer. En outre, le gradient important de la nappe des sables renforce cette protection. Le risque d'une intrusion saline a toutefois été évoqué sur l'entrée de l'estuaire de la Gironde sur la pointe de Soulac-sur-Mer. On retrouve aussi quelques points de prélèvement présentant une salinité supérieure au reste de l'aquifère dans le sud des Landes, laissant envisager une possible intrusion.

Dans les Pyrénées-Atlantiques et l'extrême sud des Landes, les aquifères littoraux sont quasi inexistant. Biarritz est alimenté en eau potable majoritairement par des eaux superficielles.

Sur le bassin d'Arcachon, le BRGM (Corbier *et al.*, 2007) a recherché des points de captage d'eau salée dans la nappe superficielle, afin de proposer une ressource alternative à l'eau de mer en cas de contamination de celle-ci par des bactéries rendant impropre la consommation des huîtres du bassin. Il a alors été mis en évidence le caractère très aléatoire de la position du biseau salé. Enfin, bien que la densité de puits et de forages soit importante autour du bassin d'Arcachon, il s'agit dans la très grande majorité des cas, de prélèvements de particuliers servant à l'arrosage des jardins, ce qui engendre donc un impact relativement faible sur l'avancée du biseau salé.

- **Les mesures de chlorures ou conductivité élevées sont constatées**

- Dans la zone de Soulac sur la pointe de Grave, la sensibilité à l'intrusion saline est connue, quatre points de mesures indiquent des concentrations en chlorures comprises entre 160 et 300 mg/L
- Dans l'estuaire de la Gironde, une dizaine de points de mesure de la nappe des calcaires de l'Éocène est caractérisé par des concentrations en chlorures de 100 à 3 000 mg/L.
- Au nord de Biarritz, dans les sables plio-quaternaires et les sables et graviers du Pliocène captif, quatre points indiquent des concentrations moyennes en chlorures de 100 à 500 mg/L et des taux de conductivité électrique élevée (700 à 2 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

## 6.2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

### 6.2.1. Des tests de la méthode GALDIT

#### *L'aquifère des calcaires du Bathonien au nord de la plaine de Caen*

Dans la basse vallée de l'Orne au nord de Caen en Basse Normandie, l'aquifère des calcaires du Bathonien est connu pour être influencé par l'eau de la mer. Cette nappe a été choisie pour un test cartographique de la méthode GALDIT.

- **Paramètre G–Type d'aquifère**

Paramètre G	Poids	Attributs du paramètre	Valeur rang
Type d'aquifère	1	<b>Aquifère captif</b>	<b>10</b>
		<b>Aquifère libre</b>	<b>7.5</b>
		<b>Aquifère semi-captif</b>	<b>5</b>
		Aquifère contraint <sup>(1)</sup>	2.5

<sup>(1)</sup> Recharge et/ou barrière alignée parallèlement à la côte

#### GALDIT

Entités du référentiel BDLISA Zoom sur la plaine de Caen :  
Calcaires du Bathonien sous Marnes du Oxford. et Argiles à Silex

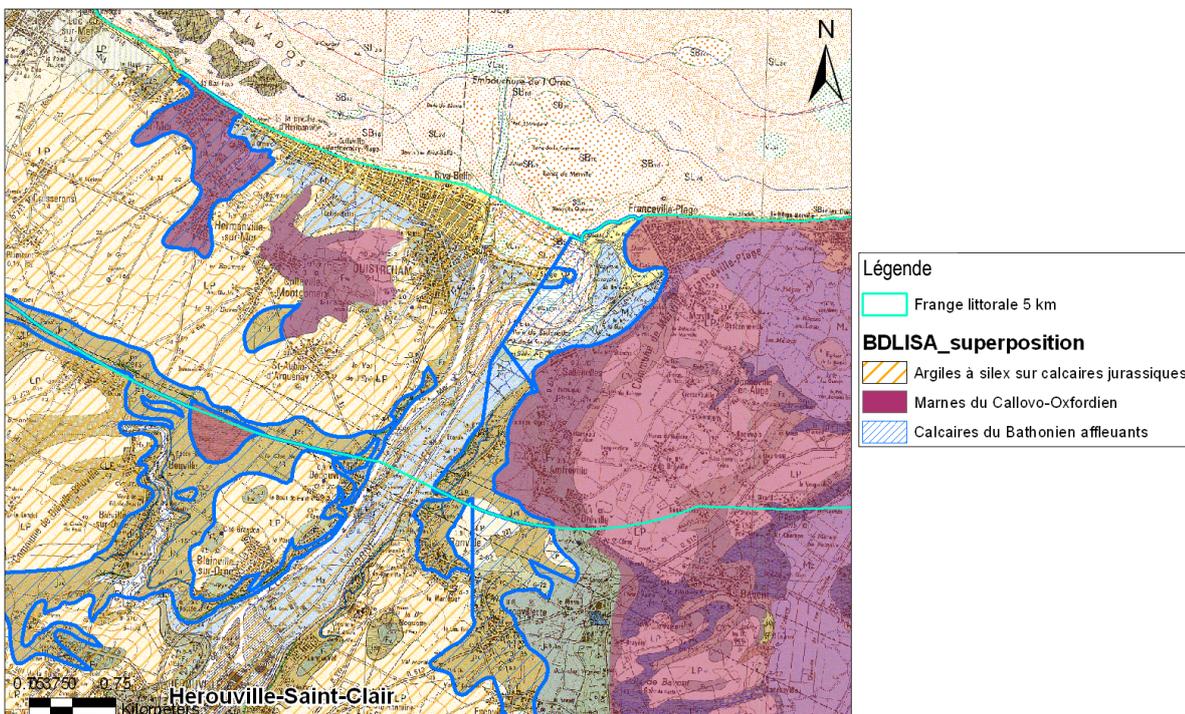


Illustration 38 : Carte des entités BDLISA : Calcaires du Bathonien affleurants, couverts par les Argiles à silex et les Marnes du Callovo-Oxfordien.

Cette carte hydrogéologique affiche les entités du référentiel BDLISA et différencie les calcaires « affleurants » et considérés comme aquifère libre, l'aquifère semi-captif (considérés par simplification : sous les Argiles à Silex) et l'aquifère captif sous les marnes du Callovo-Oxfordien.

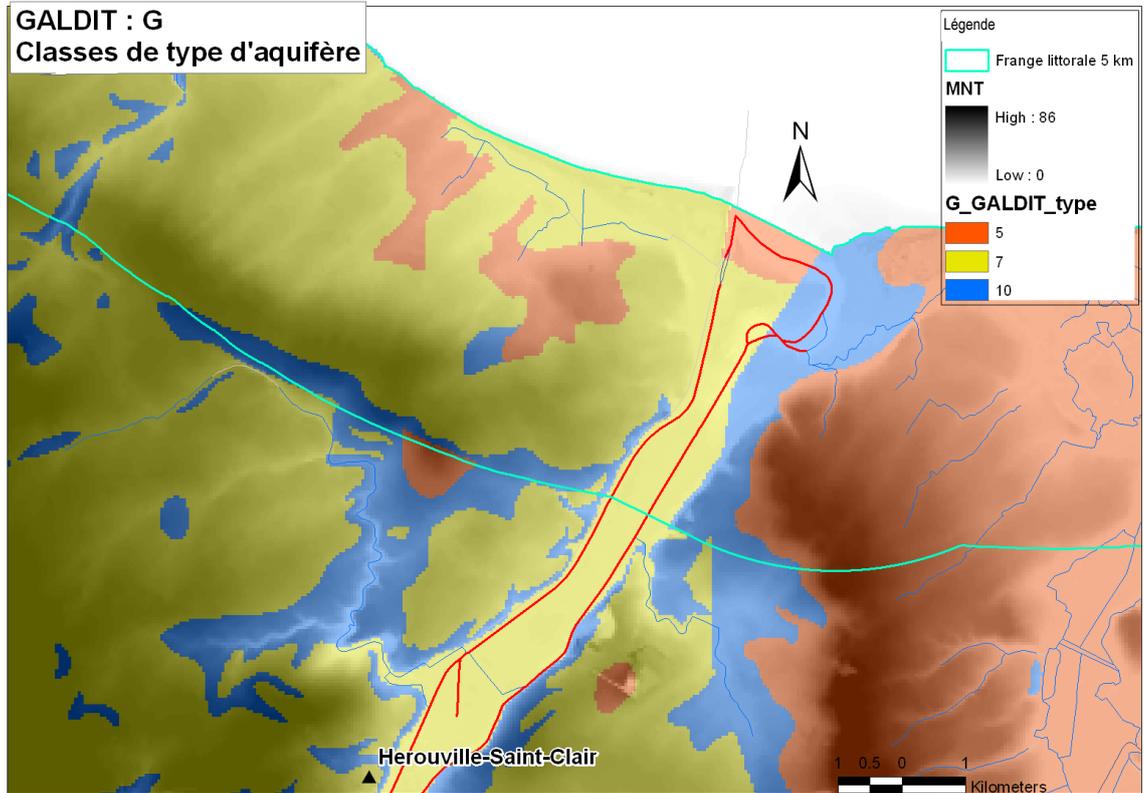


Illustration 39 : Carte des 3 classes de type d'aquifère méthode GALDIT.

- **Paramètre A – Conductivité hydraulique de l'aquifère**

Paramètre A	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
conductivité hydraulique de l'aquifère (m/j)	3	Elevée	> 40	10
		<b>Moyenne</b>	<b>10 – 40</b>	<b>7,5</b>
		Faible	5 – 10	5
		<b>Très faible</b>	<b>&lt; 5</b>	<b>2,5</b>

Cet aquifère est caractérisé par une perméabilité de fissures voir de karst, qui de plus est très hétérogène et variable. La topographie va influencer la variabilité des perméabilités. La conductivité hydraulique de l'aquifère est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-7}$  à  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s au niveau des plateaux ; ce qui correspond à la classe très faible, et à une note de 2,5.

En position de vallées sèches, la fracturation est plus importante ; les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s. L'épaisseur moyenne étant de 50 m, la conductivité hydraulique varie de  $2 \cdot 10^{-5}$  à  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s, ce qui correspond pour ces zones à la classe moyenne avec la note de 7,5.

Des alluvions reposent en partie sur les formations aquifères carbonatées. Ces alluvions sont aquifères, renfermant une nappe. Le niveau piézométrique est situé à environ 7 mètres au-dessus du niveau marin. La surface de contact entre calcaires karstiques et alluvions n'est pas connue avec précision ; selon la connaissance régionale, il semblerait que ce contact pourrait être situé au-dessus du niveau de la mer et non actif du point de vue hydrogéologique (pas de présence de sources...).

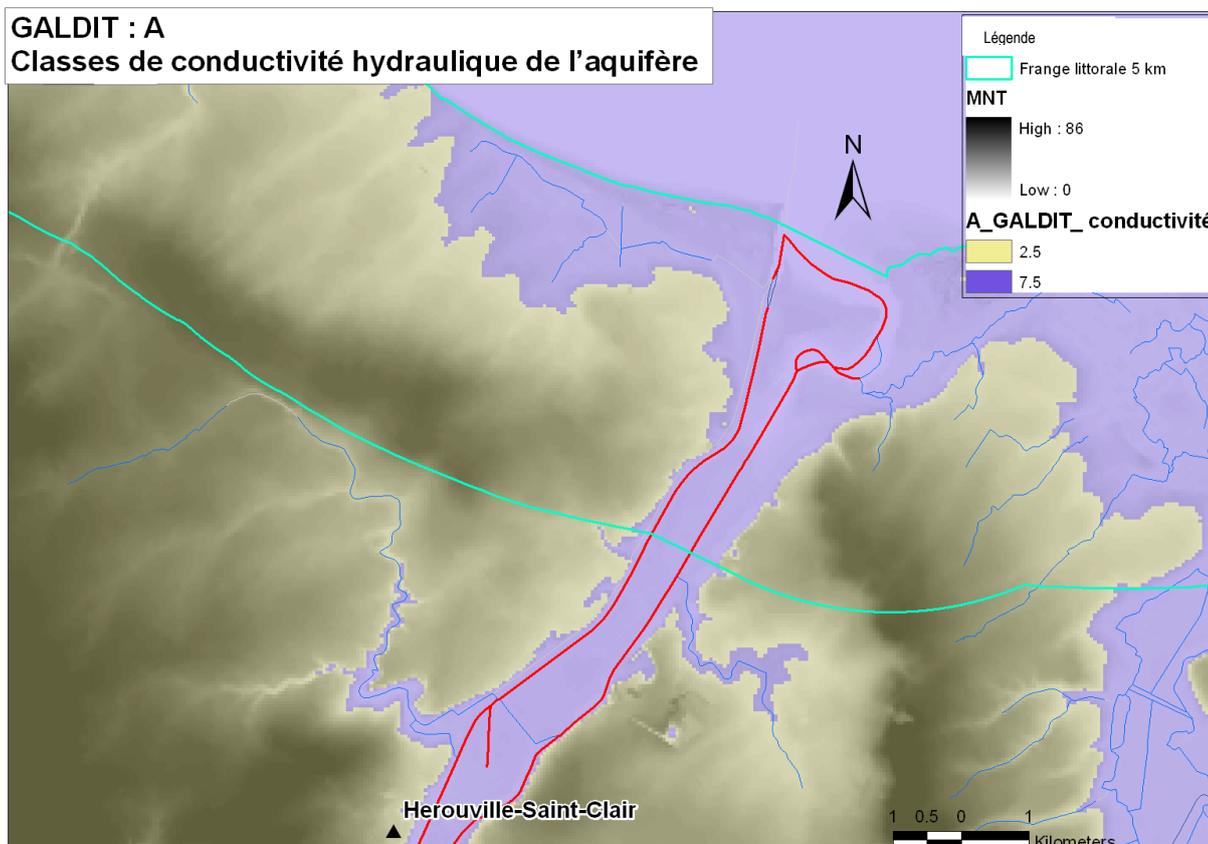


Illustration 40 : Carte des 3 classes de conductivité hydraulique de l'aquifère méthode GALDIT.

- **Paramètre L– Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer**

Paramètre L	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang (m)	
Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer (m)	4	<b>Elevée</b>	<b>&lt; 1,0</b>	<b>10</b>
		<b>Moyenne</b>	<b>1,0 – 1,5</b>	<b>7,5</b>
		<b>Faible</b>	<b>1,5 – 2,0</b>	<b>5</b>
		<b>Très faible</b>	<b>&gt; 2,5</b>	<b>,5</b>

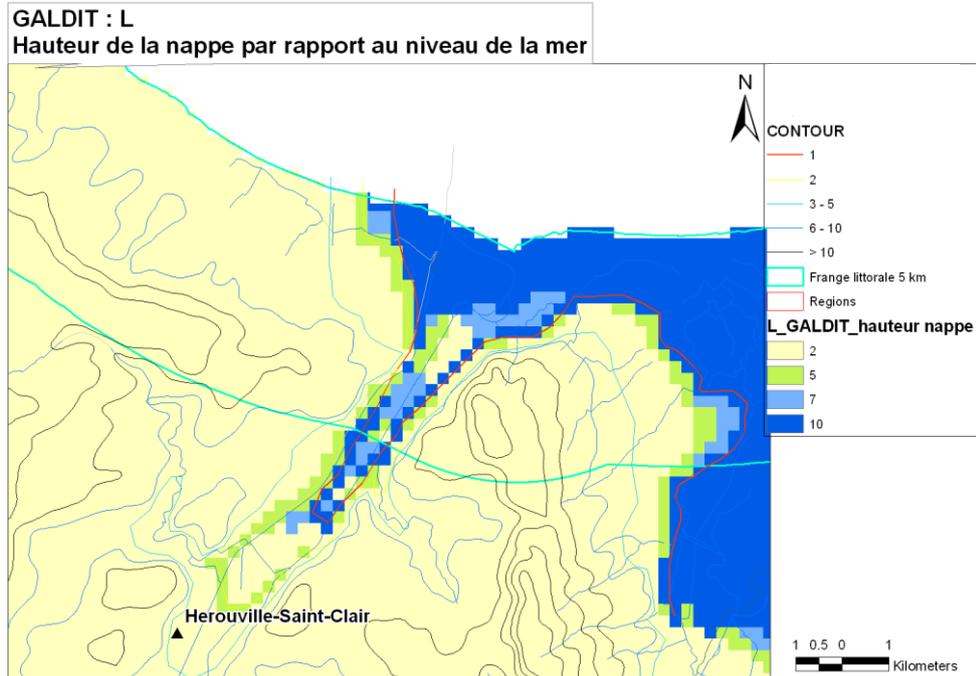


Illustration 41 : Carte des 4 classes de hauteur de la piézométrie par rapport au niveau marin selon la méthode GALDIT.

La hauteur du niveau piézométrique par rapport au niveau marin est calculée à partir des niveaux piézométriques pour une situation de basses eaux, de l'aquifère des calcaires du Bathonien. Les zones basses inférieures à 10 mètres ont été complétées par des isolignes estimées (isolignes de 1 et 2 mètres). Dans la grille des hauteurs inférieures à 1 m, la valeur GALDIT correspond à la valeur 10.

- **Paramètre D– Distance par rapport à la côte**

Paramètre D	Poids	Attributs du paramètre		note
		Classe	Rang (m)	
Distance par rapport à la côte (m)	4	Très courte	< 500	10
		Courte	500 – 750	7,5
		Moyenne	750 – 1 000	5
		Eloignée	> 1 000	2,5

La distance de la côte a été calculée avec la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte.

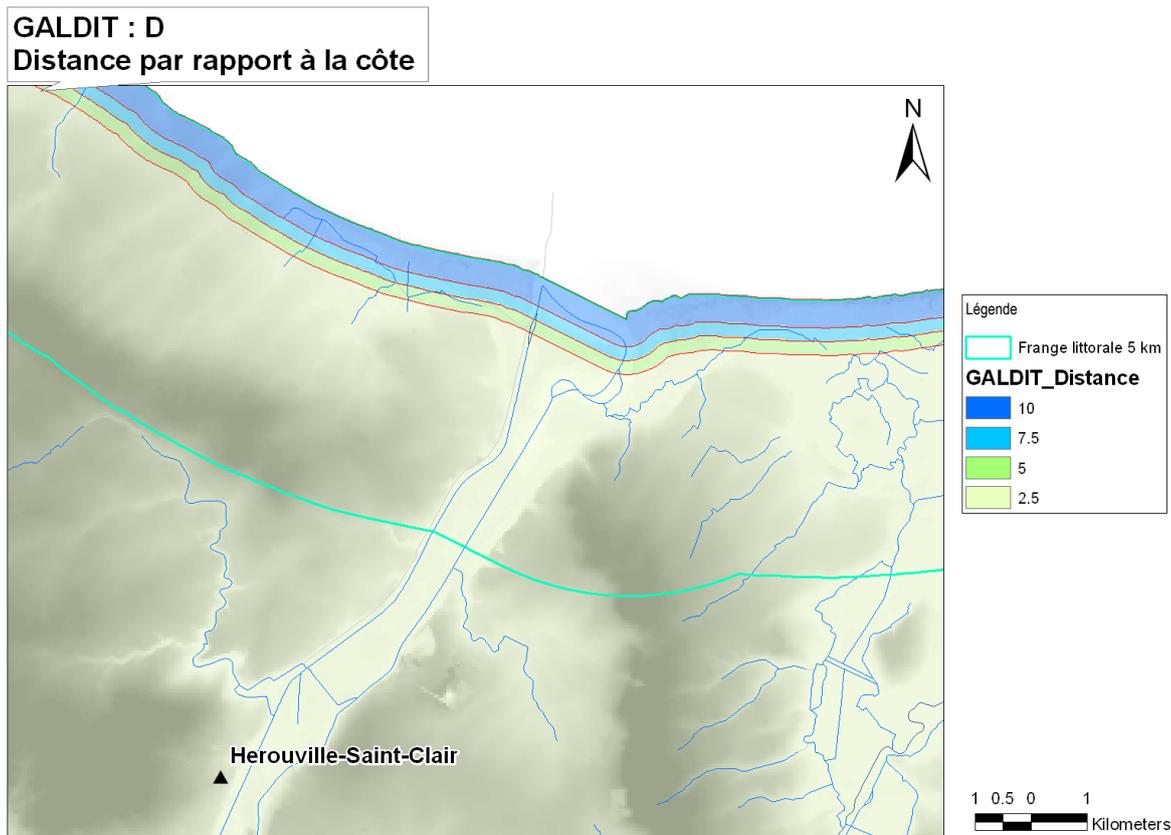


Illustration 42 : Carte des 4 classes de distance par rapport à la côte méthode GALDIT.

- Paramètre I – Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone**

Paramètre I	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang (ppm)	
Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude : $Cl^- / (HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$	1	Élevé	> 2	10
		<b>Moyen</b>	<b>1,5 – 2</b>	<b>7,5</b>
		Faible	1 – 1,5	5
		Très faible	< 1	2,5

A proximité de la côte, deux forages pour l'alimentation en eau potable présentent des concentrations en chlorures supérieur à 800 mg/L pour les valeurs moyennes, les concentrations pouvant dépasser 1,5 g/L. Des valeurs de conductivité supérieure à 600  $\mu S/cm$  se retrouvent au niveau de deux autres forages pour l'AEP. Nous ne disposons pas de mesures des Hydrogénocarbonates ou des Carbonates ( $HCO_3$ ,  $CO_3$ ) ; par simplification, les concentrations en chlorures et taux de conductivité ont été utilisés pour classer l'aquifère par rapport à l'impact de l'état actuel de l'intrusion saline, en sensibilité moyenne (Rang 1,5-2, note 7,5).

**GALDIT**  
Entités du référentiel BDLISA Zoom sur la plaine de Caen :  
Mesures de salinité

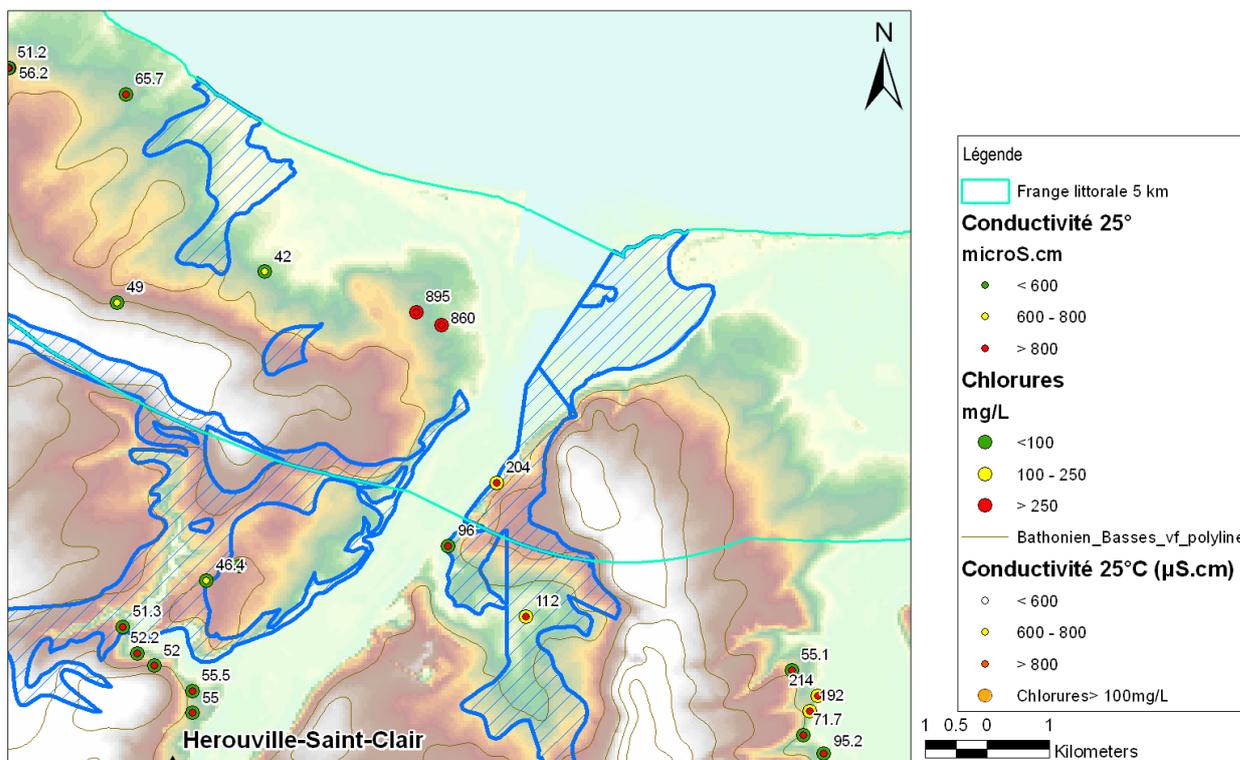


illustration 43 : Carte des mesures de salinité dans la zone d'étude.

• **Paramètre T – Épaisseur de l'aquifère**

Paramètre T	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
Épaisseur de l'aquifère (m)	2	<b>Forte</b>	<b>&gt; 10</b>	<b>10</b>
		Moyenne	7,5 – 10	7,5
		Petite	5 – 7,5	5
		Très petite	< 5	2,5

L'épaisseur de l'aquifère varie dans la zone d'étude entre 10 m au Sud de la vallée de l'Orne et 100 m sous les plateaux. On attribue à l'épaisseur de l'aquifère la classe FORTE (Rang > 10 m, Note 10).

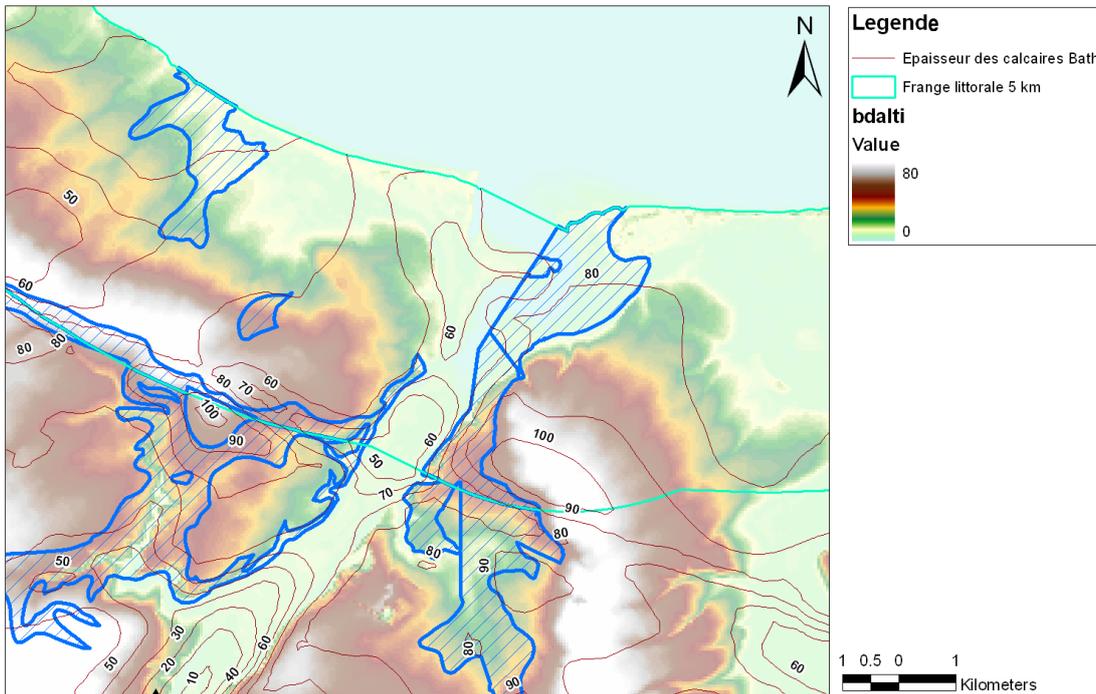


Illustration 44 : Carte des épaisseurs de la nappe des calcaires du Bathonien

• **Tableau de synthèse des résultats pour la zone d'étude**

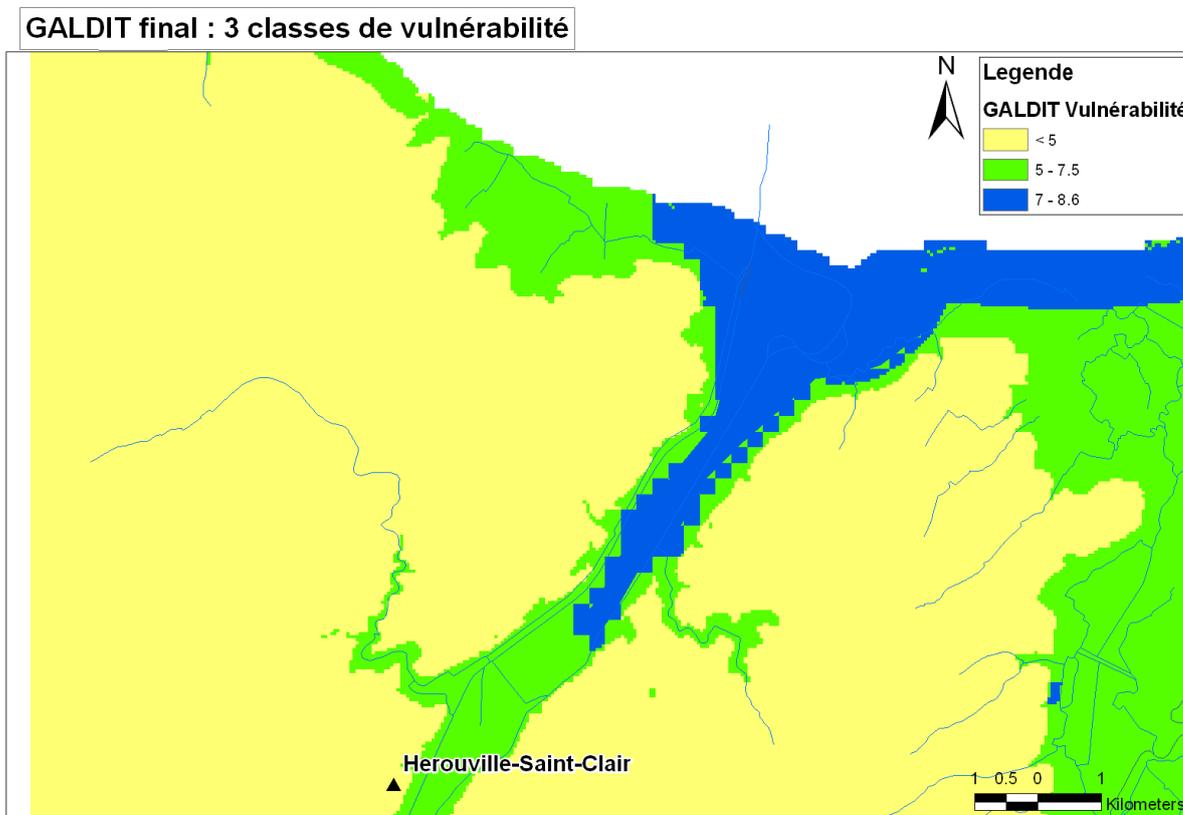
Paramètres	Poids	Rangs			
		Très faible 2,5	faible 5	Moyen 7,5	Elevé 10
G : Type d'aquifère	1	-	semi-captif	libre	captif
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	-	10-40	-
L : Profondeur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	< 1	1 – 1,5	1,5 - 2	> 2
D : Distance de la côte (m)	2	< 500	500-750	750-1 000	> 1 000
I : Impact de l'intrusion saline (ppm)	1	-	-	1,5 - 2	-
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	-	-	-	> 10

Considérant les poids et les notes proposés ci-dessus, le calcul de la vulnérabilité globale est effectué selon la relation suivante :

$$[G\_GALDIT]*1+[A\_GALDIT]*3 + [L\_GALDIT]*4+[D\_GALDIT] * 2+[I\_GALDIT=7.5*1]+[T\_GALDIT=10*2].$$

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 13, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	5 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 5



*Illustration 45 : Carte résultant des 6 paramètres GALDIT :  
 3 classes de vulnérabilité aux intrusions salines.*

Ce résultat montre qu'on peut distinguer des zones de vulnérabilité à partir du traitement de données disponibles dans le référentiel BDLISA et des études régionales. Pour les données piézométriques, il est nécessaire d'affiner la représentation des différentes isopièzes, pour prendre en compte un espace métrique.

Le calcul de la modification de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT, suite à une montée du niveau marin intervient sur les deux paramètres suivants :

- hauteur du niveau piézométrique par rapport au niveau marin ;
- distance par rapport à la côte (calcul à partir du MNT).

Ce calcul sera réalisé en 2011 afin de caractériser l'impact de la remontée du niveau marin sur la vulnérabilité d'un aquifère côtier, et d'apprécier la variabilité spatiale du rivage vers l'intérieur des terres, notamment au niveau des vallées.

### **6.2.2. Une approche originale à l'échelle du Languedoc-Roussillon**

Etant données les multiples sources d'incertitudes existantes (notamment concernant la forme, la position réelle du biseau salé et les caractéristiques hydrodynamiques

générales des aquifères côtiers languedociens), une démarche la plus simpliste et la moins exigeante en termes de données, en première approximation a été testée à partir de données et de travaux conjoints avec un projet ANR MISEEVA. Les données utilisées se sont concentrées sur des données piézométriques et en analysant les conséquences pour les captages AEP existants. C'est ainsi une approche différente ciblée uniquement sur un seul usage, à savoir l'AEP.

Ainsi, le principe de Ghyben-Herzeberg a été utilisé pour déterminer la profondeur du biseau salé pour tous les aquifères renfermant des nappes libres ou semi-captives (partie captive en bordure maritime) de la bordure littorale languedocienne.

Les aquifères concernés sont les suivants :

- les calcaires jurassiques du massif de la Gardiole et du pli-ouest de Montpellier ;
- les alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel ;
- les alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Hérault ;
- les alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Orb ;
- les alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Aude.

Les données disponibles sur la piézométrie des nappes contenues dans ces aquifères nous permettent de construire des cartes de profondeur du biseau salé, en considérant que cette dernière est égale à 40 fois la valeur du niveau piézométrique en tout point de la nappe. Cette approche est considérée valable dans la mesure où, pour les territoires considérés, les forages implantés dans des nappes libres sont généralement situés à une distance supérieure à un kilomètre de la mer, ce qui, d'après Van der Veer (1977), rend cette formulation acceptable.

La comparaison de la profondeur du biseau salé ainsi définie avec celle des principaux forages d'exploitation pour l'eau potable, agricole ou industrielle répertoriées dans les communes concernées par l'étude, permet de proposer une caractérisation de la vulnérabilité aux intrusions salines. Ainsi, la vulnérabilité aux intrusions salines d'une commune donnée sera fonction de la part des volumes d'eau exploités par forage sur la commune, qui est pompée au niveau de forages dont la profondeur est proche de celle du biseau salé (Illustration 46).

Cette analyse, menée au temps présent sur la base des cartographies piézométriques existantes, peut ensuite être extrapolée au futur, en estimant qualitativement l'évolution de la piézométrie (et donc la position du biseau salé), en fonction de la position future du trait de côte (Illustration 47).

Le déplacement du trait de côte n'étant pas assimilable à une simple translation comme sur l'exemple de l'illustration 47 puisqu'il dépend de la topographie, l'estimation de son impact sur la piézométrie se fera qualitativement en fonction de la forme future du trait de côte proposé par les scénarios de submersion permanente et récurrente. Cette approche a été développée en ayant recours à des données d'évolution du trait de côte et de submersion obtenues dans le cadre du projet ANR MISEEVA, coordonné par le BRGM.

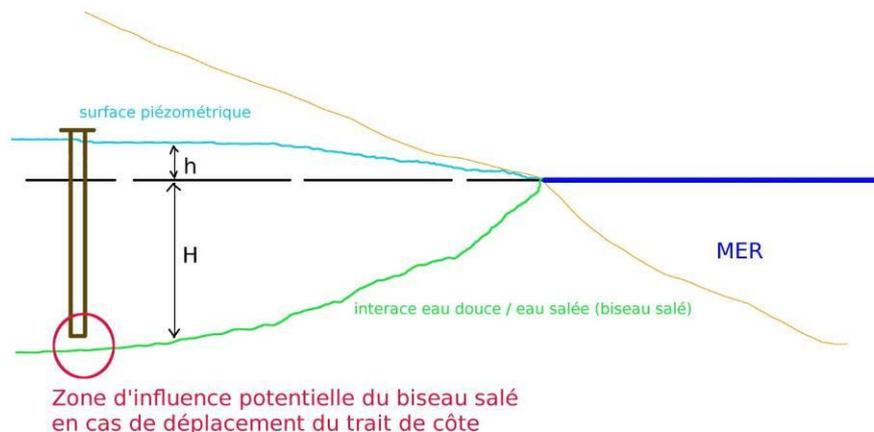


Illustration 46 : Description schématique de la caractérisation de la vulnérabilité d'un forage à l'intrusion saline.

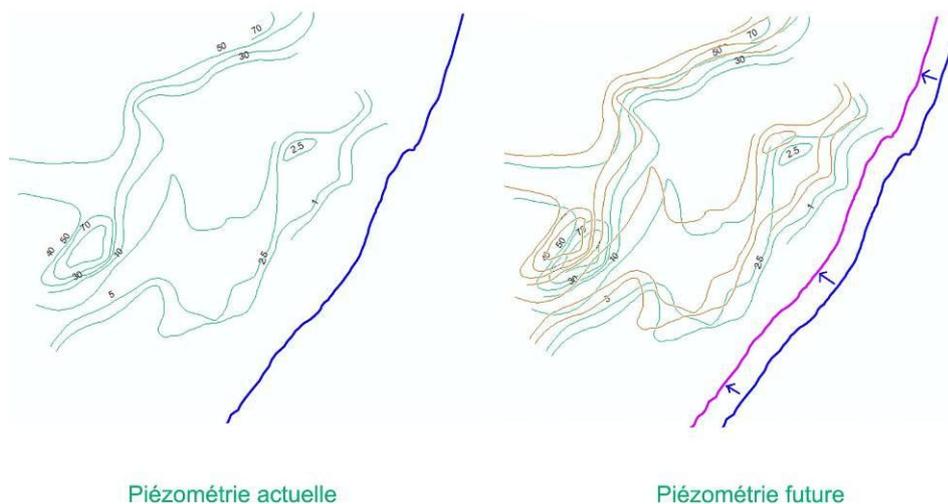


Illustration 47 : Schématisation de l'impact théorique du déplacement du trait de côte sur la piézométrie.

### Impact des scénarios de submersion

- **143c et 143a : aquifères jurassiques du massif de la Gardiole et du pli-ouest de Montpellier**

Sur cette entité nous disposons d'une carte piézométrique réalisée en 2002, en période de basses eaux (période de pénétration maximale du biseau salé) (Illustration 48). Un certain nombre de forages captent l'eau contenue dans les calcaires pour des besoins d'alimentation en eau potable ou industrielle. Lorsqu'elles sont connues, les profondeurs totales des forages peuvent être mises en regard de la profondeur

théorique du biseau salé calculée à l'aide de la formulation de Ghyben-Herzberg (Illustration 49).

Nom du captage	Usage	Indice BSS	Volume prélevé (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /an)	Profondeur (m)
Flés Nord	AEP	10163X0158	400	109
Flés Sud	AEP	10163X0157	400	70
Issanka F7	AEP	10162X0184	3500	
Karland	AEP	10163X0044	30	55
Lauzette F1	AEP	09907X0402	2000	105
LouGarrigou	AEP	09907X0364	5	60
Thermes F8	THERMES	10165X0014	100	69
Thermes F9	THERMES	10165X0234	200	
Sce Cauvy	AEP	10165X0021	1000	0

Liste des ouvrages exploitant les eaux souterraines des calcaires de la Gardiole.

On constate ainsi sur l'illustration 49 que dès à présent, le forage de Karland, mais surtout ceux de Flés Nord et Sud ont des profondeurs proches des profondeurs théoriques du biseau salé. De fait, cette situation est connue pour les forages du Flés, dont les eaux pompées présentent des taux de salinité importants en étiage, qui nécessitent un contrôle continu de leur exploitation. La source de Cauvy, captage important en termes d'alimentation en eau potable du secteur, se situe elle aussi en situation très vulnérable. Par contre les forages des thermes F8 et F9 ne seront pas considérés dans notre analyse, car ils captent une ressource en eau profonde où la méthode de Ghyben-Herzberg ne s'applique pas.

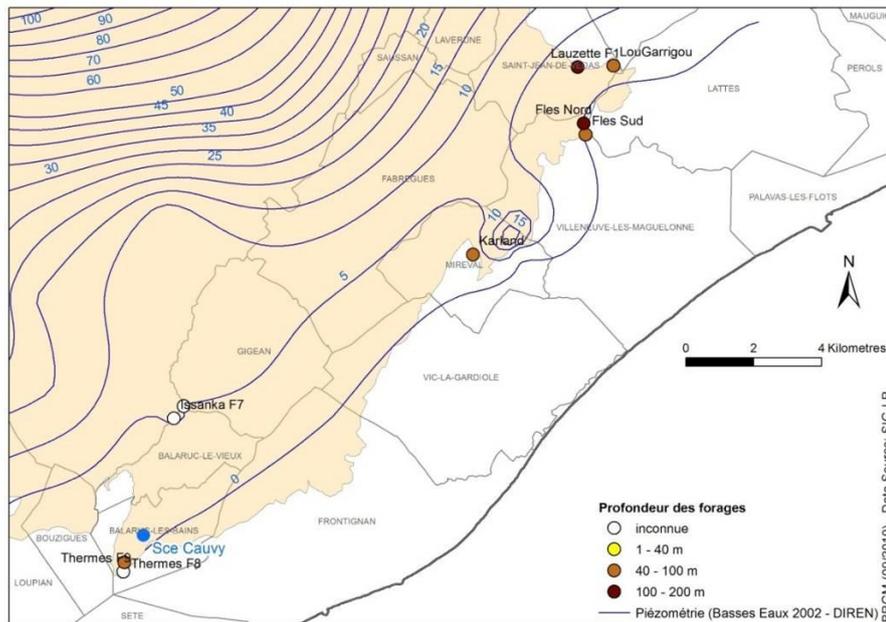


Illustration 48 : Situation de la nappe contenue dans les calcaires jurassiques de la Gardiole au cours des basses eaux de 2002 et des forages exploitant cette nappe.

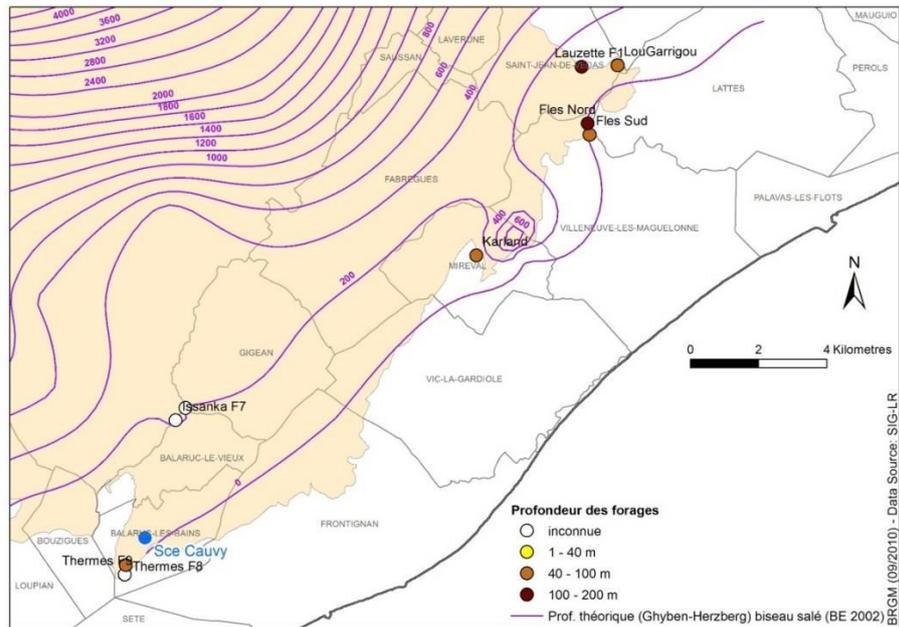


Illustration 49 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les calcaires jurassiques de la Gardiole, au cours des basses eaux de 2002.

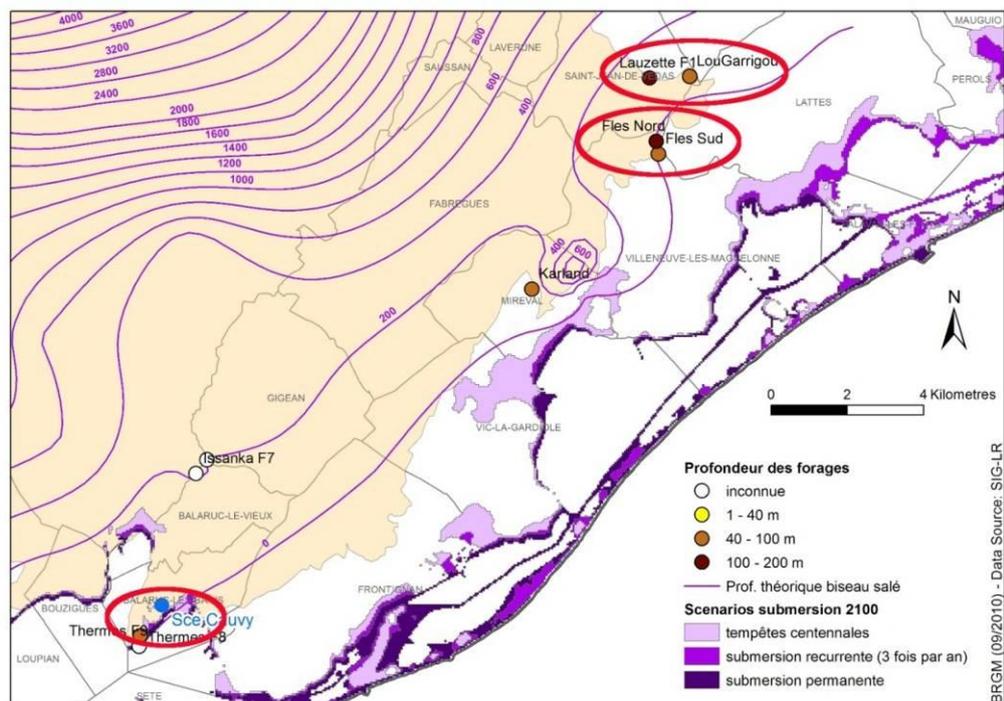


Illustration 50 : Localisation des ouvrages implantés dans les calcaires jurassiques et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

Si l'on considère que la position future du trait de côte correspond à la limite maximale de submersion récurrente proposée par les scénarios de submersion pour le futur on peut proposer une analyse qualitative de l'impact de ces scénarios (Illustration 50). On voit ainsi que les ouvrages de Flés Sud, Nord, du Garrigou ou de la Lauzette sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être affectés par le biseau salé, au vu des déplacements relatifs du trait de côte au droit de ces ouvrages. Le forage de Karland, semble moins vulnérable vu la faible avancée du trait de côte proposé par le scénario de submersion dans son secteur. Enfin, la source de Cauvy est potentiellement très vulnérable, autant en termes de submersion par la surface que par la progression du biseau salé, du fait de sa position très proche de l'étang de Thau et de sa faible altitude.

• **Aquifère 328e1 : alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel**

Les cailloutis villafranchiens (entité 328e1) constituent est un aquifère hétérogène, où la nappe est libre sur une grande partie de sa surface, mais devient semi-captive à proximité de l'étang de l'Or. En effet, les alluvions villafranchiennes, dont l'épaisseur est rarement supérieure à 40 m, sont recouverts de niveaux limoneux et sablo-argileux du quaternaire en bordure de l'étang.

Sur cette entité nous disposons d'une carte piézométrique réalisée en 2003 par la DIREN, à une période inconnue. Des forages captent l'eau contenue dans les alluvions villafranchiennes pour des besoins d'alimentation en eau potable ou industrielle. Parmi ceux-ci, seuls ceux situés en bordure de l'étang sont susceptibles de subir un impact en lien avec le biseau salé. Lorsqu'elles sont connues, les profondeurs totales des forages peuvent être mises en regard de la profondeur théorique du biseau salé calculée à l'aide de la formulation de Ghyben-Herzberg (Illustration 49). Au regard des épaisseurs connues pour ces alluvions (40 m), les courbes de profondeur du biseau salé supérieures à 80 m, ne doivent pas être considérées.

Nom du captage	Usage	Indice BSS	Volume prélevé (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /an)	Profondeur (m)
TREIZE CAIR	AEP	09915X0198	263	25
PILES F1	AEP	09915X0199	307	40
RESTAURANT		09915X0202		15
MONUMENT		09915X0166		16
ALBERT CAMU		09915X0203		15
AUBETTES 1	AEP	09912X0261	228	26
GINESTIE		09912X0240		22
GARRIGUES B	AEP	09908X0361	900	32
VAUGUIERES	AEP	09915X0201	100	15
VAUGUIERES	AEP	09915X0200	498	15
GASTADE 1 O	AEP	09916X0087	371	33
DECHETTERIE	AEP	09915X0212		12
C. F4 BON P	PRV	09913X0439	75	0
VAUGUIERES	AEP	09908X0201	617	10
P. F1 SARL	PRV	09915X0223		0

*Liste des ouvrages exploitant les eaux souterraines des alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel.*

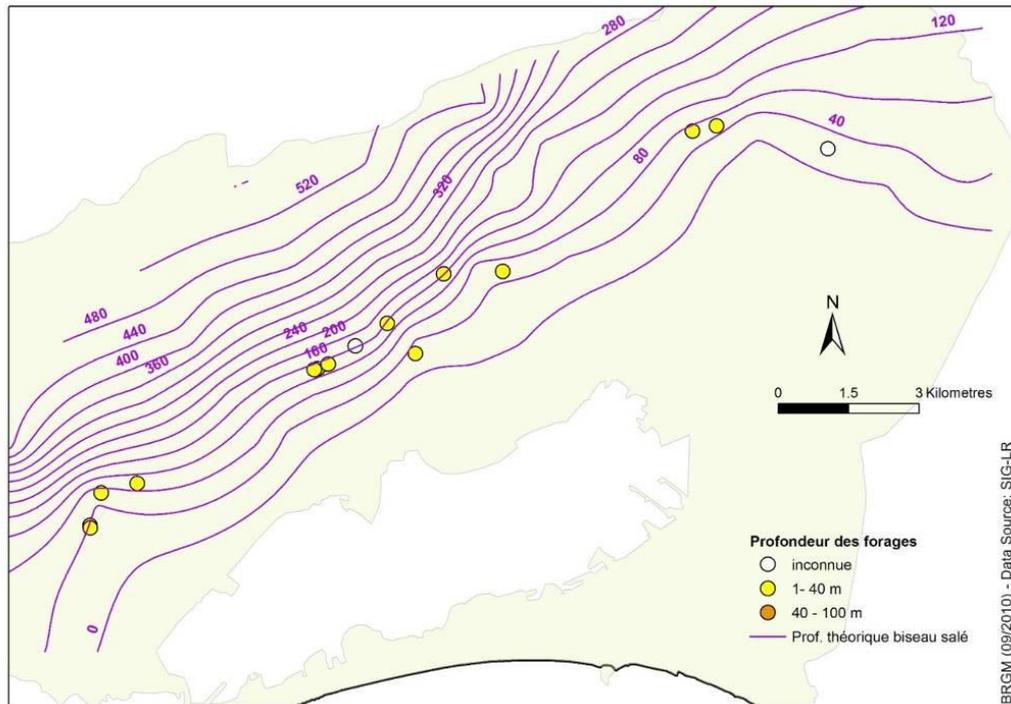


Illustration 51 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel, en 2003.

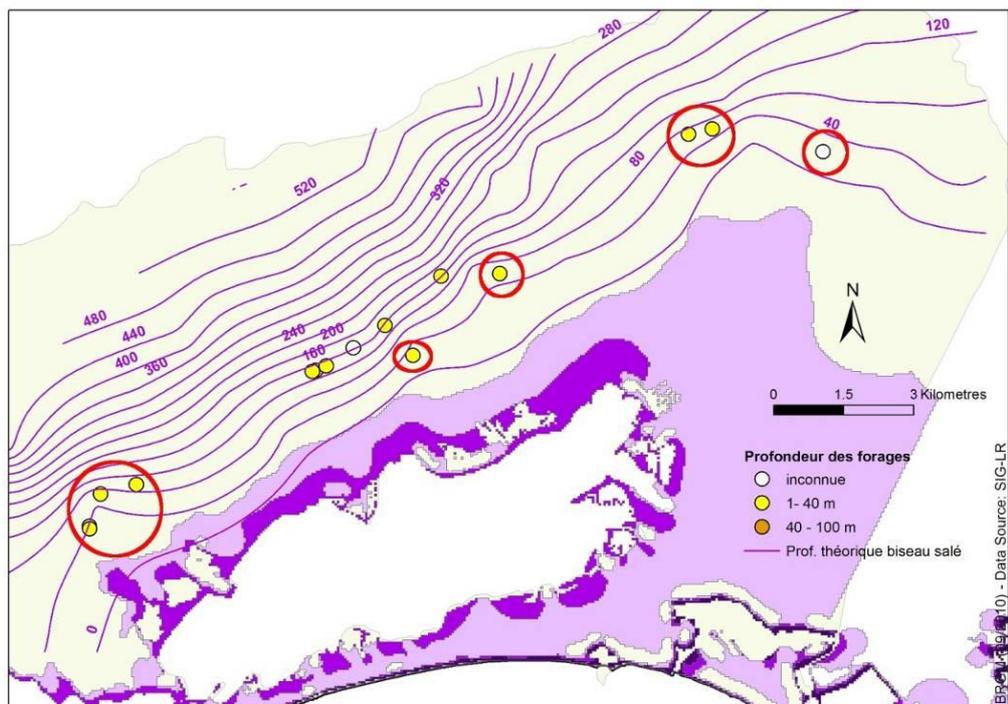


Illustration 52 : Localisation des ouvrages implantés dans la nappe de Mauguio-Lunel et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

On constate que certains ouvrages seraient, d'après la forme théorique attribuée au biseau salé selon la formulation de Ghyben-Herzberg, d'ores et déjà très proches de subir des problèmes d'intrusion. Il s'agit des ouvrages de Vauguieres (09915X0200 et 09908X0201) et Piles F1 (09915X0199), dont les profondeurs sont proches de celles de la courbe de 40 m de profondeur pour le biseau salé. Il conviendrait de prendre contact avec les exploitants de ces ouvrages pour vérifier le réalisme de nos calculs.

Sous l'hypothèse pessimiste où la position future du trait de côte correspondrait à la limite maximale de submersion récurrente proposée par les scénarios de submersion pour le futur, on constate que les courbes du biseau salé pourraient se décaler vers le nord d'une distance d'environ 500 m (Illustration 52). Cette progression serait alors susceptible de renforcer la vulnérabilité des ouvrages cités comme étant potentiellement vulnérables à l'actuel (Vauguières et Piles F1) et menacerait de plus les ouvrages de Vauguières (09915X0201), Garrigues B (09908X0361), de Gastade 10 (09916X0087), d'Aubettes 1 (09912X0261), de Ginestie (09912X0240) et de C. F4 BON P (09913X0439).

- **Aquifère 334b2 : alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Hérault**

Les alluvions quaternaires récentes de la basse vallée de l'Hérault (entité 334b2) constituent un aquifère complexe, en relation hydraulique forte avec le fleuve Hérault. Libre dans sa partie amont, la nappe devient captive à proximité du littoral, du fait de la présence d'un niveau de limons de couverture dont l'épaisseur augmente en allant vers l'aval, provoquant une mise en charge de la nappe. Des relations hydrauliques existent aussi avec les sables astiens sous-jacents, qui se complexifient à l'approche du littoral, du fait de l'existence de formations argilo-graveleuses peu perméables du pliocène continental, qui les séparent des sables astiens.

Pour ces formations, nous disposons d'une carte piézométrique réalisée en 1972 par le BRGM. Vue l'ancienneté de ces données, il est probable qu'elles ne soient que peu représentatives de la piézométrie actuelle dans ces formations. Par ailleurs, les alluvions présentent des épaisseurs réduites de l'ordre de 20 m en bordure littorale.

Ces éléments font que les courbes de profondeur du biseau salé, calculées à l'aide de la formulation de Ghyben-Herzberg (Illustration 53), sont probablement éloignées de la réalité. De plus, au vu de la profondeur des alluvions, celles dont la valeur est supérieure à 40 m ne doivent pas être considérées.

L'illustration 53 permet de constater que nous possédons très peu d'informations sur les profondeurs des forages dans ce secteur. De plus, comme les alluvions sont superposées aux sables astiens, ces forages peuvent traverser les alluvions pour aller capter les sables Astiens. Le fichier des prélèvements de l'Agence de l'Eau RMC (que nous n'avons pas utilisé comme référence pour les prélèvements du fait des imprécisions qu'il contient) ne recense d'ailleurs qu'un seul captage sur ce secteur.

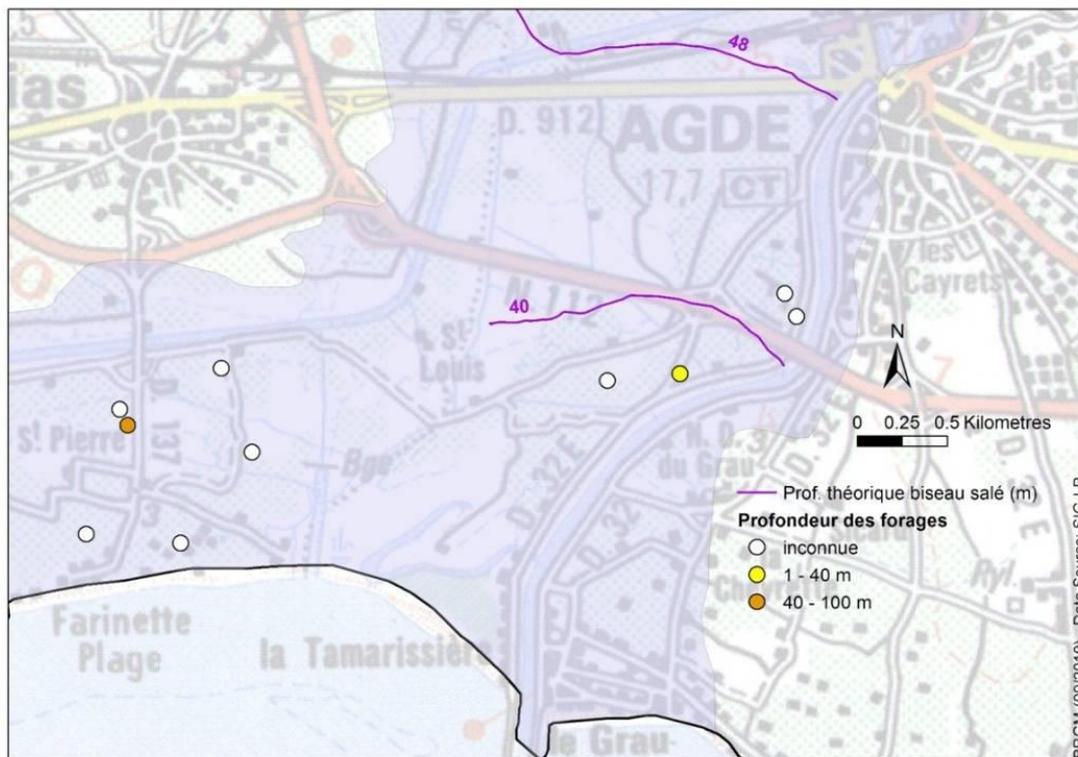


Illustration 53 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l’Hérault, en 1972.

Les forages susceptibles de se trouver dans la zone d’influence du biseau salé sont listés dans le tableau ci-dessous. Il n’est pas du tout certain que ces forages soient utilisés pour exploiter les alluvions. Ainsi, les forages dits « Farinette », situés au niveau du lieu-dit Saint-Pierre, présentent des profondeurs qui semblent bien supérieures à celle des alluvions.

Nom du captage	Usage	Indice BSS	Volume prélevé (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /an)	Profondeur (m)
FARINETTE	AEP	10402X0123	570	94
FARINETTE SECOURS	PRJ	10402X0187	0	115
C. F1 LES PEUPLIERS	PRV	10403X0367	8	
C. F1 INTERNATIONAL	PRV	10403X0198	104	
C. F1 LE MAS DE LA PLAGE	PRV	10402X0188	38	
C. F1 LES JARDINS D'ELSA	PRV	10403X0335	10	
C. F1 LES SALISSES	PRV	10402X0129	128	
C. F1 LES CANOES	PRV	10403X0231	24	40
C. F2 LA PLAGE	PRV	10403X0377	68	
P. P1 LA CADENE	PRV	10403X0369	8	
C. F2 L'AIR MARIN	PRV	10403X0376	77	

Liste des ouvrages exploitant les eaux souterraines des alluvions quaternaires de la basse vallée de l’Hérault.

Si on retient l'hypothèse pessimiste que le futur trait de côte correspond à la limite maximale de submersion récurrente proposée par les scénarios de submersion, on constate que les courbes du biseau salé pourraient se décaler vers le nord d'une distance d'environ 600 m, dans la partie ouest de la plaine alluviale (Illustration 54). Cette progression serait à même d'impacter les ouvrages F1 Le mas de la Plage (10402X0188), F2 La Plage (10403X0377), F1 Les jardins d'Elsa (10403X0335), F1 Les Peupliers (10403X0367) et F1 Les Canoes (10403X0231), en allant de l'ouest vers l'est, qui sont tous des forages privés.

Le constat proposé est entaché d'incertitudes importantes. En effet, seul un travail de recherche plus détaillée sur les caractéristiques de ces forages pourrait permettre de nous assurer qu'ils sont bien implantés dans les alluvions et de vérifier les ordres de grandeur des volumes prélevés.

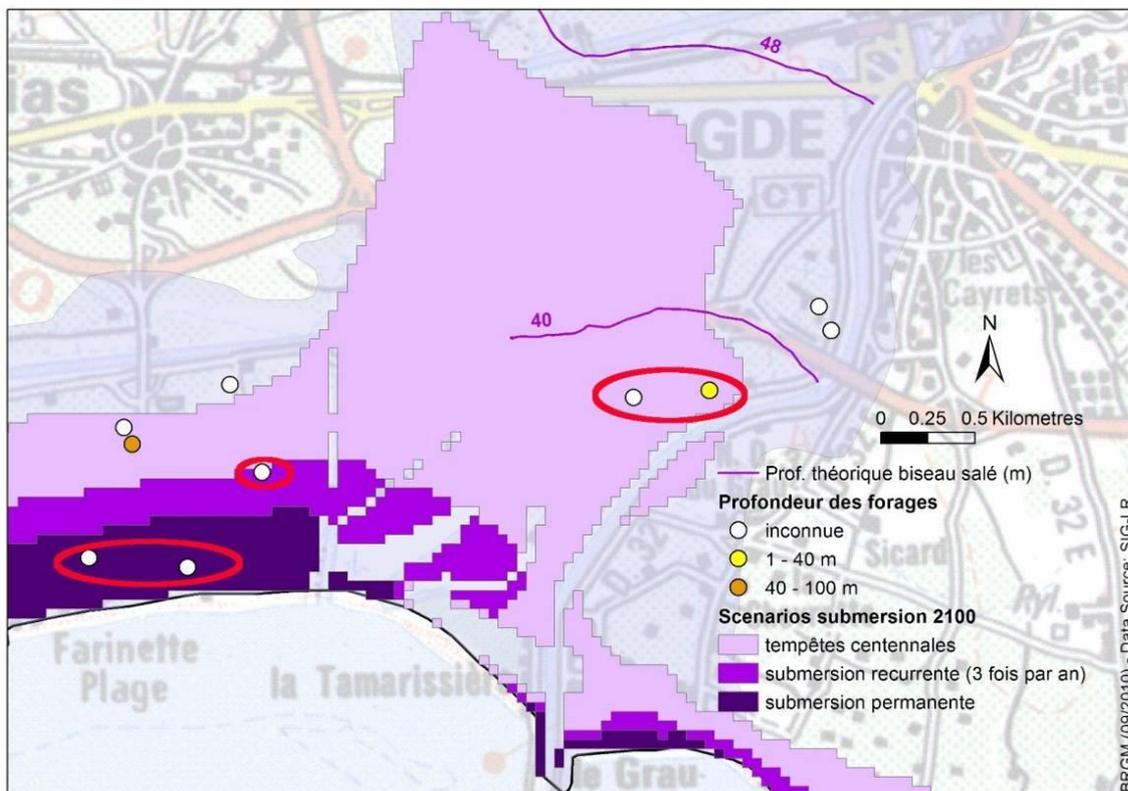


Illustration 54 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Hérault et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

- **Aquifère 336d2 : alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Orb**

Les alluvions quaternaires récentes des basses terrasses de la basse-vallée de l'Orb (entité 336d2) constituent la nappe alluviale du lit majeur de l'Orb. D'une puissance allant de 6 à 30 m en bordure littorale, elles sont constituées, du haut vers le bas, de couches de limons, de sables et des alluvions modernes, graviers et cailloutis grossiers. La nappe est en relation hydraulique forte avec le fleuve Orb. Libre dans sa

partie amont, la nappe devient captive à proximité du littoral, du fait de la présence d'un niveau de limons de couverture dont l'épaisseur augmente en allant vers l'aval, provoquant une mise en charge de la nappe. Des relations hydrauliques existent aussi avec les sables astiens sous-jacents, qui se complexifient à l'approche du littoral, du fait de l'existence de formations argilo-graveleuses peu perméables du pliocène continental, qui les séparent des sables astiens.

Pour ces formations, nous disposons d'une carte piézométrique réalisée en 1976 par le BRGM. Vue l'ancienneté de ces données, il est probable qu'elles ne soient que peu représentatives de la piézométrie actuelle dans ces formations. Par ailleurs, les alluvions présentent des épaisseurs maximales de l'ordre de 30 m en bordure littorale.

Ces éléments font que les courbes de profondeur du biseau salé, calculées à l'aide de la formulation de Ghyben-Herzberg (Illustration 55), sont probablement éloignées de la réalité. De plus, au vu de la profondeur des alluvions, celles dont la valeur est supérieure à 40 m ne doivent pas être considérées.

L'illustration 55 permet de constater que, comme pour l'entité des alluvions de l'Hérault, les profondeurs des forages sont quasiment inconnues dans ce secteur (8 forages sur les 9 recensés). De plus, les alluvions étant superposées aux sables astiens, ces forages peuvent traverser les alluvions, puis capter les sables astiens.

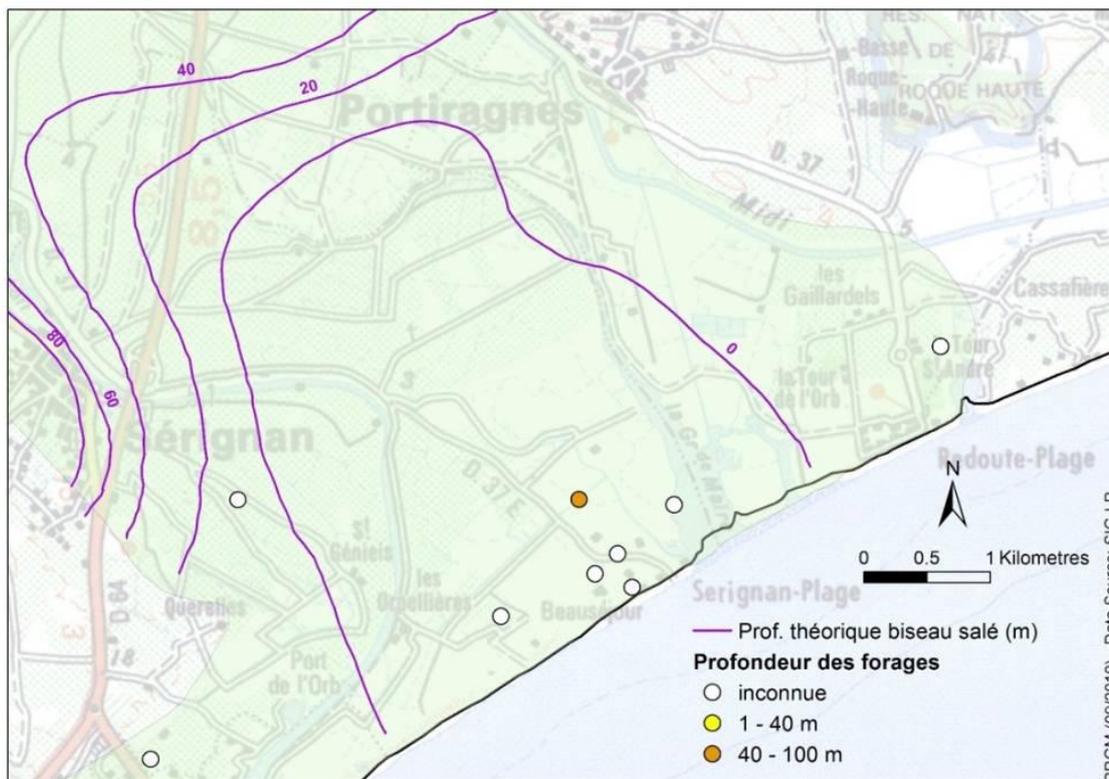


Illustration 55 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Orb, en 1976.

Les forages susceptibles de se trouver dans la zone d'influence du biseau salé sont listés dans le tableau ci-dessous, mais il n'est pas du tout certain que ces forages exploitent les alluvions. Ainsi, le forage F1 de la Mairie, présente une profondeur bien supérieure à celle des alluvions.

Nom du captage	Usage	Indice BSS	Volume prélevé (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Profondeur (m)
C. F2 BLEU MARINE	PRV	10406X0090	50	
C. F1 LA MAIRE	PRV	10406X0056	52	100
C. F1 LES ORPELLIERES	PRV	10405X0176	49	
C. F1 LE CLOS FERRAND	PRV	10405X0113	23	
C. F3 LE GRAND LARGE	PRV	10406X0091	80	
C. F2 BEAUSEJOUR	PRV	10406X0092	95	
C. F2 LES VIGNES D'OR	PRV		8	
P. F1 MINI GOLF DU LION	PRV	10406X0093	62	
P. F1 MER ET SOLEIL	PRV		8	
C. F3 LES SABLONS	PRV	10406X0102	99	
C. F3 L'HERMITAGE	PRV		25	
C. F1 LE CLOS DE LA GRANGETTE	PRV			

Liste des ouvrages exploitant les eaux souterraines des alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Orb.

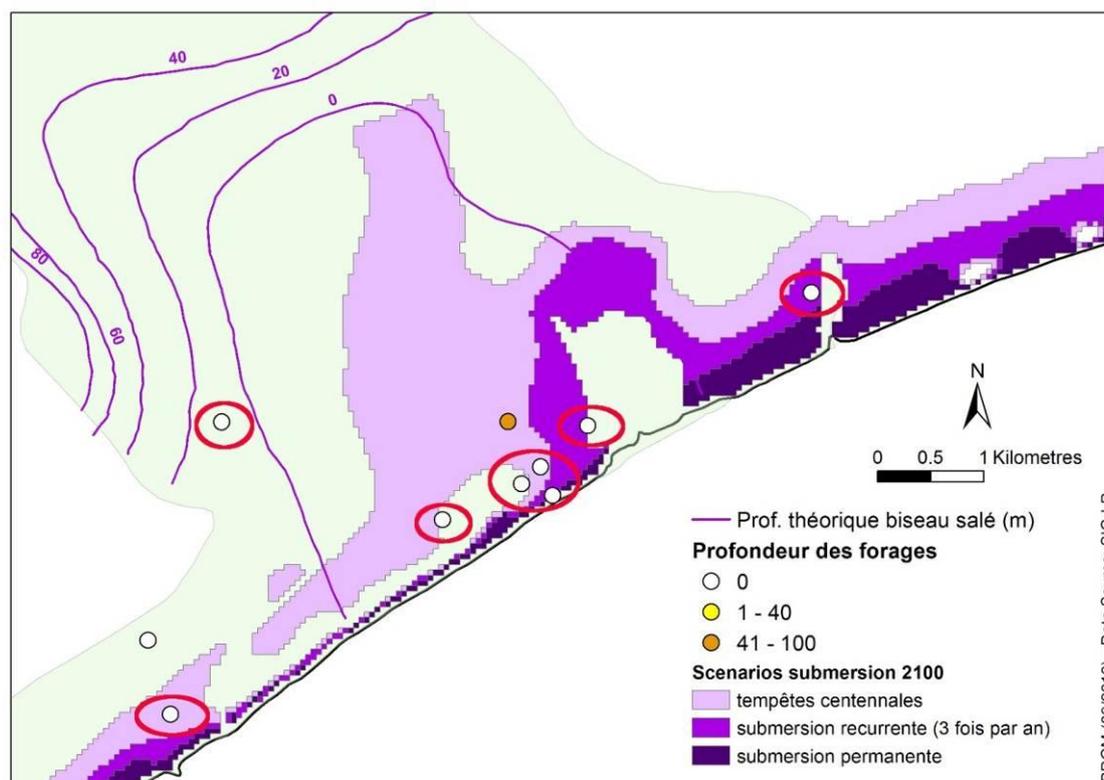


Illustration 56 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Orb et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

Si on retient l'hypothèse pessimiste que le futur trait de côte correspond à la limite maximale de submersion récurrente proposée par les scénarios de submersion pour le futur, on constate que les courbes du biseau salé pourraient se décaler vers le nord d'une distance d'environ 500 m, et ce, plutôt dans la partie est de la plaine alluviale (Illustration 56). Cette progression serait à même d'impacter les ouvrages de F1 Mer et Soleil, F2 Les Vignes D'or, F1 les Orpellières (10405X0176), F2 Beausejour (10406X0092), F1 Mini-Golf Du Lion (10406X0093), F3 Le Grand Large (10406X0091), F2 Bleu Marine (10406X0090), et F3 Les Sablons (10406X0102).

Comme pour les alluvions de l'Hérault, un travail de recherche détaillée pourrait permettre de lever les incertitudes liées au manque de connaissances sur les forages.

- **Aquifère 337a : alluvions quaternaires de la basse vallée de l'Aude**

Les alluvions quaternaires récentes de la basse-vallée de l'Aude en aval d'Olonzac (337a), s'étalent entre Coursan et Narbonne, dans ce qui était l'ancien lit majeur de l'Aude avant que celui-ci soit détourné vers la mer en passant au nord du massif de la Clape, pour protéger Narbonne de ces inondations violentes. Des sables et graviers d'une épaisseur pouvant atteindre 20 m sont surmontés par une couverture limoneuse imperméable en allant vers l'étang de Bages. Cette couverture imperméable rend la nappe captive dans toute la vallée. Entre Coursan et la mer, les alluvions sont très argileuses et moins intéressantes en termes de ressources en eau.

Pour ces formations, nous disposons d'une carte piézométrique réalisée en 1965 par le CERH. Vue l'ancienneté de ces données, il est probable qu'elles ne soient que peu représentatives de la piézométrie actuelle dans ces formations. Par ailleurs, les alluvions présentent des épaisseurs maximales de l'ordre de 20 m en bordure littorale. Ces éléments font que les courbes de profondeur du biseau salé, calculées à l'aide de la formulation de Ghyben-Herzberg (Illustration 57), sont probablement éloignées de la réalité. De plus, au vu de la profondeur des alluvions, celles dont la valeur est supérieure à 40 m ne doivent pas être considérées.

La situation particulière de l'aquifère alluvial, en retrait par rapport au bord de mer, rend à priori la nappe captive qu'il contient relativement peu vulnérable à l'intrusion du biseau salé. En effet, l'important gradient piézométrique observé en bordure de la vallée limite les intrusions (les valeurs de profondeur obtenues par la formulation de Ghyben-Herzberg sont très largement supérieures à l'épaisseur des formations alluviales). On constate ainsi qu'un seul forage exploité (Forage Cap De Pla Le Ratier, code BSS inconnu), pourrait être en situation de relative vulnérabilité par rapport aux intrusions salines dont la profondeur est inférieure à 40 m.

Si on retient l'hypothèse pessimiste que le futur trait de côte correspond à la limite maximale de submersion récurrente proposée par les scénarios de submersion, on constate que la situation de cet aquifère par rapport aux intrusions salines, pourrait ne pas être modifiée par la submersion (Illustration 58). En effet, le secteur de l'étang de Bages situé au contact avec l'entité alluviale serait *a priori* très peu submergé, la submersion gagnant plutôt du terrain ponctuellement un peu plus au sud et sur des distances inférieures à 500 m.

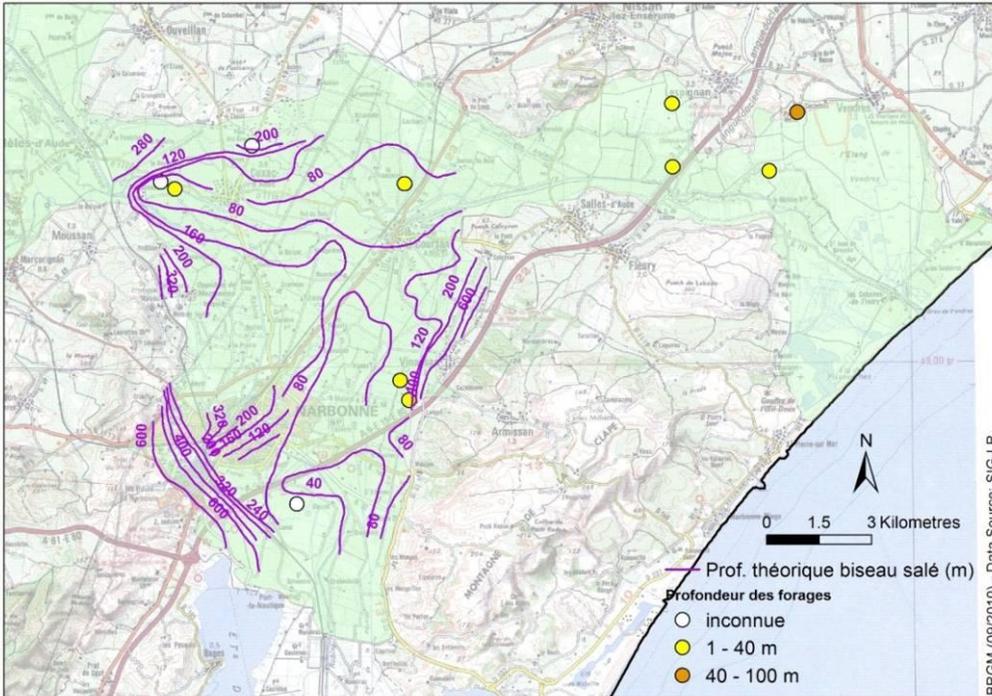


Illustration 57 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l’Aude, en 1965.

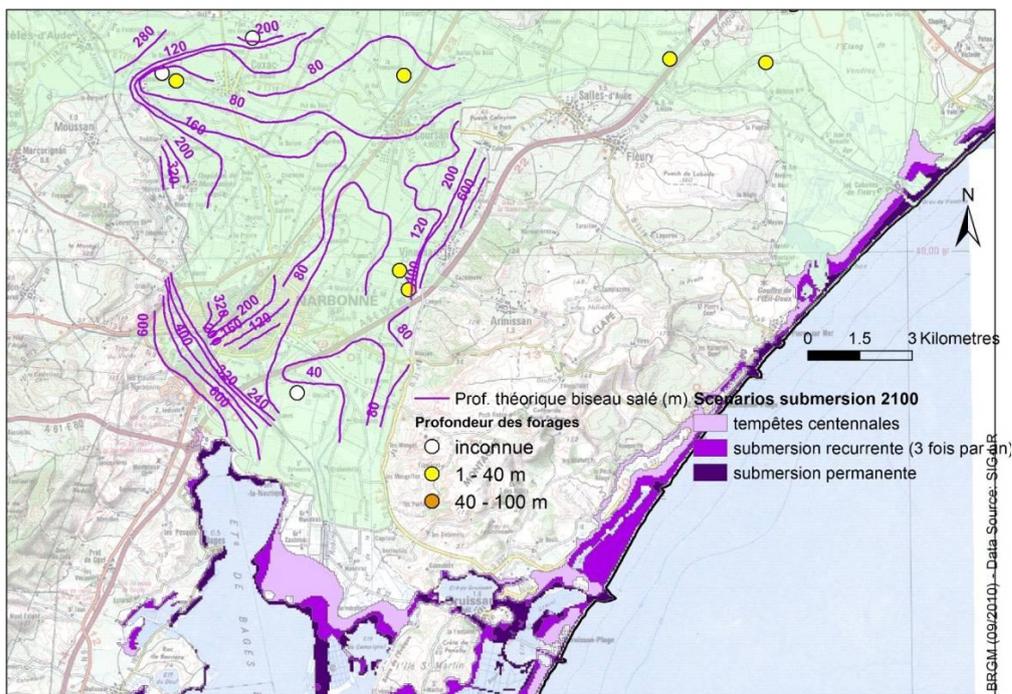


Illustration 58 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l’Aude et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

### 6.2.3. Conclusion et perspectives

Une caractérisation de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de la salinisation a été entreprise à deux échelles et à l'aide de deux approches différentes. À l'échelle nationale, des premières cartes de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion saline actuelle ont permis de faire un point sur l'état des connaissances région par région et de faire une mise à jour le dernier état datant de 1996. Trois types de cartes ont été préparés à l'échelle nationale, concernant une bande littorale de 5 km de large ; ce sont les cartes de conductivité et concentration en chlorures, indices d'intrusion saline pour des valeurs seuils précisées, des cartes de pression anthropique avec une représentation de la densité de population. Des tests ont été faits pour représenter des zones de basses topographies sur certaines côtes. Il reste à étendre ce travail à l'ensemble des côtes de la Métropole. Par ailleurs, la combinaison de ces différentes cartes devrait permettre d'avoir une représentation de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'échelle des côtes de la France Métropole.

L'état des connaissances concernant les aquifères côtiers de la France Métropole, mise à jour, fait ressortir l'existence d'intrusion saline ponctuelle, parfois plus importante au niveau des îles. La situation est similaire a priori à l'état décrit en 1996.

Concernant l'application de la méthode GALDIT à l'échelle de groupes d'aquifères ou de région, il est nécessaire de disposer de données piézométriques. Des cartes piézométriques existent çà et là, mais ne sont pas rassemblées dans une base commune. Ce travail devra être fait en 2011. Lorsque ces cartes ne sont disponibles, l'utilisation des données de piézomètre ponctuelles pourra être envisagée, comme cela a été fait dans le cadre de la cartographie pour la région du Languedoc-Roussillon.

La méthode GALDIT nécessite de disposer d'un certain nombre de données ; si celles-ci ne sont pas disponibles pour toutes les entités, mais par ailleurs si des informations existent concernant le niveau piézométrique, la sensibilité vis-à-vis de l'intrusion saline pour l'actuel et pour le futur, pourra être précisée en prenant en compte la position de la nappe par rapport au niveau de la mer (risque maximal si  $\Delta < 2$  m).

Une démarche simple a été testée pour conduire une analyse de la vulnérabilité future des aquifères côtiers, vis-à-vis des intrusions salines en lien avec les scénarios de submersion marine, fournis dans le cadre du projet MISEEVA. Cette démarche s'appuie sur la formulation de Ghyben-Herzberg pour proposer une caractérisation de la géométrie du biseau salé, à partir des informations piézométriques disponibles sur les aquifères côtiers languedociens contenant des nappes libres à semi-captives en bordure littorale. Cette démarche n'a pas été appliquée aux aquifères contenant des nappes captives d'importance régionale que sont ceux des sables Astiens et sables et argiles du Plio-Quaternaire du Roussillon, du fait de la non-adéquation de la formulation de Ghyben-Herzberg à ce type de situation. L'analyse qualitative conduite est entachée de beaucoup de sources d'incertitude. La première d'entre elles est liée à la dynamique réelle de mise en place des intrusions salines et à l'existence du biseau salé.

À l'heure actuelle, en dehors des formations calcaires du Jurassique du Languedoc-Roussillon sur lesquelles des difficultés sont connues, peu de problèmes en lien avec les intrusions salines sont connus dans les différentes formations étudiées. La formulation adoptée pour décrire la géométrie du biseau salé est très largement discutable. La deuxième source d'incertitude concerne la qualité et la représentativité des cartes piézométriques utilisées, parfois fort anciennes. Des campagnes piézométriques (ou, à défaut, des investigations de terrain ponctuelles) seraient nécessaires pour actualiser et valider cette information (sur laquelle se base la majeure partie de l'approche utilisée). La troisième source d'incertitude concerne la localisation et la connaissance des volumes réellement exploités dans les aquifères considérés. Les profondeurs d'un grand nombre d'ouvrages considérés ne sont pas connues, ce qui introduit des incertitudes quant aux niveaux qu'ils captent réellement. Enfin, la dernière source d'incertitude réside dans l'extrapolation de l'évolution des surfaces submergées à celle des courbes d'iso-profondeur du biseau salé. Cette extrapolation est largement qualitative et ne tient absolument pas compte des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère considéré. Cette démarche était exploratoire. Une comparaison pourra être effectuée en 2011 pour une entité avec les résultats de la méthode GALDIT, qui elle-même doit être validée.

Des acquisitions de données sur les prélèvements sur certaines entités pour affiner la méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité sont nécessaires, quelle que soit la démarche retenue au final.

### **6.3. RECENSEMENT DES MODÈLES HYDROGÉOLOGIQUES NUMÉRIQUES**

Un recensement des modèles hydrogéologiques distribués développés sous MARTHE a été effectué au cours de l'année 2010. Les modèles actualisés disponibles concernent uniquement la façade atlantique, avec en particulier le modèle nord aquitaine (MONA) au niveau de l'estuaire de la Gironde et le modèle Poitou-Charentes. Il n'existe pas de modèles numériques mis à jour récemment et utilisables pour les besoins du projet au niveau de la façade méditerranéenne, mis à part le modèle de l'aquifère du Gapeau (région PACA) développé dans le cadre d'un projet de recherche en partenariat industriel avec VEOLIA (projet RECHARGE). Ce modèle 3D a été développé sous MARTHE pour modéliser le comportement de l'aquifère vis-à-vis de différents scénarios de gestion, et de l'intrusion saline. Le modèle n'est pas accessible à ce jour au vu de la nature du contrat de recherche. La nappe de l'Argens dispose d'un modèle, mais non accessible par le BRGM, et non développé sous MARTHE. Les autres modèles, concernant la nappe de la Crau et l'aquifère Plio-Quaternaire du Roussillon sont obsolètes, datant de 20 à 30 ans ; ils nécessitent de nouveaux développements qui ne peuvent être effectués dans le cadre de cette action.

Les deux aquifères sélectionnées bien que n'ayant pas une vulnérabilité emblématique, considérant les données disponibles, sont le marais de Saint-Ciers-sur-Gironde (extraction ou zoom du modèle MONA) et la partie nord du Marais-Poitevin (département de la Vendée).

### 6.3.1. Tests de simulation

Les premiers tests de simulation concernent le modèle du marais de Saint-Ciers-sur-Gironde au niveau de l'estuaire de la Gironde et le modèle de gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin issu de l'adaptation du modèle des aquifères jurassiques en Poitou-Charentes [Douez O. et *al.* (2010), Putot E. et Bichot F. (2007), Touchard F. et *al.* (2002), Touchard F. et *al.* (2004)].

L'estuaire de la Gironde est fortement influencé par les marées de l'océan atlantique. La salinité des eaux de l'estuaire est donc de plus en plus importante d'amont en aval jusqu'à la pointe de Grave, qui marque la limite entre l'estuaire et l'océan. Les relations nappe-estuaire ont été étudiées en rive gauche de la Gironde et ont permis de mettre en évidence des zones vulnérables vis-à-vis de l'intrusion d'eau saumâtre. Cependant la complexité géologique (présence de nombreuses terrasses) ainsi que la présence d'eaux fossiles salées, rendent la modélisation de cette zone difficile. En revanche, en rive droite, au niveau du marais de Saint-Ciers, la géologie semble plus simple et un nombre important de données sont disponibles compte tenu de l'implantation de la centrale nucléaire d'EDF. Des études montrent un contact direct entre les eaux de l'estuaire et la nappe des graves, justifiant le choix de cette zone pour effectuer des simulations.

Le marais Poitevin est une zone humide emblématique de la façade atlantique, du fait de sa biodiversité et de l'activité économique associée (agriculture, pêche, tourisme). Le marais est en contact avec l'océan, mais il est également alimenté par des eaux souterraines. Une modification du niveau marin peut avoir un impact sur ce système. Des premiers tests à l'aide du modèle prenant en considération les relations nappe rivière du point de vue hydraulique permettront d'apporter des premiers éléments.

### 6.3.2. Saint-Ciers-sur-Gironde

L'étude bibliographique réalisée sur la région Aquitaine a mis en évidence le manque de données permettant de mettre en œuvre un modèle hydrodynamique suffisamment détaillé sur la côte Aquitaine pour l'aquifère du Plio-Quaternaire. En effet, généralement, l'extension du biseau salé est relativement faible et atteint au maximum quelques kilomètres. Il convient alors de pouvoir reproduire une géométrie précise au niveau de l'interface terre/mer. Il est également nécessaire d'avoir une piézométrie détaillée. En Aquitaine, la piézométrie de l'aquifère du Plio-Quaternaire au niveau du cordon dunaire est inconnue et le nombre de sondages permettant de reproduire cette géométrie est très faible. La réalisation de piézomètres disposés perpendiculairement au trait de côte, allant de celui-ci jusqu'à l'arrière dune, soit quelques centaines de mètres, permettrait d'avoir une piézométrie précise mais également de connaître la répartition et l'extension actuelle du biseau salé, ce qui est pour l'instant inconnu.

De plus la réalisation d'un modèle hydrodynamique prenant en compte les effets de densité nécessite un maillage de quelques dizaines de mètres au maximum et également une discrétisation verticale importante. Un modèle de ce type à l'échelle régionale engendrera un nombre de mailles très important et n'est pas envisageable à l'aide des outils de modélisation actuels.

Concernant les aquifères profonds, le manque, voire l'absence totale de données concernant leur exutoire est un handicap important puisque la modélisation hydrodynamique de ces aquifères serait constituée par un très grand nombre d'hypothèses sur : (i) la distance à la côte et donc la position de l'exutoire ; (ii) les paramètres hydrodynamiques ; (iii) la géométrie.

Outre les questions relatives au nombre de données disponibles, il faut se poser la question de la justification d'un tel modèle. L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence un risque relativement faible d'intrusion saline due à une élévation du niveau marin puisque l'aquifère du Plio-Quaternaire est protégé par le cordon dunaire et la légère crête piézométrique engendrée par celui-ci alors que les aquifères plus profonds sont protégés du fait de leur exutoire qui semble-t-il est relativement éloigné de la côte (plusieurs dizaines de kilomètres) mais également du fait de leur imperméabilisation en allant vers l'Ouest. Enfin l'aquifère du Plio-Quaternaire est peu exploité sur la côte Aquitaine à l'exception du bassin d'Arcachon. Il serait peut-être plus intéressant d'étudier une zone moins étendue qui présente semble-t-il un risque plus important du fait de l'absence de cordon dunaire.

Après étude des différentes possibilités, le choix de la zone à modéliser s'est porté sur le marais de Saint-Ciers-sur-Gironde.

### ***Contexte géologique et hydrogéologique de la zone : le marais de Saint-Ciers-sur-Gironde***

- **Les raisons du choix de cette zone**

L'estuaire de la Gironde, formé par la confluence de la Dordogne et de la Garonne, est fortement influencé par les marées de l'océan Atlantique qui se font ressentir jusqu'en amont de Bordeaux. La salinité des eaux de l'estuaire est donc de plus en plus importante d'amont en aval jusqu'à la pointe de Grave qui marque la limite entre l'estuaire et l'océan. Une remontée du niveau marin de 60 centimètres entraînerait alors une augmentation de salinité tout au long de l'estuaire. Cette remontée est susceptible de s'accompagner d'un étiage plus important accentuant encore la salinité de l'estuaire à cette période.

Les relations nappe-estuaire ont été longtemps étudiées en rive gauche et ont permis de mettre en évidence des zones présentant une vulnérabilité plus ou moins importante à l'intrusion d'eau saumâtre en provenance de l'estuaire. Cependant la complexité de la géologie du fait de la présence d'un grand nombre de terrasses et la présence d'eaux fossiles largement salées rendent la modélisation de cette zone trop complexe.

En revanche en rive droite de la Gironde au niveau du marais de Saint-Ciers, la géologie semble plus simple et un nombre important de données est disponible compte tenu de l'implantation de la centrale nucléaire d'EDF en plein cœur du marais sur la commune de Braud-et-Saint-Louis. De plus certaines études mettent en évidence un contact direct entre les eaux de l'estuaire et la nappe des graves ce qui justifie alors le choix de cette zone compte tenu des risques de salinisation des eaux de l'aquifère en

cas de pompage trop intensif et d'une augmentation du niveau et de la salinité des eaux de l'estuaire.

Le marais de Saint-Ciers se situe au nord de Blaye, à une soixantaine de kilomètres au nord de Bordeaux (Illustration 59).

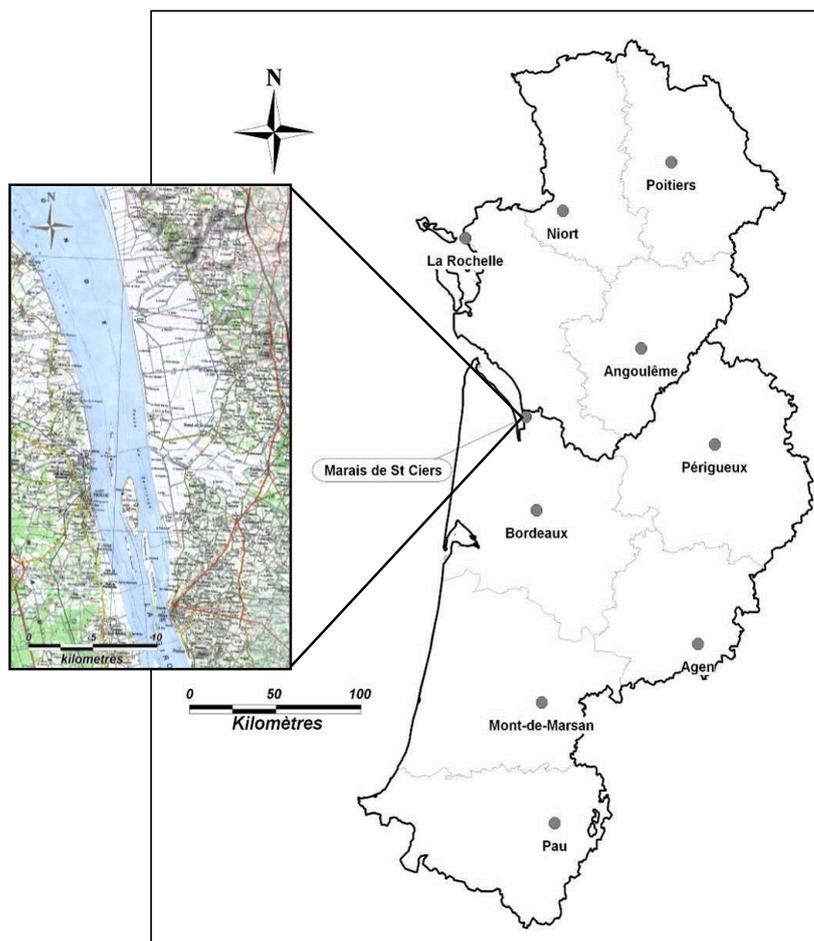


Illustration 59 : Situation géographique de la zone d'étude.

- **Géographie**

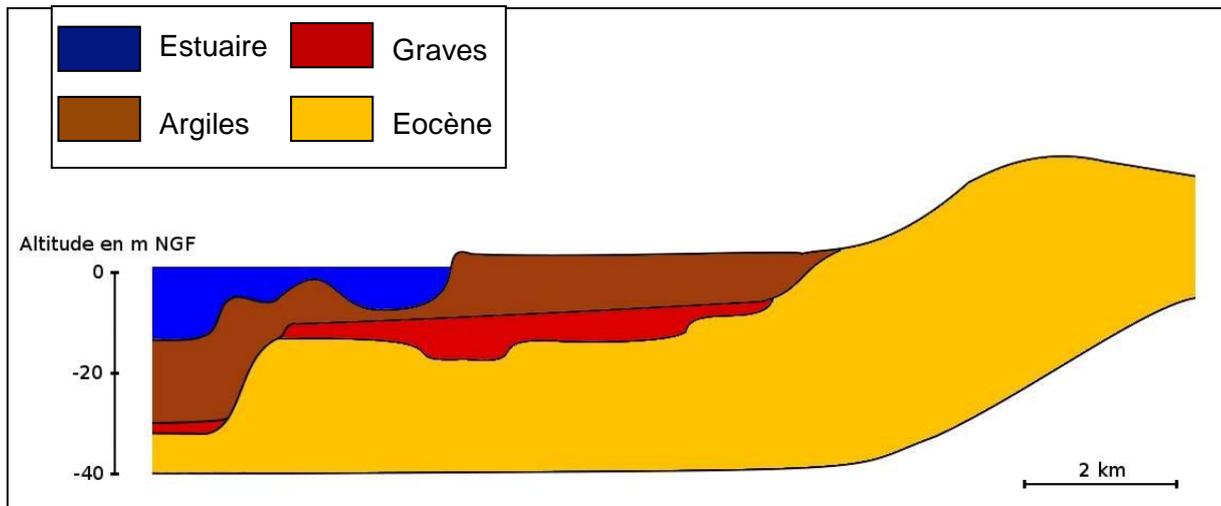
Le marais est une zone de cultures importante où l'on trouve principalement des parcelles de maïs, cultures consommant un grand volume d'eau, mais également quelques parcelles réservées à l'élevage de bovins. À l'Est, le marais est bordé par des coteaux remontant rapidement à plusieurs dizaines de mètres d'altitude. Ces coteaux sont utilisés pour la culture de la vigne très importante dans la région (Côte de Blaye). Plusieurs petits cours d'eau entaillent ces coteaux et se déversent dans le canal de ceinture ceinturant le marais à l'est comme son nom l'indique. Ces cours d'eau servent d'exutoire à la nappe. À l'Ouest, l'estuaire de la Gironde borde le marais sur toute sa longueur soit sur une vingtaine de kilomètres.

- **Contexte géologique**

La zone étudiée se situe sur le flanc sud de l'anticlinal de Jonzac de direction armoricaine c'est-à-dire SE-NW. Les coteaux bordant le marais se sont déposés au Secondaire et au Tertiaire et sont recouverts au niveau du marais et de l'estuaire par des sédiments quaternaires fluviatiles et marins.

La fin de l'Éocène est marqué par une transgression marine provenant du Sud-Ouest entraînant une sédimentation marno-calcaire (faciès marin) au Sud-Ouest de la Centrale et sablo-argileuse au Nord-Est (faciès continental). La limite de cette transgression passe en plein cœur de la zone d'étude. Au début du Quaternaire, la baisse du niveau marin entraîne la formation de chenaux fluviatiles érodant le substratum éocène et se comblant de sables, graviers et galets. L'histoire de ces dépôts est liée aux variations climatiques. Elle se caractérise par une succession de phases de creusements et de remblaiements. Puis la transgression flandrienne voit le dépôt de formations limoneuses venant recouvrir entièrement les différentes terrasses alluviales.

L'illustration 60 représente schématiquement la disposition des différentes couches. Il apparaît que s'il existe un contact direct entre les eaux de l'estuaire et les graves, dû au dragage du chenal de navigation, il ne saurait être important.



*Illustration 60 : Coupe schématique est-ouest.*

- **Campagne de terrain (piézométrie et chimie)**

Afin de compléter les informations disponibles dans la bibliographie, une campagne de terrain a été effectuée entre juin et mi-juillet 2010. 49 mesures piézométriques ont été effectuées sur 36 ouvrages captant pour la plupart (29) l'aquifère des graves, les autres captant l'Éocène. 23 mesures des paramètres suivants : oxygène dissous, pH, température, conductivité et potentiel d'oxydo-réduction ont été effectuées sur 19 ouvrages dont 16 captent l'aquifère des graves.

## ***Modélisation de l'aquifère des graves en rive droite de l'estuaire de la Gironde***

La modélisation du système est réalisée à l'aide du logiciel MARTHE version 7.0. Le modèle MARTHE est un logiciel de modélisation hydrodynamique, en régime transitoire, des écoulements dans les milieux poreux tridimensionnels et/ou multicouches. Le schéma de résolution utilise les différences finies avec un maillage rectangulaire.

### **• Construction du modèle**

#### ***Discrétisation spatiale et géométrie***

La zone modélisée s'étend sur une douzaine de kilomètres d'Ouest en Est (du centre de l'estuaire jusqu'aux coteaux) et sur une vingtaine de kilomètres du Nord au Sud (de Blaye à Saint-Bonnet-sur-Gironde) soit une superficie de 301 km<sup>2</sup>. Le maillage du modèle comprend 143 118 mailles carrées actives de 100 mètres de côté réparties sur 330 lignes, 170 colonnes et 15 couches représentant les différentes formations de la manière suivante de haut en bas :

- couche 1 : Estuaire ;
- couche 2 : Argile flamandienne ;
- couche 3 à 14 : Graves (discrétisation verticale d'un mètre de hauteur afin de prendre en compte les effets de la salinité) ;
- couche 15 : Éocène.

L'extension de ces différentes formations est délimitée par des mailles inactives (698 382 au total). La géométrie du modèle repose sur les éléments suivants :

- ouvrages recensés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS – BRGM) ;
- rapport d'études concernant principalement la construction et le développement de la centrale nucléaire du Blayais située au cœur de la zone ;
- avis émis par le BRGM sur différentes études d'impact concernant des projets d'exploitation des graves au droit de l'estuaire de la Gironde ;
- campagne bathymétrique réalisée entre 2005 et 2007 par le Port Autonome de Bordeaux ;
- Modèle Numérique de Terrain de l'IGN.

Un nombre conséquent de données est disponible dans un rayon proche de la centrale EDF. En s'éloignant les données deviennent moins nombreuses et moins précises puisqu'il s'agit principalement d'ouvrages agricoles dont les coupes géologiques (logs de forages) sont rarement renseignées. Au niveau de l'estuaire, dans la partie est, très peu de données sont disponibles à l'exception de la zone située en face de la centrale où des sondages nautiques ont été réalisés pour les fouilles de celles-ci. Le couplage de ces informations avec les avis émis par le BRGM a permis de reconstituer la géométrie des graves au droit de l'estuaire avec cependant une incertitude importante

puisque aucune valeur précise ni spatialisée n'est disponible dans ces avis. La géométrie interpolée à partir de ces informations met en évidence un contact direct entre les graves et les eaux de l'estuaire sur un secteur représenté par 5 mailles soit 5 hectares au sud de la centrale EDF, en face de l'île de Pâtiras, dans le chenal de Saintonge.

La figure suivante (Illustration 61) présente la géométrie 3D du système modélisé, réalisé à partir du croisement de l'ensemble des informations citées précédemment.

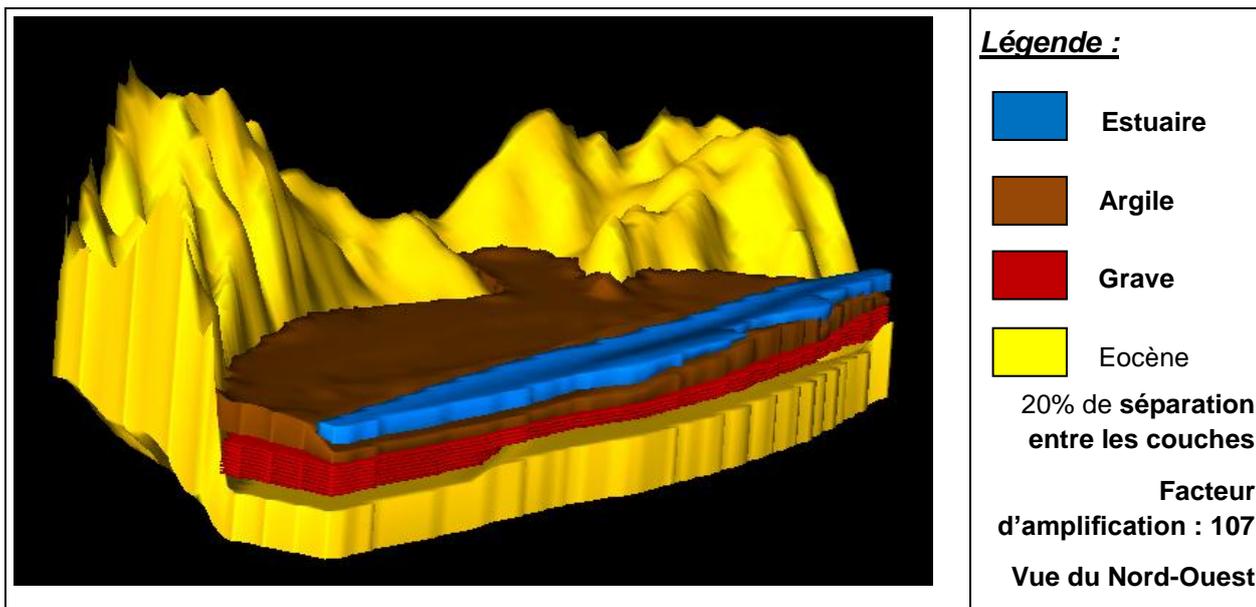


Illustration 61 : Représentation 3D de la géométrie du modèle.

### Conditions aux limites

Les limites Est et Ouest sont constituées par des potentiels imposés appliqués sur les couches 1 et 15 (la première et la dernière couche) de la manière suivante :

- couche 1 (estuaire) : d'après la bibliographie et les hauteurs d'eau mesurées dans l'estuaire, le niveau moyen de celui-ci est de 0,5 m NGF. Ce niveau est ainsi imposé comme potentiel sur cette couche ;
- couche 15 (Éocène) : les cartes piézométriques du modèle de la crête piézométrique de l'Eocène ont permis de déterminer le niveau à imposer au droit de l'estuaire dans la couche éocène. Ainsi, il est de 0,5 m NGF sur une grande partie, puis au Sud il augmente progressivement jusqu'à 3m NGF entre l'île de Pâtiras et Blaye. À l'Est, la couche représentant l'Éocène a été étendue jusqu'à environ 5 km de la limite des graves et le potentiel imposé correspond à un niveau piézométrique situé à 2 mètres de profondeur par rapport à la topographie. L'éloignement de la limite permet de ne pas avoir un système trop contraint.

Enfin, à l'Est du marais, dans le secteur où l'Eocène affleure, la nappe est autorisée à déborder.

### Paramètres hydrodynamiques

L'aquifère des gravas est considéré comme un milieu isotrope, les paramètres hydrodynamiques sont donc identiques dans toutes les directions de l'espace ( $K_x = K_y = K_z$ ). Les mesures réalisées pour le compte d'EDF lors de la construction de la centrale donnent des valeurs de coefficient de perméabilité s'échelonnant de  $1,6 \cdot 10^{-5}$  à  $1,3 \cdot 10^{-3}$  m/s. Faute de mesures le coefficient d'emmagasinement captif est estimé arbitrairement à  $1 \cdot 10^{-4}$ .

### Simulation en régime permanent

La simulation en régime permanent consiste à établir l'équilibre hydrodynamique du système sans influence anthropique (sans prélèvement).

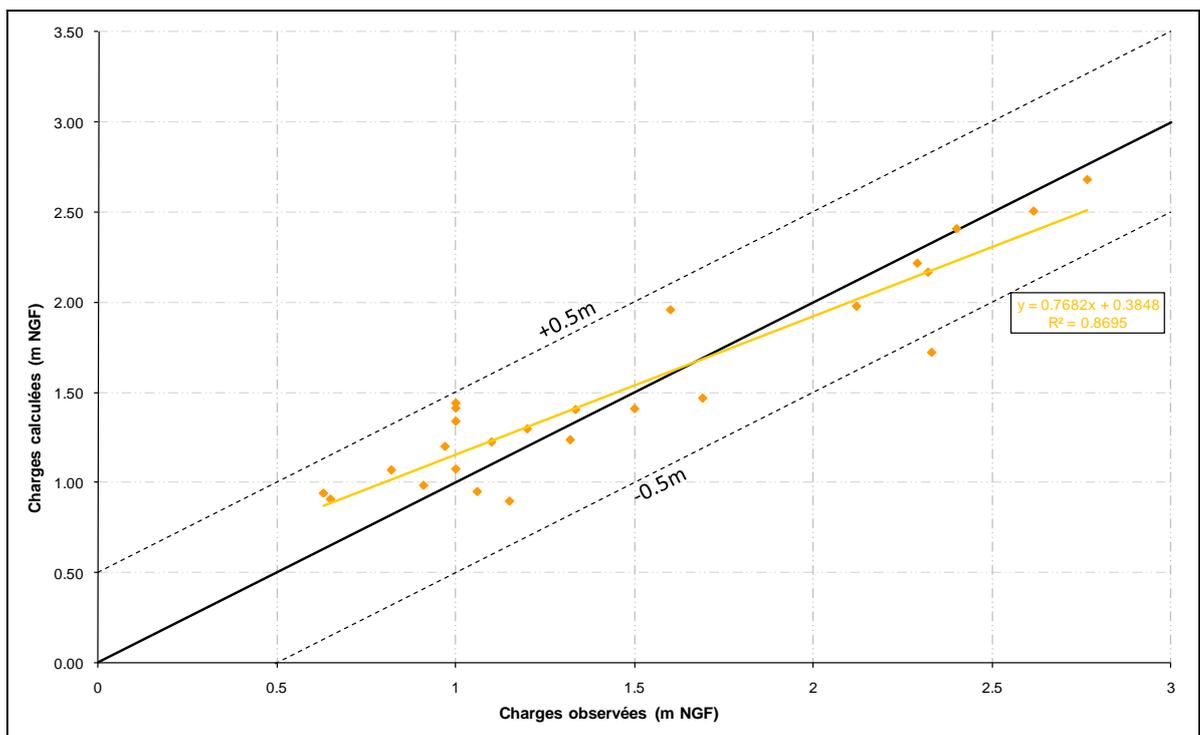


Illustration 62 : Diagramme de dispersion.

Le processus de calage aboutit à un champ de perméabilités compris entre  $2.5 \cdot 10^{-3}$  et  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s pour les gravas et entre  $3 \cdot 10^{-5}$  et  $6 \cdot 10^{-4}$  m/s pour l'Eocène. Enfin, la perméabilité verticale de l'Eocène est fixée à  $6 \cdot 10^{-8}$  m/s d'après les valeurs trouvées dans la bibliographie.

Le processus de calage du modèle a abouti au diagramme de dispersion qui suit (Illustration 62) permettant de valider le calage du modèle en régime permanent en termes de charges.

### **Analyse de sensibilité**

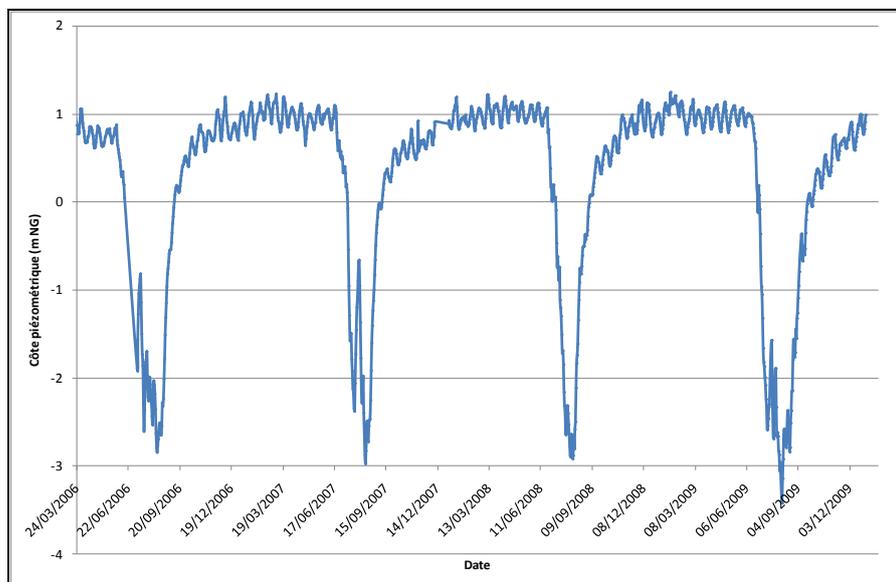
Une analyse de sensibilité du modèle a montré qu'en régime permanent et sans pompage, seul les variations des coefficients de perméabilité des graves et de l'Eocène vont avoir un impact sur les charges simulées. Suite aux différents tests réalisés, il s'avère que le champ de perméabilité des graves peut-être entre 0 et 10 fois plus faible et entre 0 et 5 fois plus élevé environ. Il en est de même pour le champ de perméabilité de l'Eocène, mais inversement, c'est-à-dire qu'il peut être entre 0 et 10 fois plus élevé ou entre 0 et 5 fois plus faible.

Le coefficient de perméabilité verticale de l'Éocène ne joue pas un rôle important, mais en régime transitoire et en prenant en compte les prélèvements, ce paramètre deviendra alors très important.

### **Simulation en régime transitoire**

#### *Chronique piézométrique*

Sur l'ensemble du marais, une seule chronique piézométrique, relative à la nappe des graves, est disponible (Illustration 63) au niveau de la centrale EDF. Ce piézomètre équipé d'un capteur n'est, a priori, pas exploité et le rabattement observé durant les mois d'été au cours des dernières années est de près de 4 mètres.



*Illustration 63 : Chronique piézométrique entre 2006 et 2010 au piézomètre PGE3B (Centrale EDF).*

L'ouvrage le plus proche exploitant la nappe des graves se situe à 1 km du piézomètre. Cependant certains ouvrages au sein de la centrale exploitent l'aquifère du Campanien situé à 230 mètres de profondeur. Il se peut qu'il y ait une influence non pas en terme de flux mais en terme de transfert de pression, ce qui pourrait expliquer ce fort rabattement. Il est également possible que d'autres ouvrages exploitant la nappe des graves soit présents aux alentours de la centrale, mais qui n'ont pas été repérés lors de la campagne de terrain et qui ne sont pas recensés.

À noter que la comparaison avec les charges simulées se fera sur les charges observées de 2007 en raison d'une lacune dans l'enregistrement entre le 15 juin et le 7 juillet 2006.

### *Les prélèvements*

La seule carte piézométrique existante date du mois d'août 1988. Le volume des prélèvements a donc pu augmenter depuis cette date. De plus les volumes prélevés ne sont très certainement pas exacts, puisque lors de la campagne de terrain certains ouvrages repérés ne sont pas référencés. Les prélèvements ne se font pas en continu et la répartition au cours de la journée ou de la semaine est inconnue. Le débit exact de pompage n'est pas connu non plus. Cependant, lors de la campagne de terrain, la plupart des ouvrages étaient équipés de pompes d'un débit compris entre 60 et 90 m<sup>3</sup>/h.

D'après les données de la chambre d'agriculture, en 2006, 29 ouvrages exploitent la nappe des graves (Illustration 64) et prélèvent au total environ 1 150 000 mètres cube pour une année. Pour la même année les données de l'agence de l'eau aboutissent à 33 ouvrages pour environ 1 400 000 mètres cube prélevés. Ces volumes annuels sont en réalité prélevés majoritairement sur une période allant de 2 à 3 mois entre les mois de juin et septembre.

La campagne de terrain a permis de repérer deux ouvrages non référencés ni dans la BSS, ni par la chambre d'agriculture, ni par l'agence de l'eau. Après enquête auprès des propriétaires, ces ouvrages sont bien exploités, mais le volume moyen annuel n'est pas connu. Un débit de pompage de 60 m<sup>3</sup>/h leur a été attribué, de manière raisonnable.

Il n'est pas exclu que d'autres ouvrages soit exploités mais non référencés, puisque les deux ouvrages repérés sont visibles de la route, mais certains ouvrages peuvent être éloignés et donc non visibles.

### *Pas de temps*

Les simulations sont réalisées en régime transitoire en affectant pour chaque ouvrage le débit fourni par la chambre d'agriculture (jugé plus juste) ramené à un débit équivalent à 75 jours de pompage (2 mois et demi) et à 10 heures de pompage par jour. Les pas de temps se découpent donc de la manière suivante : (i) 10 h de pompage et (ii) 14 h de repos. Il s'agit d'une hypothèse sur la répartition temporelle des prélèvements puisqu'aucune donnée relative à celle-ci n'est disponible.

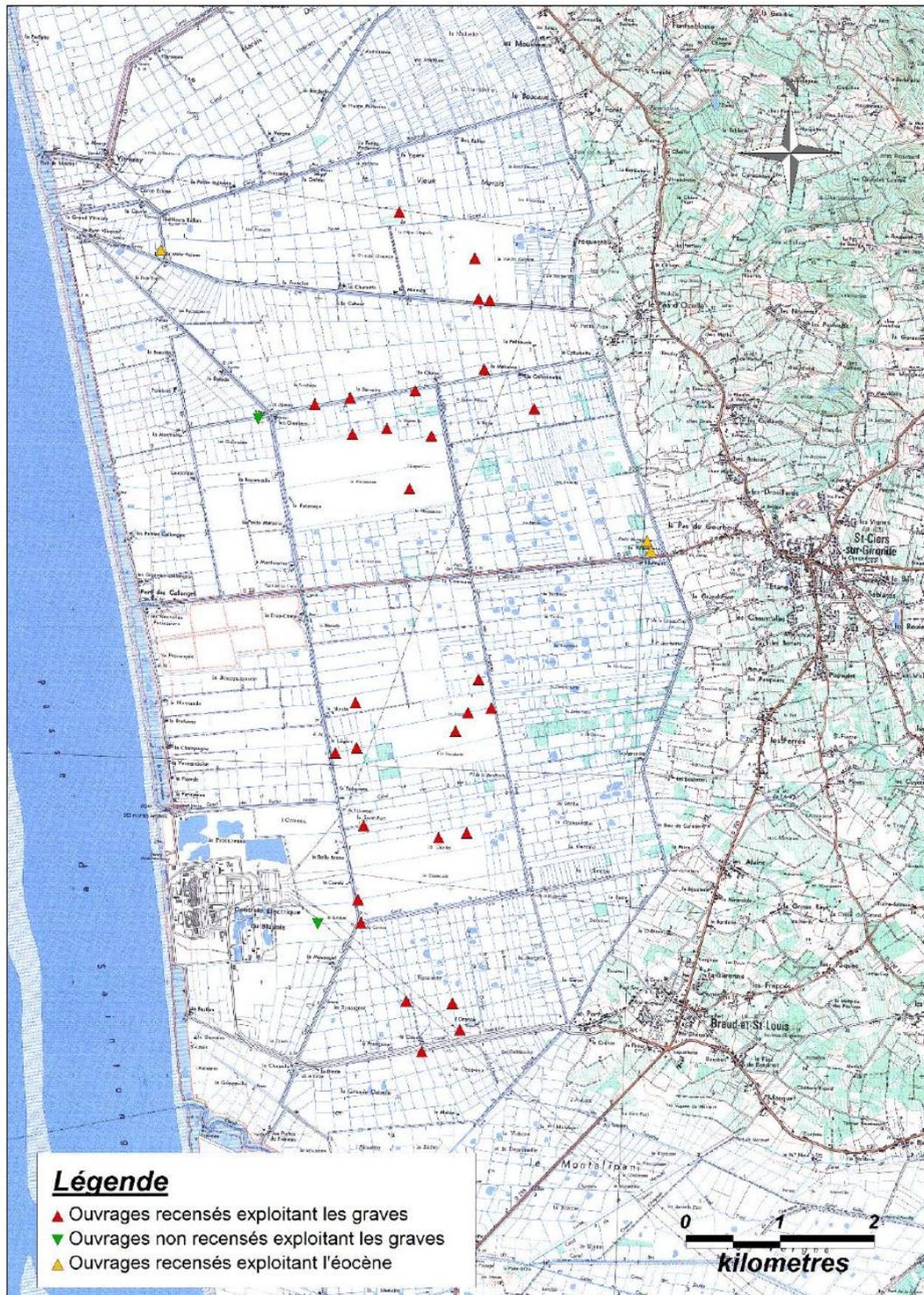


Illustration 64 : Répartition des ouvrages exploitant la nappe des graves et celle de l'Eocène.

### Correction du champ de perméabilité

Après vérification en régime permanent, il se trouve que le calage obtenu présente une amélioration par rapport à celui issu du régime permanent puisque le coefficient directeur de la droite de corrélation est proche de 1 (Illustration 65).

Le rabattement, légèrement plus important que celui simulé avec la première méthode, reste cependant faible comparé aux valeurs enregistrées au piézomètre de la centrale EDF (0,6 m au lieu de 4 m environ).

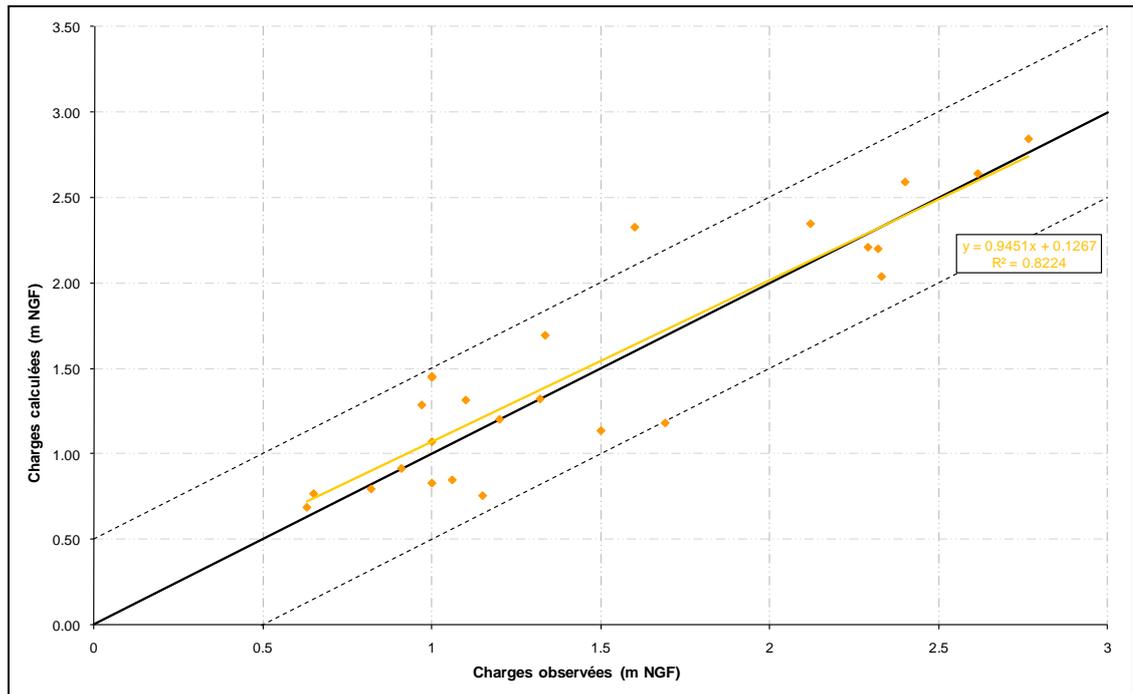


Illustration 65 : Diagramme de dispersion obtenue suite au processus de calage en régime transitoire.

### Synthèse

Les corrections apportées au modèle permettent de résoudre le problème de dénoyage puisque les charges piézométriques simulées aux puits en période de pompage sont cohérentes et ne descendent pas sous la limite du toit des graves, à l'exception de la zone mis en évidence précédemment.

En revanche, les rabattements simulés au piézomètre PGE3B sont faibles et ne correspondent pas aux charges attendues puisque le rabattement observé est d'environ 4 mètres alors que les rabattements simulés n'excèdent pas 65 cm.

Malgré cela, la simulation en régime transitoire a tout de même permis d'affiner le calage du modèle et c'est donc le champ de perméabilité issue de la deuxième méthode qui servira aux simulations intégrant la salinité.

Dans les deux cas il y a une inversion des sens d'écoulement entre la zone de prélèvement et l'estuaire comme représenté sur les figures suivantes (Illustration 66 et Illustration 67).

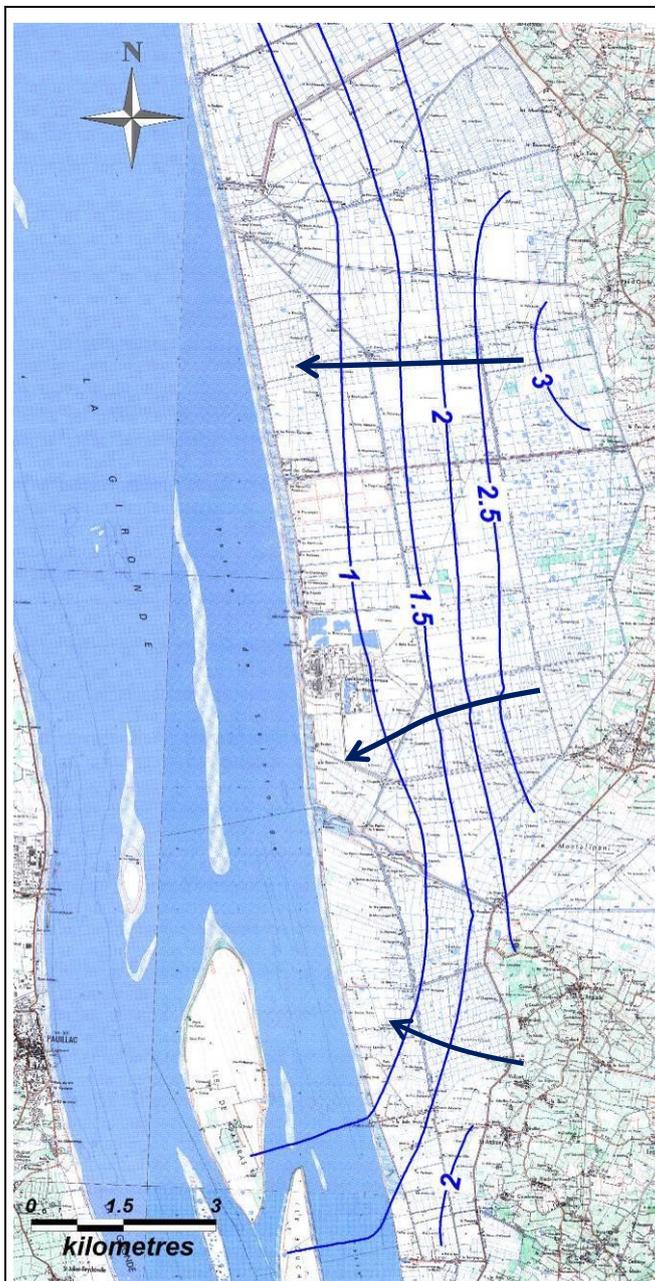


Illustration 66 : Sens d'écoulement de la nappe au repos.

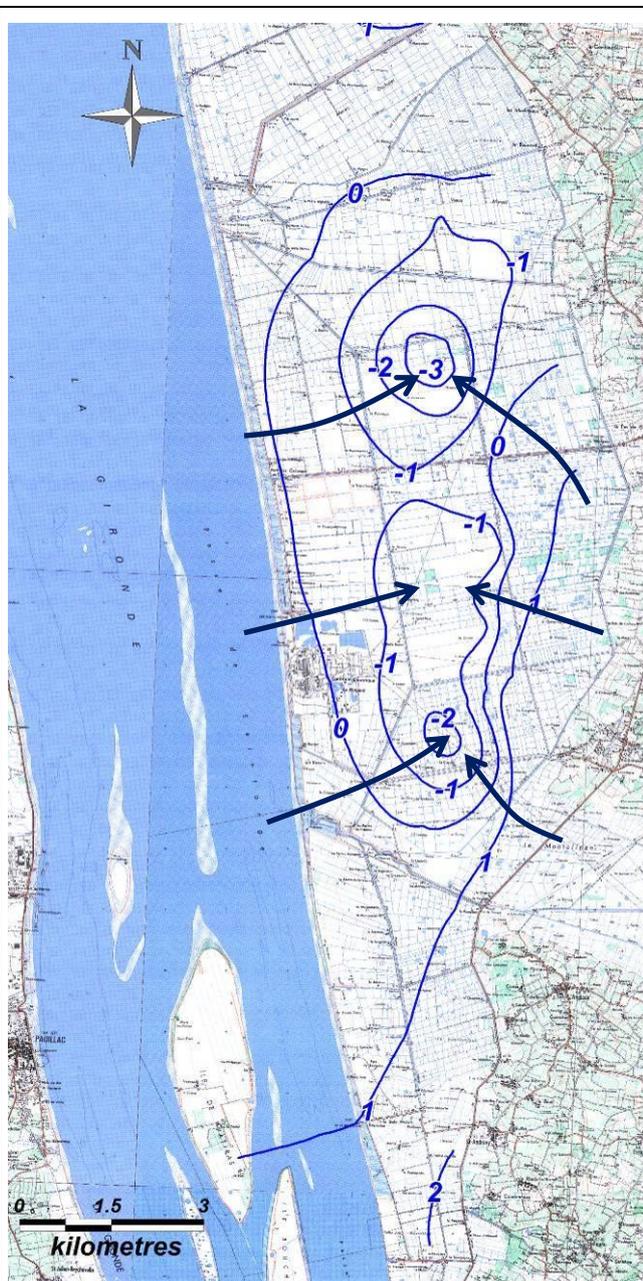


Illustration 67 : Sens d'écoulement de la nappe en pompage.

• **Prise en compte des phénomènes de densité liés à la salinité**

Suite aux analyses de sensibilité et aux résultats obtenus, la salinité est intégrée au modèle en imposant une valeur de salinité pour l'estuaire. Dans cette partie de l'estuaire, la salinité des eaux est comprise entre 8 et 15g/l selon la période de l'année. La campagne piézométrique ayant été réalisée en période de hautes eaux, la salinité de l'estuaire est imposée à 8 g/l dans le modèle. La limite Est du modèle, au niveau de l'Éocène, est imposée à 0,2 g/l puisqu'il ne s'agit pas d'eau pure. Aucune donnée de dispersivité n'étant disponible, l'hypothèse suivante est faite : le transport se fait uniquement par convection et diffusion moléculaire, dont le coefficient est égal à  $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Un maillage écosais est réalisé uniquement sur les colonnes du modèle pour atteindre une largeur de maille dans le sens Est-Ouest de 25 mètres au niveau de la berge de l'estuaire. Ceci permet alors d'avoir une bonne précision de l'extension du front salé perpendiculairement à la berge.

En régime permanent et sans pompage, les différences de salinité entre la partie supérieure et la partie inférieure de l'aquifère sont très faibles (0,5 g/l au plus proche de l'estuaire). Il s'agit donc plus d'un front salé que d'un biseau salé. Le graphique ci-dessous (Illustration 68) présente l'évolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge de l'estuaire.

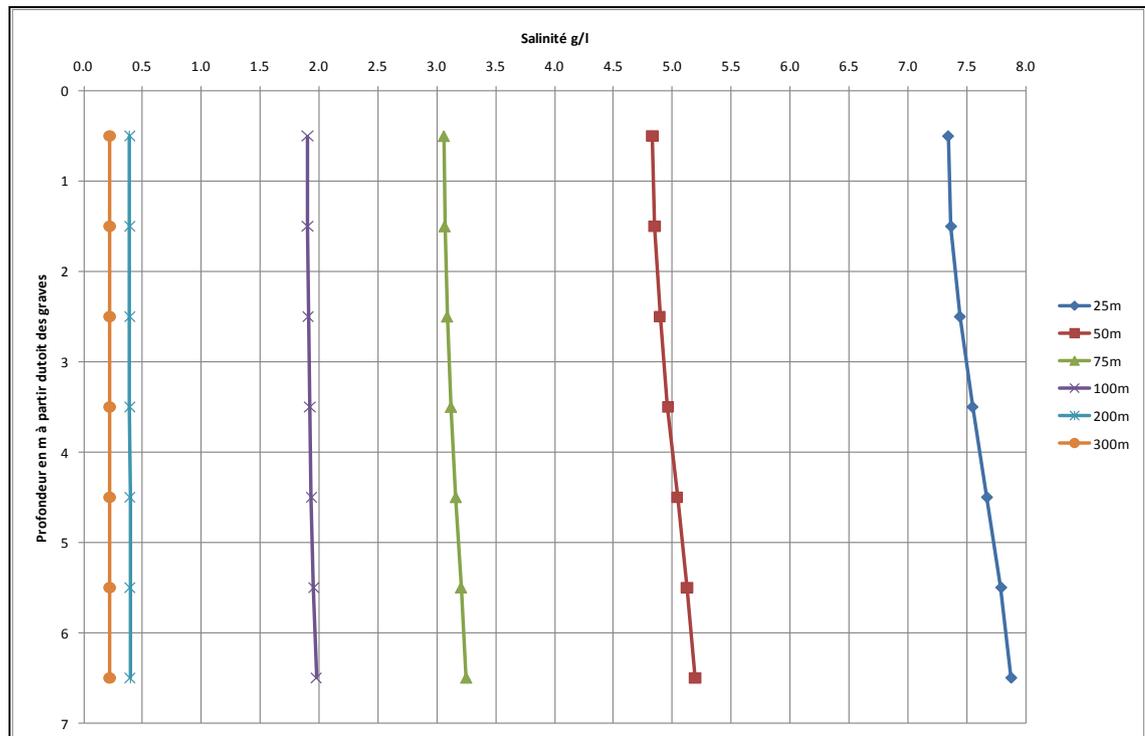


Illustration 68 : Évolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge.

D'après les simulations en régime permanent et sans pompage la propagation du front salé à l'intérieur des terres se fait sur une distance environ égale à 200 mètres (illustration 69). D'après les mesures effectuées sur le terrain il semble que l'extension du front salé soit un peu plus importante mais, comme précisé précédemment, étant donné le peu de données disponibles ainsi que leur précision, il ne peut pas être effectué un calage à partir de celles-ci.

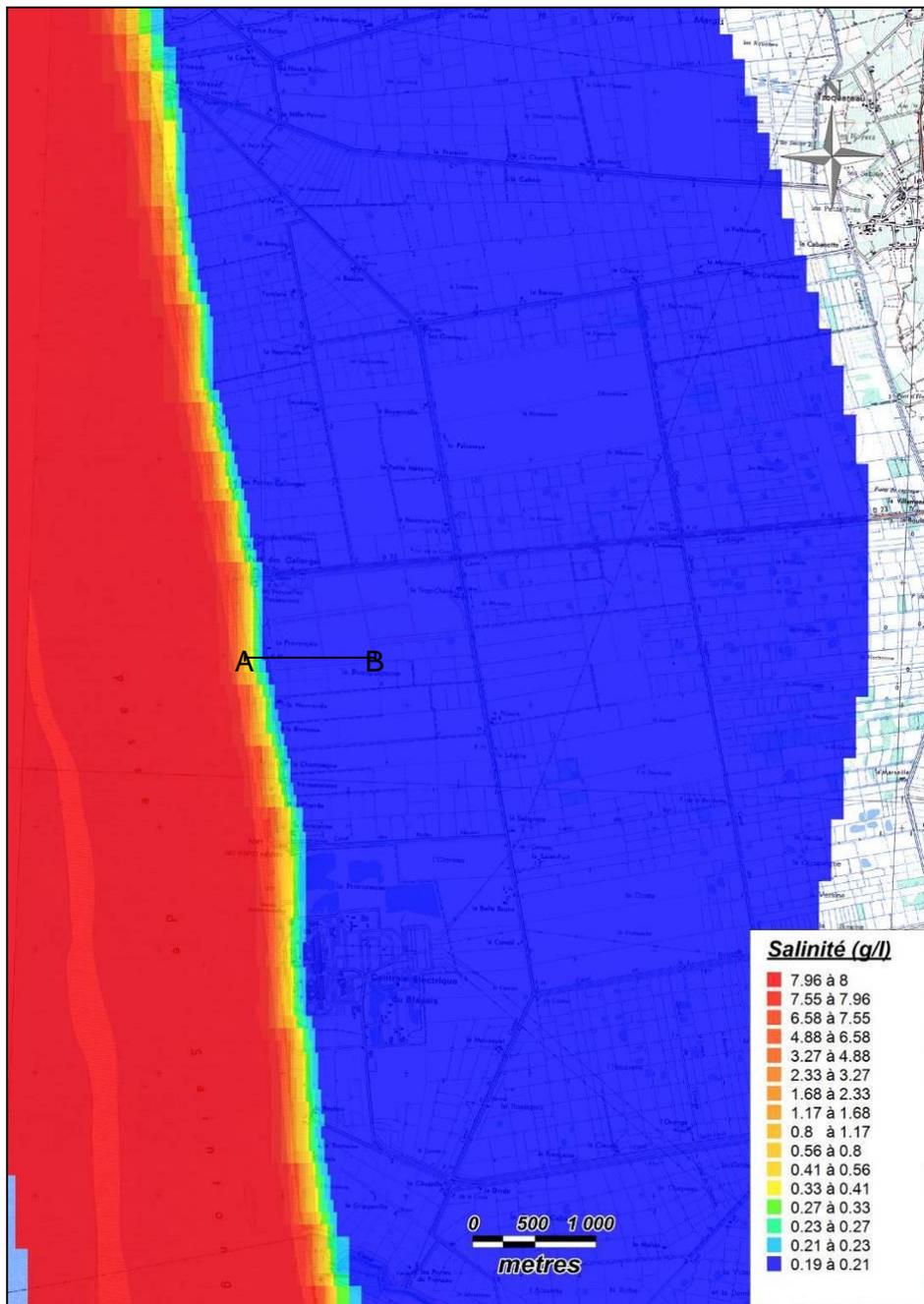


illustration 69 : Répartition de la salinité dans la couche 3 au repos.

En période de prélèvement la salinisation de la nappe va varier à proximité de l'estuaire comme le montre le graphique ci-dessous (Illustration 70) (t = 0 correspond à l'équilibre établi en régime permanent).

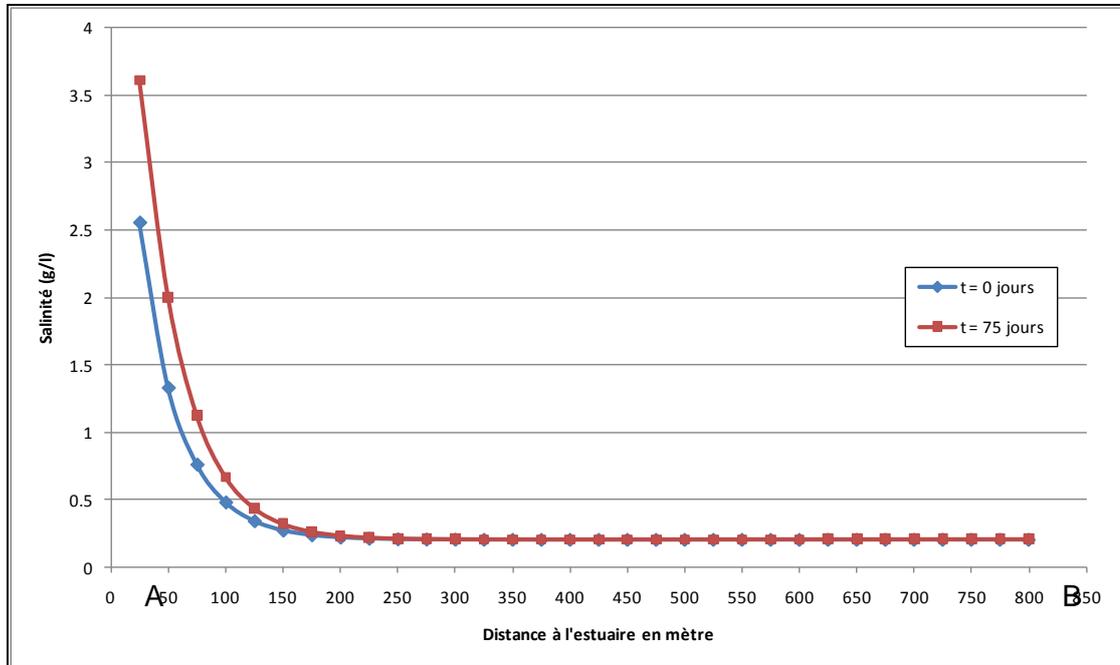


Illustration 70 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.

Il apparaît sur ce graphique (Illustration 70) que l'extension du front salé ne progresse pas de manière visible au cours de la période de pompage ; il y a simplement une augmentation de la salinité à proximité de l'estuaire.

Au vue des données disponibles, la prise en compte de la salinité dans les simulations réalisées ne permet pas de réaliser un calage sur les paramètres hydrodynamiques relatifs au transport de masse (diffusion moléculaire, dispersivité). En effet, les données disponibles sont principalement des valeurs de conductivité issues de la campagne de terrain. Dans l'idéal des prélèvements auraient dues être effectués (et analysés en laboratoire) à intervalle régulier. Ceci aurait alors permis d'avoir une valeur de concentration en chlorures et également de connaître l'évolution de la salinité en fonction des marées, afin d'établir une valeur moyenne (comme pour la charge).

### • Conséquences du changement climatique

D'après les études réalisées, le changement climatique aurait deux conséquences sur la zone étudiée :

- augmentation de la côte moyenne de l'estuaire (+0,6 mètre dans le cas le plus pessimiste) ;
- augmentation de la salinité de l'estuaire due à un étiage plus fort et plus long.

Le niveau moyen de l'estuaire est donc imposé à 0,5 + 0,6 soit 1,10 mètre. Il est également fait l'hypothèse que le niveau piézométrique de l'Eocène se mette à l'équilibre avec l'estuaire. La limite Ouest du modèle au niveau de l'Eocène est imposée à 1,10 mètre sur les mailles où il était précédemment imposé entre 0,5 et 1,10. Enfin, la salinité de l'estuaire est imposée à 15 g/l. La salinisation imposée à l'estuaire est un élément principal qui va influencer la salinisation de l'aquifère en absence de pompage.

À noter que compte tenu du calage inexistant sur les paramètres du transport les résultats obtenus sont à prendre avec précaution. La très faible diffusion-dispersion retenue est susceptible de limiter grandement la salinisation du front.

### Régime permanent

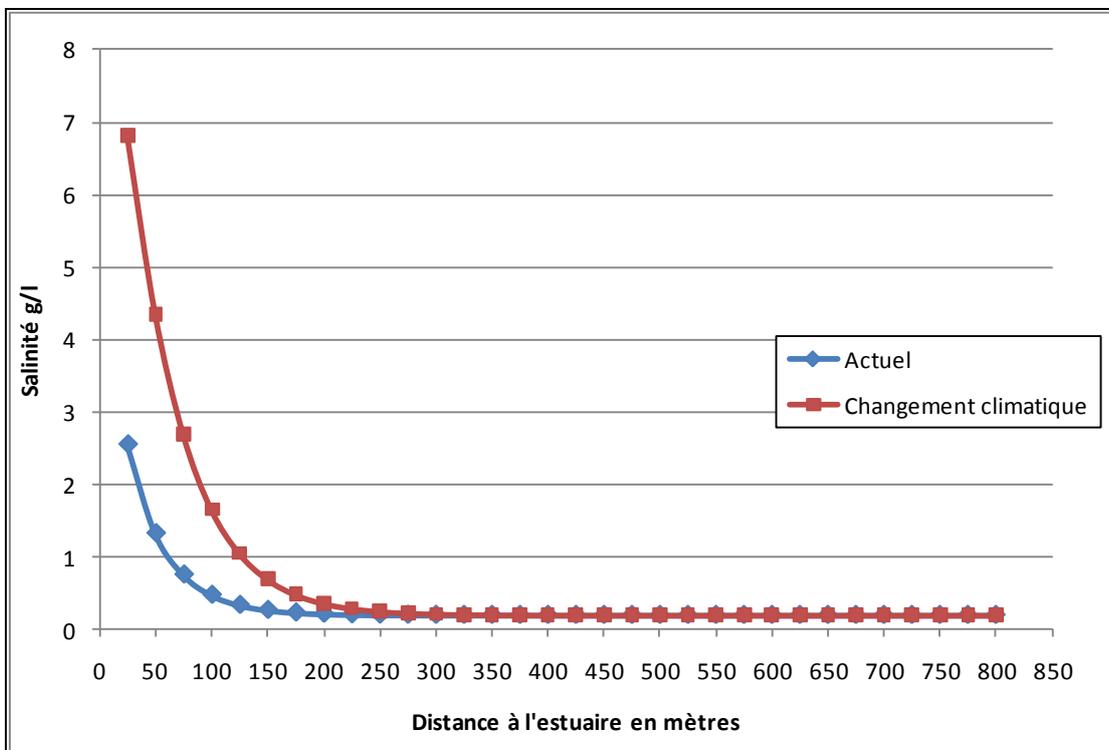


Illustration 71 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.

Les conséquences du changement climatique sur l'intrusion d'eau saumâtre au sein des graves en régime permanent ne sont pas importantes. En effet la progression du front salé est très faible et correspond à une distance inférieure à 100 m soit une extension du front salé à l'intérieur des terres inférieure à 300 m. De plus, plus l'éloignement à l'estuaire est important, plus l'augmentation de salinité est faible. Ainsi au-delà de 200 mètres, c'est-à-dire la zone de progression du front salé, la différence de salinité est inférieure à la centaine, voire la dizaine de mg/l.

Au repos, l'augmentation de la salinité et de la côte moyenne de l'estuaire dû au changement climatique, a un impact très faible sur la salinité des eaux de la nappe.

### Régime transitoire

En période de prélèvements, les conclusions sont semblables puisqu'il n'y a pas de progression visible du front salé entre le début de la période des pompages et la fin de celle-ci. Toutefois la salinité au sein de la zone de mélange des eaux s'accroît proportionnellement à l'augmentation de la salinité dans l'estuaire, comme c'est le cas actuellement (sans augmentation ni de la salinité, ni de la côte moyenne de l'estuaire) en période de prélèvement.

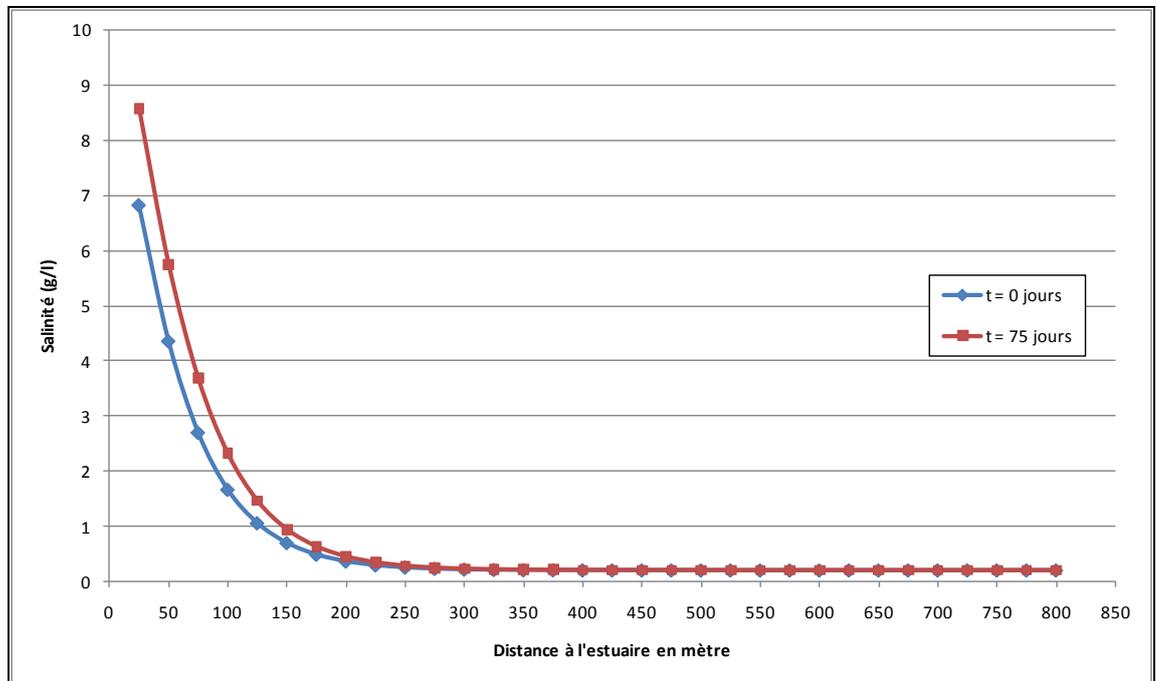


Illustration 72 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire.

Il s'avère donc qu'aussi bien en période sans prélèvement qu'en période de prélèvement, les conséquences du changement climatique sur l'aquifère des graves seraient faibles. Le front salé progresse d'une distance inférieure à 100 mètres environ, ce qui est certes le double de l'extension actuelle, mais l'augmentation de la salinité dans la zone de progression est très faible puisqu'elle est de l'ordre de la centaine de milligrammes par litre tout au plus.

Toutefois le calage approximatif du modèle concernant les flux entrants et sortants peut avoir des conséquences sur les simulations en régime transitoire. S'il le modèle permettait de reproduire tous les rabattements observés, il se peut alors que la

progression du front salé en période de prélèvement serait plus importante. Il est donc possible que le modèle sous-estime légèrement l'extension du front salé.

Au vu de ces résultats, des incertitudes sur la non prise en compte de certains paramètres, il n'est pas envisagé de poursuivre avec de nouvelles simulations de scénarios de prélèvements par ex. sur ce site d'étude.

### 6.3.3. Marais Poitevin

#### Contexte géologique et hydrogéologique

Les formations rencontrées du nord au sud de ce secteur sont les suivantes (Illustration 73).

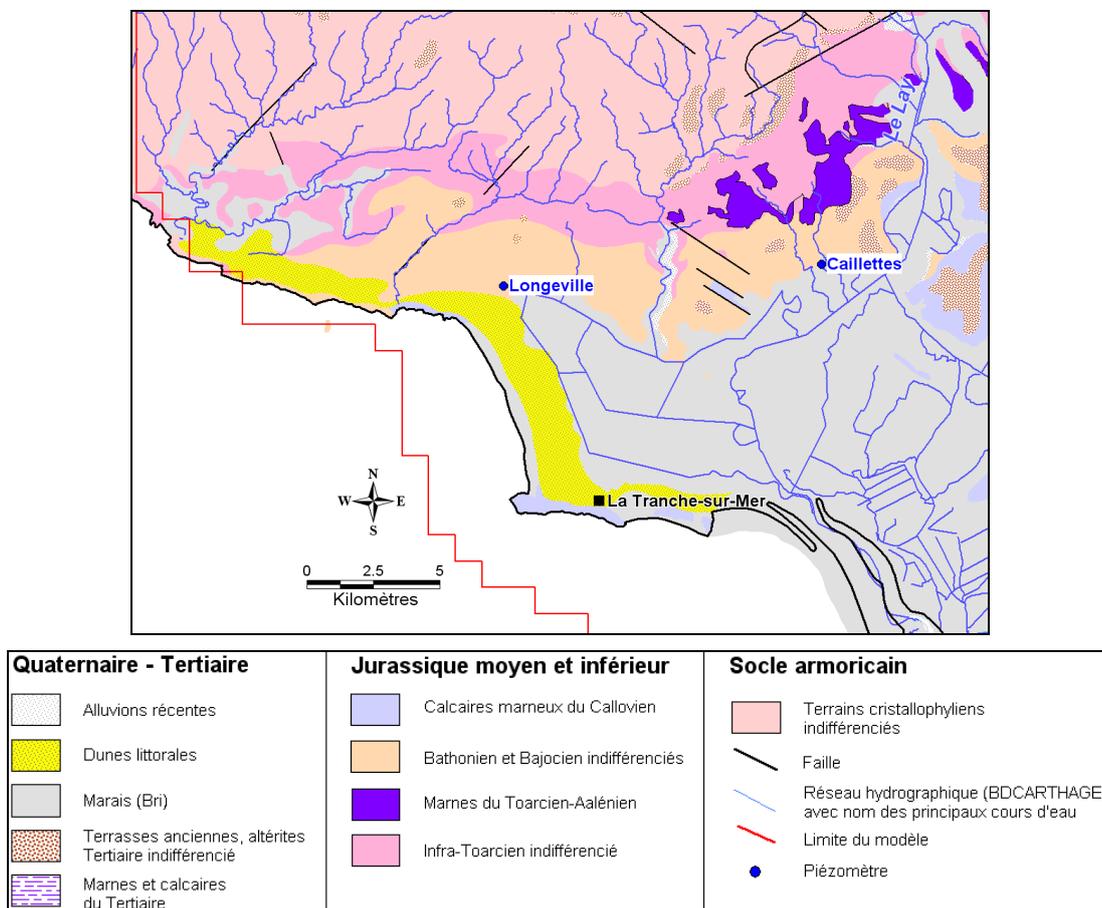


Illustration 73 : Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin.

Les terrains du socle qui présentent une grande variété de roches granitiques et métamorphiques, sont caractérisés par une structuration importante en relation avec de grands accidents de direction armoricaine (NO-SE). La densité du réseau

hydrographique montre que le socle renferme peu de ressources souterraines (nappes localisées au sein des altérites) et que la part des ruissellements superficiels est importante.

Au-dessus du socle, reposent les formations du Jurassique inférieur (Lias) correspondant à l'aquifère de l'Infra-Toarcien. Ce réservoir est composé principalement de faciès calcaires plus ou moins dolomités et gréseux. Il est généralement captif sous les marnes toarciennes. On le trouve à l'affleurement dans certaines vallées à la faveur de l'érosion.

Au-dessus du Toarcien se superposent les calcaires karstifiés du Dogger. Le faciès réservoir est représenté par des calcaires oolithiques et dans une moindre mesure par des calcaires en plaquettes. Cet aquifère devient captif sous les formations du Jurassique supérieur peu épais dans ce secteur, et les argiles fluviomarines (dénommées « Bri ») du Quaternaire formant le Marais-Poitevin.

### ***Description du modèle existant***

Dans le cadre de cette action, un modèle hydrodynamique déjà existant a été utilisé ; il s'agit du modèle de gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin qui est lui-même issu de l'adaptation du modèle des aquifères jurassiques en Poitou-Charentes [Douez O. et al. (2010), Putot E. et Bichot F. (2007), Touchard F. et al. (2002), Touchard F. et al. (2004)].

Ce modèle comporte (au niveau du Marais) sept couches avec de haut en bas : Bri du Marais, Jurassique supérieur altéré (aquifère), Jurassique supérieur non altéré, Dogger (aquifère), Toarcien, Infra-Toarcien (aquifère) et le socle.

Le code de calcul retenu dans le cadre de cette modélisation est MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) [Thiery D. (1990)].

L'extension globale du modèle jurassique couvre une superficie de 19 280 km<sup>2</sup> (Illustration 74). Concernant le maillage, la trame du kilomètre carré a été retenue. Les mailles en périphérie nord du Marais-Poitevin ont été subdivisées en mailles carrées de 333 m de côté (gigogne).

En « sortie » de modèle, des potentiels imposés ont été appliqués :

- sur la limite ouest du modèle, qui correspond au niveau imposé par l'Océan Atlantique. Il est à noter que le modèle utilisé est un modèle monophasique et ne fait donc pas intervenir les paramètres spécifiques des eaux salines (l'existence d'un biseau salé et sa possible évolution ne peuvent donc pas être appréhendées). Pour tenir compte de l'effet densitaire des eaux marines, un potentiel « océan » de + 0,5 m NGF a été introduit dans le modèle initial de manière empirique et sera analysé lors des simulations à venir en 2011 avec prise en compte de la densité, suite à l'acquisition de données sur la salinité dans l'aquifère ;

- sur les bordures nord-est et sud-ouest du modèle régional, qui sont très éloignées de la zone d'intérêt.

Les échanges nappes/rivières jouant un rôle important dans l'hydrodynamique régionale, les principaux cours d'eau ont été intégrés à l'aide du module « échanges nappes/rivières » du logiciel WinMarthe. Sur l'ensemble du bassin du Marais-Poitevin, cela représente environ 1240 kilomètres de linéaires de cours d'eau.

La recharge a été estimée par zones, au pas mensuel, à travers un bilan classique fournissant la pluie efficace, à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration sur 11 stations météorologiques, et des données de réserves utiles des sols. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, développé par le BRGM, a ensuite été utilisé pour évaluer le fractionnement de cette pluie efficace entre ruissellement et infiltration. Au final, 99 zones de recharge/ruissellement ont été intégrées dans le modèle.

Le calage en régime transitoire a été réalisé sur la période 2000-2007 au pas de temps mensuel et hebdomadaire sur les mois de juin à août, et en intégrant les prélèvements pour l'AEP, l'irrigation et dans les cours d'eau.

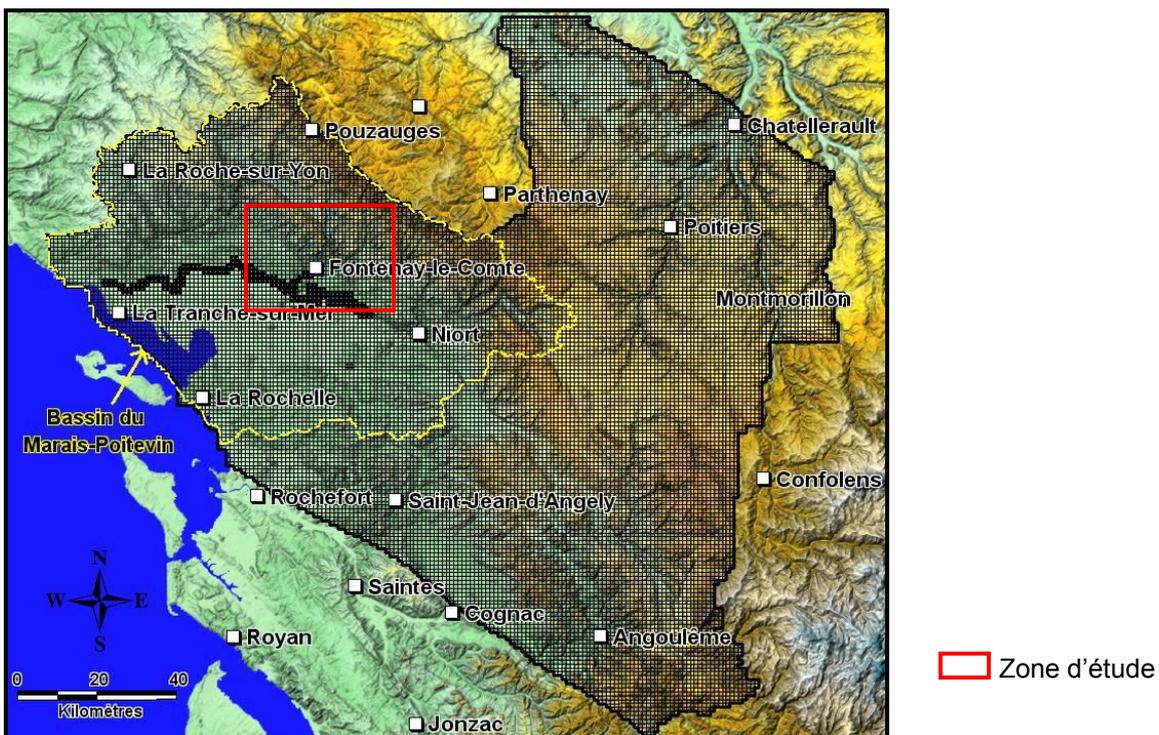


Illustration 74 : Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude.

Les calages pour les 2 piézomètres les plus proches de la bordure océanique sont visibles sur les illustrations (Illustration 75 et Illustration 76). Ces deux piézomètres, qui captent la nappe du Dogger, sont contrôlés en année humide, sur la période de basses

eaux, par les niveaux d'eau dans les canaux à proximité (2000, 2001, 2002 et 2007). En année sèche (2003, 2004, 2005 et 2006), la charge hydraulique décroche du fait de l'absence de soutien des canaux (assèchement ou insuffisance de débits). Les chroniques piézométriques sont correctement restituées que ce soit en basses ou hautes eaux (peu d'écart entre les minimums simulés et observés). Longeville est toutefois légèrement mieux simulé. Le palier constaté en juin est plus ou moins bien restitué sur le piézomètre de Longeville.

À noter que la charge au droit du piézomètre de Longeville, du fait des prélèvements pour l'irrigation, est inférieure au 0 NGF en été, durant les années sèches.

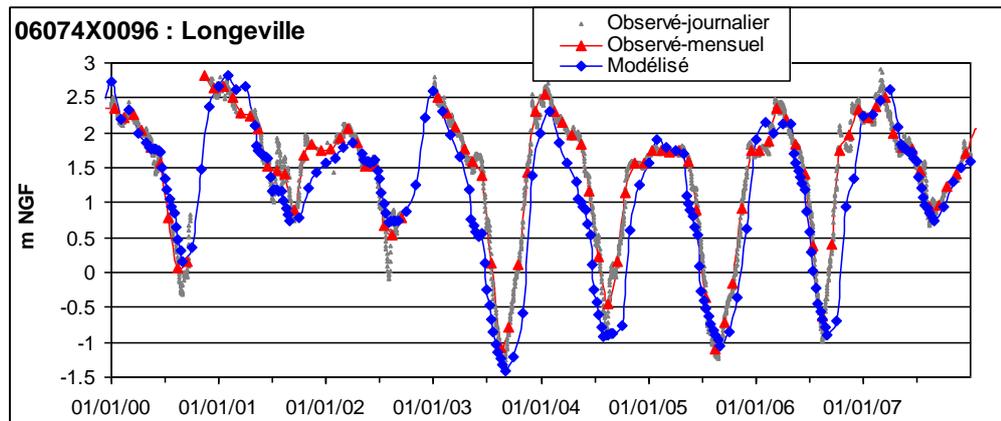


Illustration 75 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger).

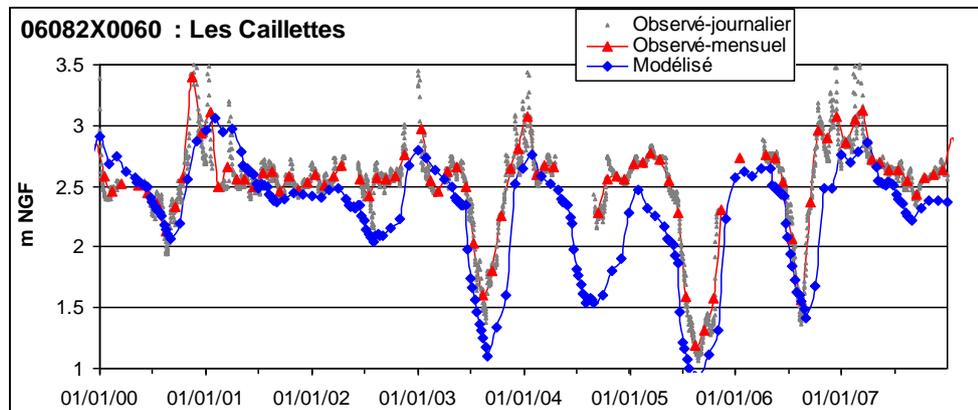


Illustration 76 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger).

### Description des simulations

Deux simulations d'élévation du niveau marin ont été réalisées. Ces simulations sont basées sur les recommandations issues de la note de synthèse émanant du service du Climat et de l'efficacité énergétique [Direction générale de l'énergie et du climat

(2010)]. Ainsi, pour uniformiser les évaluations effectuées dans le cadre des études sur les impacts du changement climatique, il a été choisi d'utiliser les hypothèses suivantes pour l'élévation du niveau des mers à l'horizon 2100 :

- hypothèse optimiste : 0,40 m ;
- hypothèse pessimiste : 0,60 m ;
- hypothèse extrême : 1 m.

Dans le cadre de ce modèle seules les deux dernières hypothèses (2 simulations) ont été simulées.

Les simulations ont été réalisées sur les années 2000 à 2007 (période de calage du modèle), avec les mêmes paramètres que ceux du calage (recharge, prélèvements, hauteur d'eau imposée dans les canaux...) et au pas de temps mensuel. Cette période est intéressante, car elle présente une grande variabilité climatique. L'année 2005 se caractérise par une sécheresse exceptionnelle, contrairement à 2001 qui a été très humide (périodicité de retour au-delà de 10 ans). L'année 2006 apparaît représentative d'une année moyenne. Les années 2002, 2003 peuvent être considérées comme proches de la quinquennale sèche. Il n'apparaît donc pas nécessaire de générer des scénarios de précipitations spécifiques.

La remontée océanique est appliquée en faisant varier les potentiels imposés dans le modèle sur la bordure océanique de 0,6 mètre et d'1 mètre (Illustration 77). Il est à noter que la position de la ligne du rivage reste identique à l'actuel pour les différentes simulations au vu de la précision du MNT.

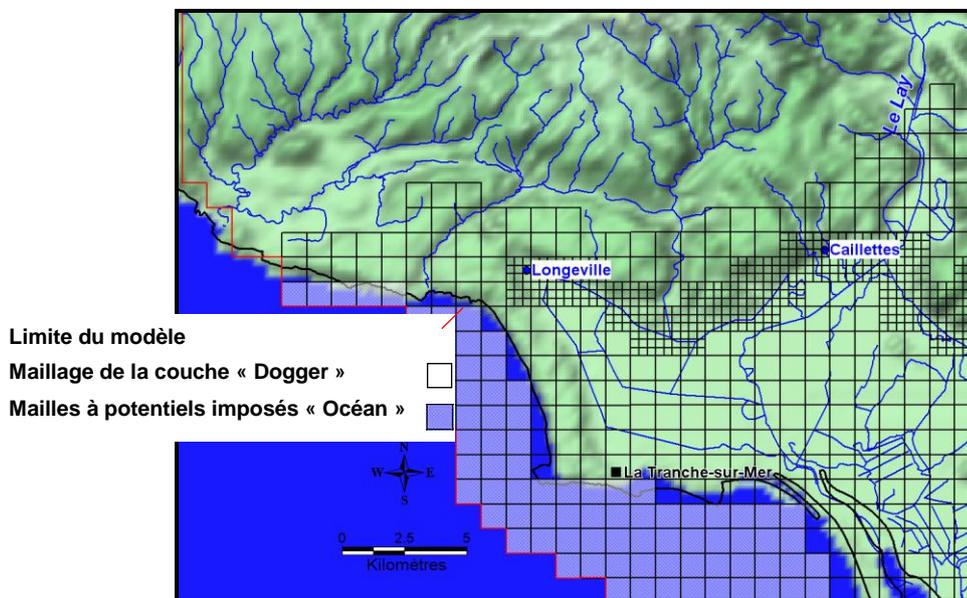


Illustration 77 : Potentiels imposés au niveau de l'Océan.

Dans le secteur étudié, seul l'aquifère du Dogger est analysé dans ces premières modélisations, ce réservoir est en effet en contact plus ou moins direct avec l'Océan qui est naturellement son exutoire.

### Résultats des simulations

Dans le modèle, le niveau océanique actuel étant considéré à la charge de + 0,5 m NGF (compensation de l'effet densitaire), les niveaux océaniques simulés correspondent à des élévations de 0,6 m et 1 m par rapport au + 0,5 m NGF. Les charges imposées, qui permettent de faire les simulations, sont respectivement égales à +1,1 m NGF et +1,5 m NGF.

- **Effets sur les Piézomètres**

Seul le piézomètre de Longeville pourrait être influencé par la remontée océanique, ce « phénomène » étant visible seulement en année sèche et en basses eaux (Illustration 78).

La remontée océanique n'impacte pas le niveau de hautes eaux du fait vraisemblablement des cotes des eaux superficielles à proximité de ce piézomètre qui sont en hiver nettement supérieures au niveau de base simulé. C'est également le cas sur la période d'étiage en année humide ou le maintien en eaux des canaux vient soutenir le niveau du piézomètre.

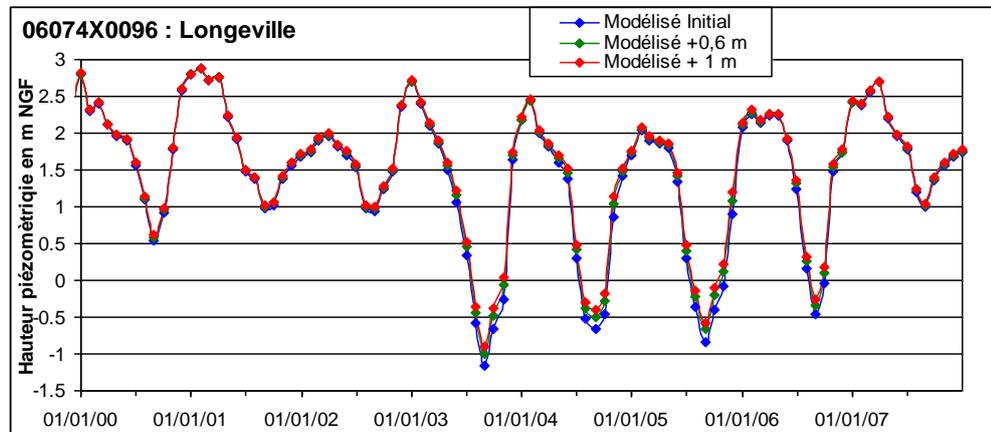


Illustration 78 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville.

Afin de mieux caractériser le transfert de pression au sein de l'aquifère du Dogger, des piézomètres virtuels (P1 et P2) ont été placés le long de la ligne de côte (Illustration 79).

La charge piézométrique dans le secteur du P1 (Illustration 80), localisé à l'embouchure du cours d'eau le Goulet (absence de cordon dunaire), est, à l'état initial (calage) et en période d'étiage, aux alentours du niveau océanique retenu (+0,5 m). Le

niveau semble tout de même être influencé par les pompages situés au nord de ce secteur (Illustration 79).

La remontée océanique induit une augmentation de la charge globale de P1 (remontée du niveau de base).

En période de crues les niveaux restent, pour les deux simulations de remontée de l'Océan, au-dessus du niveau marin. La dépression engendrée par les pompages d'irrigation (avec les volumes prélevés actuels) générerait, selon le modèle, des flux de l'Océan vers l'aquifère (différence de charge de -0,3 m pour une remontée océanique de +0,6 m et de -0,5 m pour une remontée à 1 m).

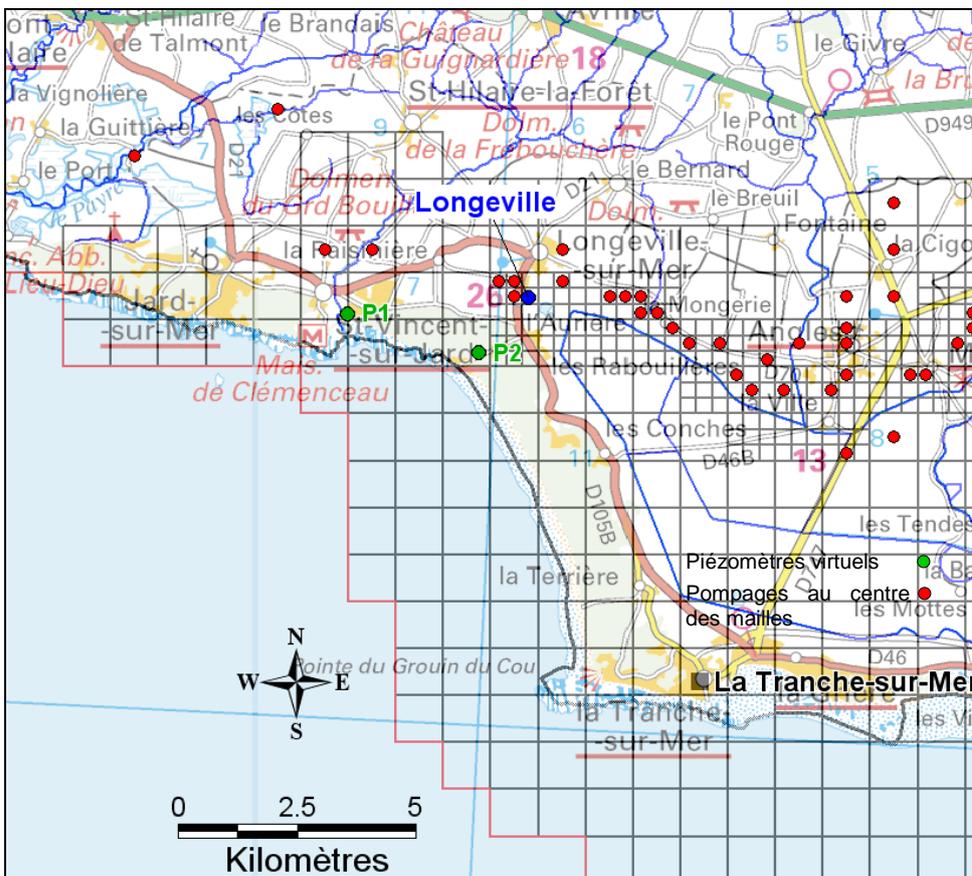


Illustration 79 : Localisation des piézomètres virtuels.

Le constat est légèrement différent pour P2 situé plus au Sud-Ouest. La dépression engendrée par les prélèvements autour du piézomètre de Longeville semble déjà impacter ce secteur puisque les niveaux simulés à l'état initial (calage) sont inférieurs au niveau marin de 0,5 mètres durant les années sèches et en période d'étiage.

Une augmentation du niveau océanique, avec les volumes prélevés actuellement, amplifierait ce phénomène avec des différences de charge entre la nappe et l'Océan

dans ce secteur pouvant atteindre - 1 mètre environ (simulation de remontée du niveau marin de +1 mètre).

En années humides, les niveaux sont soutenus par le maintien des canaux en eaux.

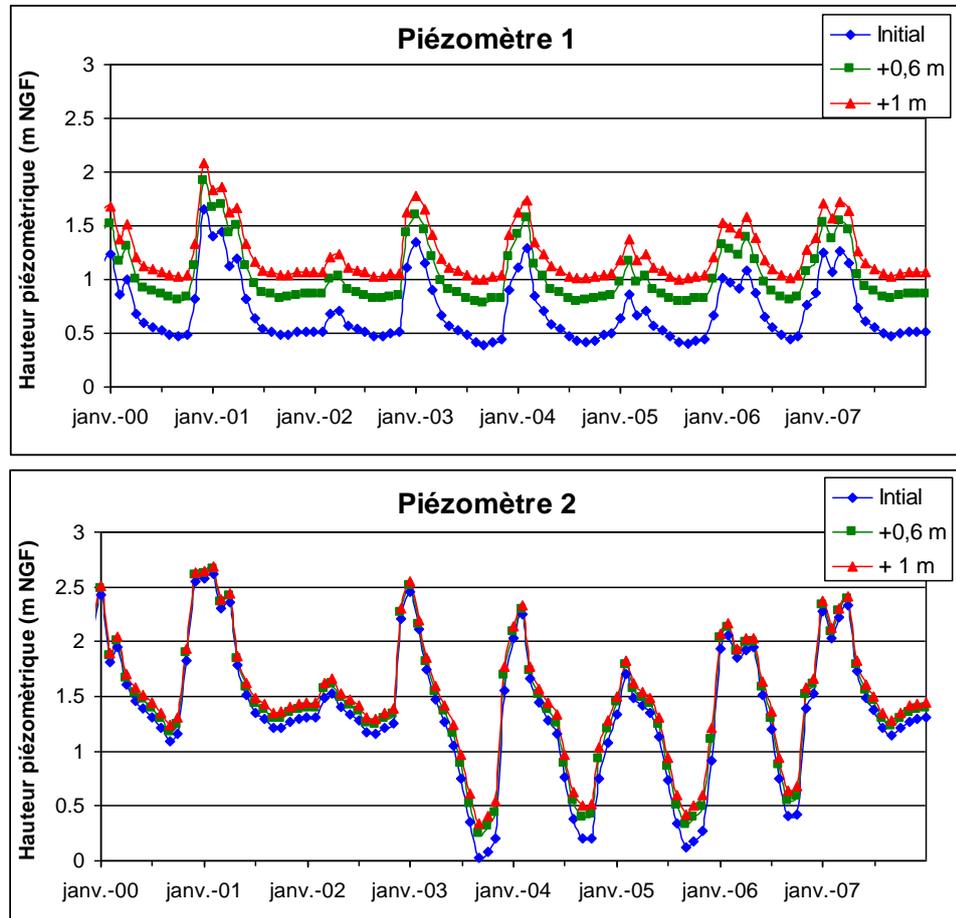


Illustration 80 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels.

### Cartographie des résultats

Les résultats cartographiques sont donnés pour l'année la plus humide (2001) et la plus sèche (2005) observées au cours de la période de simulation et pour les hautes eaux (mars) et basses eaux (octobre) (Illustration 81 et Illustration 82).

Pour plus de lisibilité, sur ces cartographies le niveau inférieur ou égal à celui de l'Océan (niveaux simulés) est représenté par la couleur bleue. Il convient de préciser que cela ne signifie pas qu'il y ait forcément une invasion marine du fait que dans le modèle sont intégrés des potentiels imposés supérieurs au niveau de la mer pour tenir compte de la densité, au niveau des mailles situés sur la côte.

- **Année humide (Illustration 81)**

En périodes de hautes-eaux, la remontée océanique semble impacter légèrement le littoral dans les secteurs où le cordon dunaire est assez restreint et ne joue donc pas ou peu le rôle de barrière hydraulique (à l'ouest du piézomètre de Longeville). Le niveau de la nappe serait égal à celui de l'Océan au maximum de la remontée (+1 mètre) à un peu plus d'un kilomètre au nord de la ligne de rivage actuelle.

En période de basses eaux, ce constat se dégrade largement puisque la charge de la nappe est inférieure ou du moins égale au niveau de l'Océan jusqu'au piézomètre de Longeville sur la simulation + 1 mètre.

- **En année sèche (Illustration 82)**

Au cours des années sèches et en période de hautes eaux, les niveaux de nappe sont à l'équilibre avec celui de l'Océan très à l'intérieur des terres (plus de 3 kilomètres pour la simulation avec hypothèse +1 m).

En période de basses eaux, dans le modèle initial (calage) les niveaux de nappes sont inférieurs, voire en équilibre avec l'Océan, jusqu'à une limite située entre les piézomètres de Longeville et des Caillettes. Ceci est à relier aux dépressions engendrées par les nombreux pompages d'irrigation dans le secteur (charge dans le piézomètre de Longeville atteignant en période sèche des hauteurs situées entre -1,5 et - 1 m NGF – Illustration 75)

Les simulations de l'augmentation du niveau marin, en maintenant les volumes prélevés actuels, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres.

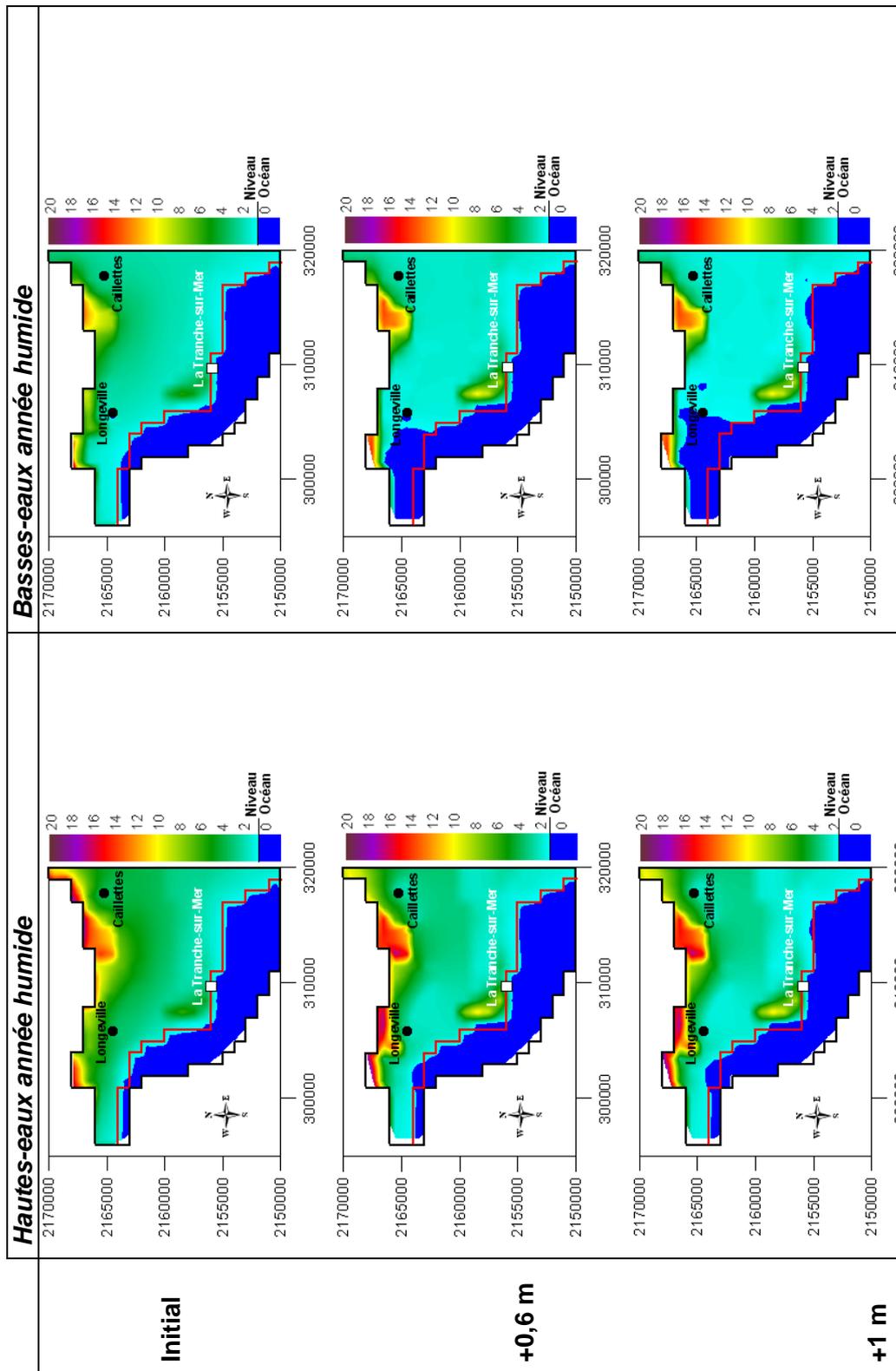


Illustration 81 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide).

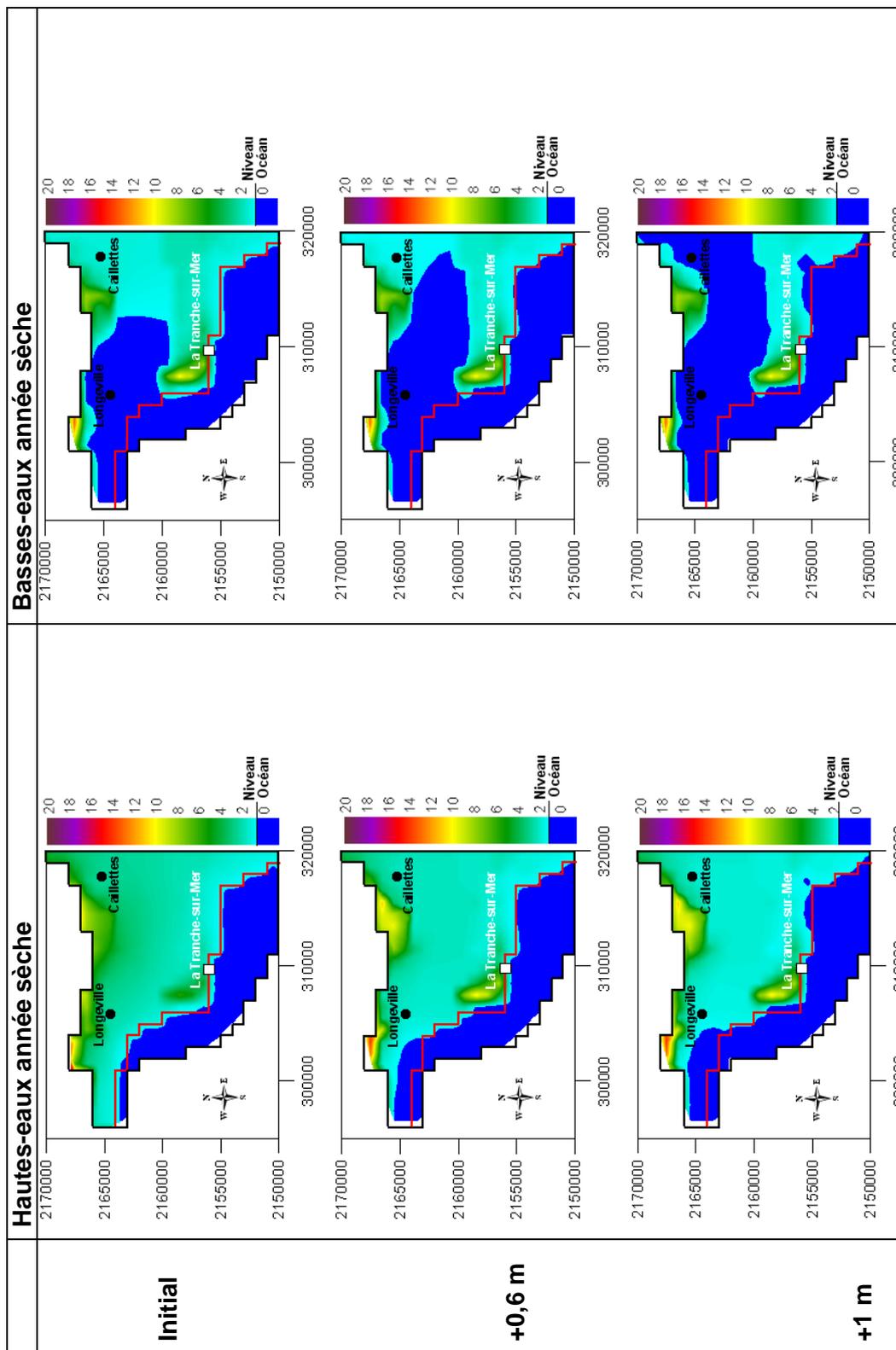


Illustration 82 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2005 (année sèche).

## 7. Conclusion et Perspectives

### 7.1. CONCLUSION

Au cours de cette action menée en 2010, l'état de l'art concernant la cartographie de la vulnérabilité des aquifères a permis d'identifier la méthode spécifique GALDIT dédiée aux aquifères côtiers. Les premiers tests sont encourageants. Des adaptations pour les aquifères karstiques sont à envisager. L'état de l'art concernant la montée de niveau marin sous influence de changement climatique a permis de retenir des scénarios à prendre en considération au niveau de la cartographie de la vulnérabilité et au niveau des simulations (modèles hydrodynamiques). Le développement méthodologique pour cartographier la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'échelle de la Métropole doit encore être finalisé, mais permettra de comparer la situation actuelle avec la situation de changement climatique marquée par une remontée du niveau marin. Si l'application de la méthode de cartographie de la vulnérabilité GALDIT ne peut être appliquée à l'échelle des côtes de la Métropole, celle-ci pourra être appliquée sur les zones identifiées comme les plus vulnérables de manière globale.

Les premiers tests de simulation indiquent que l'effet d'une remontée de niveau marin et de salinité au niveau d'un estuaire n'a pas un impact très important au vu des hypothèses considérées dans les modèles; l'impact associé aux prélèvements peut être tout aussi important. Il est possible que l'incertitude sur les flux entraîne une sous-estimation de l'extension du front salé notamment en période de prélèvement. Actuellement l'extension du front salé à l'intérieur des terres est de 200 mètres aussi bien au repos qu'en période de prélèvement. D'ici 100 ans, l'augmentation de la cote moyenne de l'estuaire de +0,6 m et un doublement de la salinité de l'estuaire entraînerait une progression du front salé d'une distance inférieure à 100 mètres. Enfin, malgré le choix du secteur présentant le plus grand nombre de données, il a été difficile d'étudier précisément les intrusions d'eau en provenance de l'estuaire. Ceci permet, encore une fois, de souligner la nécessité d'acquérir des données en vue de la construction d'un modèle à plus grande échelle visant à étudier l'impact du changement climatique sur les aquifères côtiers.

Par ailleurs, l'influence peut se faire sentir sur plusieurs kilomètres dans le cas du Marais Poitevin, sur la base des premiers résultats d'une modélisation hydrodynamique sans prise en compte de la salinité. Les simulations de l'augmentation du niveau marin, en maintenant les volumes prélevés actuels et en situation de basses eaux en année sèche, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres.

## 7.2. PERSPECTIVES GÉNÉRALES

Les perspectives pour l'année 2011 de cette action sont les suivantes : (i) Finalisation de l'état des connaissances selon la méthodologie appliquée en utilisant le référentiel BDLISA en particulier sur la côte Méditerranéenne, avec une mise à jour des connaissances en particulier pour la région Provence Alpes Côte d'Azur ; (ii) Finalisation du développement méthodologique de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en contexte actuel et en contexte de remontée de niveau marin influencée par le changement climatique, à l'échelle de l'ensemble des côtes de la Métropole ; (iii) Application de la méthode de cartographie GALDIT sur les régions où la vulnérabilité identifiée à l'aide de l'échelle de la Métropole est la plus élevée et où les données nécessaires à l'application sont disponibles ; (iv) Acquisition de données complémentaires en termes de salinité pour la zone d'étude modélisée au niveau du Marais Poitevin et modélisation de scénarios avec prise en compte de l'effet de densité ; (v) Interprétation des résultats de la modélisation, adaptation de la méthode GALDIT et rédaction de recommandations pour les zones les plus vulnérables.

## 7.3. PERSPECTIVES POUR LA MODÉLISATION

Plusieurs pistes complémentaires peuvent être évoquées pour la modélisation du Marais Poitevin :

Dans un premier temps, il serait intéressant de pouvoir collecter des données de terrain à proximité de l'Océan :

- mesure des niveaux d'eau en période de hautes eaux mais également de basses eaux afin de voir un impact potentiel des pompages pour l'irrigation sur les différents ouvrages existant sur le secteur (puits, forages) ;
- échantillonnage des eaux de différents ouvrages (puits ou forages) avec en particulier la mesure de la salinité afin de vérifier ou non la possible intrusion des eaux marines dans les aquifères côtiers.

Dans le cas de nouvelles simulations, il serait tout d'abord nécessaire de raffiner le maillage en bordure de l'Océan (actuellement maille d'1 kilomètre) afin de prendre en compte plus précisément la limite océanique, les côtes topographiques des dunes et la géométrie locale des différentes couches.

Enfin, l'intégration dans le modèle hydrodynamique de la salinité (calage à partir des données récoltées) pourrait permettre d'étudier à l'aide de simulation de remontée du niveau marin l'avancée ou non d'un biseau salé.

## 8. Principales Références

**Astie H. et Bellegarde R.** (1974) - Études des relations nappe-estuaire – compte rendu d'un pompage d'essai de longue durée sur le dispositif expérimental F.1, Rapport BRGM 74 AQI 53.

**Aunay B.** (2007) - Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université Montpellier 2.

**Auriol J. et Bellegarde R.** (1977) - Étude des risques de salure de la nappe des « Graves quaternaires » lors de la pose des conduits de prise et de rejet d'eau en Gironde, Rapport BRGM 77 SGN 134 AQI.

**Bobba A.G.** (1998) - Application of a numerical model to predict freshwater depth in islands due to climate change: Agatti island, India. *Journal of Environmental Hydrology* 6(10) : p. 1-13.

**Bobba A. G.** (2002) - Numerical modelling of saltwater intrusion due to human activities and sea-level change in the Codavari Delta, India. *Hydrological Sciences Journal* 47 : p. 67-80.

**Canadell J.G., Le Quéré C., Raupach M.I.R., Field C.B., Buitehuis E.T., Ciais P., Conway T.J., Houghton R.A., Marland G.** (2007) - Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity carbon intensity and efficiency of natural sinks. Proceedings of the National Academy of Science.

**Cazenave A., Dominh K., Guinehut S., Berthier E., Llovel W., Ramillien G., Ablain M., Larnicol G.** (2009) - Sea level budget over 2003-2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo, Global and Planetary Change, 2 doi:10.106/j/gloplacha.208;10.004, 2009.

**Cazenave A., Nerem R.S.** (2004) - Present-day sea level rise: a synthesis, *Geosciences CR.*, Volume 340, Issue 11, p. 761-770.

**Cazenave A., Nerem R.S.** (2004) - Present-day sea level change: observations and causes. Review of Geophysics 42, RG3001. doi:10.1029/2003RG000139.

**Chachadi A.G & Lobo-Ferreira J.P.** (2005a) - Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicator Descriptions. IAHS and LNEC, Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

**Chachadi A.G. & Lobo-Ferreira J.P.** (2001) - Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modelling in

hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, p. 7-9.

**Comte J-C.** (2008) - Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

**Corbier P., Abou Akar A. et Karnay G.** avec la collaboration de **Léger A.** (2007) - Caractérisation des biseaux d'eau salée exploités sur le pourtour du Bassin d'Arcachon et expérimentation sur 3 sites tests. 119 p., 83 ill., 4 ann. Rapport BRGM n° ?

**Corbier P., Capdeville J.P., Pedron N., Platel J.P, Winckel A.,** avec la collaboration de **Lopez B.** (2005) – SAGE Nappes profondes de Gironde – Atlas des zones à risques, 180 p., 82 ill., 4 ann. Rapport BRGM n° ?

**Custodio E.** (1997) - Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Guidelines for Study, Monitoring and Control, Water report n° 11. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, Italie, 152 p.

**Custodio E.** (2002) - Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures dans Bocanegra, Martines and Massone (Editors), *Groundwater and human development*, p. 1905-1918.

**Daum J.R.,** avec la collaboration de **Bakalowicz M., Chery L., Longin G.** (1996) - Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rap. BRGM R 38847, 77 p., 27 fig., 5 tabl.

**De Montety V.** (2008) - Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque – cas de la camargue (Delta du Rhône, France), Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

**Direction générale de l'énergie et du climat** (2010) - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. Direction générale de l'énergie et du climat / Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, Synthèse n° 2 - février 2010, 6 p.

**Domingues C.M. & al.** (2008) - Improved estimates of upper-ocean warming and multidecadal sea-level rise. *Nature* 453: p. 1090-1096.

**Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L.** (2010) - Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-58297-FR, 239 p, 212 ill., 5 ann., 12 pl.

**Feseker T.** (2007) - Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany. *Hydrogeology Journal* 15 : p. 267-279.

**Frissant N., Bodéré G.** (2009) - Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en Corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-FR, 249 p. 30 ill., 1ann.

**Frissant N., Bodéré G.** (2009) – Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en Corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-FR, 249 p. 30 ill., 1 ann.

**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.

**Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J.** (2007) - Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy) : A numerical model. *Journal of Hydrology* 340 : p. 91-104.

**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.

**Grinsted A., Moore Æ.J.C., Jevrejeva Æ.S.** (2009) - Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*.

**Grinsted A., Moore Æ.J.C., Jevrejeva Æ.S.** (2009) - Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*.

**Hansen J. E.**, Scientific reticence and sea level rise, *Environmental research letter* 2, April June 2007, [http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7\\_2\\_024002.html](http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7_2_024002.html)

**Hansen J.E.** (2007) - Scientific reticence and sea level rise, *Environmental research letter* 2.

**Herzberg A.** (1901) - Die wasserversorgung einiger nordseebäder. *Jour. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 44: p. 815–819, p. 842–844.

**Hubbert M.K.** (1940) - The theory of groundwater motion, *Journal of Geology* 48 : p. 785-944.

**IPCC** (2001) - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group 1 to the Third Assesment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, US, Cambridge University Press.

**IPCC** (2007) - Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M.Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

**Krinner G., Julien J.** (2007) - High resolution simulation of the surface mass balance of Greenland at the end of this century. *The Cryosphere Discuss.*, 1, p. 351-383.

**Lacouture L.** (1996) - Faisabilité d'un modèle hydrogéologique sur la bordure sud du Marais Poitevin (17 – 79) – Bilan des connaissances. 51 p., 16 ill., 10 ann. Rapport BRGM n° ?

**Langevin C.D., Dausman A.M.** (2005) - Numerical Simulation of Saltwater Intrusion in Response to Sea-Level Rise.

**Lobo-Ferreira J.P., Chachadi A.G., Diamantino C. & Henriques M.J.** (2005b) - Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. IAHS and LNEC, Proceedings of the 4<sup>th</sup> The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

**Lombard A., Garric G., Penduff T., Molines J.M.** (2008) - Regional variability of sea level change using a global ocean model at ¼° resolution, *Ocean Dyn.*

**Louche B., Crampon N., Bracq P.** (1998) - Qualité et comportement de l'aquifère crayeux sur le littoral Nord-Pas-de-Calais. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 327 : p. 463-470.

**Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C.** (2007) - Global Climate Projections. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

**Melloul A., Collin M.** (2006) - Hydrogeological in coastal aquifers due to sea level rise. *Ocean & Coastal Management* 49 : p. 281-297.

**Moreau C.F., Sourisseau B.** (1989) - Marais de Saint-Ciers (Gironde) - Etude des potentialités en eau souterraine de la nappe des graves par modélisation mathématique. Rapport BRGM n° ...

**Petit V.** (1996), avec la collaboration pour les synthèses régionales: Caous J.Y. (Nord-Pas-de-Calais), Czernichowski I. (Picardie), de La Quèrière P. (Haute-Normandie), Mäzenc B. (Basse-Normandie), Talbo H. (Bretagne), Ehiermael G. (Poitou-Charentes), Sourisseau B. (Aquitaine), Bérard P. (Languedoc-Roussillon), Bel F. (Provence-Côte-d'Azur). Les aquifères littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM R 39298. 120 p., 36 fig., 1 ann.

**Pfeffer W.T., Harper J.T., O'Neel S.** (2008) - Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. *Science* 321: p. 1340–1343.

**Putot E., Bichot F.** (2007) - CPER 2000-2006 Phase 4 - Modèle Infra-Toarcien Dogger : calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-55742-FR, 94 p., 86 ill., 7 tab., 8 ann.

**Rahmstorf S.A.** (2007) - Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise ; *Science*, Vol. 215, p. 368-369.

**Rahmstorf S.A.** (2007) - Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise; *Science*, Vol. 215, p. 368-369.

**Ranjan S.P., Kazama So., Sawamoto M.** (2006) - Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management* 80 : p. 25-35.

**Ranjan S.P., Kazama So., Sawamoto M.** (2006) - Effects of climate changes on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change* 16 : p. 388-399.

**Ranjan S.P., Kazama So., Sawamoto M., Sana A.** (2009) - Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources. *Ocean & Coastal Management* 52 : p. 197-206.

**Rignot E. et al.** (2008) - Recent Antarctica ice mass loss from radar interferometry and regional climate modeling. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/neo102.

**Sourisseau B.** (1987) - Études hydrogéologiques et hydrogéotechniques sur le site de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde) – Synthèse des travaux et de la surveillance des nappes de 1972 à 1984, Rapport BRGM 85 SGN 374 AQL.

**Thiéry D.** (1990) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

**Thiéry D.** (2007) - Modélisation 3D des écoulements à densité variable avec le logiciel MARTHE version 6.9. Rap. BRGM/RP-55871-FR, 88 p., 23 fig.

**Touchard F., Bichot F., Karnay G.** (2002) - CPER 2000-2006 - Phase 1 - Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien – Synthèse hydrogéologique de l'aquifère Infra-Toarcien en Poitou-Charentes. Rapport BRGM/RP-51881-FR.

**Touchard F., Karnay G., Bichot F. et al.** (2004) - CPER 2000-2006 - Phase 2 - Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien - Réalisation de deux forages et modélisation géologique de l'aquifère. Rapport BRGM n° ?

**Tsimplis M., Marcos M., Somot S.** (2008) - 21<sup>st</sup> century Mediterranean sea level rise : Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model, *Global and Planetary Change* Volume : 63 Issue 2-3, p. 105-111.

**Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J., Dörfliger N., Martin A.** (2007) - Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, BRGM/RP-55332-FR.

**Vermeer M., Rahmstorf S.** (2009) - Global sea level linked to global temperature; PNAS, December 22, 2009, vol. 106, no. 51, p. 21527–21532.

**Vuillaume Y.** (1970) - Caractérisation géochimique de l'intrusion marine dans la nappe de la Crau, 46 p., 19 fig., 5 ann.

**Wada Y., van Beek L.P.H., van Kempen C.M., Reckman J.W.T.M., Vasak S. and Bierkens M.F.P.** (2010) - Global depletion of groundwater resources, *Geophysical Research Letters* doi:10.1029/2010GL044571, in press.

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

## **Annexe 1**

### **Références de la BD Bibliographique**



## **Aquitaine**

Negrel, Ph., Colin, A., Petelet-Giraud, E., Brenot, A., Millot, R. et Roy, S., (2006) - CARISMEAU : Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour Garonne : interconnexions et hétérogénéités. Rapport de phase 1. Rapport BRGM ?.

Platel, J.P. et al. : Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine Caractérisation de la crête piézométrique de l'Eocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Rapport BRGM/RP57808

Agence de l'eau Adour-Garonne Département Géologie d'océanographie, Ifremer, labo océanographie biologique B&I, Cemagref - BRGM-SGR/AQI – DIREN AQI - Port autonome de Bordeaux. (1994) - Etat des connaissances sur l'Estuaire de la Gironde.

Corbier P., Capdeville J.P., Pedron N., Platel J.P, Winckel A., avec la collaboration de Lopez B. (2005) – SAGE Nappes profondes de Gironde – Atlas des zones à risques, 180 pages, 82 illustrations, 4 annexes.

Ozog Roamin (2010) - Impact de la remontée du niveau marin sur les aquifères côtiers - Modélisation de l'aquifère des graves au niveau du marais de St Ciers sur Gironde. Mémoire de Master STEE 2ème année - Institut EGID - Bordeaux 3

Bellegarde R., Chamayou J., Heng B., Marionnaud J.M. (1973) - Possibilité de recharge artificielle de la nappe des "sables éocènes" en Gironde. Rapport BRGM 73SGN058AQI.

Allen P., Castaing P., Ferai A., Klingebiel A., Vigneaux M. (1970) - Contribution à l'étude des faciès de comblement et interprétation paléogéographique de l'évolution des milieux sédimentaires récents et actuels de l'Estuaire de la Gironde. Bulletin.

Corbier P., Abou Akar A. et Karnay G. avec la collaboration de Léger A. (2007) Caractérisation des biseaux d'eau salée exploités sur le pourtour du Bassin d'Arcachon et expérimentation sur 3 sites tests. 119 pages, 83 illustrations, 4 annexes.

IGBA (1977) - Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la Garonne entre Virelade et Villenave d'Omon. Micro-résumé : évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau de la nappe des graviers sous-flandriens.

Sourisseau B., (1993) - Etude de l'estuaire de la Gironde, Réalisation d'un livre blanc Géologie de l'Estuaire, aquifères associés.

## **Bretagne**

Ayraud Virginie (2005) - Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes, Thèse d'Etat, Université de Rennes 1.

Carn-Dheilly Anne, (2005), Enquête sur les forages d'eau saumâtre en Ille et Vilaine (35), NOTE 05.149.

BRGM (2006) Analyse de la conductivité de l'eau de forages des régions littorales de Quiberon (56) et Paimpol (22). Influence du biseau salé. Note BRGM BRE n° 07.03 - 20 p.

Le Jeune F., Mathieu F, et Miehé J.M., (1997) - Imagerie de la dynamique sédimentaire et du biseau salé en zone littorale. Etude géophysique sur le secteur de Sables d'Or les Pins. Rapport R39362.

Collet C., Moreau C. (1993), Caractéristiques et gestion des eaux souterraines salées de la baie de Bourgneuf, synthèse des connaissances et standardisation de protocoles communs d'analyse des paramètres de qualité BRGM/RR-35615-FR.

## **Corse**

Van Hoorne A. (2002) - Invasion saline des aquifères alluviaux côtiers en Corse. Rapport de stage à la DIREN Corse (2002). 26 p., 5 ann.

Frissant N., Bodéré G. (2009) – Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en Corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-FR, 249 p. 30 ill., 1 ann.

BRGM (1997) – Salinisation des nappes alluviales côtières. Analyse du phénomène dans l'estuaire de la Solenzara (Corse). Rapport BRGM/R-39792, 71 p., 6 ann.

Farand R., Garnier J.L, coll. Dominici R. et Juncy G. (1991) – Alimentation en eau potable de Calvi (Haute-Corse). Champ de captage de la Figarella. Réalimentation artificielle de la nappe en période d'étiage. Simulation sur modèle mathématique. Rapport B

Dominici R. et Juncy G. (1988) – Reconnaissance géophysique de la basse vallée du Prunelli (Corse du sud) – Recherche du biseau salé. Rapport BRGM 1988, 02, CSC 6 p. + ann.

Barbut J., Garnier JL, coll. Dominici R., Farand R., Juncy G. (1993) – Etude sur les possibilités aquifères de la nappe alluviale du Bevinco. Simulation sur modèle mathématique. 18 p. + ann.

Géo-Corse (1978) – Position du biseau salé dans la basse vallée du Golo. 4 p., 2 ann.

## **Languedoc-Roussillon**

Aunay B., Dörfliker N., Duvail C., Grelot F., Le Strat P., Montginoul M. & Rinaudo J.-D. (2006) A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers: the case of the Roussillon Basin (France). International symposium - Aquifers Systems Management - 30 may-1th june 2006, Dijon, France.

Aunay, B., (2007) - Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers. Thèse de Doctorat en Hydrogéologie, Université Montpellier 2.

Caballero, Y. ; Marchal, JP. (2008) - Bassin d'alimentation et contexte hydrogéologique du captage du Val Auger, Banyuls-sur-Mer (66). BRGM/RP-56516-FR, 62 pages, 22 illustrations. 3 annexes.

Perrine Fleury, Michel Bakalowicz, Ghislain de Marsily, Submarine springs and coastal karst aquifers: A review, *Journal of Hydrology*, Volume 339, Issues 1-2, 10 June 2007, Pages 79-92, ISSN 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.03.009.

Astier A, Delmas J.P., (199\_) Nappes aquifères du littoral méditerranéen dans la région Languedoc-Roussillon. Etude préliminaire. Estimation provisoire de leur extension et de leur possibilité d'utilisation. Rapport DATAR/CTE Languedoc.

Auroux F. (1992) - Modèle mathématique de gestion de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon. Modélisation mathématique des risques d'intrusion marine dans l'aquifère plio-quaternaire. Rapport BRGM R 34981 LRO 45 92.

Auroux F. (1995) - Modélisation du système aquifère multicouche du Roussillon. Vadémécum pour la mise en œuvre de nouvelles simulations. Rapport ANTEA A 02708.

Auroux F. (1995)- Simulations d'exploitation complémentaire de l'aquifère multicouche du Roussillon pour assurer les besoins en eau à l'horizon 2010. Rapport BRGM N 1878.

Debuissou J., Lemaire B., Paloc H. (1966) - Les sources littorales et sous-marines du Languedoc-Roussillon. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM DS.66.A63 de juin 1966. (RT8).

Marchai J.P., Camus A, Viala J.P. (1987) - Surveillance de la qualité chimique des eaux souterraines dans la zone littorale du Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM 87 LRO 688 PR du 19 mars 1987.

Marchai J.P., Chery L. (1995) - Contamination marine de l'aquifères plio-quaternaire du Roussillon (Pyrénées-Orientales) Rapport BRGM : R38604.

Marchal J.P., Camus A. (1984) - Surveillance de la qualité chimique des eaux souterraines dans la zone littorale du Languedoc-Roussillon. Secteur compris entre l'embouchure de l'Aude et le Grau-du-Roi. Observations effectuées en 1983. Rapport BRGM 77 84 A.

Marchal J.P., Camus A., Renault P., Paloc H. (1977) - Examen de l'état actuel de la contamination par le sel marin des réservoirs aquifères littoraux à nappe libre de la région Languedoc-Roussillon. Synthèse des résultats d'une enquête documentaire.

Santamaría L. (1995) - Etude des caractéristiques des eaux souterraines et de ses relations avec l'étang de l'OR. DEA. Univ. de Montpellier U, encadrement BRGM/Conservatoire du Littoral/DIREN.

SOGREAH (1962) - Basses plaines Orb-Hérault. Etude hydrogéologique.

### **Nord-Pas de Calais**

CHAaban F., Masson E., Darwishe H., Louche L., EL Khattabi J., Battiau-Queney Y., Carlier E. (2010) - SIG et modélisation hydrogéologique littorale : application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France). Séminaire SIG 2010, 29-30 septembre 2010.

Gourry J.C. (1997) - Méthodologie géophysique (radar, conductivimètre, sondage électrique) pour l'étude géologique et hydrogéologique du littoral de Merlimont (Pas de Calais). Rapport BRGM R39851. 95 pp, 18 fig., 12 tab, 10 planches, 4 ann.

Louche B. (1996) - Limites littorales de la nappe de la craie dans la région Nord Pas-de-Calais, relations eaux souterraines - eaux superficielles - mer. Thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille. 276 p.

Louche B. et V. Hallet (2001) - Détermination de la structure tectonique de l'aquifère crayeux du littoral Nord Pas-de-Calais par prospection géophysique couplée à des observations par forage. Conséquence sur la répartition d'eau salée. Revue des sciences.

Louche B. (1994/1995) - Limites littorales de la nappe de la craie - Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer. Travaux de thèse de 3eme Cycle, USTL-UFR des Sciences de la Terre.

Mania J., (1971) - Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens des Flandres franco-belges et dans le Bassin d'Orchies - Thèse de 3eme Cycle - USTL.

Rousset J. (1971) - Etude générale des "Wateringues" - Rapport de présentation (Service Hydrologique Centralisateur).

Pickaert L. et al. (2010) - Grand Port Maritime de Dunkerque : Inventaire et diagnostique du réseau - Prélèvement et piezométrie. Mai 2010. BRGM/RP-59226-FR.

## **Normandie**

Equilbey (2001) - Analyse succincte de dossiers E.S.R. zone industrielle de Caen Mondeville (Calvados) Contacte et vulnérabilité hydrogéologique BRGM/RP-51432-Fr.

Dassibat C. (1978) - Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage en 1977. Etude BRGM 78 SGN 320 PNO.

Barbecot F., Ch. Marlin, E. Gibert, L. Dever (2000) - Hydrochemical and isotopic characterisation of the Bathonian and Bajocian coastal aquifer of the Caen area (northern France). Applied Geochemistry 15 (2000) 791-805.

Barbecot F., Ch. Marlin, E. Gibert, L. Dever (1998) - Identification et caractérisation d'un biseau salin dans l'aquifère côtier du Bajocien-Bathonien de la région de Caen (France). C.R. Académie des Sc. Paris . Science de la terre et des planètes. 1998. 32p.

Dassibat C., Pascaud P., Roux J.C. (1980) - Hydrogéologie des calcaires jurassiques de Basse-Normandie. Bulletin BRGM. SGR-HNO-P-MNO-004.

## **PACA**

Guglielmi Y., et L. Prieur, (1997) - Essai de localisation et de quantification des résurgences sous-marines d'un aquifère captif à porosité d'interstices : exemple de la nappe alluviale de la basse vallée du Var (Méditerranée, France). Journal of Hydrology 190 (1997) 111-122.

Arfib B., Th. Cavalera, E. Gilli (2006) - Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. C. R. Geoscience 338 (2006) 757–767.

Bernard P., Daum J.R., Martin J.C. (1995) - " MARTCRAU " : Actualisation du modèle de la nappe de la Crau. Rapport BRGM R-38199, 18 p, 51 fig., 7 tab!., 3 ann.

De Montety V., (2008) - Salinisation d'un Aquifère Captif Côtier en Contexte Deltaïque - Cas de La Camargue (Delta du Rhône, France), 2008, Thèse, Université d'Avignon.

Mary JP., Riou V., Lefevre A., Rovira E. (199\_) - Protection de la nappe alluviale du Bas Gapeau vis-à-vis d'intrusions salines. Mise au point d'un instrument de gestion. Document BRGM 256.

Ollivier P., (2006) - Interface continent-océan : géochimie du Rhône (flux et bilans d'érosion) et transferts d'eaux souterraines en Camargue (apports des isotopes du strontium). Thèse Univ. Paul Cézanne Aix-Marseille III, 246 pp.

Stanudin.B., (1967) - Prospection électrique de la Basse Vallée du Gapeau et de la plaine d'Hyères (Var). Rapport BRGM/67-DS-A083.

Vallet-Coulomb C., Radakovitch O., Montety V. D., Hermitte D., Sonzogni C., Ollivier P., and Paul M. (2009) - L'eau souterraine en Camargue. In: Le golfe du Lion, un observatoire de l'environnement. Eds Monaco, A., Ludwig, W., Provansal, M., et Picon, B.

Vuillaume Y., (1970) - Caractérisation géochimique de l'intrusion marine dans la nappe de la Crau, 46p., 19 fig., 5 annexes.

Blavoux B., Gilli E., C. Rousset (2004) - Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille–Cassis). Principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien. C. R. Geoscience 336 (2004) 523–533.

ORE. RESYST (2008) Réponses d'un système deltaïque aux forçages externes - Rapport finale de l'O.R.E. RESYST/

Veronique de Montety et al. (2008). Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta (Southern France). Applied Geochemistry 23 (2008) 2337–2349.

## **Pays de Loire**

Direction de l'Environnement et de l'Aménagement (Conseil Général de Vendée) (1994) - Les eaux souterraines de Tile de Noirmoutier, caractéristiques, utilisation et gestion. Brochure du Service d'hydrogéologie.

Mondain P.H. (1995) - Plaine et marais de Sud Vendée et de l'Ouest des Deux-Sèvres. Etude globale pour la gestion de la ressource en eau souterraine. Synthèse Générale - Rapport CALLIGEE.

## **Picardie**

Czernichowski-Lauriol I., (1996) - Les Aquifères Littoraux de la Région Picardie. Rapport BRGM R 38981, 15 p., 2 fig.

Czernichowski-Lauriol I., (1996) - Les Aquifères Littoraux de la Région Picardie. Rapport BRGM R 38981, 15 p., 2 fig.

Bault V., (2010) - Note concernant la création d'un forage pour alimenter une mare à hutte à Quend (80). BRGM, note d'expertise, GGRNE/SGRPIC/VB/VP/2010-0346.

Allard J.F. (1992) - Le Galet de Mer Français - Exploitation de la Pointe du Hourdel (Somme) - Suivi de l'évolution du niveau de la nappe. Note BRGM PIC 92/72, 8 p., 1 ann.

Comon D. (1991) - Complexe Conchylicole - Recherche d'eau par forage à la craie au Crotoy (Somme) - Compte-rendu des travaux et résultats. Note BRGM PIC 91/17, 11 p., 3 ann.

Louche B. (1994) - Reconnaissance des hydro-systèmes souterrains côtiers picards et approche de leur fonctionnement - Région du Marquenterre - Secteur de Fort-Mahon et Quend. Rapport préliminaire de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 54 p.

SRAE (1982) - Les Bas Champs de Cayeux et le Marquenterre - Propositions pour la reconquête de la qualité des eaux. Rapport du Service Régional de l'Aménagement des Eaux (Ministère de l'Agriculture, Région Picardie), 48 p., + Annexes.

## **Poitou-Charentes**

Lacouture L. (1996) Faisabilité d'un modèle hydrogéologique sur la bordure sud du Marais Poitevin (17 – 79) – Bilan des connaissances. 51 pages, 16 illustrations, 10 annexes. Rapport Brgm, laine R39301.

Lemordant Y., (2000) - Gestion des eaux souterraines en Poitou-Charentes - Année 3. Réseau qualité- Etude de faisabilité- Synthèse et validation des points de surveillance. Rapport BRGM/RP-50334-FR.

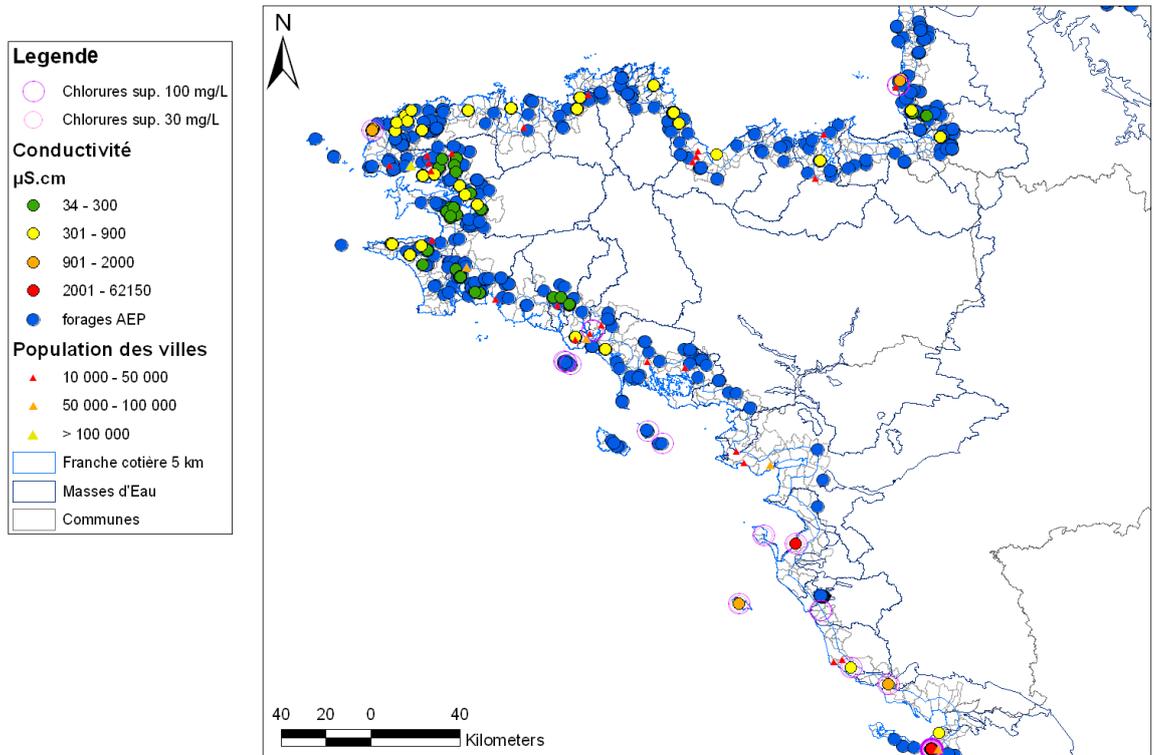
Lavie. J., Bichot. F., Guilbert M., Barrault M., (2006) - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2005. Volume 1 : Gestion du réseau et exploitation des résultats. Volume 2 : Résultats des analyses 2001-2005. Volume 3 : Synthèse et fiches des points.

Giraud, F., P. Lachassagne, B. Ladouche, Ph. Weng, J.L. Pinault, C. Chevallier (2000) - Etude hydrologique et hydrogéologique du marais de Rochefort (Charente-Maritime). Rapport BRGM/RP-50247-FR, 121 pages + annexes.

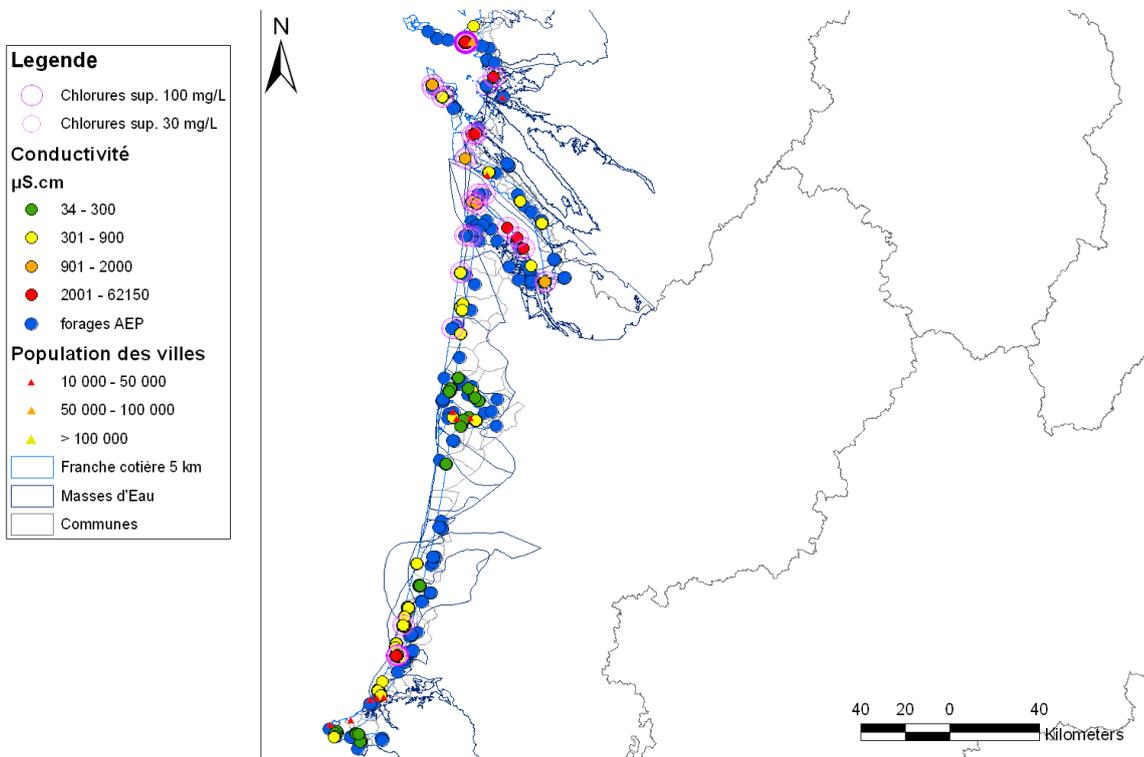
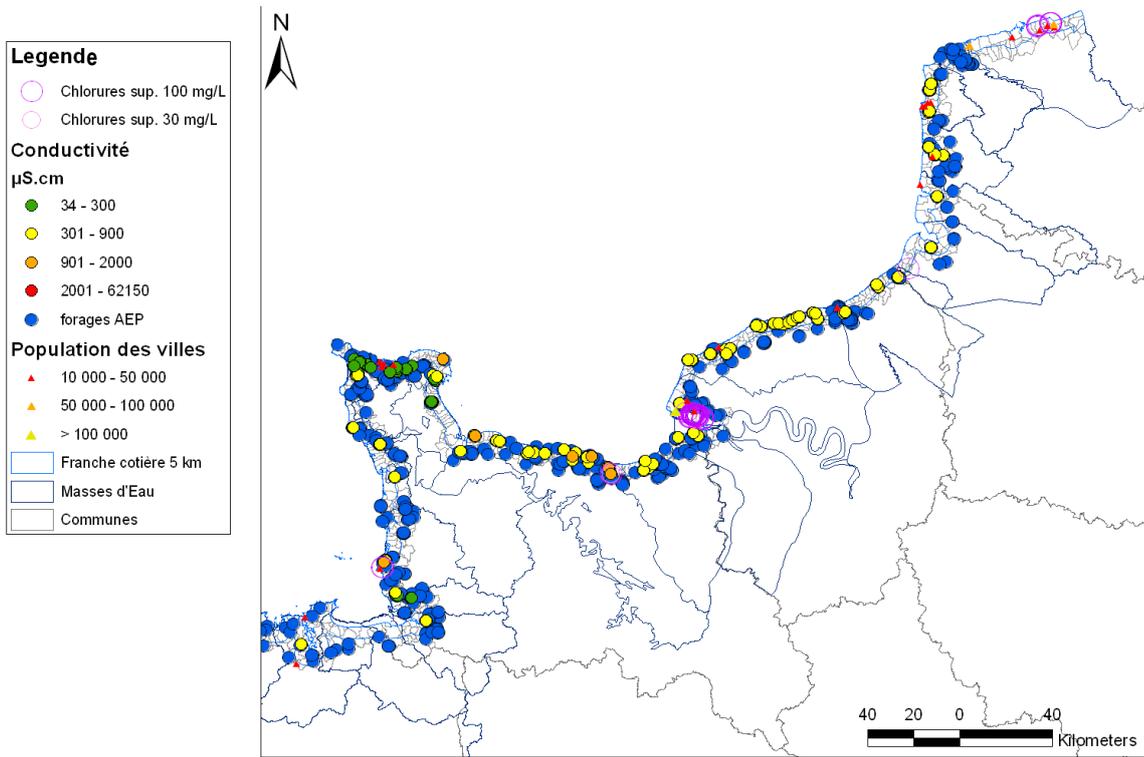
## **Annexe 2**

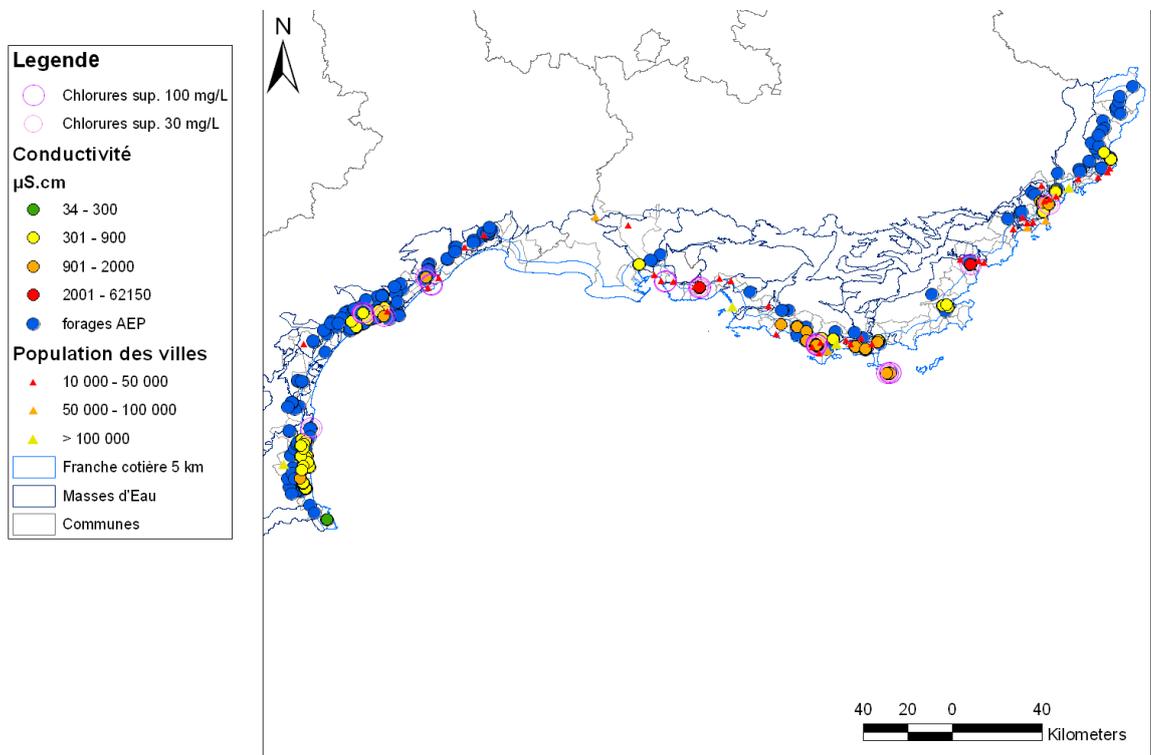
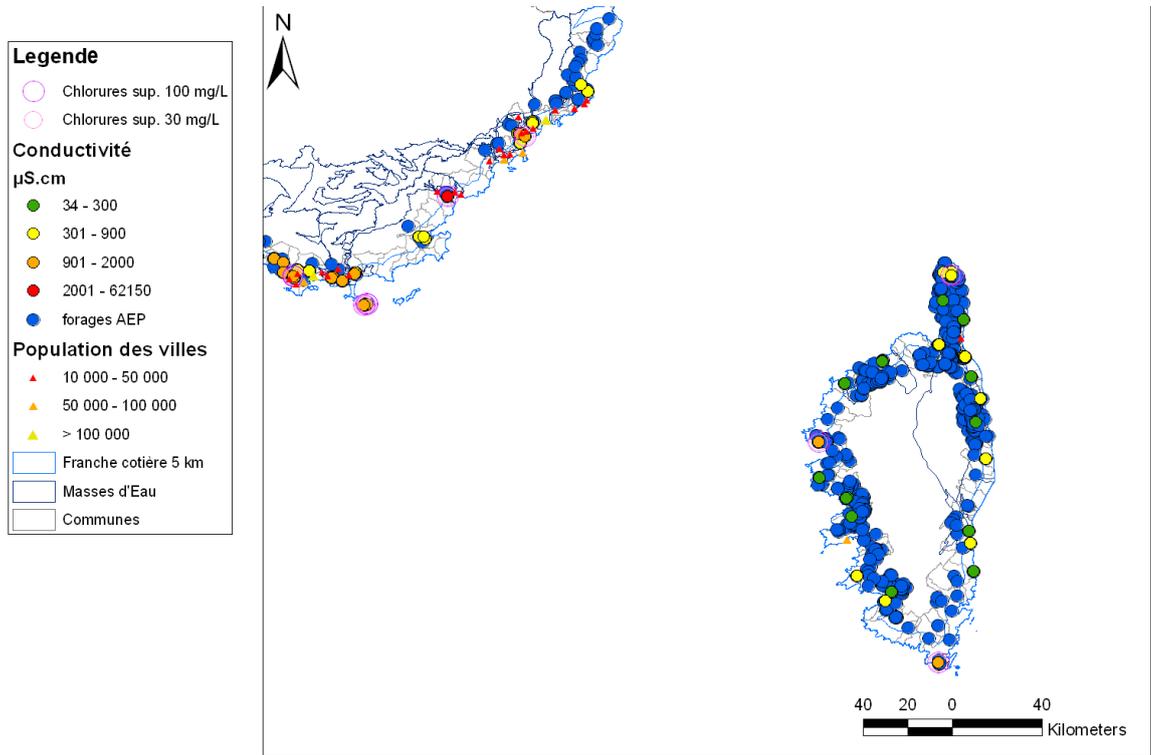
# **Cartographie des forages pour l'AEP et des conductivités électriques**





Montée du niveau marin – conséquences sur les aquifères côtiers de la France métropole









**Service EAU**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 Orléans Cedex 2 – France  
Tel.: +33 (0)2 38 64 34 34