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

Statut du document [Rapport final]

Dörfliger N., Schomburgk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Chatelier M., Croiset N., Surdyk N. (BRGM)

Décembre 2011



#### Partenariat 2011 EAU Action N°6



## Contexte de programmation et de réalisation

Dans le cadre des actions N°4 et N° 6 « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole » des conventions ONEMA-BRGM 2010 et 2011, la finalisation des actions menées au cours de ces deux années a été réalisée et fait ainsi l'objet de ce rapport final.

#### Les auteurs

Nathalie Dörfliger

Hydrogéolgue

n.dorfliger@brgm.fr

Service EAU, EAU/DIR, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

Susanne Schombrugk

Hydrogéologue

n.dorfliger@brgm.fr

Service EAU, EAU/AVD, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

Madjid Bouzit

Socio-économiste

m.bouzit@brgm.fr

Service EAU, EAU/NRE, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

Vincent Petit Hydrogéologue

v.petit@brgm.fr

brgm Réunion - 5 rue Sainte-Anne, B.P. 906 - 97478 St Denis cédex

Yvan Caballero

Hydrogéologue

y.caballero@brgm.fr

Service EAU, EAU/NRE, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier- France

Pierre Durst

Hydrogéologue

p.durst@brgm.fr

Département GTH, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

Olivier Douez & Marion Chatelier,

Hydrogéologues

o.douez@brgm.fr; m.chatelier@brgm.fr

Service Régional Poitou Charentes, Poitiers-France

Nolwen Croiset & Nicolas Szurdyk

Hydrogéologues

n.croiset@brgm.fr; n.szurdyk@brgm.fr

Service EAU, EAU/QAL, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

Les correspondants

Onema: Pascal Maugis, Direction de l'Action Scientifique et Technique

Chargé de mission en Hydrologie, pascal.maugis@onema.fr Référence du document : Fiche Action BRGM ONEMA N°6 2011

Droits d'usage : accès libre

Couverture géographique : Antilles et Océan Indien – Ile de la Réunion

Niveau géographique [un seul

choix]:

Niveau de lecture [plusieurs

choix possibles] :

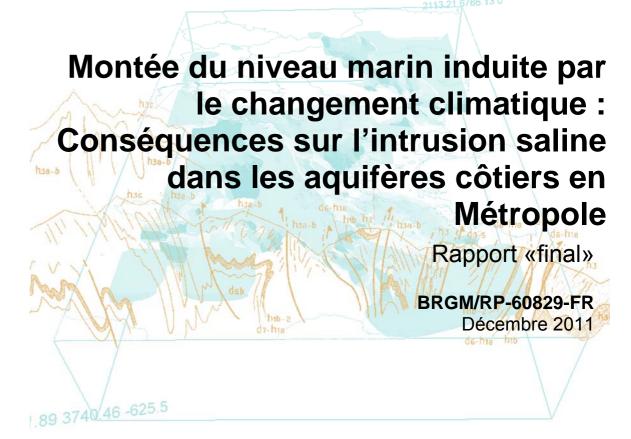
Professionnels, experts

Nature de la ressource Rapport, tableau de données, couche information

[plusieurs choix possibles]: géographique,



Document public









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

Rapport «final»

BRGM/RP-60829-FR

Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM 2010 et 2011

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

#### Vérificateur :

Nom : Delphine Allier
Date : 24 avril 2012

Signature:

### Approbateur:

Nom : Serge Lallier

Date: 10 décembre 2012

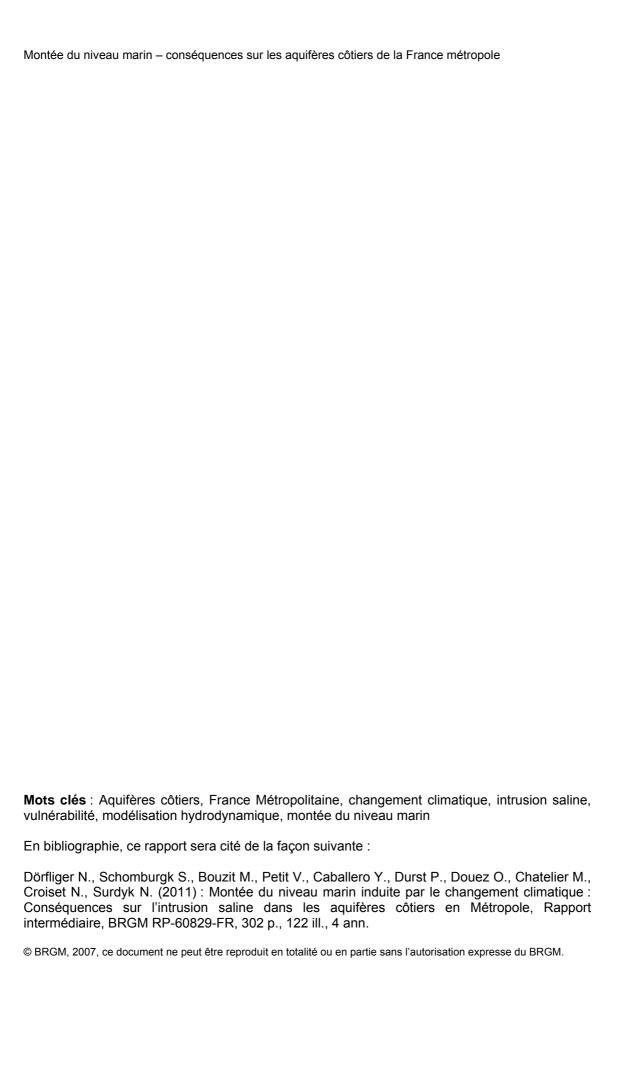
Signature:

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.







# **Synthèse**

Les aquifères côtiers sont en contact avec la mer ou l'océan; ils sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles ainsi que sous influence anthropique (prélèvement par pompage). Les intrusions salines sont localisées au niveau du littoral, ainsi que long des cours d'eau au niveau de leur embouchure, où des langues salées pénètrent le continent. Cette sensibilité est liée à des facteurs internes (type d'aquifère, propriétés physiques du milieu, hétérogénéité) et à des facteurs externes (volume d'eau prélevé en fonction du temps et de l'espace pour différents usages : alimentation en eau potable, tourisme, agricultures, industrie ; recharge (précipitation efficace) et niveau marin.

Les intrusions salines constituent ainsi un problème qui sera amplifié dans un contexte d'augmentation de niveau marin, de changement climatique (modification des conditions de recharge) et d'une dépendance croissante des ressources en eau souterraine pour l'alimentation en eau en zones littorales : augmentation de la population sédentaire avec l'installation de nombreux retraités français ou nord européens sur les côtes, irrigation avec de l'eau souterraine pour le maraîchage et l'arboriculture. Ces territoires constituent des territoires à forts enjeux de développement économique. Les conditions hydrogéologiques et les activités anthropiques dans cet environnement côtier ont ainsi une influence significative sur la qualité des eaux souterraines, souvent constituant l'unique ressource en eau douce.

Une augmentation du niveau marin associé aux changements climatiques (expansion thermique des océans lors du réchauffement, fonte des calottes glaciaires, fonte des glaciers et des couvertures glacées) constitue un des paramètres significatifs qui va jouer un rôle sur l'intrusion saline. Selon les scénarios du GIEC, l'augmentation du niveau de la mer pourrait être comprise entre 0.2 et 0.6m en 2100 selon les scénarios. Dans les zones côtières, une pression démographique pourra également conduire à une augmentation des besoins en eau et donc des prélèvements pouvant accentuer l'extension et le développement de biseaux salés.

L'impact d'une remontée du niveau marin sur l'extension du biseau salé des aquifères côtiers nécessite de procéder à un diagnostic à différentes échelles, métropolitaine ou régionale (une ou plusieurs masses d'eau souterraine ou aquifères). Aucune analyse selon une approche systémique généralisée n'existe à ce jour, seuls des cas d'études particuliers (Werner et Simmons, 2009). Ainsi ce diagnostic doit passer par une mise à jour de l'état des lieux concernant les aquifères côtiers, un état de l'art concernant l'hydrogéologie et les méthodes de cartographie de la vulnérabilité, par une application de ces méthodes ainsi que de simulations numériques sur des sites tests, afin d'apprécier les conséquences d'une remontée du niveau marin. Une comparaison des approches qualitatives (cartographie de la vulnérabilité) et quantitative (simulation numérique) devrait permettre d'apporter des éléments de validation en plus des éléments d'analyse de sensibilité concernant la méthode de cartographie de la vulnérabilité préconisée. Les résultats obtenus concernant l'impact d'une montée de

niveau marin sur les aquifères côtiers métropolitains, avec deux échelles de diagnostic, permettront de formuler des recommandations en termes de suivi et de gestion des aquifères les plus vulnérables.

Dans le cadre des actions N°4 et N° 6 « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole » des conventions ONEMA-BRGM 2010 et 2011, les travaux suivants ont été menés et font l'objet de ce rapport final:

- synthèse de l'état de l'art, concernant l'intrusion saline, la remontée du niveau marin induite par le changement climatique et la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers;
- état des lieux de la connaissance des aquifères côtiers métropolitains ;
- cartographie de la vulnérabilité à l'échelle nationale pour les aquifères côtiers et à l'échelle régionale au niveau de sept zones tests répartis sur les côtes de l'Hexagone;
- simulations numériques au niveau de deux aquifères de la côte Atlantique ;
- recommandations pour le suivi et la gestion des aquifères côtiers les plus sensibles.

La synthèse de l'état de l'art concernant l'hydrogéologie des aquifères côtiers met en évidence la problématique du biseau salé associé à, d'une part la différence de densité entre l'eau douce et l'eau de mer et à d'autre part, aux conditions internes (géométrie, propriétés physiques hydrodynamiques, nappe libre ou nappe captive,...) et conditions aux limites (niveau marin, recharge). Des solutions analytiques ont été proposées dès 1901 avec Ghyben Herzberg. Werner & Simmons proposent un modèle conceptuel (2009) qu'ils utilisent pour proposer le calcul d'un indice d'intrusion saline par aquifère côtier, mais difficilement utilisable à une échelle nationale avec 5500 km de côtes sur les façades de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée.

L'état de l'art concernant la montée du niveau marin induite par le changement climatique a été réalisé à partir des éléments du rapport BRGM RP-58289-FR rédigé pour le Ministère de l'Environnement et des travaux du GIEC (des années 2000 et 2007). Les contributions relatives des différentes composantes influençant l'élévation séculaire du niveau marin moyen sont selon l'ordre d'importance, l'expansion thermique, la fonte des glaciers et des couvertures glacées, puis la fonte des calottes (Arctique et Groënland). L'élévation séculaire du niveau marin n'est pas uniforme à l'échelle du globe. Il y a des variations liées à la variabilité de la température et de la salinité. Selon les auteurs, la fourchette de la hausse du niveau marin envisagée d'ici 2100 est comprise entre 0.2m (GIEC, 2007) et 5m (Hansen, 2007). Cette dernière valeur ne peut être retenue, considérant la publication de Pfeffer et al. 2008, indiquant qu'une valeur supérieure à 2m n'est pas plausible du point de vue de la physique. La valeur haute de la fourchette est de 0,6m (GIEC, 2007) ce qui est jugée comme minimaliste, leur modèle étant linéaire et ne tient pas compte d'un éventuel emballement des écoulements glaciaires. Les estimations les plus récentes sont assez concordantes entre elles, avec des valeurs comprises entre 0,8m et 1,8m pour la valeur haute. Au vu des incertitudes importantes des différentes méthodes, les valeurs

suivantes sont proposées dans le cadre de cette action, afin de couvrir une gamme de valeurs la plus réaliste possible : pour la façade atlantique, 0,6m et 1m, et pour la façade méditerranéenne, 0,35m et 1m d'augmentation pouvant se traduire par une augmentation de 1,6m en considérant les vagues. Pour la cartographie de la vulnérabilité à l'aide de la méthode GALDIT, les niveaux de +1 et + 2m sont considérés. Pour les simulations numériques, les niveaux de l'océan retenus sont +0.6m et +1m.

Concernant la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers, la synthèse faite dans le cadre de l'état de l'art fait ressortir qu'il n'y a que très peu de guides ou méthodologies pour évaluer rapidement la vulnérabilité de régions à l'intrusion marine. La méthode GALDIT (Chachadi et Lobo Ferreira (2007)) est le seul exemple de cartographie dédiée aux aquifères côtiers et intégrant la notion de remontée de niveau marin. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à une intrusion saline repose sur la combinaison de six paramètres : (i) le type d'aquifère : libre, captif ou semi-captif, (ii) la conductivité hydraulique de l'aquifère ; (iii) la profondeur de la nappe en dessous du niveau marin ; (iv) la distance par rapport à la côte ; (v) l'impact actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude ; (vi) l'épaisseur de l'aquifère. Une note est attribuée aux 4 classes de chaque paramètre ; cette note est comprise entre 2,5 et 10. Les valeurs résultantes sont obtenues par agrégation des valeurs des paramètres pondérées de manière significative mais néanmoins subjective. Ce type de méthode permet d'obtenir une première estimation qualitative de la vulnérabilité.

La méthode GALDIT a été utilisée dans plusieurs contextes hydrogéologiques ; c'est une méthode qualitative dont la validation l'est également, considérant d'une part les principes sur lesquels elle repose et d'autre part les résultats obtenus. Ceux-ci sont à rapprochés de données de terrain et/ou de résultats de modèles. Cette méthode ne prend pas en compte la recharge ni le flux qui s'écoule au travers de l'aquifère, ou encore les débits pompés. Les résultats de vulnérabilité à l'aide de la méthode GADLIT appliquée à un secteur du Marais Poitevin ont été comparés aux résultats des simulations numériques. Les résultats sont jugés cohérents et consistants, validant ainsi la méthode GALDIT, d'ores et déjà calibrée pour différents types d'aquifères.

La carte résultante de vulnérabilité selon la méthode GALDIT doit être confrontée à une carte des aléas dans le cadre d'une analyse de risques. Une zone de forte vulnérabilité ne peut constituer un risque important s'il n'y a pas ou n'aura pas de prélèvements à cet endroit. Suite aux premiers tests réalisés en 2010 (BRGM RP-59456-FR), la méthode GALDIT a été appliquée au niveau de sept zones d'étude, identifiées comme vulnérables de manière globale à l'aide d'une méthode de cartographie de la sensibilité à l'échelle de la Métropole.

La carte de sensibilité ou de vulnérabilité en grand est basée sur la nature et le type d'aquifères; elle est réalisée à partir du référentiel de systèmes aquifères BDLISA, pour une bande de terre de 5km de large le long de la côte. Deux autres cartes sont réalisées pour apprécier de manière qualitative les surfaces pouvant être impactées par une remontée de niveau marin (cartographie des zones basses) et d'autre part la pression démographique avec des cartes de prélèvements en eau

souterraines (volumes, usages AEP, agricoles et industriels), et des cartes de densité de population avec également une indication sur les tendances à la croissance. La carte de vulnérabilité en grand ou dite de sensibilité, intègre en partie ces données par surimposition graphique ainsi que des conductivités électriques pour des points d'eau. La carte des surfaces par tranche d'altitude (< 1m, 1,1 à 2m, 2,1 à 3m, 3,1 à 4m et 4,1 à 20m), indique que quelques 600km² de surface sur une bande littorale de 5km de large concernent la tranche <1m et principalement localisées sur la façade méditerranéenne. En Vendée ainsi qu'au niveau de l'estuaire de la Gironde, de telles surfaces peuvent également être mises en évidence. Les zones les plus sensibles ainsi identifiées à l'échelle des côtes métropolitaines sont: la côte orientale de la Corse ; une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ; la partie septentrionale de la côte du Poitou-Charentes ; la côte nord-est de la Bretagne et la côte du Calvados. A noter que les zones méditerranéennes sont les plus marquées par une influence anthropique pouvant également accentuer les risques d'intrusion saline, résultant de la combinaison remontée du niveau marin et augmentation des prélèvements dans les eaux souterraines.

Les tests de simulation réalisés au niveau de l'estuaire de la Gironde 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 ; l'impact associé aux prélèvements peut être tout aussi conséquent. Il est possible que l'incertitude sur les flux entraine 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 côte moyenne de l'estuaire de +0.6m et un doublement de la salinité de l'estuaire entraineraient une progression du front salé d'une distance inférieure à 100 mètres. Par ailleurs. l'influence peut se faire sentir sur plusieurs kilomètres dans le cas du Marais Poitevin, sur la base des résultats d'une modélisation hydrodynamique sans prise en compte de la salinité, effectuée dans un premier temps. 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; 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 simulations conduites au niveau du Marais Poitevin, à l'aide des modèles conceptuels en coupe mettent en évidence une vulnérabilité variable aux intrusions marines pour l'aquifère du Dogger, avec une vulnérabilité particulière vis-àvis des conditions d'exploitation actuelle pour les zones dunaires. Les dépressions dues au pompage d'irrigation en basses eaux génèrent une inversion des flux de la dune vers l'intérieur des terres. Ce fonctionnement exacerbé lors des années sèches favorise l'entrée du biseau salé. La dune, caractérisée par un coefficient d'emmagasinement élevé (15%) ne joue pas le rôle de barrière hydraulique comme supposé lors des premières simulations à l'échelle du Marais Poitevin.

Des recommandations pour le suivi et la gestion des aquifères qui sont potentiellement impactés par une remontée de niveau marin sont formulées. Pour les aquifères les plus sensibles localement ou régionalement, en fonction des aléas actuels ou à venir, des études détaillées doivent être menées, avec en (1) un suivi piézométrique accompagné de profils de conductivité et de prélèvements ciblés pour analyse de

chlorures ou des suivis en continu en forage au niveau d'un réseau de piézomètres défini, (2) interprétation et détermination de niveaux d'alerte, (3) une cartographie de vulnérabilité détaillée accompagnée d'une cartographie des aléas actuels et à venir. Pour les secteurs impactés d'ores et déjà par des intrusions salines pour des aquifères exploités pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages, des solutions de gestion doivent être mises en œuvre: - optimisation des prélèvements afin de limiter l'intrusion saline et — gestion active en procédant à une recharge artificielle pour maintenir une barrière hydraulique empêchant la progression de l'intrusion saline. L'utilisation d'un modèle numérique pour simuler des scénarios de gestion active, couplée à un réseau de piézomètres avec seuils d'alerte concernant la salinité en différentes profondeurs de la zone saturée d'un aquifère constitue un outil d'aide à la décision et de gestion.

# **Sommaire**

1.	Introduction	17
2.	Synthèse de l'état de l'art concernant l'intrusion saline des aquifères côtiers	s19
3.	Synthèse de l'état de l'art concernant la remontée du niveau marin induite p le changement climatique	
	3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ELEVATION SECULAIRE D NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITE REGIONALE DU NIVEAU MARIN	
	3.2. PREDICTIONS A PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODELES CLIMATIQUES	26
4.	Synthèse bibliographique concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers	35
	4.1. NOTIONS GENERALES DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES	35
	4.2. BREF APERÇU DES METHODES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES	38
	4.3. VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS PAR RAPPORT A L'INTRUSION SALINE	
	4.3.1.Méthode GALDIT4.3.2.Exemple d'application de la méthode GALDIT	
	4.4. AUTRES APPROCHES (GLOBALES) DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE	46
	4.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	48
5.	Etat des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle de la France Métropolitaine et cartographie des scénarios de remontée de niveau marin	49
	5.1. DESCRIPTION DE LA BD BIBLIOGRAPHIQUE	49
	5.2. ETAT DE L'INTRUSION SALINE MARINE PAR REGION	
	5.2.2.La façade méditerranéenne	53
6.	Test de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers à différentes échelles : nationale et régionale	63

	6.1. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A L'ECHELLE NATIONALE	63
	6.1.1.Démarche méthodologique	
	6.1.2. Explications des cartes de sensibilité à l'échelle de trois secteurs littora métropolitains	aux
	6.2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A L'ECHELLE REGIONALE 6.2.1. Des tests de la méthode GALDIT	
	6.2.2.Analyse de la sensibilité des différents paramètres de la méthode GALDIT	107
	6.2.3. Validation de la méthode GALDIT et comparaison de la méthode GALI avec les simulations numériques	TIC
	6.2.4. Conclusion et perspectives	117
	6.2.5. Recensement des modèles hydrogéologiques numériques	
	6.3. TESTS DE SIMULATION	118
	6.3.1. St-Ciers sur Gironde	119
	Conditions aux limites	124
	Paramètres hydrodynamiques	124
	6.3.2. Marais Poitevin	136
	6.3.3.Caractérisation hydrochimique et modélisation complémentaire en cou du biseau salée – Marais Poitevin	
7.	Recommandations	181
8.	Conclusion	181
9.	Principales Références	187
L	iste des illustrations	
	ustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg xtrait de Frissant et al,. 2005)	20
	ustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un coulement vers la mer (extrait de Glover (1959))	21
(۷	ustration 3 : l'interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse Verner & Simmons, 2009) : qo est la décharge de l'aquifère vers la mer par unité de ngueur, W est la recharge uniforme de l'aquifère (en m/s)	24
er	ustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al. 2008) – n rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. 006) et en vert : données de Holgate et al. (2006)	25
	ustration 5 : Explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, n pourcentage du total expliqué (Source : GIEC, 2007)	26

de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave et al. 2008)	27
Illustration 7 : Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC	28
Illustration 8 : Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000)	29
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)	29
Illustration 10 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21ème 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	30
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 4ème rapport (AR4) sont indiquées par des barres en bas à droite. (Vermeer & Rahmstorf, 2009)	31
Illustration 12 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la hausse du niveau marin d'ici 2100 par différents auteurs en utilisant les scenarii de températures du GIEC	33
Illustration 13 : Modèle conceptuel de la vulnérabilité des aquifères (action COST 620, 2004)	36
Illustration 14 : Méthode de vulnérabilité intrinsèque à index	39
Illustration 15 : Tableau de synthèse des poids et rang de la méthode GALDIT	45
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)	46
Illustration 17 : Carte de vulnérabilité intrinsèque et anthropique des aquifère cotiers de la région Bretagne (Petit, 1996).	47
Illustration 18 : Carte de vulnérabilité des masses d'eau vis-à-vis de l'intrusion saline en région Corse (Frissant et Bodéré, 2009)	48
Illustration 19 : nombre de références bibliographiques par région cotière	51
Illustration 20 : Type d'approche pour l'investigation de l'intrusion saline	52
Illustration 21 : Conclusion des études compte à l'existence d'une intrusion saline récente par la mer	53
Illustration 22 : Aquifères côtiers de la partie ouest du Languedoc-Roussillon	54
Illustration 23 : Aquifères cotiers de la partie centrale du Languedoc-Roussillon	55
Illustration 24 : Aquifères cotiers de la partie sud du Languedoc-Roussillon	56
llustration 25 : Schéma de la démarche de cartographie nationale 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	6.4
I Iau∪I Iai⊽	04

Ilustration 26 : Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité générale ou de sensibilté 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 métropolitaine	65
illustration 27 : Carte de vulnérabilité générale ou de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la côte méditerranéenne	68
illustration 28 : Cartographie et tableau de la répartion 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	70
Illustration 29 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi- décenales	71
Illustration 30 : Exemple de la plaine de Caen (MNT sur 5 km)	71
illustration 31 : Exemple de la plaine de Caen (pente sur 5km) et sensibilité des aquifères	72
Illustration 32: Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine	73
Illustration 33: Cartes des pressions anthropiques par tendance de croissance de la population sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique	75
Illustration 34: Graphique du % de Touristes par nombre de communes	76
Illustration 35: Cartes des prélèvements des eaux souterraines (irrigation, AEP et industriel) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique	78
Illustration 36: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins en eau potable (AEP) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique	80
Illustration 37: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins industriels sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique	81
Illustration 38: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour l'irrigation sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique	82
illustration 39 : Carte de la vulnérabilité des aquifères côtiers en France Métropolitaine à la remontée du niveau marin de + 2m et pression par prélèvements	85
illustration 40 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la région Nord Pas de Calais et Picardie	86
Illustration 41 : Carte des principaux aquifères – Région Nord Pas de Calais	87
Illustration 42 : Carte de dépassement des normes de potabilité sur des captages AEP (concentrations en chlorures et en conductivité) dans la zone de Caen	90
Illustration 43 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne	91
Illustration 44 : Carte géologique simplifiée, Sud de la Vendée (Extrait du Rapport BRGM/RP-55505-FR)	94
illustration 45 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine	97
Ilustration 46 : Schéma de la démarche de cartographie régionale de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un	

nationale	98
illustration 47 : Carte des sept secteurs pour lesquels une cartographie de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT a été réalisée	99
illustration 48 : Rang des paramètres des 7 zones tests.	101
Illustration 49 : Comparaison de la vulnérabilité GALDIT suivant le poids du type d'aquifère (G).	101
Illustration 50 : Comparaison de la vulnérabilité GALDIT initiale et avec un nouveau classement ajusté.	103
illustration 51 : Cartes de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour l'actuel et pour des scénarios de remontée du niveau marin pour les 7 secteurs identifiés	106
Illustration 52 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre G	107
Illustration 53 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre A	108
Illustration 54 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre L	110
Illustration 55 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre D	111
Illustration 56 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre l	113
Illustration 57 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre T	114
Illustration 58 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité	115
Illustration 59 : Exemple de sensibilité à la transfromation d'échelle dans une somme pondérée.	116
Illustration 60 : Situation géographique de la zone d'étude	121
Illustration 61 : Coupe schématique est-ouest	122
Illustration 62 : Représentation 3D de la géométrie du modèle	124
Illustration 63 : Diagramme de dispersion	125
Illustration 64 : Chronique piézométrique entre 2006 et 2010 au piézomètre PGE3B (Centrale EDF)	126
Illustration 65 : Répartition des ouvrages exploitant la nappe des graves et celle de l'Eocène	128
Illustration 66 : Diagramme de dispersion obtenue suite au processus de calage en régime transitoire	129
illustration 67:	130
illustration 68 :	130
Illustration 69 : Evolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge	131

illustration 70 : Répartition de la salinité dans la couche 3 au repos	132
Illustration 71 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire	133
Illustration 72 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire	134
Illustration 73 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire	135
Illustration 74 : Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin	136
Illustration 75 : Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude	138
Illustration 76 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger)	139
Illustration 77 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger)	139
Illustration 78 : Potentiels imposés au niveau de l'Océan	140
Illustration 79 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville	141
Illustration 80 : localisation des piézomètres virtuels	141
Illustration 81 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels	
Illustration 82 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide)	145
Illustration 83 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2005 (année sèche)	146
Illustration 84 : Ouvrages prélevés en avril et octobre 2011. Certains ouvrages ne sont pas répertoriés dans la Banque Nationale du Sous Sol (BSS) et font l'objet d'un code temporaire (XA, XB, XD).	147
Illustration 85 : Profondeur des ouvrages échantillonnés	148
Illustration 86 : Minéralisation des eaux prélevées et gammes de salinisation définies par Lloyd et Heathcote (1985). HE : Hautes Eaux, BE : Basses Eaux	149
Illustration 87 : Faciès hydrochimiques déterminés sur la base du Diagramme de Piper (exemple des eaux prélevées en avril 2011)	150
Illustration 88 : Conductivités électriques à 25 °C mesurées en hautes eaux (avril 2011) et basses eaux (octobre 2011).Unité en µS.cm <sup>-1</sup>	151
Illustration 89 : Composition chimique moyenne de l'eau de mer [Copin Montegut G. (1996)]	152
Illustration 90 : Relation sodium/chlorure dans les eaux prélevées au Dogger. La série RQ représente un échantillon moyen caractéristique des eaux du Dogger calculées sur la base des données 2001-2011 du réseau de suivi de la qualité des nappes de Poitou-Charentes (34 ouvrages)	

Illustration 91 : Relation Na/Cl pour les eaux prélevées à l'Infra-Toarcien et l'eau saumâtre prélevée au Dogger (Avril 2011). Les prélèvements effectués en hautes eaux témoignent d'une corrélation identique.	153
Illustration 92 : Relation F/Cl pour les échantillons prélevés en avril 2001. La relation est identique en octobre 2011	154
Illustration 93 : Localisation des coupes AB et CD. Le carroyage gris correspond au maillage du modèle hydrodynamique régional [Douez O. (2010)]	157
Illustration 94 : Topographies associées aux coupes AB et CD.	158
Illustration 95 : Caractéristiques du maillage des coupe AB et CD	158
Illustration 96 : Perméabilités et porosités implémentées dans les modèles AB et CD	161
Illustration 97: Statut des piézomètres de référence utilisés pour le calage des coupes AB et CD	162
Illustration 98 : Caractérisation statistique des calages	162
Illustration 99 : Charges simulées/références du modèle AB	164
Illustration 100 : Charges simulées/références pour le modèle CD	165
Illustration 101 : Evolution des charges hydrauliques en réponse aux différentes simulations de remontée océaniques. Coupe AB : P5, P45. Coupe CD : P8, 06074X0096.	167
Illustration 102 : Evolution de la variation V de concentration dans le profil en fonction des périodes de recharge et d'étiage – Coupe AB- Simulation + 0 m NGF	
Illustration 103 : Profils de charges hydrauliques pour une simulation à 0 m NGF – Coupe AB	169
Illustration 104 : Biseau salé simulé au droit de la coupe AB pour un niveau océanique actuel (0 m NGF). Instantannés pour différentes années climatiques : année humide (2001), année sèche (2005), année moyenne (2006/2007). Echelle exprimée en g.L <sup>-1</sup> de chlorures.	170
Illustration 105 : Avancée du biseau salé pour différents scénarri de remontée océanique. Le front équivaut à une concentration de 100 mg.L <sup>-1</sup> de chlorures.Coupe AB	172
Illustration 106 : Evolution de la variation V de concentration dans le profil en fonction des périodes de recharge et d'étiage – Coupe CD- Simulation + 0 m NGF	174
Illustration 107 : Profil en long des charges hydrauliques simulées pour différentes périodes et années climatiques.Simulation à + 0 m NGF	174
Illustration 108 : Biseau salé simulé au droit de la coupe CD pour un niveau océanique actuel (0 m NGF). Instantannés pour différentes années climatiques : année humide (2001), année sèche (2005), année moyenne (2006/2007). Echelle exprimée en g.L <sup>-1</sup> de chlorures.	175
Illustration 109 : Avancée du biseau salé pour différents scénarri de remontée océanique. Le front équivaut à une concentration de 100 mg.L <sup>-1</sup> de chlorures.Coupe CD.	177
illustration 110 : schéma des trois types de catégories de recommandations pour la gestion des aquifères côtiers vis-à-vis d'une remontée du niveau marin	182

Montée du niveau marin – conséquences sur les aquifères côtiers de la France métropole

# Liste des annexes

Annexe 1	195
Annexe 2	203
Annexe 3	221
Annexe 4	289

# 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) et 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, 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, 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 métropolitains, par un état de l'art de l'hydrogéologie des aquifères côtiers et de la cartographie de leur vulnérabilité, d'autre part par la cartographie de la vulnérabilité à différentes échelles, 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 et des résultats des cartes de vulnérabilité. Des modalités pour généraliser ces recommandations pour les différentes configurations possibles d'aquifères côtiers seront formulées.

Dans le cadre des actions N°4 et N° 6 « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole » des conventions ONEMA-BRGM 2010 et 2011, les travaux suivants ont été menés et font l'objet de ce rapport final:

- Synthèse de l'état de l'art, concernant l'intrusion saline, la remontée du niveau marin induite par le changement climatique et la vulnérabilité des aguifères côtiers ;
- Etat des lieux concernant les aquifères côtiers métropolitains et base de données associées ;
- Cartographie de la vulnérabilité à l'échelle nationale pour les aquifères côtiers et à l'échelle régionale au niveau de sept zones tests;
- Simulations numériques au niveau de deux aquifères de la côte Atlantique ;
- Recommandations pour le suivi et la gestion des aquifères côtiers.

# 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, 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.

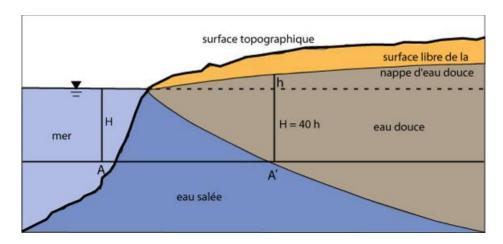


Illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al,. 2005).

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

$$H \cdot d_s = (H + h) \cdot d$$
 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 :

$$H \cdot (\mathbf{d}_{s} - 1) = h$$
 Eq. 2

 $H = \frac{h}{d_{s} - 1}$ 

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 :

$$H = \frac{h}{0.025} = 40h$$
 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).

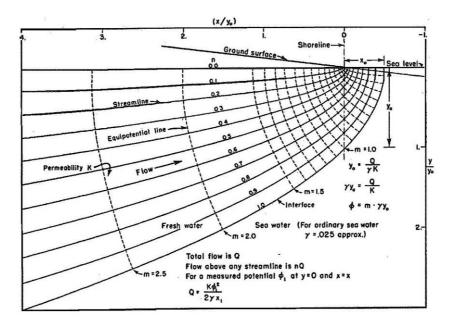


Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover (1959)).

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.

A partir de l'expression d'un potentiel de vitesse Φ d'écoulement dans la nappe :

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

où dd 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 :

$$y^{2} = \frac{2Qx}{K(\frac{d_{s} - d_{d}}{d_{d}})} + \frac{Q^{2}}{K^{2}(\frac{d_{s} - d_{d}}{d_{d}})^{2}}$$
 Eq. 6

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

$$x_0 = \frac{Q}{2K(\frac{d_s - d_d}{d_d})}$$
 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. 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 2km 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<sup>-4</sup> 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).

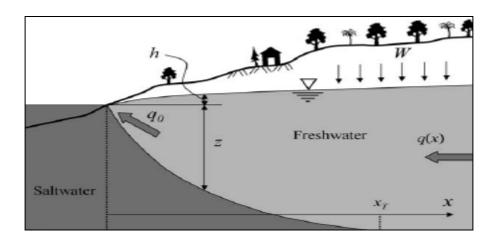


Illustration 3 : l'interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse (Werner & Simmons, 2009) : qo est la décharge de l'aquifère vers la mer par unité de longueur, W est la recharge uniforme de l'aquifère (en m/s)

Dans le cas des « systèmes à flux contrôlé », la valeur maximum de  $x_T$  (cf illustration 3), est de 45 m pour une élévation du niveau marin de 1,5m, avec des valeurs de recharge comprise entre 40 et 120 mm/an, une conductivité hydraulique de 1,16.10<sup>-4</sup> 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 RP-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'ELEVATION SECULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITE REGIONALE DU NIVEAU MARIN

Entre 1870 et 2004, le niveau marin moyen global aurait augmenté de 1,7 mm/an (+/- 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, il y a un ralentissement considérable (Cazenave & Nerem, 2004) (Illustration 4).

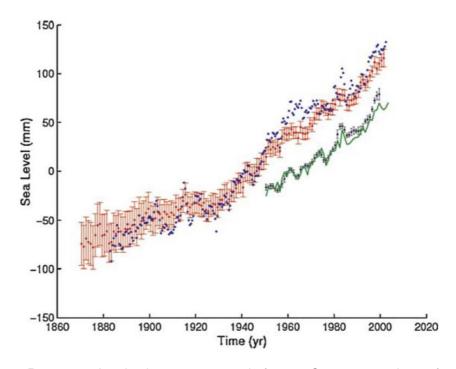


Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al. 2008) – en rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006) et en vert : données de Holgate et al. (2006).

Les causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen observée s'explique par (i) une dilation 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.

A 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.

Cause de l'élévation séculaire du niveau marin moyen	1961-2003	1993-2003
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%
Total expliqué	1,1 mm/an	2,8 mm/an
Total observé	1,8 mm/an	3,1 mm/an

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).

# 3.2. PREDICTIONS A PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODELES 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).

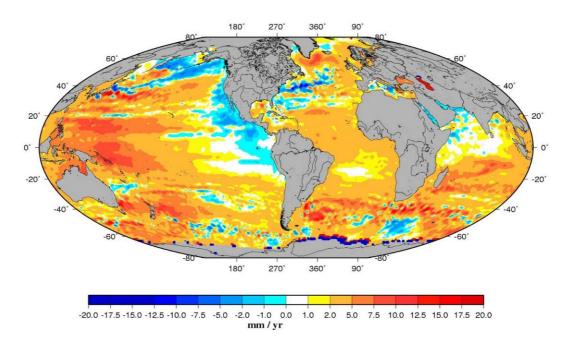


illustration 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave et al. 2008).

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.

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 différent 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>ème</sup> siècle. Il est lui-même scindé en trois groupes décrivant les directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique.

A1F1 : 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'accroit 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.

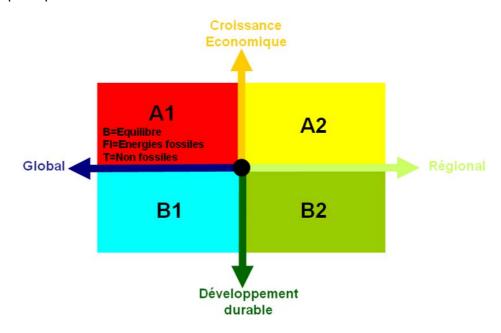


Illustration 7: Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC.

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 marqueur¹ » (Illustration 8).

Scénario d'illustration marqueur : scénario utilisé sous forme provisoire pour représenter une famille de scénarios donnée. Le choix de scénario marqueur était basé sur les quantifications initiales qui reflétaient le mieux le canevas (Description narrative d'un scénario qui met en lumière les principales caractéristiques du scénario, les relations entre les forces motrices clés, et les dynamiques de leur évolution), et les caractéristiques de modèles spécifiques.

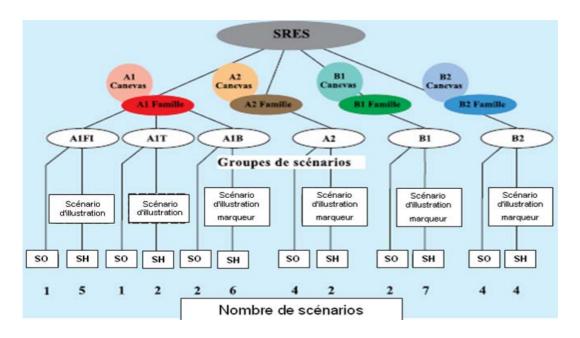


Illustration 8 : Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000)

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).

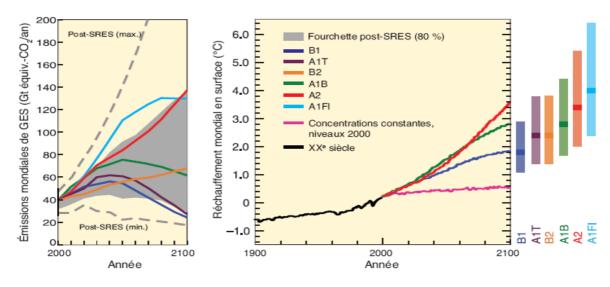


Illustration 9 : Scénarios d'émissions mondiales de Gaz à effet de Serre, et du réchauffement moyen prévisible en surface (à droite) (d'après GIEC, 2007).

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 (A1F1).

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 (AF1).

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.

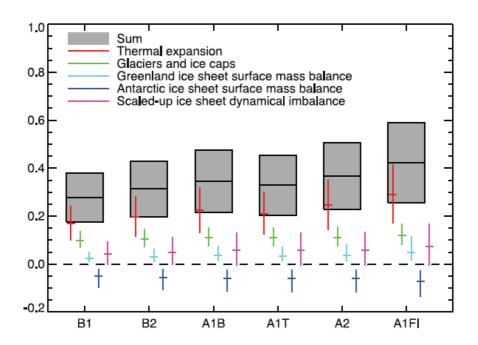


Illustration 10 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21ème siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 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'excèderait 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 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.

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 21<sup>ème</sup> siècle en utilisant les projections de températures du GIEC (4<sup>ème</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).

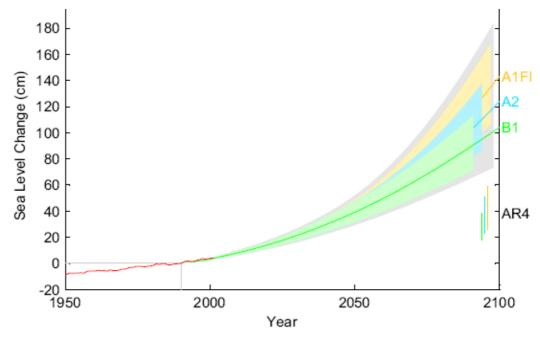


Illustration 11 : Projections de hausse du niveau marin pour la période 1990-2100, basées sur les projections de températures du GIEC pour les scénarios B1, A2 et A1FI. Les projections du GIEC dans leur 4ème rapport (AR4) sont indiquées par des barres en bas à droite. (Vermeer & Rahmstorf, 2009)

Les réponses non-linéaires de l'écoulement glaciaire durant le 21<sup>ème</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 2,0m. 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 & 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.

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 2m. 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 & 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 1,8m (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).

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....).

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 0,60m (0,6m 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 1,4m	Méthode semi-empirique : -élévation du niveau marin proportionnelle à l'augmentation de TL'accélération observée de la fonte de la banquise n'est pas prise en compte.
Hansen, 2007	5m	-Méthode empirique : Il considère que le taux de contribution de la banquise à l'élévation du niveau marin double chaque décadeValeur peu concevable physiquement
Pfeffer & al, 2008	0,8 et 2m	Approche cinématique des écoulements des glaciers groenlandais et antarctiques : 2m constitue une valeur maximale.
Rahmstrof, 2009	0,75 et 1,9m	Rajout d'un terme à réponse rapide (quasi instantanée) à l'augmentation de température.
Grinsted, 2009	0,9 à 1,6m	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 scenarii de températures du GIEC

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 1m d'augmentation du niveau marin ;
- Pour la façade Méditerranéenne scénarios de 0.35m et 1 m d'augmentation du niveau marin, se traduisant pour ce dernier en considérant les marées, vagues... par une augmentation de 1.6m (résultats du projet ANR MISEEVA).

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

#### 4.1. NOTIONS GENERALES DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES

Le terme « générique » de vulnérabilité est défini de différentes manières selon les disciplines et les auteurs. Il n'y pas 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 croissement 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 CNFSH², opte pour un sens opposée 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).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> CNFSH: Comité National Français des Sciences Hydrogéologiques.

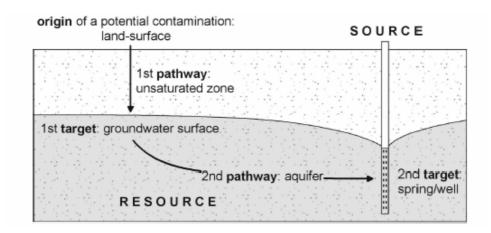


Illustration 13: Modèle conceptuel de la vulnérabilité des aquifères (action COST 620, 2004)

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

#### 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.

#### Ecoulement

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 la régénération des qualités 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.

A 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.

A 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 METHODES DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES

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 sur les choix des paramètres (ou critères) et la procédure de pondération des paramètres. A 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 :

<u>Paramètres liés au sol</u>: 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;

<u>Paramètres liés à la zone non saturée</u> : épaisseur de la ZNS, approximation de la conductivité hydraulique, nature lithologique, fracturation ;

<u>Paramètres liés à la zone saturée</u> : 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).

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 vandose zone (impact); C: hydraulic Conductivity (perméabilité de l'aquifère)	US-EPA (Environnemental Protection Agency) - Aller <i>et al.</i> en 1985, 1987	Utilisé essentiellement au 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 Saturo; T : Tipologia della Copertura (sol) ; A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero ; C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ; S : Acclività della Superficie Topographica	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 Vulnerabity 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 et al., 2000.	Dérivée de la méthode EPIK, spécifique pour les aquifères karstiques
RISK	R : Roche aquifère ; I : Infiltration, S : Sol ; K Karstification	Dörfliger et al., 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 et al., 2002	Proposé comme méthode européenne par COST 650 pour les aquifère karstique.
DISCO	DIS : discontinuity (discontinuités ) ; CO : protection Cover and rainflow (couverture protectrice et ruisselement)	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 lythology (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)	Mardhel et Gravier, 2005	Applicable à grande échelle
GALDIT	Voir ci-dessous		

Illustration 14 : Méthode de vulnérabilité intrinsèque à index

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.

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. VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS PAR RAPPORT A 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 4ème 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 (Aquifer hydraulic conductivity);

- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Depth to groundwater Level above sea);
- La distance par rapport à la côte (Distance from the shore);
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (Impact 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 = 
$$\sum_{i=1}^{6} p_i R_i / \sum_{i=1}^{6} p_i$$

Où p<sub>i</sub> est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre i

R<sub>i</sub> 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	
		semi-captif	5	
		Aquifère contraint (1)	2.5	
(1) 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 captif, ce dernier étant sous une pression plus grande qu'uniquement la pression atmosphérique. De même, un aquifère captif 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'inter-connectivité 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.

D	Detale	Attributs du p	NI - 4 -		
Paramètre A	Poids	Classe Rang		Note	
conductivité hydraulique de l'aquifère	3	Elevée	> 40	10	
		Moyenne	10 – 40	7.5	
		Faible	5 – 10	5	
raquilere		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 audessus 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 p	Note	
Farametre L	Folus	Classe	Rang (m)	Note
Hauteur à la nappe		Elevée	< 1.0	10
par rapport au	4	Moyenne	1.0 – 1.5	7.5
niveau de la mer	4	Faible	1.5 – 2.0	5
(m)		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 1000 m.

		1		1
Paramètre D	Poids	Attributs du	note	
Farametre D	Folus	Classe	Rang (m)	Tiole
Distance		Très courte	< 500	10
Distance par rapport à la côte	1	Courte	500 – 750	7.5
(m)	4	Moyenne	750 – 1000	5
(111)		Eloignée	> 1000	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<sup>-</sup> / (HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 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.

Paramètre I	Poids	Attributs du	Note		
raiailletie i	Folus	Classe	Rang (ppm)	Note	
Impact de l'état actuel de		Elevé	> 2	10	
l'intrusion saline de la	1	Moyen	1.5 – 2	7.5	
zone d'étude :		Faible	1 – 1.5	5	
$\text{Cl}^{-}$ / (HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )		Très faible	< 1	2.5	

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 saisonnières 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 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. Il a été clairement démontré que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline devrait être importante et inversement. Suivant ce principe, des valeurs de rang correspondantes à différentes épaisseurs d'aquifère sont attribuées comme suit :

Paramètre T		Poids	Attributs du	Note	
		Polus	Classe	Rang	Note
			Large	> 10	10
Epaisseur de l'aquifère (m)		2	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.

		Rangs				
Paramètres	Poids	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)	2	> 1000	750- 1000	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 la figure cidessous :

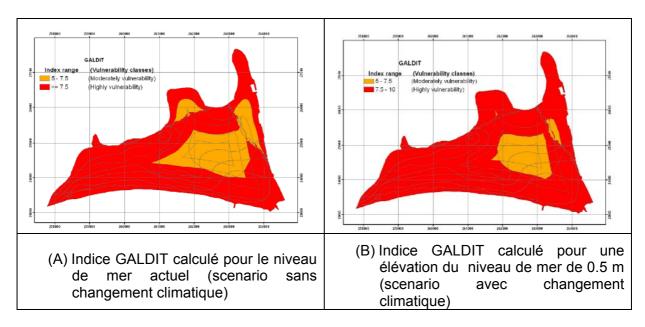


Illustration 16 : Exemple de carte de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour (A) le niveau de la mer actuel et (B) pour une élévation du niveau marin de 0,5 m (Lobo Ferreira et al. 2005).

En conclusion, la méthode GALDIT est une méthode simple d'utilisation, qui nécessite peu de données. 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.

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

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.

Pour définir la vulnérabilité des aquifères en Bretagne, Petit (1996) se base sur les données de 9400 forages (localisation, contexte géologique, profondeur du forage, débit instantané, ...). A partir d'une analyse statistiques 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.

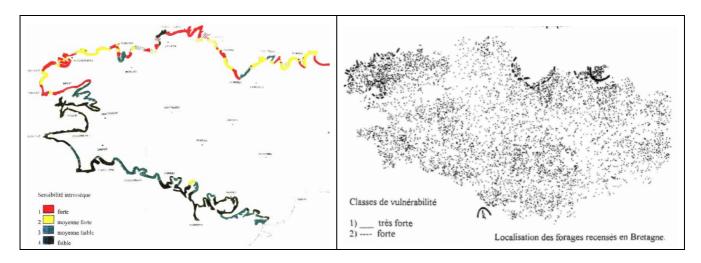


Illustration 17 : Carte de vulnérabilité intrinsèque et anthropique des aquifère cotiers de la région Bretagne (Petit, 1996).

Frisant et Bodéré (2009) étudient la sensibilité des aquifères côtiers corses et s'appuient sur les « 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

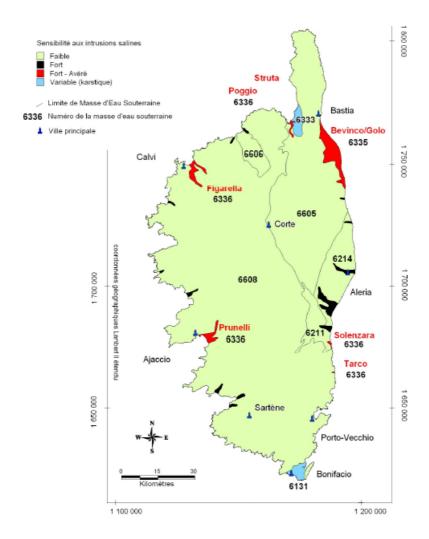


Illustration 18 : Carte de vulnérabilité des masses d'eau vis-à-vis de l'intrusion saline en région Corse (Frissant et Bodéré, 2009).

#### 4.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A 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. Etat 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 leBRGM; 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)
- Maitre d'ouvrage et maitre d'œuvre de l'étude
- Type de référence (étude, article scientifique, thèse de recherche, ou note d'expertise)
- Type et nom de l'aquifère côtier concerné par l'étude
- Codes des masses d'eau et/ou référentiel BDLISA<sup>3</sup> (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

\_

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Base de Données des Llmites des Systèmes Aquifères

- Etude 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.

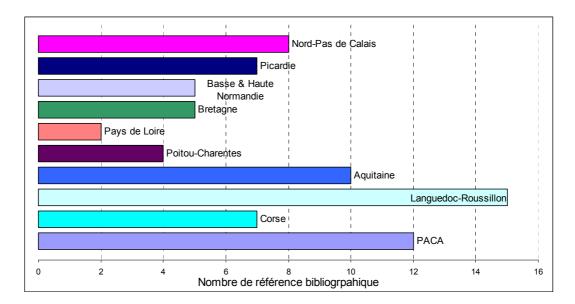


Illustration 19 : nombre de références bibliographiques par région cotière

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 hydrochimique 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 hydro-chimique. Il s'agit du travail de thèse de B. Aulnay (2007) sur la plaine du Roussillon.

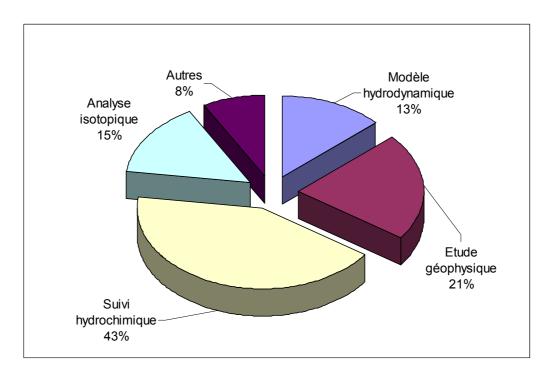


Illustration 20: Type d'approche pour l'investigation de l'intrusion saline

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 : Frissant N., Bodéré G. (2009) pour la région Corse, Corbier P. (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.

A ce stade, il faut noter que la base de donnée bibliographique ne fait la distinction entre études concernant quelque points (cible = forage) des études portants sur l'aquifère ou masse d'eau dans son ensemble (cible = eau souterraine).

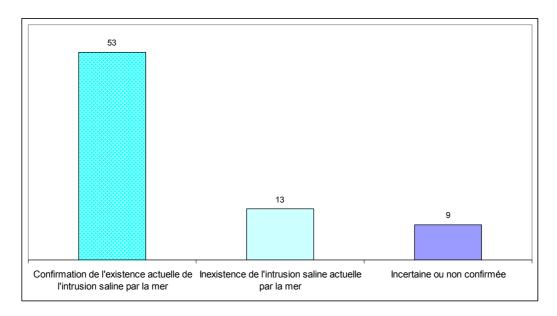


Illustration 21 : Conclusion des études compte à l'existence d'une intrusion saline récente par la mer

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. ETAT DE L'INTRUSION SALINE MARINE PAR REGION

#### 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, 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.

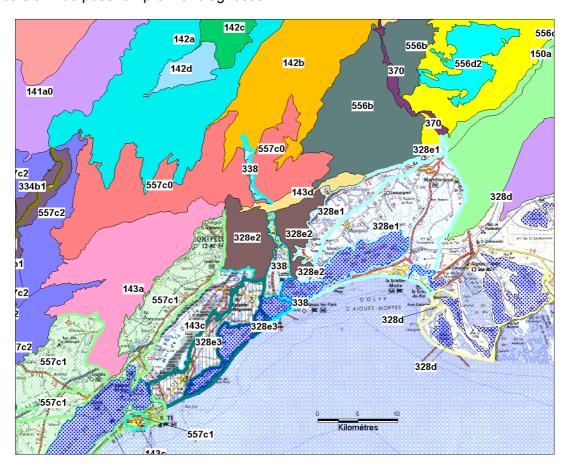


Illustration 22 : Aquifères côtiers de la partie ouest du Languedoc-Roussillon

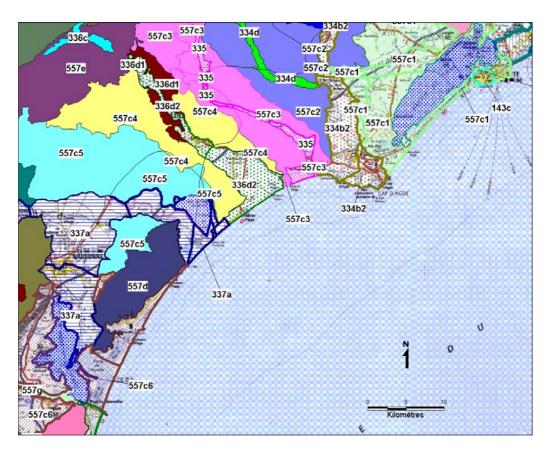


Illustration 23 : Aquifères cotiers de la partie centrale du Languedoc-Roussillon

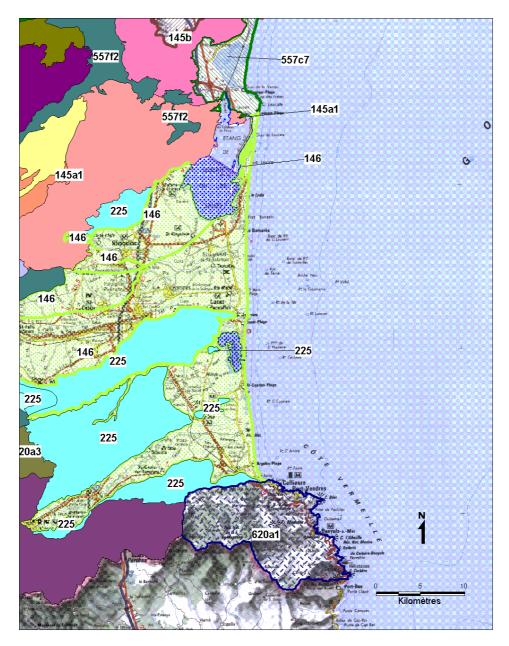


Illustration 24 : Aquifères cotiers de la partie sud du Languedoc-Roussillon

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

G	La nappe est libre en amont et devient rapidement captive.				
Α	La perméabilité élevée (maximum de 10 <sup>-2</sup> 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				
1	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 toit 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.

Etude 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 Virdoule 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 m³/h. Un niveau d'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.
Т	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.

Etude 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'Etang 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
Α	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
Т	

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

Etude 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 m³/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.

Etude 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			
Α	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.			
Т				

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

Etude 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.					
Α	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.					
	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.

Etude 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> m²/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.
Т	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.

Etude 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			
Α	Aquifère peu productif, hétérogène et les ressources en eau sont très peu			
	utilisées. Il n'y a pas de 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			
Т	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.

Etude 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,
- A la percolation d'eau contaminée par les forages mettant en connexion plusieurs niveaux aquifères,
- A 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. Ces deux approches sont complémentaires. L'approche nationale permet d'avoir un aperçu général de la situation actuelle et future de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion saline. L'approche régionale permet, à l'aide de la cartographie de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT, d'avoir une information plus détaillée, approche pouvant être appliquée en fonction des besoins sur d'autres aquifères.

#### 6.1. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A L'ECHELLE NATIONALE

#### 6.1.1. Démarche méthodologique

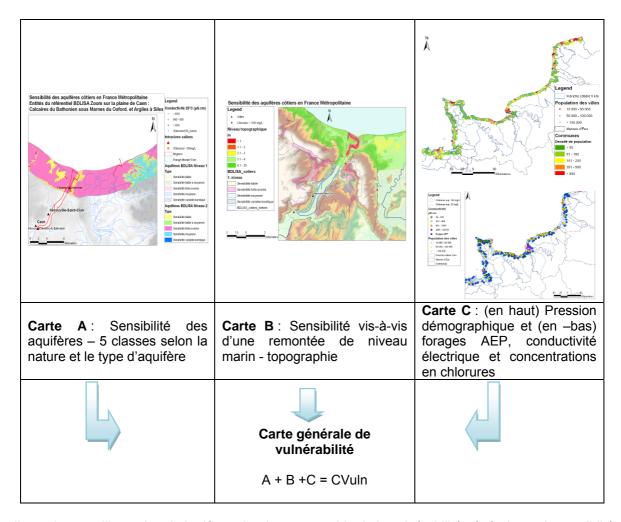
Cette approche propose une classification de la sensibilité actuelle des aquifères vis-à-vis des intrusions marines, intégrant des informations spatialisées en tant qu'indicateurs de salinité. Ces informations sont issues essentiellement des bases de données ADES, du référentiel BDLISA et de différentes études locales comprenant des données non bancarisées mais attestant d'intrusions salines. Une cartographie des zones basses à l'aide d'un MNT et de la pression démographique sur ces zones, fournissent des éléments complémentaires. Ces deux types de cartographie sont assemblées afin d'obtenir une carte indicative de risque (croissement vulnérabilité et pression) pour différents scénarios de surélévation du niveau marin à une échelle nationale.

La démarche nationale peut être schématisée comme suit :

(B) Cartographie des zones (A) Extraction de la BDLISA et basses à l'aide du MNT et cartographie de la bande du Méthode GALDIT littoral sur 5km des aquifères ⇒ Impact d'une côtiers remontée de niveau Classification de la marin selon deux sensibilité vis-à-vis de ou trois scénarios l'intrusion saline actuelle Cartographie des données ponctuelles de salinité (C) Cartographie Cartographie à l'échelle de la pressions France métropolitaine de la Prélèvements des vulnérabilité des aquifères côtiers eaux souterraines (frange littorale) vis-à-vis de pression l'impact d'une remontée du niveau démographique marin sur l'intrusion saline actuelle et évolution de la population

Ilustration 25 : Schéma de la démarche de cartographie nationale 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

Les différentes cartes ont été réalisées pour la façade méditerranéenne, du Roussillon jusqu'aux Alpes et la Corse et la façade atlantique de la région Nord Pas de Calais jusqu'en Aquitaine.



Ilustration 26 : Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité générale ou de sensibilté 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 métropolitaine

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

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 ce référentiel à la fin 2011 correspondent aux zones de la côte méditerranéenne; à défaut, les masses d'eau sont utilisées.

Le référentiel BDLISA 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.

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<sup>-4</sup> à 10<sup>-6</sup> 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, mais vraisemblablement 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.

De plus, en croisant les informations de la bibliographie des études régionales, il est possible d'attribuer une sixième classe, la Classe « Sensibilité forte-avérée » aux aquifères pour lesquels les intrusions salines sont existantes et où 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).

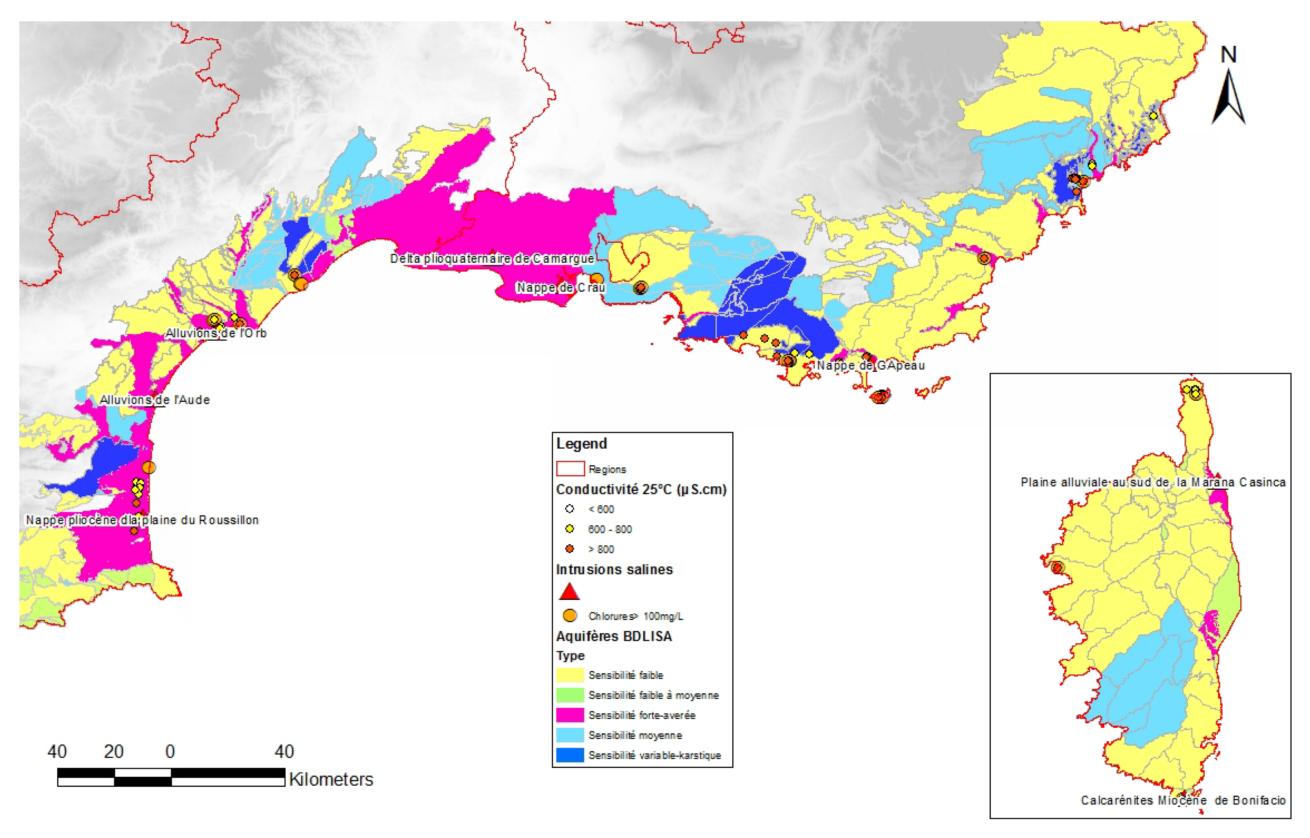


illustration 27 : Carte de vulnérabilité générale ou de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la côte méditerranéenne

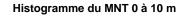
Les cartes (cf. exemple ci-dessus) rassemblent les entités des premiers ordres (prise en compte de la superposition des aquifères) ; les aquifères de surface en contact direct avec la mer classés en « sensibilité forte avérée » sont représentés au-dessus des autres entités. Ces cartes sont accompagnées d'un commentaire sur l'état des connaissances.

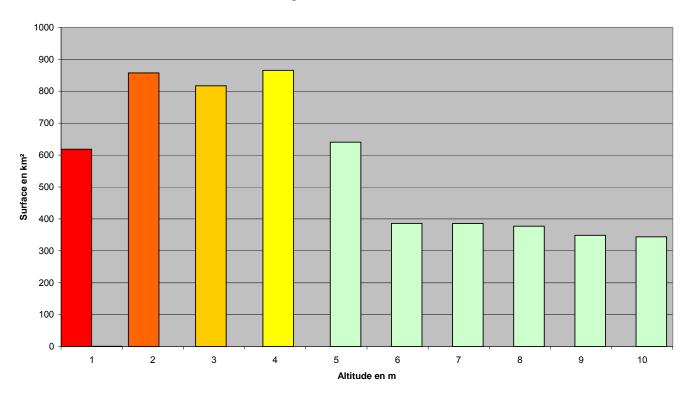
Sur ce type de carte de sensibilité des aquifères côtiers, (cf illustration 27) figurent également les ouvrages contaminés par des intrusions salines ; pour ce faire, les données de concentrations en chlorures et de conductivité électrique sont extraites de la base de données ADES. Une classification est proposée pour les conductivités électriques : > 600  $\mu$ S/cm, 600 à 800  $\mu$ S/cm et > 800  $\mu$ S/cm. La variabilité spatio-temporelle des valeurs de conductivité électrique existe au sein des différents types d'aquifères : (i) de 500 à 600 μS/cm pour les calcaires et la craie, (ii) 100 à 300 μS/cm pour les aquifères de socle et (iii) de 400 à 600 µS/cm pour les sables. Il en ressort que les valeurs inférieures à 600 µS/cm de manière générale correspondent à des aquifères dont les eaux souterraines ne sont pas à priori influencées par des contaminations naturelles et anthropiques : des valeurs comprises entre 900 et 2000 µS/cm correspondent à des eaux souterraines probablement influencées par des intrusions salines et d'autres contaminations. Les valeurs supérieures à 800 µS/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 µS/cm (pour environ 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 (®BD Alti), 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 1m, 5 m, 10 m ou 20 m. La précision de la grille, interpolée à partir de ces données diminue avec la résolution métrique verticale. (Source : BD ALTI, descriptif technique). 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 1m. 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.

Dans le cadre des travaux menés par le groupe de travail (GT) thématique Risques Côtiers du GT national « 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.





# Niveaux topographiques sur les côtes en France Métropolitaine

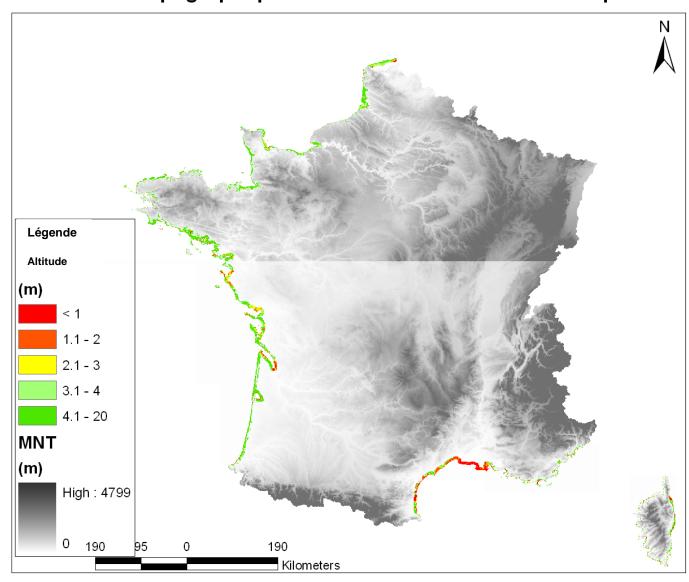


illustration 28 : Cartographie et tableau de la répartion des surfaces par altitude (0 à 1 m : risque de submersion permanente et temporaire (retour d'un événement tous les 20 ans)) pour l'ensemble des côtes de Métropole

Elévation du MNT IGN	Surface	Submersion permanente (SP) Submersion temporaire bi-décenale (ST20ans)
1m	786 km²	SP et ST
2m	993 km²	ST
3m	926 km²	ST

Illustration 29 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi-décenales
Un exemple est donné pour la plaine de Caen (Illustration 30).

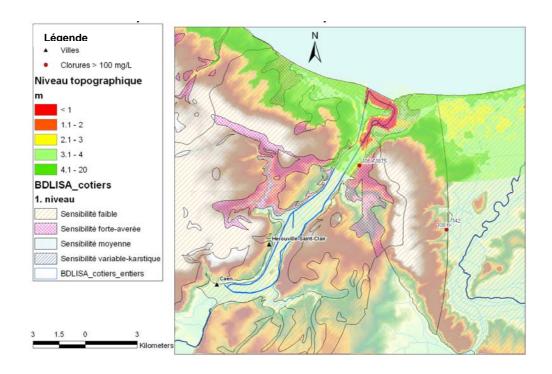


Illustration 30 : Exemple de la plaine de Caen (MNT sur 5 km)

Les zones de faibles élévations sont sensibles à l'intrusion saline si la piézométrie n'est pas affectée par un fort gradient (forte pente). S'il n'existe pas de carte piézométrique pour un aquifère sédimentaire de surface, une première hypothèse est de considérer la pente de la surface topographique. En effet, dans les zones basses, en particulier dans les grands deltas alluvionnaires, la pente de la piézométrie est en général 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.

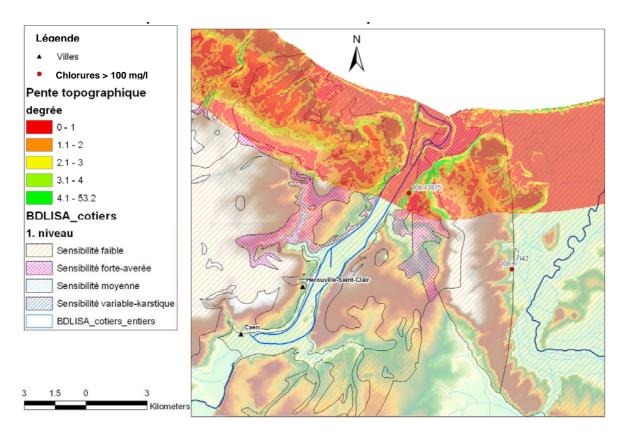


illustration 31 : Exemple de la plaine de Caen (pente sur 5km) et sensibilité des aquifères

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

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 situés 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. La densité de la population est cartographiée sur les illustrations suivantes et les villes de la taille de 10 000-50 000 habitants sont distinguées par des points rouges (Illustration 32).

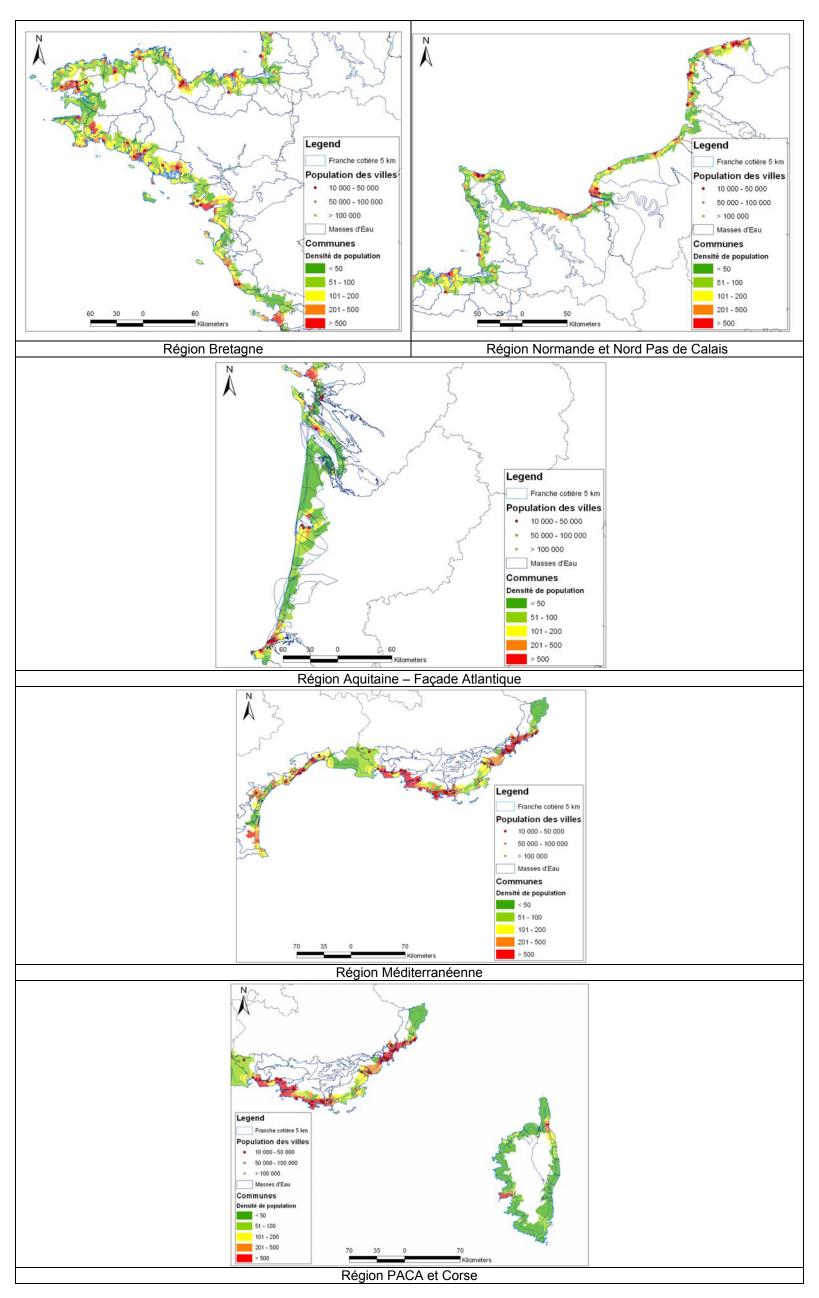


Illustration 32: Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine

L'urbanisation des côtes françaises se poursuit, la population résidente est en croissance continue notamment dans les villes de 10 000 à 50 000 habitants.

L'évolution tendancielle de la population peut être calculée par deux méthodes :

- 1) Taux de croissance annuel moyen par commune (population 1990-2007)
  - Taux de croissance variant selon la population côtière de -2,9% à +5,4% par an avec une moyenne de + 0,77%
  - → +23.5 % d'augmentation moyenne pour 2040
- 2) Taux de croissance annuel moyen par **région**, appliquée à toutes les communes côtières (taux INSEE)
  - Taux de croissance moyen (12 régions littorales) :
    - 0.59% entre 1990 2007
    - 0.45% entre 2007- 2040 \*

# → +17.5 % d'augmentation moyenne pour 2040

L'Illustration 33 cartographie les communes suivant la première méthode avec un taux d'augmentation linéaire pour la zone méditerranéenne et Atlantique. En rouge sont indiquées les communes avec une population qui serait doublée en 2040. Ces communes se concentrent surtout

- sur la côte sud-ouest de la Méditerranée (Languedoc-Roussillon)
- en région Aquitaine
- dans le sud de la Bretagne

A 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. Il est difficile d'obtenir ces données au niveau de la France, par contre l'INSEE peut fournir les capacités d'hébergement touristiques des communes par département et par année (http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?req\_id=99&ref\_id=tourisme).

Les informations suivantes peuvent être apportées, permettant de mieux estimer le besoin en eau complémentaire dans la période estivale ainsi que l'évolution (données entre 2002 et 2011) :

- a) du nombre d'emplacement camping / commune
- b) du nombre de chambre d'hôtel / commune
- c) des résidences secondaires

Pour estimer la consommation en eau, les hypothèses suivantes peuvent être appliquées (cf. projet WAT, BRGM, 2011 <a href="http://waterandterritories.eu/portail/index.php">http://waterandterritories.eu/portail/index.php</a>; SMEGREG (2005) Guide méthodologique: Analyse et réduction des consommations d'eau dans les établissements tertiaires) :

- Pour (a): 2.5 pers/emplacement, fréquentation 70% l'été, 150 l/j/pers, correspondant à 21 m3/emplacement l'été
- Pour (b): 1.5 pers/chambre/nuitée, taux remplissage de l'hôtel à 80% en été,
   ~250 l/j/pers correspondant à 24 m3/chambre l'été
- Pour (c): 2.5 pers/maison, taux de remplissage de 80 % en été, ~250 l/j/pers correspondant à 40 m3/maison l'été

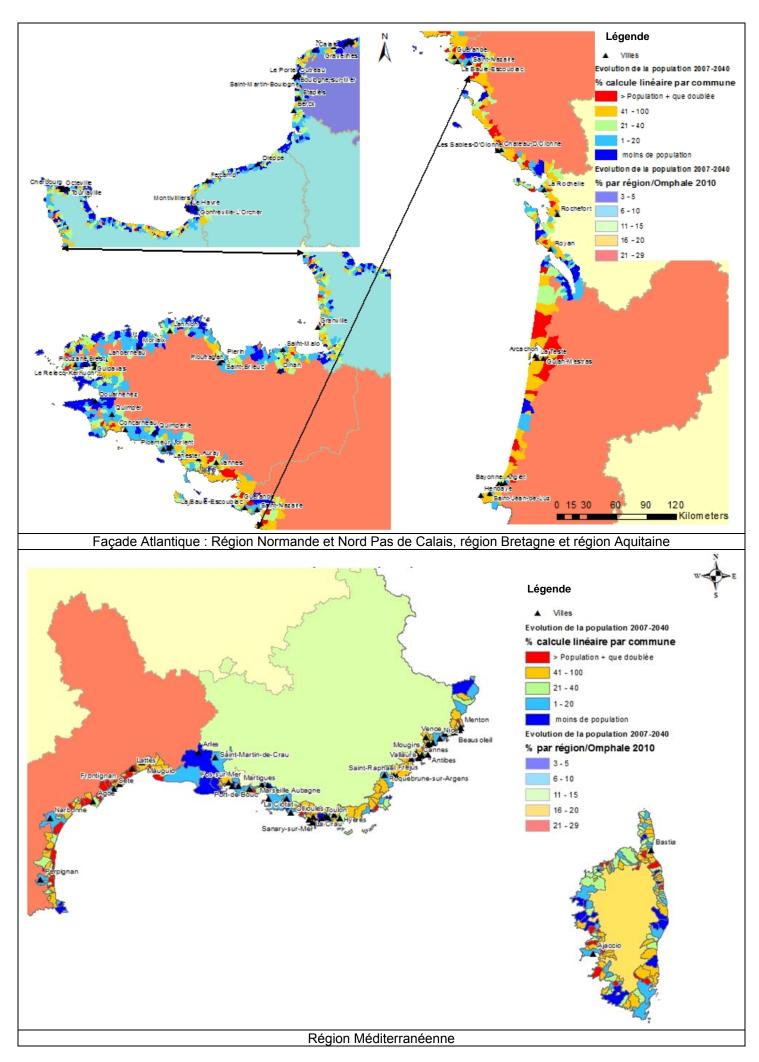


Illustration 33: Cartes des pressions anthropiques par tendance de croissance de la population sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

# Exemple pour le Languedoc-Roussillon :

Selon les hypothèses des consommations en eau prises, les résultats suivants sont obtenus :

Zone	Population 2008	Estimation Nbr Touristes	Taux touristes %	Estimation Consommation EAU10 <sup>6</sup> m3/été	
Région globale	2 581 718	957 115	37	17	
Communes côtières					
< 20 km	1 082 397	423 639	39		

En moyenne, la consommation d'eau est estimée à 7 % de la consommation totale de 104 \*10<sup>6</sup> m3/an, correspondant à 7 millions de mètres cubes pour la période estivale. Néanmoins, ce pourcentage peut être très élevé. L'Illustration 34 indique qu'une vingtaine de communes sont caractérisées par une augmentation considérable du nombre de consommateurs en eau (+30 à 70 % de consommateurs). Dans le cas de 9 communes, le nombre de consommateurs d'eau triplent en été et dans le cas de 9 autres communes le nombre de consommateurs est multipliés par 3 à 7. Ces dernières communes peuvent avoir une demande en eau potable qui est doublée ou triplée (+100 à 200%).

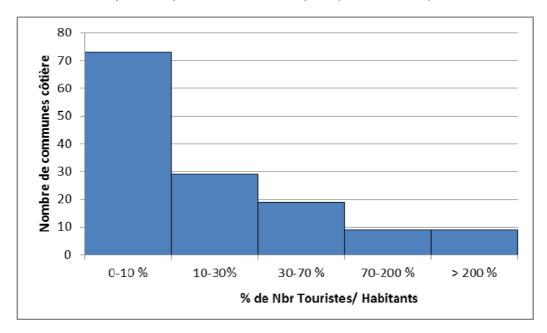


Illustration 34: Graphique du % de Touristes par nombre de communes

A la lecture de ces cartes, il est facile de constater que la pression anthropique est plus forte sur la façade méditerranéenne. Il est important de prévoir l'impact sur la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion saline en contexte naturel et de changement climatique.

Les cartes représentant les prélèvements des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie permettent d'apporter des informations plus fines sur la pression actuelle.

Les données sont extraites des bases de données des Agences de l'eau et comportent certaines spécifications suivant les bassins :

- Les données du Bassin Loire-Bretagne correspondent à la totalité des eaux souterraines de l'année 2009
- Les données des bassins Rhône-Méditerranée & Corse, Artois-Picardie et Seine-Normandie correspondent à la totalité des eaux souterraines de l'année 2008
- Les données du Bassin Adour-Garonne distinguent les nappes phréatiques des nappes profondes : seule les nappes phréatiques ont étés retenues pour cette étude (année 2008)

L'étendue des communes varie très fortement, la surface des communes dans le nord sont globalement moins étendues qu'au sud de la France. La représentation des volumes des prélèvements est plus cohérente si l'on considère un calcul de volume divisé par la surface de la commune, correspondant ainsi à une lame d'eau.

La carte des prélèvements affiche deux types de données :

- les prélèvements totaux (en m³/an) et
- des volumes supérieurs à 50 000 m³/km², correspondant à une lame d'eau de 50 mm (cf. Illustration 35).

Dans les régions plus sèches, comme sur la côte méditerranéenne, la recharge des nappes souterraines varie de 100 à 200 mm, le taux de prélèvement déclaré de 50 mm correspond ainsi à 25 à 50 % de la recharge.

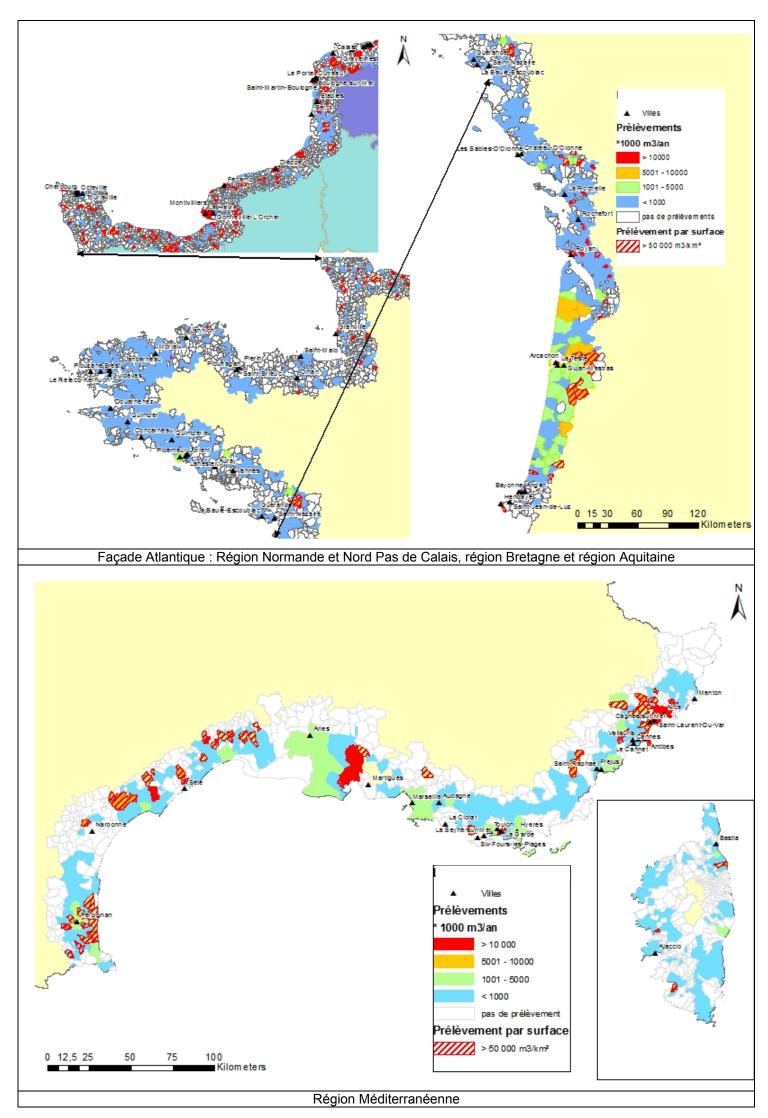


Illustration 35: Cartes des prélèvements des eaux souterraines (irrigation, AEP et industriel) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

Les cartes des prélèvements en eaux souterraines montrent des zones de pressions différentes selon les usages:

- Le besoin en eau potable par commune est particulièrement concentré autour de la méditerranée et les grandes villes comme Perpignan, Nice (Illustration 36)
- L'industrie avec un besoin important en eaux souterraines est présente sur la face atlantique comme sur la face méditerranéenne, notamment dans les zones industrielles de Marseille, de Nice, de Cherbourg et de Calais (Illustration 37)
- L'agriculture domine notamment sur les littoraux de la Somme, de l'Hérault et de la Charente-Maritime jusqu'aux Landes (Illustration 38).

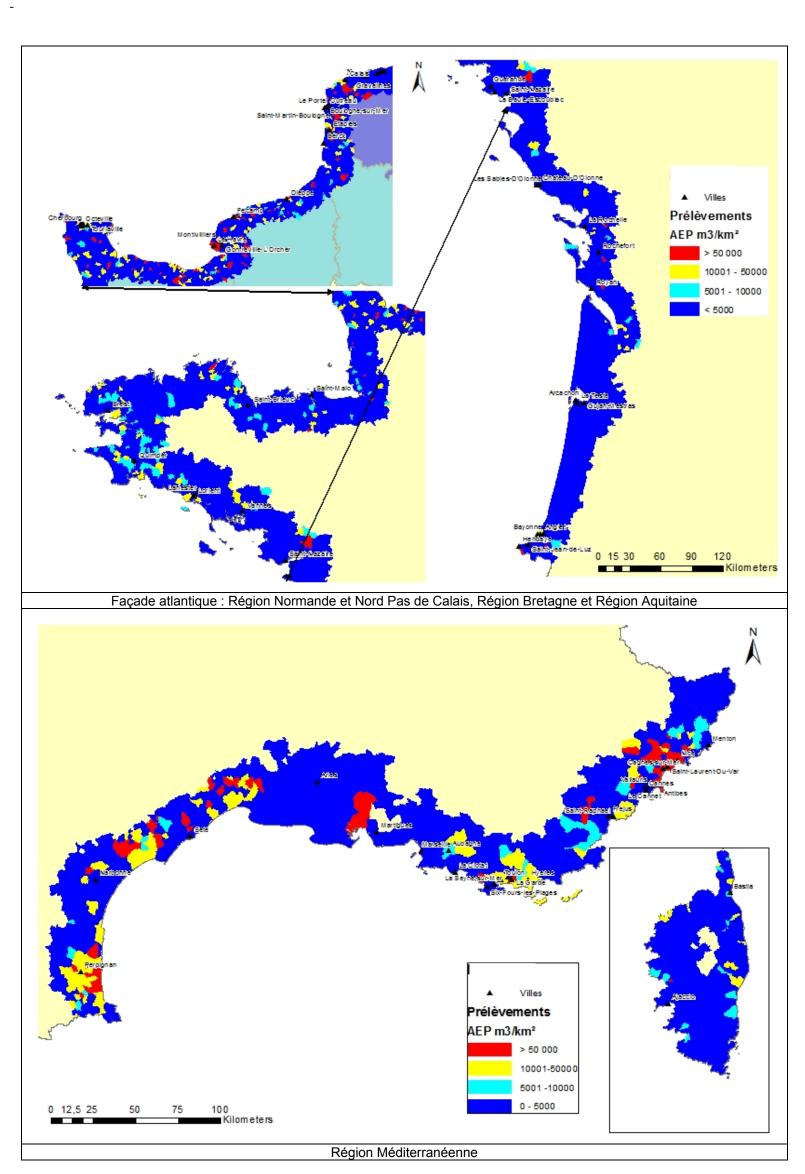


Illustration 36: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins en eau potable (AEP) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

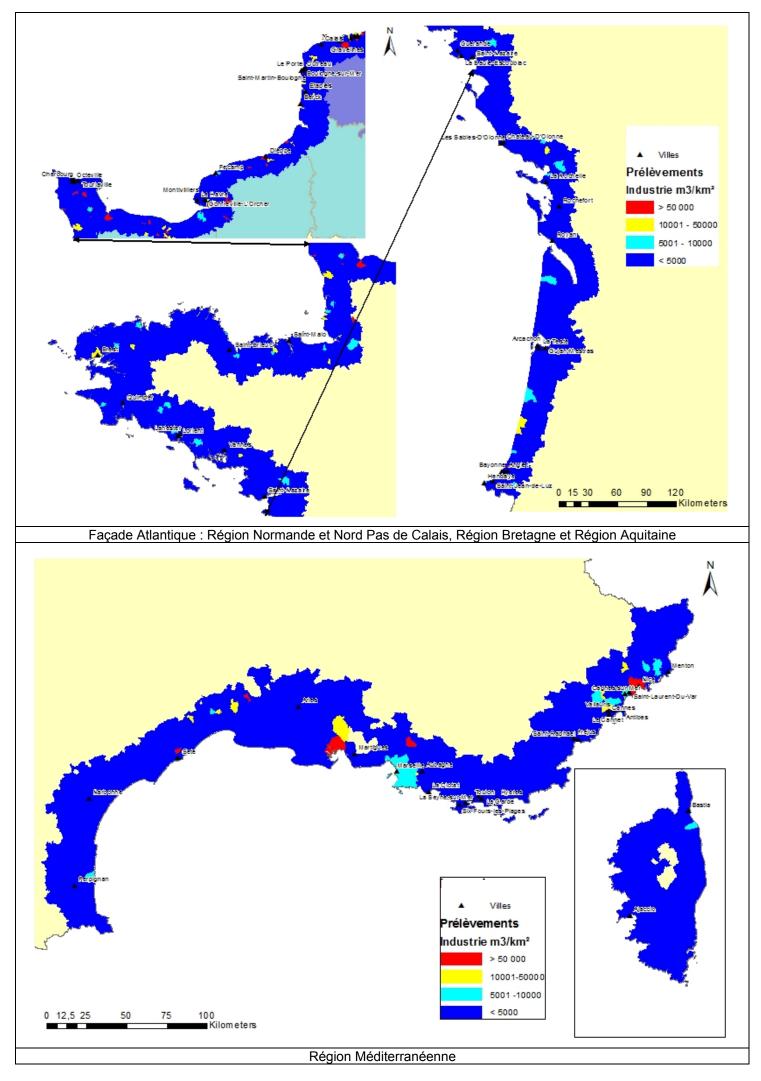


Illustration 37: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins industriels sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

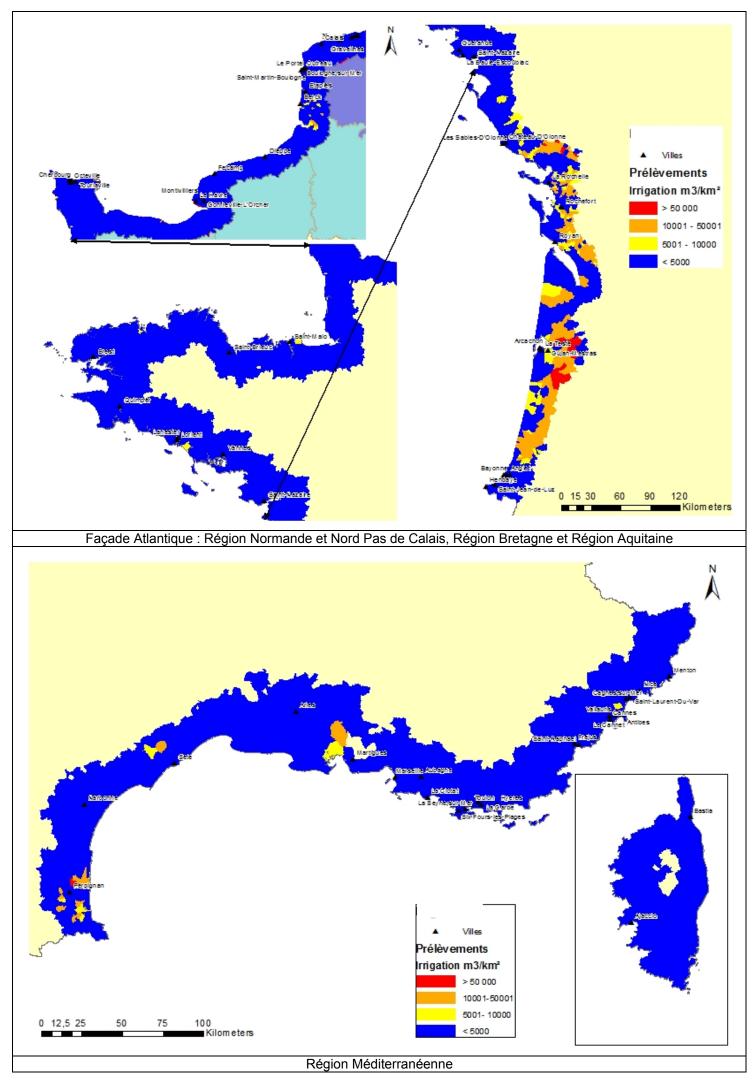
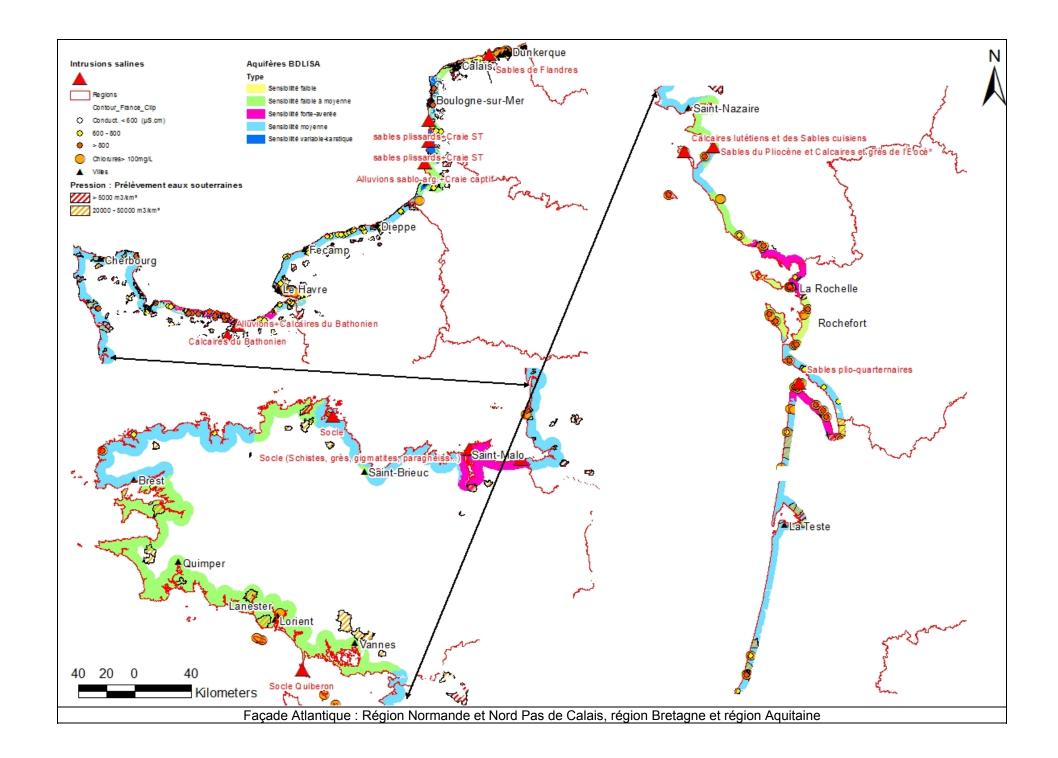


Illustration 38: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour l'irrigation sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

Ces cartes de pression globale, correspondant à la somme des prélèvements des eaux souterraines pour l'irrigation, l'industrie et l'eau potable peuvent être superposées à la carte de sensibilité des nappes et au niveau topographique inférieur à 2 m à l'échelle des côtes de la France Métropolitaine. Le résultat est la carte de vulnérabilité spécifique des nappes souterraines vis-à-vis d'une intrusion marine en contexte de surélévation de niveau marin.

Les zones les plus vulnérables suivantes sont mises en évidence au niveau des régions suivantes:

- Côte orientale de la Corse ;
- Une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ;
- La côte nord du Poitou-Charentes ;
- La côte au nord-est de la Bretagne ;
- La côte du Calvados.



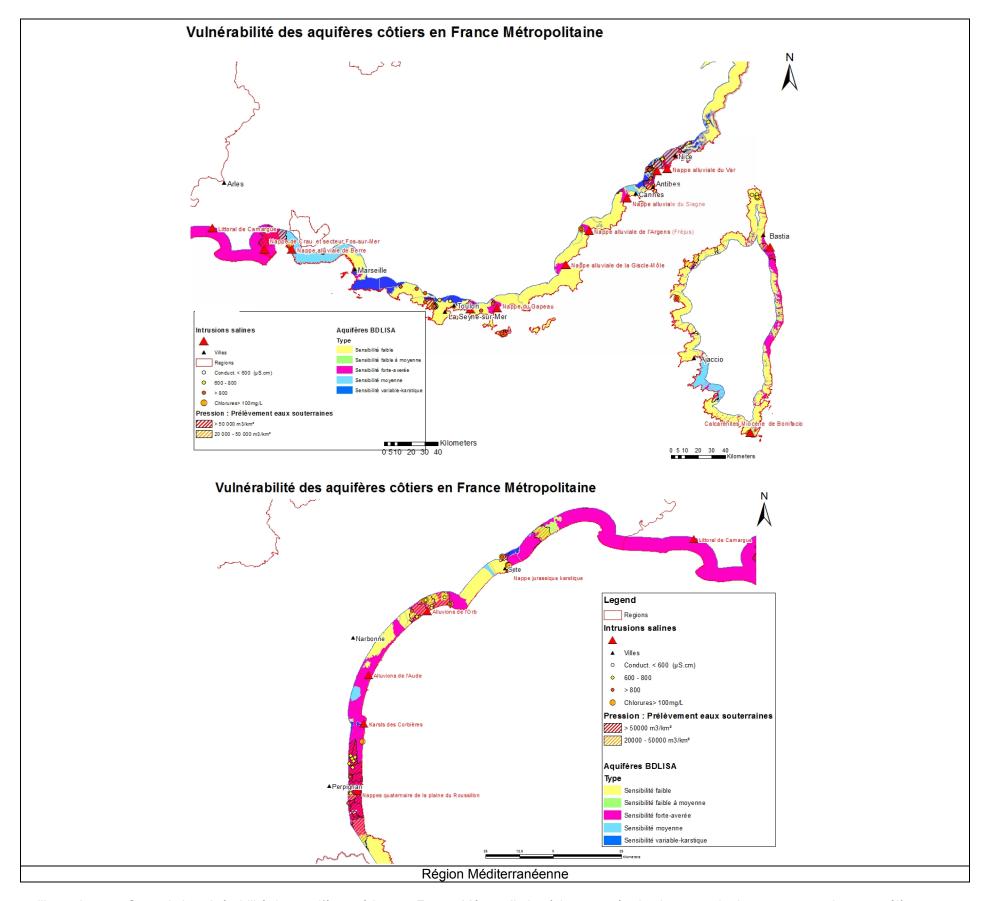


illustration 39 : Carte de la vulnérabilité des aquifères côtiers en France Métropolitaine à la remontée du niveau marin de + 2m et pression par prélèvements

# 6.1.2. Explications des cartes de sensibilité 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.

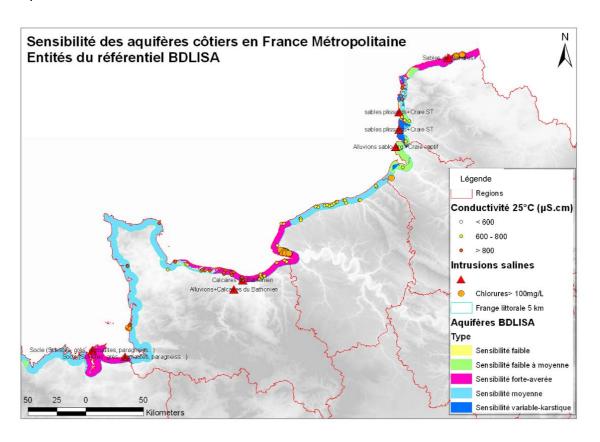


illustration 40 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la région Nord Pas de Calais et Picardie

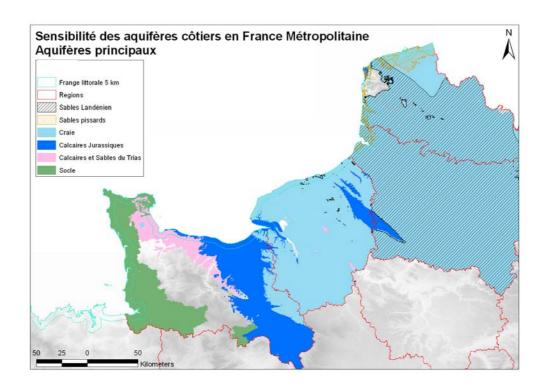


Illustration 41 : Carte des principaux aquifères – Région Nord Pas de Calais

# 1) les Craies séno-turoniennes (Illustration 41)

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 côtiers

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.

# • Etat 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 le port est de Dunkerque, les Sables flandriens superficiels sont très sensibles ; grand nombre de mesures montrent des concentrations en chlorures largement supérieures à 100 mg/L.

- Les sables plissards 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.</li>
- 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 plissards (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 apportée 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 fluviatiles 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.

## Etat 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.

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 quartenaires 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.

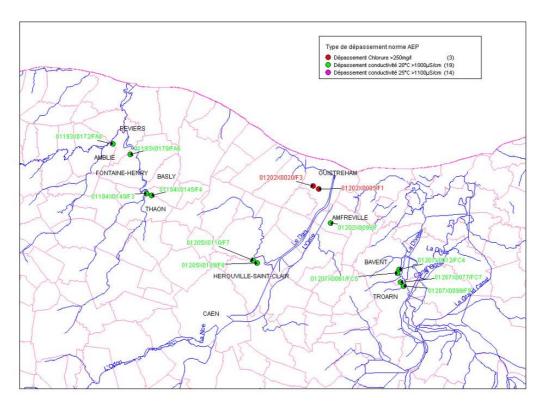


Illustration 42 : Carte de dépassement des normes de potabilité sur des captages AEP (concentrations en chlorures et en conductivité) dans la zone de Caen

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 µS/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 μS/cm).

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

Les côtes du socle du Massif Armoricain s'étendent sur environ 1900 km, ou 2900 km si on inclut tous les estuaires intérieurs.

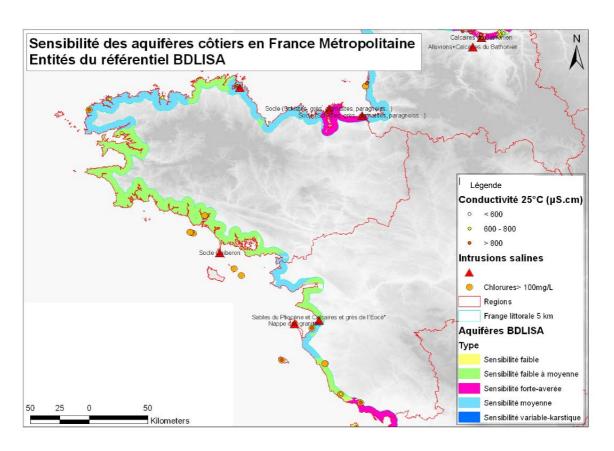


Illustration 43 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne

Le sous-sol de la Bretagne et de la partie nord des Pays-de-la-Loire est constitué par des formations indurées du Massif Armoricain. 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'Eocène 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.

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 titre d'expert le long de la côte devrait permettre de définir ces zones pour les classer en « sensibilité forte », comme les aquifères alluviaux.

# Etat 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 privilégiées, 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 St 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 Armoricain (de 408 à 40 908 μS/cm, alors qu'on trouve généralement des valeurs comprises entre 200 et 400 μS/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 iles 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.

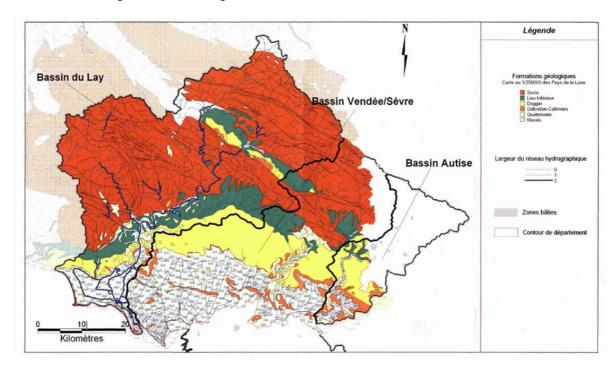


Illustration 44 : Carte géologique simplifiée, Sud de la Vendée (Extrait du Rapport BRGM/RP-55505-FR)

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'ile 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 Cénomanien à l'affleurement ou sub-affleurant qui surmonte l'unité aquifère des sables de l'Infra-Cénomanien en général captif

# • Etat des eaux souterraines et pression anthropique

En Vendée, sur l'ile 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 cuisiens 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 déformation 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'ile de Noirmoutier (Vendée), les calcaires lutétiens et des sables cuisiens superposées 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 19600 mg//L.
- Dans les sables et calcaires du Tertiaire dans la commune de Bouin (Vendée), des valeurs très élevées en Chlorures ont été enregistrées (19600 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-St-Hiliaire, 117 mg/L et Givrond (400-1300 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'Ile d'Oléron, 3 points de mesures montrent des concentrations en Chlorures élevées dans l'aquifère des sables, grès, argiles et calcaires du Cénomanien
- 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 salée se situerait à 25 km au large (étude menée dans le cadre du SAGE Nappe Profonde de Gironde).

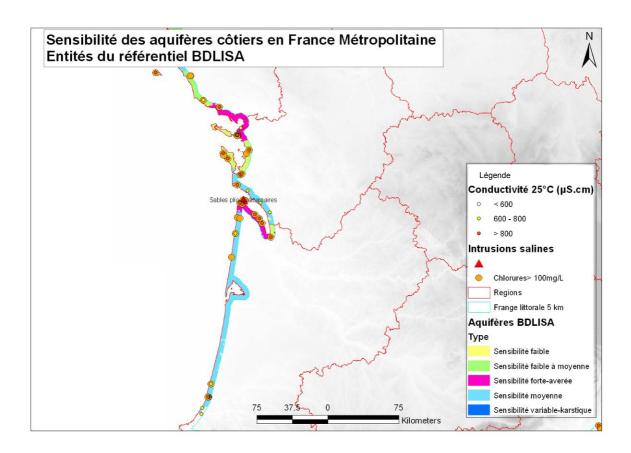


illustration 45 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine

# • Etat 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'Eocène 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 forteavérée ».

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'ile 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 inexistants. 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'Eocène est caractérisé par des concentrations en chlorures de 100 à 3000 mg/L.
- Au nord de Biarritz, dans les sables plio-quartenaires 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 2300 μS/cm).

#### 6.2. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE A L'ECHELLE REGIONALE

La démarche régionale peut être schématisée comme suit :

Extraction de la BDLISA et cartographie de la bande du littoral sur 5km des aquifères côtiers

⇒ Classification de sensibilité vis-àvis de l'intrusion saline actuelle
⇒ Cartographie des données nonctuelles de salinité

Cartographie à l'échelle régionale de la vulnérabilité des aquifères côtiers (frange littorale) vis-à-vis de l'impact d'une remontée du niveau marin sur l'intrusion saline

llustration 46 : Schéma de la démarche de cartographie régionale 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

#### 6.2.1. Des tests de la méthode GALDIT

Sept zones ont été choisies en France, connues pour être impactées par des intrusions salines et qui disposent d'un minimum de données nécessaires aux calculs de la vulnérabilité GALDIT :

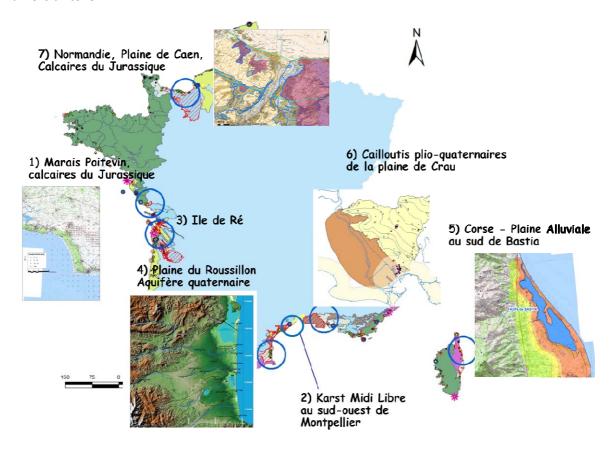


illustration 47 : Carte des sept secteurs pour lesquels une cartographie de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT a été réalisée

- 1) Dans le **Marais Poitevin**, l'aquifère des calcaires karstifiés du Dogger présente des concentrations en chlorures élevées dans la partie captive. Une campagne de terrain de 2011 a montré que les concentrations chlorures sont peu élevées dans la partie libre. Cette zone dispose d'un modèle hydrodynamique.
- 2) Karst Midi Libre au Sud-Ouest de Montpellier, l'aquifère des calcaires jurassique du pli ouest de Montpellier est connu pour être influencé par l'eau de la mer dans des puits de pompages.
- 3) L'île de Ré, a été choisie pour tester la méthodologie GALDIT sur une île. L'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger couvrent pratiquement toute l'île. Cette zone est caractérisée par une surface importante de faible altitude et ainsi une piézométrie avec une pente a priori très faible.
- 4) Les **sédiments quaternaires de la plaine de Roussillon** qui forment des aquifères qui sont d'une manière générale libres ou très légèrement captifs et localement impactés par

des intrusions salines. Cette zone dispose d'un grand nombre de données grâce à des campagnes de mesures de terrain et une modélisation des ressources en eau.

- 5) **Corse Plaine Alluviale au sud de Bastia**, une remontée du biseau salé au droit des ouvrages de captage est connue et de plus une modélisation hydrodynamique existe sur cette zone. Cette zone est également sensible d'un point de vue environnemental car l'étang de Biguglia constitue la plus importante zone humide de Corse.
- 6) Cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau : cette zone est complexe, du fait de l'existence d'un système multicouches captif en aval, libre en amont et en relation avec l'eau de surface du delta du Rhône, qui est lui-même influencé par la mer.
- 7) **Normandie, Plaine de Caen** avec les calcaires du Jurassique : aquifère en contact avec des eaux salés vers l'intérieur des terres par la baie de Caen.

Les poids définis par la méthode GALDIT influencent fortement les résultats de vulnérabilité ; une analyse de sensibilité est décrite au paragraphe 6.2.2.:

- La distance de la côte et le niveau piézométrique jouent un rôle prépondérant, car chaque indice est multiplié par 4, responsables de plus de la moitié du poids de la vulnérabilité (8/15). Les deux paramètres ont en général une répartition comparable : les rangs sont les plus élevés à proximité de la côte et diminuent vers l'intérieur des terres. Les zones pour lesquelles le niveau et le gradient piézométrique sont faibles, se maintiennent à un rang élevé à l'intérieur des terres. Cela a été démontré dans les zones tests de l'Île de Ré et de la Corse, le long des deltas et plaines. La différentiation de vulnérabilité se fait ainsi principalement selon ces deux paramètres.
- La distance de la côte a été calculée avec les outils SIG suivant un trait simplifié du trait de côte. Dans le cas des zones de lagunes et de baies, le trait de côte Histolitt a été utilisé en complément du trait de côte simplifié (source : © IGN-SHOM 2007 www.ign.fr et www.shom.fr).
- La conductivité joue également un rôle moyen à fort avec un indice multiplié par 3 et une conductivité qui est dans la plupart des cas forte ou moyenne.
- L'épaisseur de l'aquifère joue un rôle plus faible, le poids de l'indice est de 2, malgré un rang élevé, lié une épaisseur de plus de 10 m pour la plupart des zones tests.
- L'impact de l'intrusion saline est connu dans la plupart des exemples par les concentrations en chlorures ou des forts taux de conductivité. Pour les zones tests de l'Ile de Ré et de la Corse, les concentrations enregistrées ne montrent pas d'intrusion. Le poids de ce paramètre est seulement de 1. Si une zone d'intrusion saline est à une distance supérieure de 500 m de la côte, la vulnérabilité peut atteindre une classe moyenne (mais pas forte, malgré l'intrusion saline). Dans la méthodologie GALDIT, le poids faible de ce paramètre est le plus discutable, car une zone impactée par l'intrusion saline devrait atteindre la vulnérabilité la plus forte.
- Le type d'aquifère, en général captif ou libre dans les zones tests, joue un rôle faible par son poids de 1. Effectivement, la vulnérabilité finale devrait être peu influencée par ce paramètre.

Les rangs des paramètres des 7 zones d'études figurent dans le tableau ci-dessous (illustration 48).

Zone	Poids	Roussillon	Corse	Marais Poitevin	Midi/Libre Montpellier	lle de Ré	Nappe de Crau	Plaine de Rouen
G : Type d'aquifère	1	//////7,5///	///////10	//////7,5/10	///////////////////////////////////////	//////7,5/10	//////7,5/10	////5/7,5/10
A : cond. Hydr. (m/j)	3	//////7,5/10	///////10	2,5///7,5/10	//////// //10	////5/7,5///	////////10	2,5///7,5///
L : Haut. Nappe	4	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10
D : Distance côte	2	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5/7,5/10
I : Impact intrusion	1	2,5//////10	2,5///7,5/10	2,5/5/7,5/10	2,5/5///////	2,5//////10	2,5/5/7,5/10	//////7,5///
T : Epaisseur aquif.	2	2,5//////10	///////10	///////10	///////10	///////10	///////10	///////10
GALDIT		3,83/9,66	5,16/10	3,83/9,5	4,16/8,5	5,2/10	5,3/9,8	3,6-8,6
GALDIT + 1m		3,83/9,66	4,3/10				5,3/9,8	
GALDIT + 2m		3,83/9,66	4,3/10		4,8/9,2	4,5/9,3	5,3/9,8	

illustration 48 : Rang des paramètres des 7 zones tests.

La nappe de Crau est caractérisée par une zone captive à proximité de la côte. Cette zone est considérée comme vulnérable. Le changement du poids du paramètre G (type d'aquifère) a été testé en multipliant l'indice par 3.Le résultat se caractérise par une étendue plus importante vers le nord de la zone de forte vulnérabilité (cf. Illustration 49).

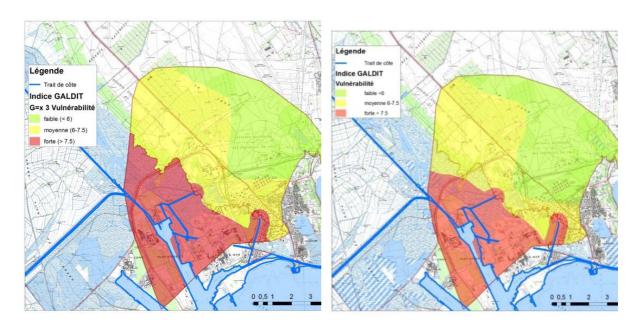


Illustration 49 : Comparaison de la vulnérabilité GALDIT suivant le poids du type d'aquifère (G).

Les calculs des vulnérabilités ont été réalisés pour 3 situations :

- Le niveau actuel de la mer
- Une augmentation du niveau de la mer de +1 m
- Une augmentation du niveau de la mer de +2 m.

Le trait de la côte suivant l'augmentation du niveau de la mer a été calculée à partir des isolignes du niveau altimétrique. Deux grilles des niveaux altimétriques de l'IGN ( taille de maille de 50x50 m et maille de 25\*25m) servent à recalculer cette ligne de côte en général. La précision du MNT 25X25 m est considérée comme meilleure par rapport à la résolution (au « pas ») verticale de la topographie (d'1 m), ces données ont pu être comparées localement. Suivant le MNT choisi, le retrait du trait de la côte varie.

Les cartes des côtes avec une augmentation du niveau de mer de +0,6m ne peuvent être réalisées avec les deux bases de données disponibles à cause de la résolution du MNT non adaptée.

Certaines zones tests ne permettent pas le calcul de vulnérabilité pour une augmentation de la mer de +1 m et +2 m. Pour une augmentation du niveau de la mer, les isolignes de 1 m et de 2 m sont très proches de la côte actuelle, avec des zones submergées de très faible extension, comme c'est le cas pour le marais Poitevin. Toutefois dans le marais, des zones actuellement entre 1 et 2 mètres seraient sous le niveau de la mer en cas d'une augmentation de niveau. Elles pourraient être vulnérables en cas de forts pompages dans des aquifères connectés hydrauliquement avec les zones plus proches de la mer, notamment dans le Marais Poitevin. La méthodologie GALDIT ne permet pas de prendre en compte ces zones, car elles sont éloignées de plus de 1000 m de la côte.

Au sud de Montpellier, le niveau altimétrique de l'IGN indique des valeurs comprises entre 0 et 2 mètres qui ne sont pas cohérentes avec le trait de la côte. En effet, les tests dans cette zone réalisés avec les données LIDAR indiquent des isolignes plus cohérentes, néanmoins ces données ne sont pas disponibles actuellement au niveau de la France.

La zone de test de l'île de Ré située en Charente, est caractérisée par des zones d'altitudes faibles. Dans les îles, la piézométrie peut être considérée comme proche de la surface. La vulnérabilité est ainsi très forte dans la moitié de l'île.

Deux zones tests, la Zone Midi Libre de l'aquifère des Calcaires Jurassiques du pli au sudouest de Montpellier et l'aquifère des alluvions de la plaine de Marana-Casinca, Corse montrent le poids trop élevé des paramètres "épaisseur", et "perméabilité", quand ils atteignent le rang le plus élevé. Avec le classement initial de GALDIT, toutes les zones éloignées de la mer de plus de 500 m seraient notées en tant que zone de "vulnérabilité" moyenne. En effet, l'indice de GALDIT est de :

Indice GALDIT= (**G** + **A**\*3 + **L** \*4 + **D**\*4 + **I** + **T**\*2)/15. Si A (perméabilité) et T (épaisseur) sont à 10 et D à 5 (distance à la côte>500m), l'indice de GALDIT sera toujours supérieur à 5.6, soit une classe de vulnérabilité moyenne.

En conséquence, il a été décidé d'appliquer un seuil de classe d'une valeur de 6 entre la vulnérabilité faible et moyenne, afin de pouvoir distinguer trois niveaux de vulnérabilité dans toutes les zones tests avec les valeurs suivants :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT			
Vulnérabilité forte	> 7.5			
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5			
Vulnérabilité faible	< 6			
3 classes initiales Galdit	Classement ajusté			
Légende Trait de cote GALDIT Vulorabilité faible Vulnérabilité forte  0.05 1 2 3 4 m	Légende Indice GALDIT Vuinérabilité tablie 48 moyene 6-7.5 forte 7-7.5  0.05.1 2 3 4 m			

Illustration 50 : Comparaison de la vulnérabilité GALDIT initiale et avec un nouveau classement ajusté.

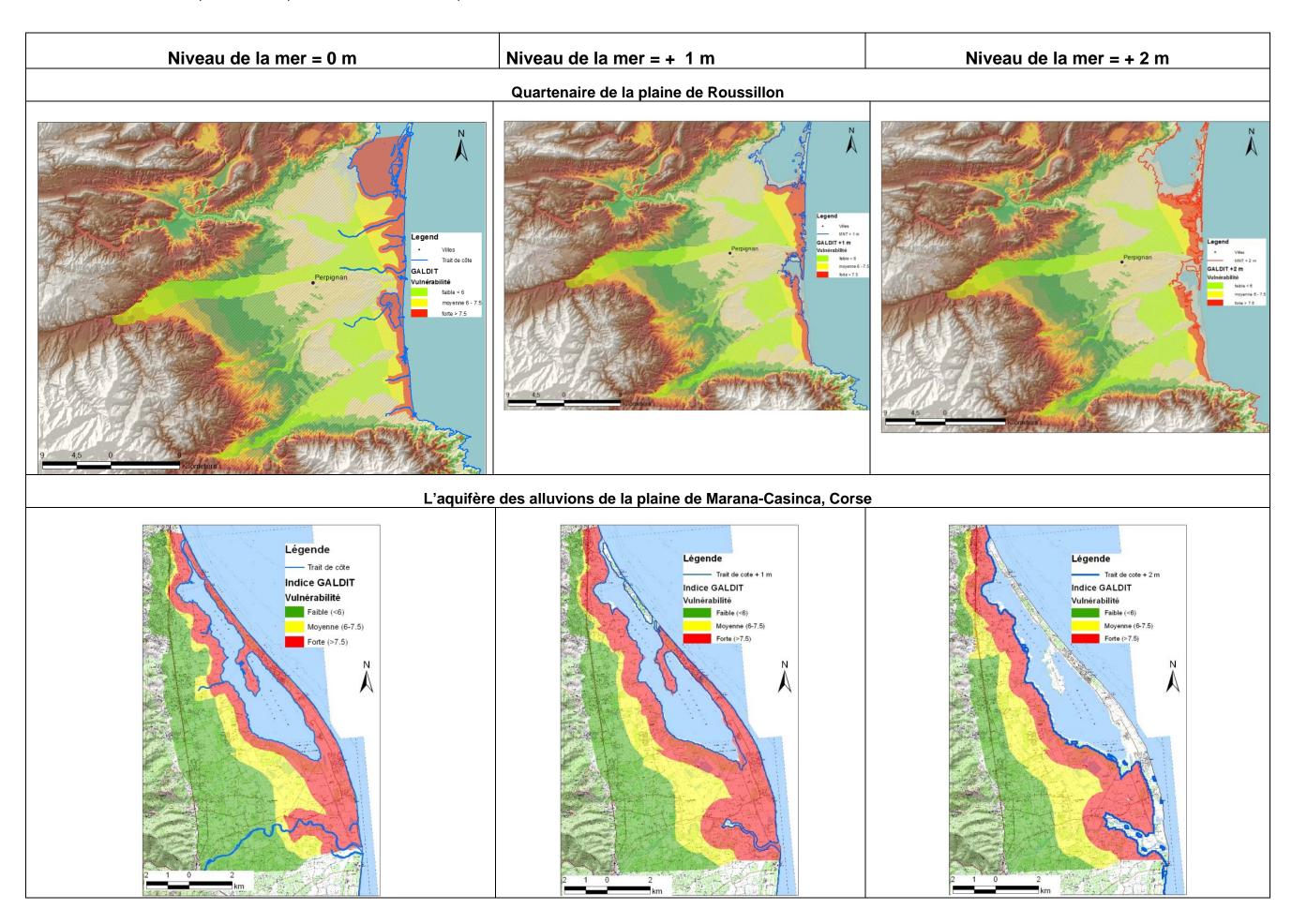
#### Importance de la qualité des données :

Cette méthode GALDIT demande de disposer de données suffisantes pour caractériser les différents paramètres à une échelle régionale voire locale. Un élément décisif est le paramètre de hauteur de la nappe, déduit à partir des cartes piézométriques. Actuellement, il n'existe pas de carte piézométrique à l'échelle de la côte française. Sur certaines zones tests, des approches statistiques ont tenté de remplacer la cartographie piézométrique, engendrant certaines incertitudes voire des erreurs. De plus, la plupart des cartes piézométriques, quand elles existent, ne sont pas cartographiées au pas de 0.5 m, ce qui est demandé pour la méthode GALDIT ; des isolignes approximatives ont dû être tracées.

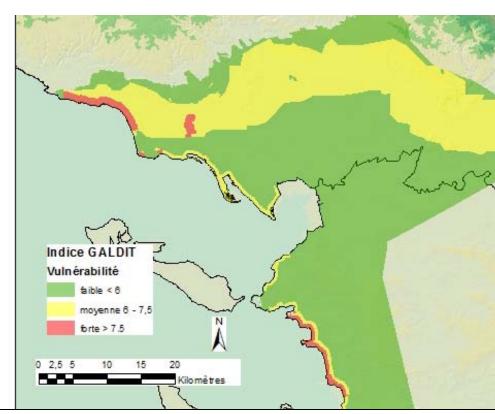
Le paramètre de la connaissance de l'intrusion saline est également un point sensible : même pour les zones connues comme étant affectées par des intrusions salines, des mesures de concentrations en chlorures ou des mesures de terrain de la conductivité ne sont pas disponibles. Même s'il existe des concentrations en chlorures sur un grand nombre de points, la densité des points n'est en général pas assez bonne pour bien délimiter les zones impactées.

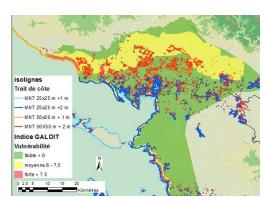
Les cartes de vulnérabilité pour les différents scénarios de remontée de niveau marin pour les 7 zones sont présentées ci-après.

Les données détaillées des cartes des différents paramètres pour les 7 secteurs sont en Annexe 4.

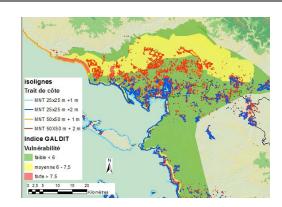


## Calcaires karstifiés du Dogger dans le marais poitevin



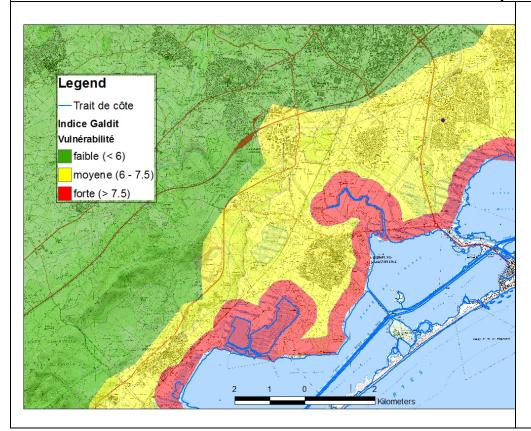


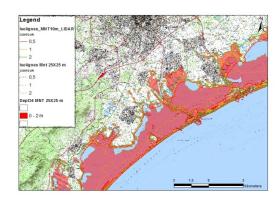
NON CALCULE CAR TRES FAIBLE DE DIFFERENCE SUR LA CÔTE



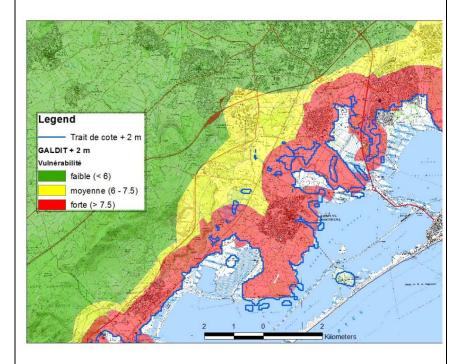
NON CALCULE CAR TRES FAIBLE DE DIFFERENCE SUR LA CÔTE

## Zone Midi Libre de l'aquifère des Calcaires Jurassiques du pli au sud-ouest de Montpellier





NON CALCULE CAR TRES FAIBLE DE DIFFERENCE SUR LA CÔTE



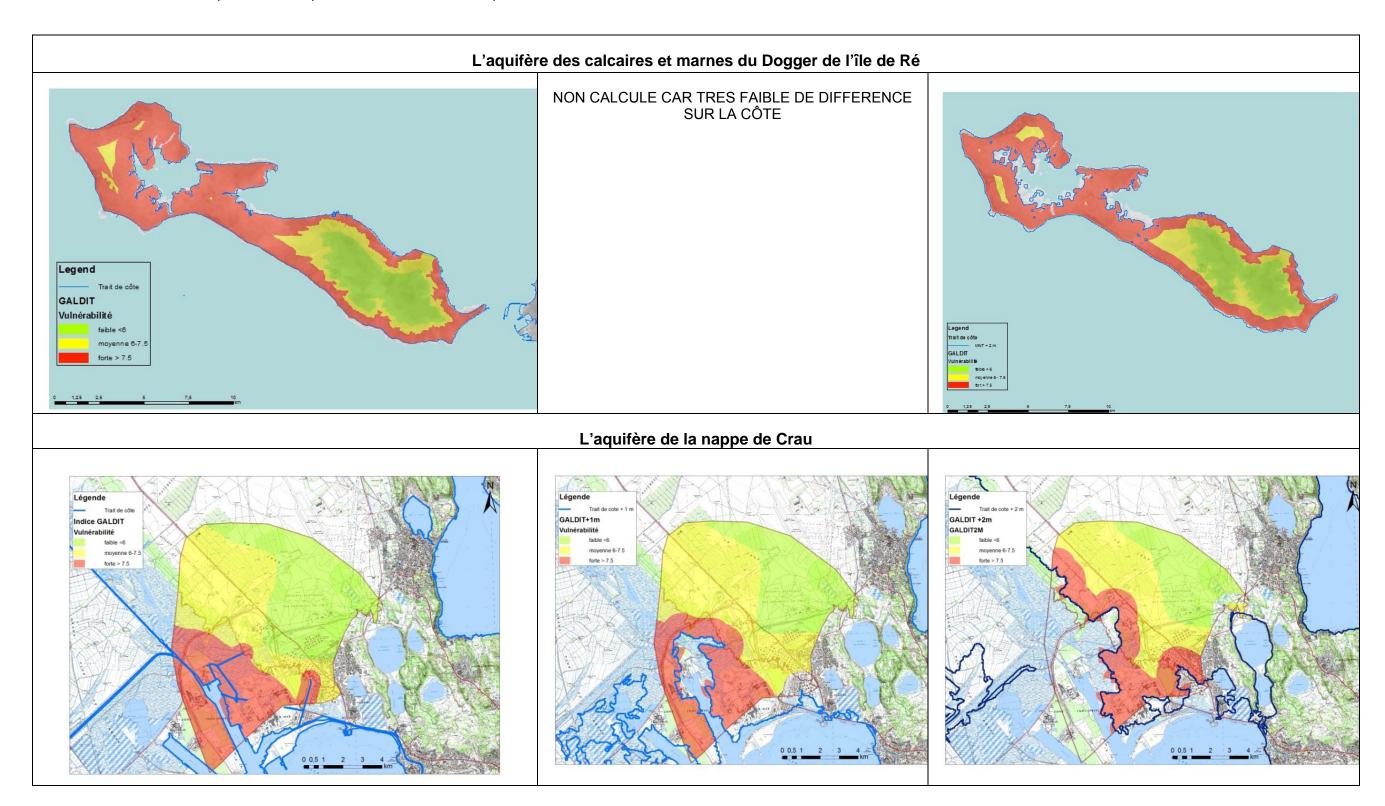


illustration 51 : Cartes de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour l'actuel et pour des scénarios de remontée du niveau marin pour les 7 secteurs identifiés

## 6.2.2. Analyse de la sensibilité des différents paramètres de la méthode GALDIT

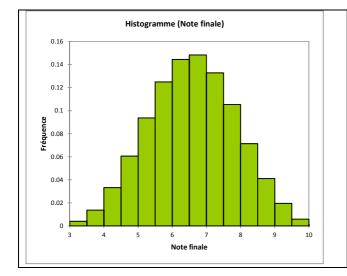
## Etude de l'impact de G:

Le type de nappe fait partie des critères sur lesquels le décideur ou l'opérateur de la méthode GALDIT n'a aucune possibilité d'action.

La conductivité hydraulique peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Dans les cas les plus courants, c'est-à-dire nappe libre ou nappe captive, la notation minimale est de 7.5 (notation 7.5 ou 10; pondération 1 pour G), cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.5. Une différence de la note de G de 2,5 (7,5 à 10) entraine une différence maximale de 0,16 (2,5/15) sur la note de vulnérabilité.

Une note de 10 pour le type de nappe implique une notation minimale de 3 (1 x 10 + 3 x 2,5 + 4 x 2,5 + 4 x 2,5 + 2 x 2,5)/15. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour la notation du type de nappe (Illustration 52). Il n'existe que 114 combinaisons pour lesquelles une note de 10 pour le type de nappe permet une note finale de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. A l'inverse, 250 combinaisons aboutissent à une note finale de la vulnérabilité supérieure à 7,5. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons se situe entre 6,5 et 7.

Même avec un facteur de pondération qui n'est que de 1, le type de nappe a un effet sur la note finale qui est non négligeable. Une note importante (10 par exemple) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (3) et les probabilités de ne pas être classées en vulnérabilité moyenne sont réduites (114 combinaisons sur 1024 possibles). L'impact est d'autant plus important que les notes faibles restent rares, de manière générale, les notes pour le paramètre G sont 7,5 ou 10 (nappe libre ou nappe captive).



Borne	Borne		
inférieure	supérieure	Effectif	Fréquence
3	3.5	4	0%
3.5	4	14	1%
4	4.5	34	3%
4.5	5	62	6%
5	5.5	96	9%
5.5	6	128	13%
6	6.5	148	14%
6.5	7	152	15%
7	7.5	136	13%
7.5	8	108	11%
8	8.5	73	7%
8.5	9	42	4%
9	9.5	20	2%
9.5	10	6	1%
10	10.5	1	0%

Illustration 52 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre G

## Etude de l'impact de A:

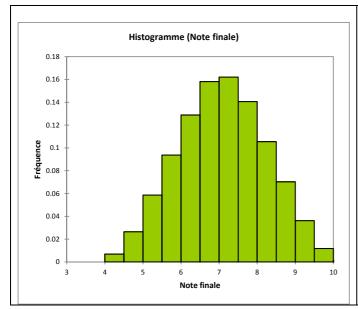
La conductivité hydraulique de l'aquifère fait partie des critères sur lesquels les décideurs n'ont aucune possibilité d'action.

La conductivité hydraulique peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Sa pondération étant de 3, cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.5 ((2.5x3)/15)) et un impact maximal de 2.0 ((10x3)/15)). La sensibilité de la conductivité sur la classification finale est de 0.5 ((2.5x3)/15)).

Une note de 10 pour la conductivité hydraulique implique une notation minimale de 4.0 (1 x 2,5 + 3x10 + 4 x 2,5 + 4 x 2,5 + 1 x 2,5 + 2 x 2,5) / 15. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour la notation de la conductivité hydraulique (Illustration 53). Il existe 34 combinaisons pour lesquelles une note de 10 pour la conductivité hydraulique permet une note finale dans le calcul de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. En revanche, 374 combinaisons permettent une note finale dans le calcul de la vulnérabilité supérieure à 7,5 avec une note de 10 pour la conductivité hydraulique. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons se situe entre 7 et 7,5, c'est-à-dire à la limite de la classe "vulnérabilité forte".

Avec un facteur de pondération de 3, la conductivité hydraulique a un impact fort sur le résultat final. Une note importante (10 par exemple) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (4.0) et les probabilités de ne pas être classée en vulnérabilité moyenne sont très réduites (34 combinaisons sur 1024 possibles).

L'impact de A est important dans le sens où des valeurs élevées pour le paramètre A ne sont pas rares. En effet, de nombreuses zones karstiques et même des zones alluvionnaire reçoivent des notes de 10 (conductivité >40 m/j).



Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence
4	4.5	7	1%
4.5	5	27	3%
5	5.5	60	6%
5.5	6	96	9%
6	6.5	132	13%
6.5	7	162	16%
7	7.5	166	16%
7.5	8	144	14%
8	8.5	108	11%
8.5	9	72	7%
9	9.5	37	4%
9.5	10	12	1%
10	10.5	1	0%

Illustration 53 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre A

## Etude de l'impact de L:

Le niveau piézométrique est l'un des critères sur lesquels les décideurs ont une possibilité d'action, s'il est influencé. En effet, il est possible d'autoriser ou non l'exploitation d'un forage d'eau qui luimême agit la piézométrie. Le paramètre L est probablement celui qui est le plus sensible du point de vue des décideurs.

Le niveau piézométrique peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Sa pondération étant de 4, cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.67 ((2.5x4)/15)) et un impact maximal de 2.67 ((10x4)/15)). La sensibilité du niveau piézométrique sur la classification finale est de 0.67 ((2.5x4)/15)).

Une note de 10 pour la piézométrie implique une notation minimale de 4,5 (1 x 2,5 + 3 x 2,5 + 4 x 10 + 4 x 2,5 + 1 x 2,5 + 2 x 2,5)/ 15 , ce qui est très proche de la valeur seuil de la classe de "vulnérabilité moyenne". Cela est d'autant plus vrai que le paramètre G prend généralement une valeur de 7,5 ou 10. Si la valeur pour le paramètre G est 10 alors la note finale devient 4,83. Un aquifère captif ayant une piézométrie peu élevée a de très forts risques d'être classé en "vulnérabilité moyenne" selon la méthode GALDIT. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour la notation de la hauteur d'eau (Illustration 54). Il n'existe que 7 combinaisons pour lesquelles une note de 10 pour la piézométrie permet une note finale dans le calcul de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. En revanche, 451 combinaisons permettent une note finale de la vulnérabilité supérieure à 7,5 avec une note de 10. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons reste néanmoins entre 7 et 7,5, c'est-à-dire avant la classe de "vulnérabilité forte".

La pondération de 4 pour le niveau piézométrique lui donne un impact fort sur la note finale. Une note importante (10 par exemple) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (4,5), soit presque à la limite de la valeur seuil de la classe de "vulnérabilité moyenne". En considérant une note de 10 pour la piézométrie, la probabilité de ne pas être classée en "vulnérabilité moyenne" est très réduite, en effet il n'existe que 7 combinaisons pour ne pas être au moins en "vulnérabilité moyenne".

La piézométrie pose généralement des problèmes d'intégration temporelle des données. La méthode GALDIT définit des seuils pour les niveaux piézométriques mais l'utilisateur n'a pas toujours à disposition une carte piézométrique. Il peut alors utiliser des chroniques piézométriques représentatives de la nappe étudiée. Il lui faudra attribuer une valeur pour chaque chronique et le mode d'intégration des données reste à définir. Plusieurs méthodes sont possibles : moyenne, plus bas niveau, niveau de l'année en cours. Le choix du mode d'intégration de la donnée peut faire varier la note d'une voire deux classes. En effet, la différence des classes des niveaux piézométriques est très restreinte (2,5 m entre la première et la dernière classe). Cela a donc un impact fort sur la note finale.

Ce fort impact de L est compréhensible, car c'est le paramètre sur lequel les décideurs ont le plus de moyen d'action. Il faut qu'il soit le plus précis possible. La construction de l'indicateur et le poids accordé au paramètre L font qu'il n'est quasi pas possible que le résultat ne corresponde pas à

-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Disponible sur ADES

une vulnérabilité moyenne avec une note de 10. Cela revient à ce que le niveau de la nappe ne soit pas inférieur à 1m, quelque soient les valeurs des autres critères.

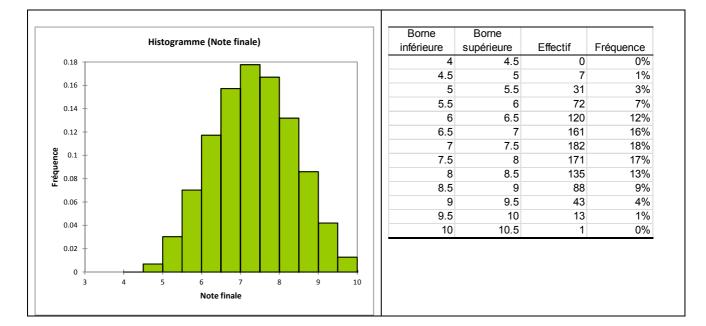


Illustration 54 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre L

## Analyse de l'impact de D:

La distance à la côte est l'un des critères sur lesquels les décideurs ont une possibilité d'action. En effet, il est possible, par l'installation ou le maintien de digue de « contrôler » la distance à la côte. Néanmoins, les possibilités d'action sont limitées à une frange d'environ 2000 m par rapport à la ligne de côte, à partir de cette distance toutes les aquifères obtiennent la même note pour le modèle (2,5). Des modifications du trait de côte sur des distances de l'ordre du kilomètre sont des événements rares. De plus certaines aquifères touchent la mer sous le trait de côte proprement dit, parfois plusieurs dizaines de mètres sous le niveau de la mer. Des travaux importants en surface pour modifier le trait de côte peuvent n'avoir aucune influence sur l'aquifère (Dans le même ordre d'idée, la modification du trait de côte par la montée de la mer peut être sans influence sur ce type d'aquifère.)

La distance à la côte peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Sa pondération étant de 4, cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.67 ((2.5x4)/15)) et un impact maximal de 2.67 ((10x4)/15)). La sensibilité de la distance à la côte sur la classification finale est de 0.67 ((2.5x4)/15)).

Une note de 10 pour la distance à la côte implique une notation minimale de 4.5 (1 x 2.5 + 3 x 2.5 + 4 x 10 + 4 x 2.5 + 1 x 2.5 + 2 x 2.5)/15. Comme pour L, la notation minimale pour D est proche de la valeur seuil de la classe de "vulnérabilité moyenne". Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour la notation de la distance à la côte (Illustration 55). Comme pour le paramètre L, il n'existe que 7 combinaisons pour lesquelles une note de 10 permet une note finale dans le calcul de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. A

l'inverse, il existe 451 combinaisons pour lesquelles une note de 10 dans la distance à la côte permet une note finale dans le calcul de la vulnérabilité supérieure à 7,5. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons reste néanmoins entre 7 et 7,5, c'est-à-dire avant la classe de "vulnérabilité forte".

La pondération de 4 pour la distance à la côte lui donne un impact fort sur la note finale. Une note importante (10 par exemple) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (4,5), soit presque à la limite de la valeur seuil de la classe de "vulnérabilité moyenne". Cela s'explique dans le contexte de vulnérabilité aux intrusions saline provenant de la mer. Néanmoins, cela donne beaucoup de poids au trait de côte même pour les aquifères qui peuvent, parfois, ne pas en dépendre (cas d'aquifère se jetant sous le niveau de la mer). De même, la gestion des étangs en bordures maritimes ou d'autres étendues d'eau saumâtres reste en suspens. Ces étendues créent en quelque sorte des traits de côte à l'intérieur des terres. La notation GALDIT, telle qu'elle est définie dans l'article original, ne les prend pas en compte à l'heure actuelle. Des améliorations peuvent être apportées.

Le fort impact de D peut s'expliquer dans le sens où les intrusions salines dépendent de la côte. La construction de l'indicateur et le poids accordé au paramètre D fait qu'il est presque impossible de ne pas être en vulnérabilité moyenne si D a une note de 10, cela implique que pratiquement toutes les côtes sont au moins en "vulnérabilité moyenne" (jusqu'à 1000 m de la côte).

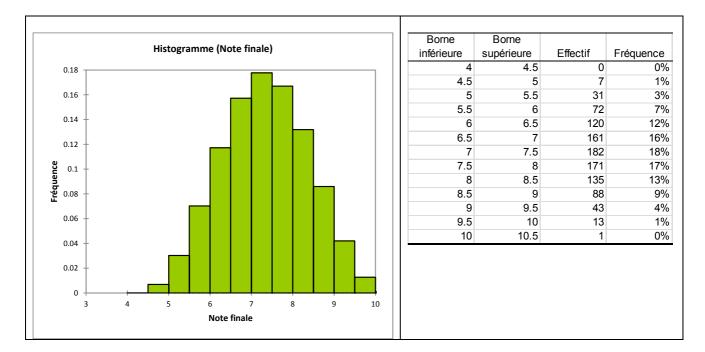


Illustration 55 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre D

## Analyse de l'impact de I:

La concentration détectée de chlorure est l'un des critères sur lesquels les décideurs n'ont pas de possibilité d'actions correctives. En effet, le calcul de ce paramètre se base sur les concentrations en chlorure qui ont déjà été mesurées. L'utilisation des paramètres telle qu'elle est définie dans

l'article original est généralement malaisée car les données de concentrations en chlorures ne sont généralement pas accompagnées de données de carbonates, ou alors ces données ne sont pas exploitables dans le cadre d'une cartographie à l'échelle proposée.

La concentration détectée de chlorure peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Sa pondération étant de 1, cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.17 ((2.5x1)/15)) et un impact maximal de 0.67 ((10x1)/15)). La sensibilité de la concentration détectée de chlorure sur la classification finale est de 0.17 ((2.5x1)/15)).

Une note de 10 pour la concentration détectée de chlorure entraine une notation minimale de 3.0 (1 x 2,5 + 3 x 2,5 + 4 x 2,5 + 4 x 2,5 + 1 x 1à + 2 x 2,5 )/15. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour la concentration détectée en chlorure (Illustration 56). Comme pour le paramètre G qui a aussi une pondération de 1, il existe que 114 combinaisons pour lesquelles une note de 10 pour le type de nappe permet une note finale de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. A l'inverse, 250 combinaisons aboutissent à une note finale de la vulnérabilité supérieure à 7,5. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons se situe entre 6,5 et 7.

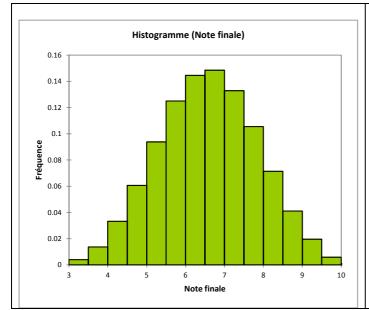
Les concentrations en chlorures posent des problèmes d'intégration temporelle des données. La méthode GALDIT définit des seuils pour les concentrations. L'utilisateur peut acquérir des données sous forme de chroniques². Il lui faudra attribuer une valeur pour chaque chronique. Le mode d'intégration reste à définir parmi plusieurs choix possibles : moyenne, plus bas niveau, concentration de l'année en cours. Le choix du mode d'intégration de la donnée peut faire varier la note d'une voire deux classe. Cela dépend de la variation de la qualité de nappe qui a été observée. Parfois les données agrégées peuvent être complétement obsolètes et fausser la note (qualité de nappe en amélioration ou en dégradation par exemple).

L'intégration spatiale est aussi problématique. En effet, les qualitomètres pouvant renseigner les concentrations en chlorures sont généralement dispersés. Il est souvent délicat de noter l'ensemble de la nappe à partir d'un ensemble de points épars. Aucune intégration n'est généralement réalisable et les données de chlorures détectées sont retranscrites comme un ensemble des zones discontinues.

Malgré un facteur de pondération faible, la concentration en chlorure peut avoir un effet sensible sur la note finale. Une note importante sur ce seul paramètre (10) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (3.0). De tous les paramètres de la méthode, le paramètre I est néanmoins celui qui a le moins d'impact.

-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Disponible sous ADES



Borne	Borne		
inférieure	supérieure	Effectif	Fréquence
3	3.5	4	0%
3.5	4	14	1%
4	4.5	34	3%
4.5	5	62	6%
5	5.5	96	9%
5.5	6	128	13%
6	6.5	148	14%
6.5	7	152	15%
7	7.5	136	13%
7.5	8	108	11%
8	8.5	73	7%
8.5	9	42	4%
9	9.5	20	2%
9.5	10	6	1%
10	10.5	1	0%

Illustration 56 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre I

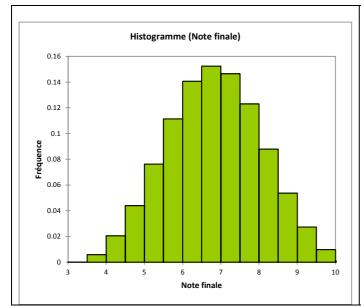
## Analyse de l'impact de T :

L'épaisseur de l'aquifère est l'un des critères sur lesquels les décideurs n'ont pas de possibilité d'action.

L'épaisseur de l'aquifère peut a priori prendre toutes les valeurs de la gamme. Sa pondération étant de 2, cela implique un impact minimal sur la classification finale de 0.33~((2.5x2)/15)) et un impact maximal de 1.33~((10x2)/15)). La sensibilité de l'épaisseur de l'aquifère sur la classification finale est de 0.33~((2.5x1)/15)).

Une note de 10 pour l'épaisseur de l'aquifère aboutit à une notation minimale de 3.5 (1 x 2,5 + 3 x 2,5 + 4 x 2,5 + 2 x 10)/15. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 1024 combinaisons contenant un 10 pour l'épaisseur de l'aquifère (Illustration 57). Il existe 72 combinaisons dans lesquelles une note de 10 dans le calcul de l'épaisseur de l'aquifère entraı̂ne une note finale dans le calcul de la vulnérabilité strictement inférieure à 5. A l'inverse, il existe 310 combinaisons dans lesquelles une note de 10 dans le calcul de l'épaisseur de l'aquifère entraı̂ne une note finale de la vulnérabilité strictement supérieur à 7,5. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons se situe entre 6.5 et 7.

Avec une pondération de 2, le paramètre T a une influence qui reste importante. Une note importante (10 par exemple) implique une notation de vulnérabilité relativement élevée (3.5) et les probabilités de ne pas être classée en "vulnérabilité moyenne" sont relativement réduites (72 combinaisons sur 1024 possibles).



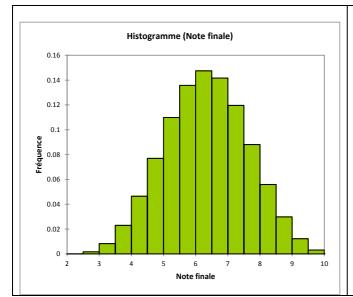
Borne	Borne		
inférieure	supérieure	Effectif	Fréquence
3	3.5	0	0%
3.5	4	6	1%
4	4.5	21	2%
4.5	5	45	4%
5	5.5	78	8%
5.5	6	114	11%
6	6.5	144	14%
6.5	7	156	15%
7	7.5	150	15%
7.5	8	126	12%
8	8.5	90	9%
8.5	9	55	5%
9	9.5	28	3%
9.5	10	10	1%
10	10.5	1	0%

Illustration 57 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité en considérant une note de 10 pour le paramètre T

## Analyse de l'indicateur GALDIT

La valeur minimale que peut atteint l'indicateur GALDIT est 2,5, sa valeur maximale est 10. Un histogramme a été réalisé sur l'ensemble de 4096 combinaisons de l'indice GALDIT (illustration 58). Il existe 640 combinaisons pouvant aboutir à un résultat strictement inférieur à 5. Deux milles six cents quatre-vingt combinaisons ont des valeurs résultantes comprises entre 5 et 7.5. Sept cents soixante-seize combinaisons ont des valeurs strictement supérieures à 7.5. Le plus grand pic de fréquence des combinaisons se situe entre 6 et 6.5.

L'extrême majorité (82%) des combinaisons correspondent ainsi à une "vulnérabilité moyenne". Il suffit de 1 ou 2 paramètres ayant des notes élevées pour que la note GALDIT soit en "vulnérabilité moyenne". Ainsi dès que L a une note élevée la vulnérabilité est au moins "moyenne". Il en va de même si A et T ont une note élevée de manière simultanée. Dans les deux cas, l'aquifère peut être situé à plusieurs centaines de kilomètres d'une côte et malgré tout classé en "vulnérabilité moyenne".



Borne	Borne		
inférieure	supérieure	Effectif	Fréquence
2	2.5	0	0%
2.5	3	7	0%
3	3.5	34	1%
3.5	4	94	2%
4	4.5	190	5%
4.5	5	315	8%
5	5.5	450	11%
5.5	6	556	14%
6	6.5	604	15%
6.5	7	580	14%
7	7.5	490	12%
7.5	8	361	9%
8	8.5	229	6%
8.5	9	122	3%
9	9.5	50	1%
9.5	10	13	0%
10	10.5	1	0%

Illustration 58 : Histogramme (et fréquences associées) des notes finales de vunérabilité

La plupart des faiblesses de l'indicateur GALDIT vienne de sa conception même. GALDIT est un indicateur simple qui peut être vu comme une somme pondérée.

Un des défauts connus des sommes pondérées portent sur la compensation entre les critères (Maystre et al., 1994). Une zone, ayant fait l'objet d'une évaluation très négative sur un critère, peut compenser cette "mauvaise" note par des évaluations plus positives sur d'autres critères, et inversement. Cela peut parfois porter à confusion lors de la lecture de la carte finale, d'où la nécessité de connaitre les cartes intermédiaires. Dans le cas de GALDIT cela permet d'expliquer pourquoi une zone est classée en "vulnérabilité moyenne" bien que située à plusieurs centaines de kilomètres d'une côte. Ce défaut n'est pas rédhibitoire pourvu que le décideur soit conscient de la construction de l'indicateur et de ses limites. Cela peut néanmoins être gênant lors les phases explicatives et de décision.

Un des avantages de l'indicateur GALDIT par rapport à une somme pondérée classique est sa construction en classe. Cela permet d'éviter toute sensibilité à la transformation d'échelle, ce qui est un des principaux défauts de la somme pondérée (Maystre et al., 1994). L'exemple ci-dessous explique ce phénomène. Trois actions a, b, c sont évaluées suivant un critère "coût" (en €/ poids 4) et un critère "quantité" (en tonne / poids 1). Cela aboutit au classement de l'action "c" comme meilleure action (Illustration 59, a). En revanche, si le critère "quantité" est exprimé en "kilogramme", la même méthode aboutie au classement de l'action "a" comme meilleure action (Illustration 59, b). L'utilisation de classe dans GALDIT n'aboutit pas à ce genre de défaut. Cela a d'ailleurs permis, dans ce rapport, d'utiliser une version différente de l'indicateur I sans perturber le reste des paramètres et des pondérations.

			somme				quantité	somme	
	cout (€)	quantité (t)	pondérée	Classement		cout (€)	(kg)	pondérée	Classement
action	4/5	1/5	5/5		action	4/5	1/5	5/5	
а	100 000	5 000	81 000	3	а	100 000	5 000 000	1 080 000	1
b	80 000	10 000	66 000	2	b	80 000	10 000 000	2 064 000	2
С	40 000	20 000	36 000	1	С	40 000	20 000 000	4 032 000	3
		_					h		

Illustration 59 : Exemple de sensibilité à la transfromation d'échelle dans une somme pondérée.

Deux inconvénients découlent néanmoins de l'utilisation de classes. D'abord, la dernière classe regroupe des zones ayant des caractéristiques très différentes. Pour la distance à la côte par exemple, la dernière classe est constituée de toutes les zones supérieures à plus de 1000 m de la côte. Elle regroupe donc des zones ayant des relations très différentes par rapport à la mer. Pour la piézométrie, la dernière classe regroupe toutes les hauteurs d'eau supérieures à 2,5 m. Encore une fois, dans le contexte de l'intrusion saline, 3 m, 10 m et 50 m de hauteur d'eau n'ont pas le même impact. Dans ce contexte, il peut être pertinent de placer un maximum à chaque classe. Seul le paramètre G est différent puisque il ne se réfère pas à une variable continue.

Le second inconvénient est que chaque création de classe entraîne l'existence d'un "effet seuil". Pour les valeurs proches du seuil, une faible variation de valeur peut entraîner le changement de classe. Inversement, la même variation éloignée de la valeur seuil peut n'avoir aucun effet. L'indicateur GALDIT étant une somme pondérée associant plusieurs classements, les effets seuils peuvent se cumuler. Cet effet seuil constitue parfois un inconvénient, car conjugué avec l'effet de de compensation, des zones légèrement différentes peuvent avoir des classements de vulnérabilité identique (généralement "vulnérabilité moyenne").

# 6.2.3. Validation de la méthode GALDIT et comparaison de la méthode GALDIT avec les simulations numériques

La validation des cartes de vulnérabilité, quelle que soit la méthode utilisée est effectuée soit en comparant les résultats obtenus à des données ponctuelles ou spatialisées d'un paramètre donnée tel que la concentration d'un élément (chlorures, nitrates), soit en comparant les résultats à des résultats de modélisation effectués sur la même zone d'étude.

Dans le cadre de l'application de la méthode GALDIT sur les 7 zones tests, les résultats obtenus ont été validés par le dire d'experts, les hydrogéologues régionaux du BRGM, connaissant les secteurs d'étude d'une part. Les données de salinité ou concentrations en chlorures ont été utilisées pour caractériser un des paramètres de la méthode GALDIT. Ces données sont parfois disparates et d'autre part influencer par une activité anthropique (effet de pompage).

Des simulations numériques sur un des secteurs du site test du Marais Poitevin ont été effectuées, selon deux approches : en plan en considérant l'augmentation du niveau marin, sans prise en compte des variations de densité dans un premier temps et selon deux coupes conceptuelles en prenant en considération les variations de densité du fluide. Ces simulations sont présentées au paragraphe 6.3. L'influence d'une remontée de niveau marin peut engendrer des zones déprimées d'étendue importante située à plus d'une dizaine de kilomètres du littoral, à l'intérieur des terres. La zone est plus importante pour des conditions de basses hautes et de plus en année sèche (illustration 96). Ce secteur correspond aux zones de vulnérabilité forte et moyenne obtenue à partir de la méthode GALDIT (illustration 51). Les résultats obtenus par la méthode de

cartographie GALDIT, approche simplifiée, sont cohérents avec les résultats de simulation numérique.

## 6.2.4. Conclusion et perspectives

Une caractérisation de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de la salinisation a été entreprise à deux échelles différentes et à l'aide de deux approches distinctes.

A l'échelle métropolitaine, les cartes de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion saline actuelle et pour un scénario extrême de remontée du niveau marin de +2m ont permis de faire un point sur l'état des connaissances région par région et de mettre à jour cet état des connaissances (le dernier état datant de 1996). Trois types de cartes ont été préparés à l'échelle nationale, concernant une bande littorale de 5km 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 cartes de zones de basses topographies au niveau de la bande du littoral. L'assemblage et superposition de ces différentes cartes permet de mettre en évidence des zones avec des aquifères côtiers sensibles à une intrusion saline et avec des pressions en termes de prélèvement différentes.

Les zones suivantes les plus vulnérables suivantes sont mises en évidence à partir de la cartographie à l'échelle nationale:

- La côte orientale de la Corse ;
- Une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ;
- La côte nord du Poitou-Charentes ;
- La côte au nord-est de la Bretagne ;
- La côte du Calvados.

L'état des connaissances concernant les aquifères côtiers de la France Métropole, mise à jour, fait ressortir l'existence d'intrusions salines ponctuelles, parfois plus importantes au niveau des îles. La situation est similaire a priori à l'état décrit en 1996. La vulnérabilité des aquifères côtiers selon cette approche à l'échelle nationale fait ressortir des zones plus vulnérables, la majorité étant de vulnérabilité moyenne à faible. Les zones plus sensibles sont situées soit au niveau d'estuaire, soit au niveau des aquifères du Languedoc Roussillon, voire au niveau des nappes alluviales en région Provence Alpes Côtes d'Azur.

La vulnérabilité à une intrusion saline liée à une augmentation du niveau marin concernant les 7 zones, cartographiée à l'aide de la méthode GALDIT a permis de mettre en évidence des zones de vulnérabilité contrastée et de superficies variées. Pour le Marais Poitevin, une zone de vulnérabilité très forte est présente dans la zone littorale nord, déjà impactée par des intrusions salines. D'autres zones éloignées de la côte de faible topographie pourront être immergées, bien que situées dans une zone de vulnérabilité faible à moyenne. Au niveau de la plaine de Caen, la zone de forte vulnérabilité concerne le littoral en grande partie ainsi qu'une grande partie de la vallée alluviale. Les données piézométriques et altimétriques n'ont pas permis de cartographier

l'impact d'une remontée du niveau marin, mais néanmoins il est probable que la vulnérabilité au niveau de la vallée ait été sous-estimée.

Pour les aquifères côtiers méditerranéens, les zones de fortes vulnérabilité concernent une bande d'un à deux kilomètres de largeur en fonction du niveau marin, intégrant les lagunes et leurs pourtours (ex. Midi Libre). La zone de vulnérabilité moyenne d'extension variable fortement liée au paramètre A dont l'hétérogénéité n'est pas toujours connue avec détail ou encore influencée par le paramètre L est fonction des données de la piézométrie. Les zones côtières y compris en bordure des étangs sont donc ainsi les plus vulnérables, une augmentation du niveau marin aura comme conséquence de déplacer les zones de forte vulnérabilité de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres vers l'intérieur des terres en fonction de l'altitude et du gradient piézométrique (ex. Crau). Les zones de vulnérabilité faible correspondent aux zones les plus éloignées, le long des cours d'eau (ex. Roussillon).

Concernant la vulnérabilité d'un aquifère insulaire, la cartographie selon la méthode GALDIT pour l'île de Ré, permet de mettre en évidence une zone de très forte vulnérabilité au niveau de la frange littorale ainsi que sur l'essentielle de la partie occidentale de l'île. La partie orientale étant caractérisée par un relief plus important et de plus grande extension, la vulnérabilité calculée est faible à moyenne. En cas d'une remontée de la mer de + 2 m, la zone nord-ouest est affectée directement dans les zones planes par submersion. Dans la partie sud-ouest la vulnérabilité est comparable à celle avec le niveau de la mer actuel.

## 6.2.5. 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, sur le littoral, 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 caractéristiques des données disponibles, sont le marais de St-Ciers-sur-Gironde (extraction ou zoom du modèle MONA) et la partie nord du Marais-Poitevin (département de la Vendée).

## **6.3. TESTS DE SIMULATION**

Les tests de simulation concernent le modèle du marais de St-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 aguifères 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)]. Les simulations prennent en compte des hypothèses de remontée de niveau marin, sans considérer des scénarios de changement climatique.

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 St-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.

#### 6.3.1. St-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 constitué 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 St-Ciers sur Gironde.

# Contexte géologique et hydrogéologique de la zone : le marais de St 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 entrainerait 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.

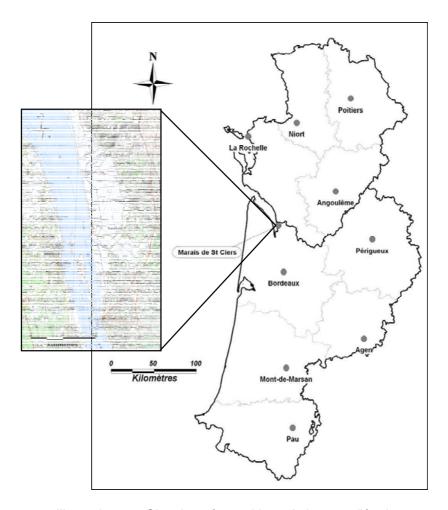


Illustration 60 : Situation géographique de la zone d'étude

Le marais de Saint-Ciers se situe au nord de Blaye, à une soixantaine de kilomètres au nord de Bordeaux (Illustration 60).

## 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. A 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. A 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-àdire 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'Eocène est marqué par une transgression marine provenant du Sud-Ouest entrainant 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 61 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.

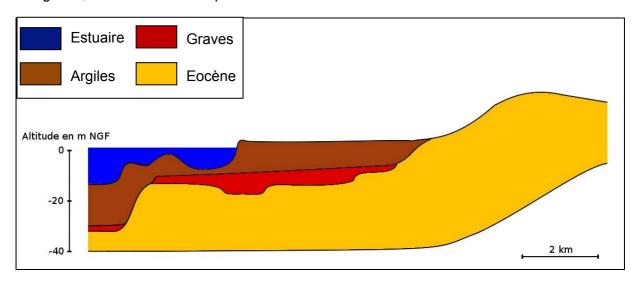


Illustration 61 : Coupe schématique est-ouest

## 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'Eocène. 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 km². 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 flandrienne
- Couche 3 à 14 : Graves (discrétisation verticale d'un mètre de hauteur afin de prendre en compte les effets de la salinité)
- Couche 15 : Eocène

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 puisqu'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 62) présente la géométrie 3D du système modélisé, réalisé à partir du croisement de l'ensemble des informations citées précédemment.

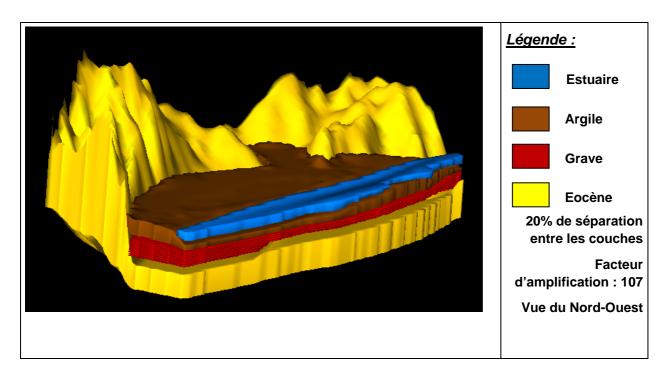


Illustration 62 : Représentation 3D de la géométrie du modèle

#### 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 (Eocène): 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. A l'Est la couche représentant l'Eocène a été étendue jusqu'à environ 5km 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 graves est considéré comme un milieu isotrope, les paramètres hydrodynamiques sont donc identiques dans toutes les directions de l'espace (Kx = Ky = Kz). 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  $1,6.10^{-5}$  à  $1,3.10^{-3}$  m/s. Faute de mesures le coefficient d'emmagasinement captif est estimé arbitrairement à  $1.10^{-4}$ .

## Simulation en régime permanent

La simulation en régime permanent consiste à établir l'équilibre hydrodynamique du système au repos.

Le processus de calage aboutit à un champ de perméabilités compris entre 2.5.10<sup>-3</sup> et 1.10<sup>-5</sup> m/s pour les graves et entre 3.10<sup>-5</sup> et 6.10<sup>-4</sup> m/s pour l'Eocène. Enfin la perméabilité verticale de l'Eocène est fixée à 6.10<sup>-8</sup> 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 63) permettant de valider le calage du modèle en régime permanent en termes de charges.

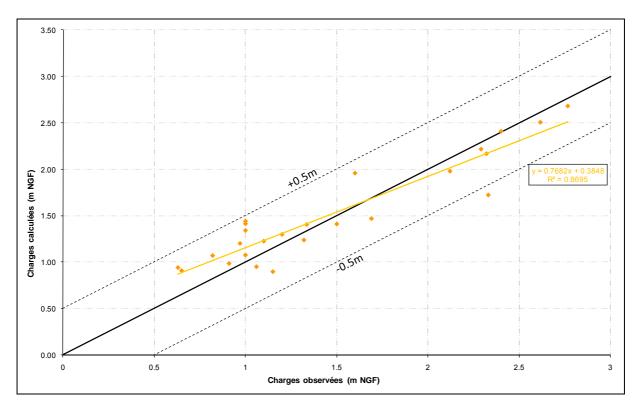


Illustration 63 : Diagramme de dispersion

## 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'Eocène 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 64) 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. 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'autre ouvrages exploitant la nappe des graves soient 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.

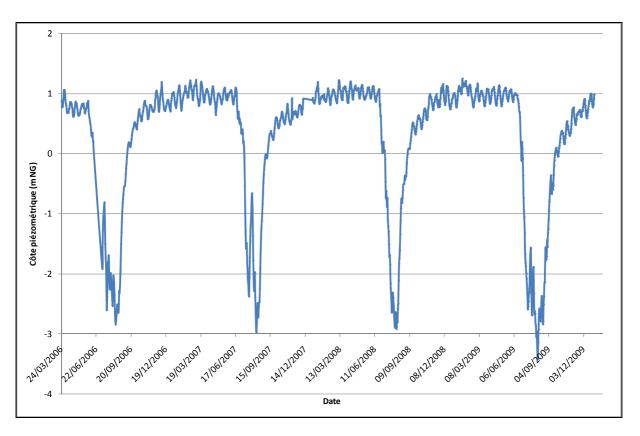


Illustration 64 : Chronique piézométrique entre 2006 et 2010 au piézomètre PGE3B (Centrale EDF)

A 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 m³/h.

D'après les données de la chambre d'agriculture, en 2006, 29 ouvrages exploitent la nappe des graves (Illustration 65) 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 60m³/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.

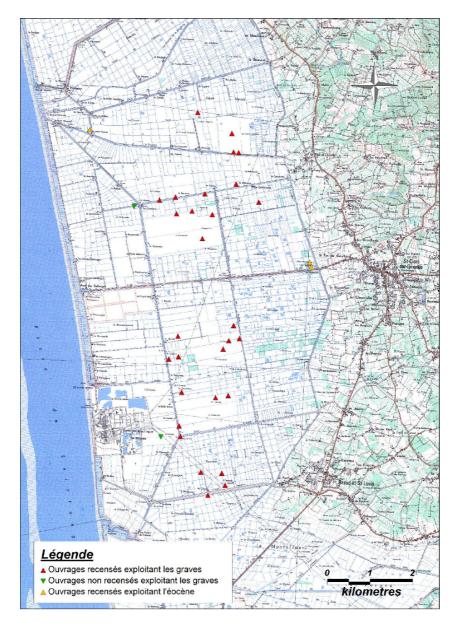


Illustration 65 : Répartition des ouvrages exploitant la nappe des graves et celle de l'Eocène

## 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.

## 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 66).

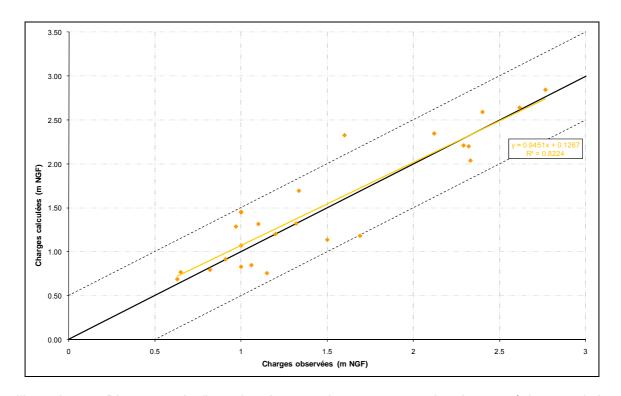


Illustration 66 : Diagramme de dispersion obtenue suite au processus de calage en régime transitoire

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 (0,6m au lieu de 4m environ).

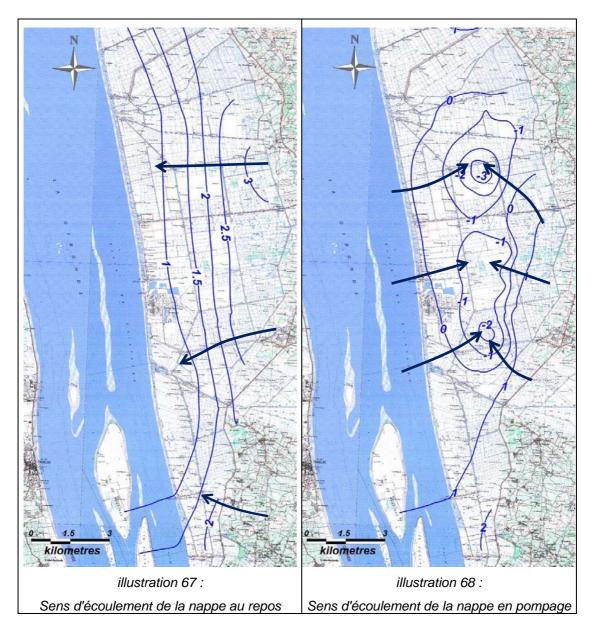
## Synthèse

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 67 et illustration 68) :



## • Prise en compte des phénomènes de densité lies 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 8g/l dans le modèle. La limite Est du modèle, au niveau de l'Eocène, est imposée à 0,2g/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.  $10^{-6}$ m²/s.

Un maillage écossais 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 69) présente l'évolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge de l'estuaire.

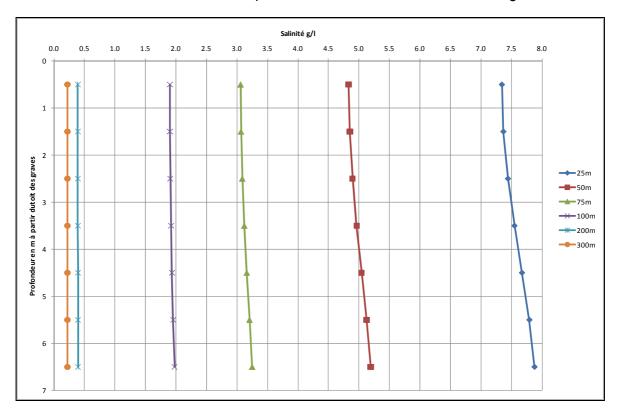


Illustration 69 : Evolution de la salinité en fonction de la profondeur et selon la distance à la berge

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 70). 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.

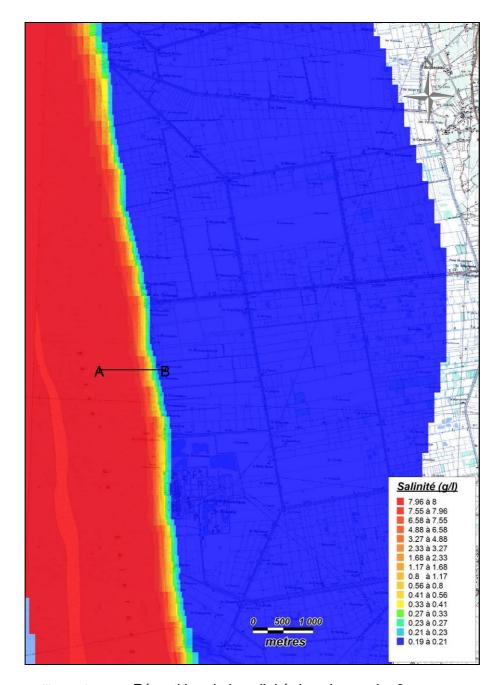


illustration 70 : Répartition de la salinité dans la couche 3 au repos

En période de prélèvement la salinisation de la nappe va varier à proximité de l'estuaire comme le montre le graphique ci-dessous (Illustration 71) (t = 0 correspond à l'équilibre établi en régime permanent).

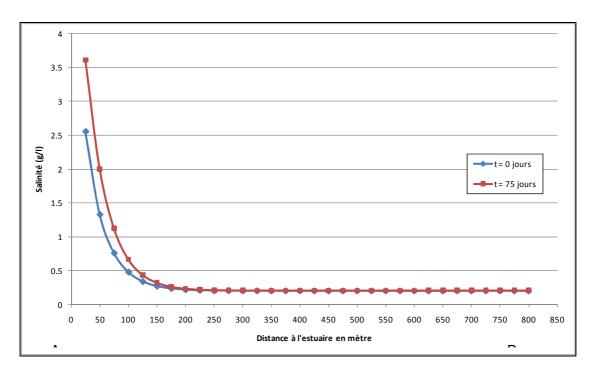


Illustration 71 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire

Il apparaît sur ce graphique (Illustration 71) 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.

A noter que compte tenu du calage inexistant sur les paramètres du transport les résultats obtenus sont à prendre avec précaution.

## Régime permanent

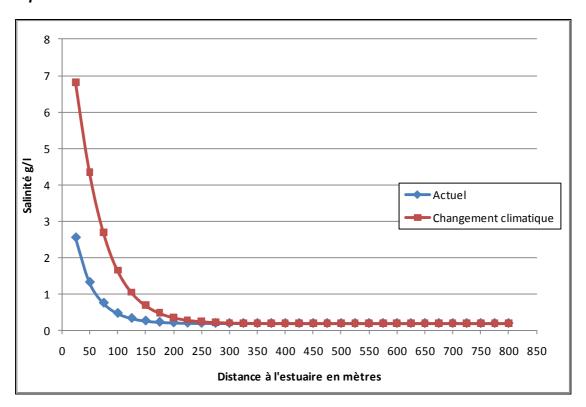


Illustration 72 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire

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 due au changement climatique, a un impact très faible sur la salinité des eaux de la nappe.

## Régime transitoire

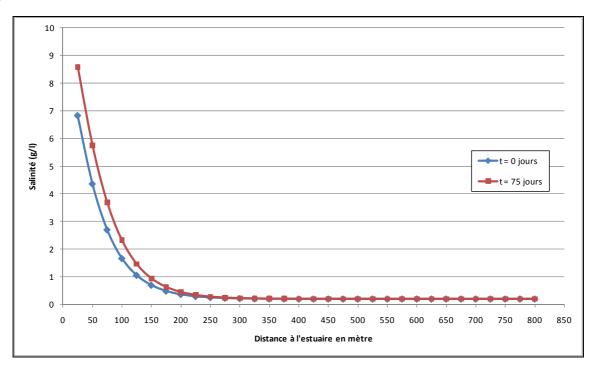


Illustration 73 : Salinité de la nappe dans la couche supérieure des graves en fonction de la distance à l'estuaire

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.

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.

## 6.3.2. Marais Poitevin

## Contexte géologique et hydrogéologique

Les formations rencontrées du nord au sud de ce secteur sont les suivantes (Illustration 74) :

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 dolomitisés 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 oolitihiques 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 fluvio-marines (dénommées « Bri ») du Quaternaire formant le Marais-Poitevin.

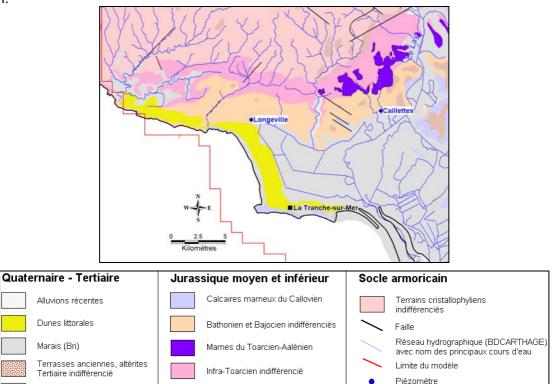


Illustration 74 : Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin

Marnes et calcaires

## 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 km² (Illustration 75). 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.
- 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.

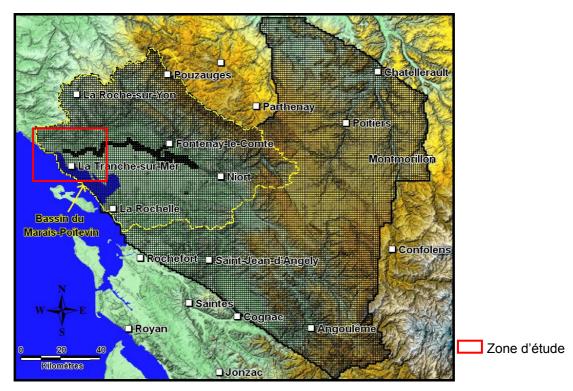


Illustration 75 : Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude

Les calages pour les 2 piézomètres les plus proches de la bordure océanique sont visibles sur les illustrations (Illustration 76 et Illustration 77). 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.

A 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.

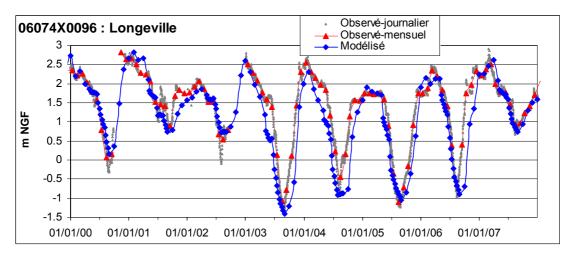


Illustration 76 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger)

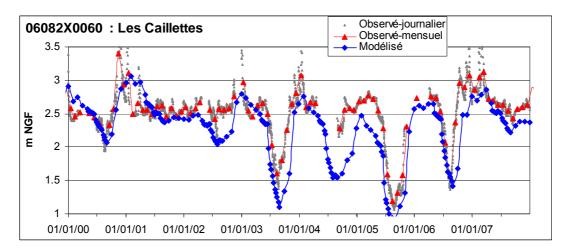


Illustration 77 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger)

## 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 sècheresse 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 climatiques 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 78). Il est à noter que la position de la ligne du rivage reste identique à l'actuel pour les différentes simulations.

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

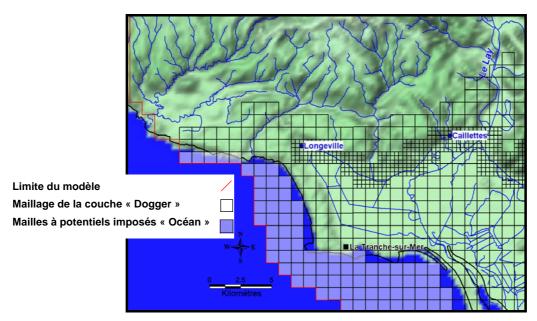


Illustration 78 : Potentiels imposés au niveau de l'Océan

## 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 79).

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.

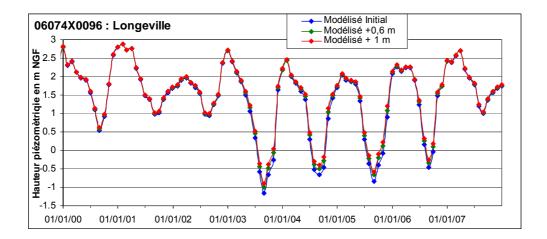


Illustration 79 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville

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 80).

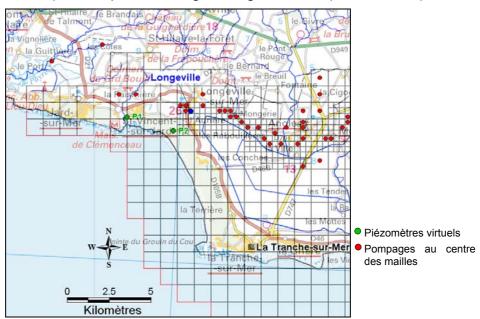


Illustration 80 : localisation des piézomètres virtuels

La charge piézométrique dans le secteur du P1 (Illustration 81), 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. Le niveau semble tout de même être influencé par les pompages situés au nord de ce secteur (Illustration 80).

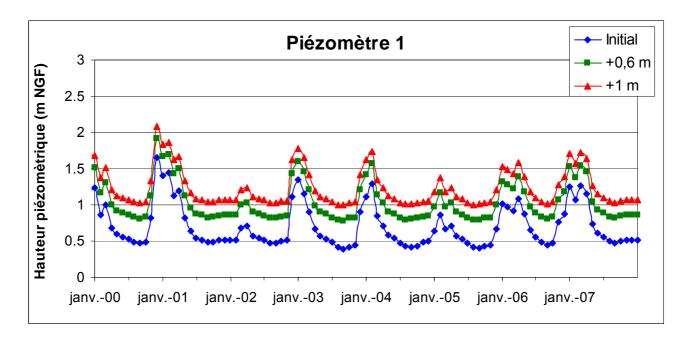
La remontée océanique induit une augmentation de la charge globale de P1 (remontée du niveau de base).

En période de crues les niveaux restent, pour les deux simulations de remontée de l'Océan, audessus 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).

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.



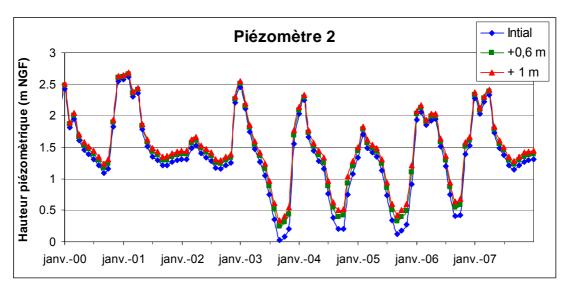


Illustration 81 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels

# 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 82 et Illustration 83).

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 forcement 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.

## Année humide (Illustration 82) :

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 83) :

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 entres 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 76)

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.

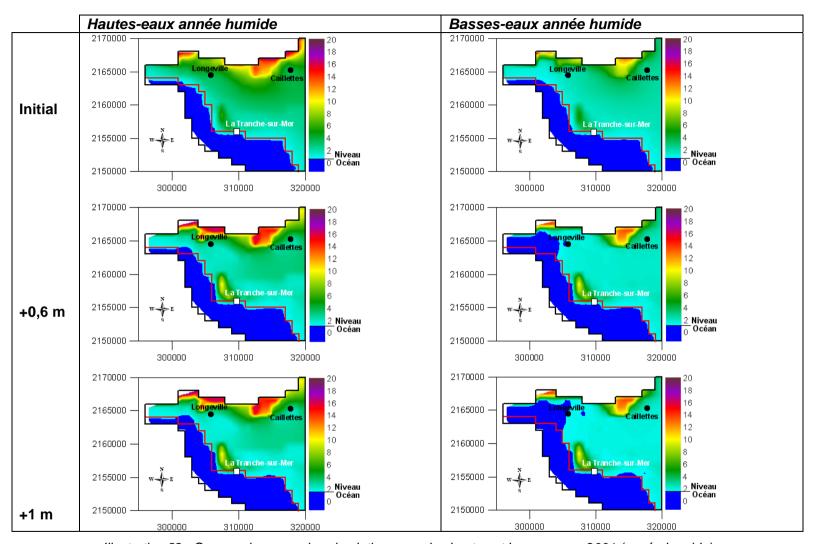


Illustration 82 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide)

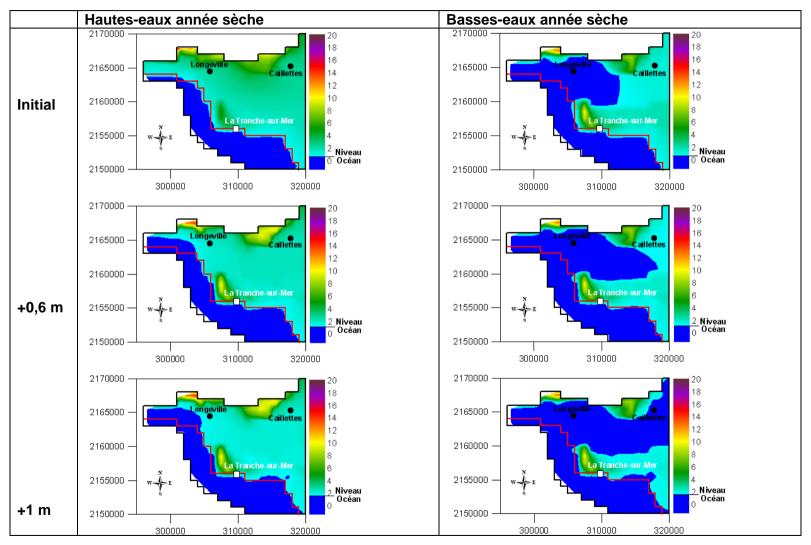


Illustration 83 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2005 (année sèche)

# 6.3.3. Caractérisation hydrochimique et modélisation complémentaire en coupes du biseau salée – Marais Poitevin

# Caractérisation hydrochimique

Situé à l'est de Longeville, le Marais Poitevin a fait l'objet de nombreuses études destinées à préciser l'origine et l'étendue de la salinisation des nappes de l'Infra-Toarcien et du Dogger [Bresson G. (1975), Glenisson P. (1995), CALLIGEE (1995), Anongba B. (2007)]. En comparaison, le secteur ouest entre Longeville et Jard sur Mer reste sous échantillonné. Afin d'apporter de nouveaux éléments de caractérisation, des campagnes de prélèvements ont été réalisées sur ce secteur.

# Méthodologie

Les prélèvements ont été effectués durant 2 campagnes, l'une en hautes eaux (avril 2011) et l'autre en basses eaux (octobre 2011). Ils ont intéressés 7 ouvrages au Dogger, 7 ouvrages à l'Infra-Toarcien et 2 ouvrages mixtes captant les deux aquifères (Illustration 84). La profondeur des ouvrages échantillonnés est reportée dans l'Illustration 85.

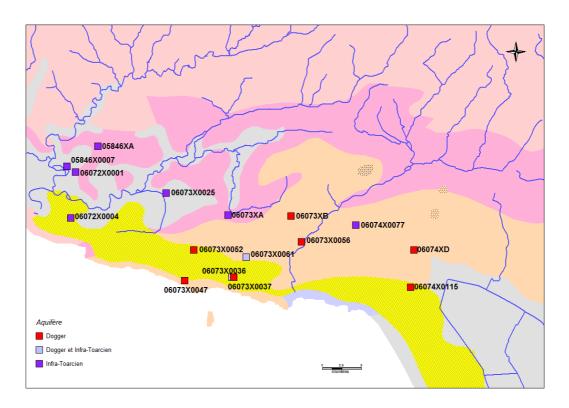


Illustration 84 : Ouvrages prélevés en avril et octobre 2011. Certains ouvrages ne sont pas répertoriés dans la Banque Nationale du Sous Sol (BSS) et font l'objet d'un code temporaire (XA, XB, XD).

Code	Profondeur (m)	
06073X0047	15,3	
06074XD	14	
06073XB	13,7	
06073X0056	37	
06073X0037	27	
06074X0115	15	
06073X0036	76	
06074X0077	50	
06073XA	26,7	
06073X0025	19	
05846XA	22	
06072X0001	22	
05846X0007	23	
06072X0004	19	
06073X0061	67	

Illustration 85 : Profondeur des ouvrages échantillonnés.

Les prélèvements sont réalisés à l'exhaure lorsque la conductivité électrique de l'eau pompée est stabilisée (pompe GrundFos MP1 / pompe en place). Dans ces conditions, l'échantillon est un mélange des principales arrivées d'eau alimentant l'ouvrage et pouvant se situer à différentes profondeurs. La conductivité électrique et la température des échantillons sont mesurées *in situ* par un conductimètre WTW Cond3210. Les cations et les anions majeurs ainsi que les ions ammonium, nitrites et fluorures sont analysés par le laboratoire départemental IANESCO après filtration *in situ*.

#### Résultats & discussion

L'ensemble des résultats analytiques est reporté en annexe 4. Les caractéristiques propres à chaque aquifère sont détaillées ci-dessous.

# Nappe du Dogger

Les variations de concentrations entre les hautes et basses eaux étant faibles (Illustration 86), la description des résultats se base sur la campagne Hautes Eaux d'avril 2011.

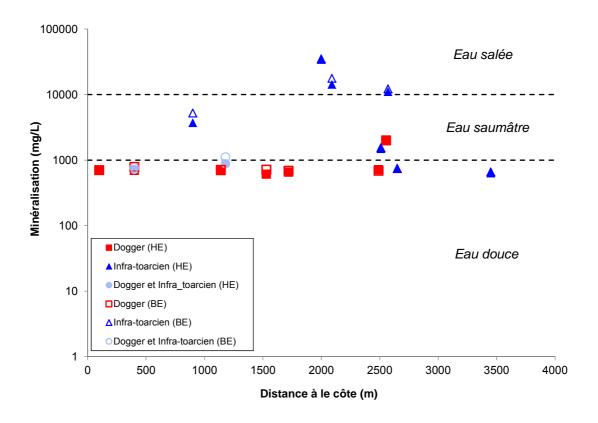


Illustration 86 : Minéralisation des eaux prélevées et gammes de salinisation définies par Lloyd et Heathcote (1985). HE : Hautes Eaux, BE : Basses Eaux.

Pour six des sept prélèvements au Dogger, le faciès des eaux échantillonnées est de type bicarbonaté calcique (Illustration 87). La minéralisation de échantillons, i.e. la somme des ions analysés, varie de 608 à 700 mg/L en hautes eaux et de 687 à 787 mg/L en basses eaux. Ces eaux sont qualifiées de douces selon la classification établie par [Lloyd et Heathcote (1985)] (Illustration 86).

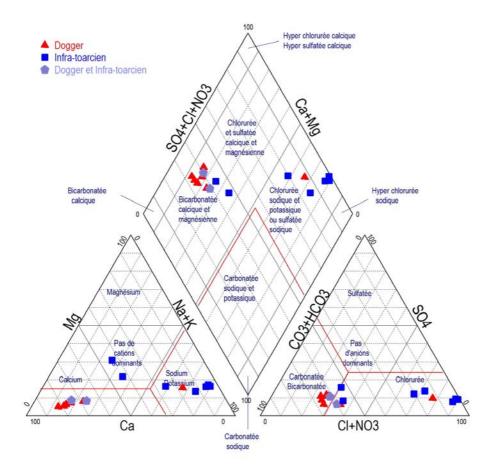


Illustration 87 : Faciès hydrochimiques déterminés sur la base du Diagramme de Piper (exemple des eaux prélevées en avril 2011).

Sur ces mêmes points, les conductivités électriques mesurées *in situ* varient de 749 à 873  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> en hautes eaux et de 847 à 973  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> en basses eaux (Illustration 88). Ces valeurs sont supérieures à la conductivité moyenne des eaux du Dogger (619 ± 97  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup>) échantillonnées depuis 2001 dans le cadre du réseau régional de suivi que la qualité des nappes en Poitou Charentes [Lavie *et al.* (2002) ; Lavie *et al.* (2003) ; Lavie *et al.* (2004) ; Lavie *et al.* (2005), Lavie *et al.* (2006), Lavie *et al.* (2007), Douez *et al.* (2009) ; Douez *et al.* (2010)].

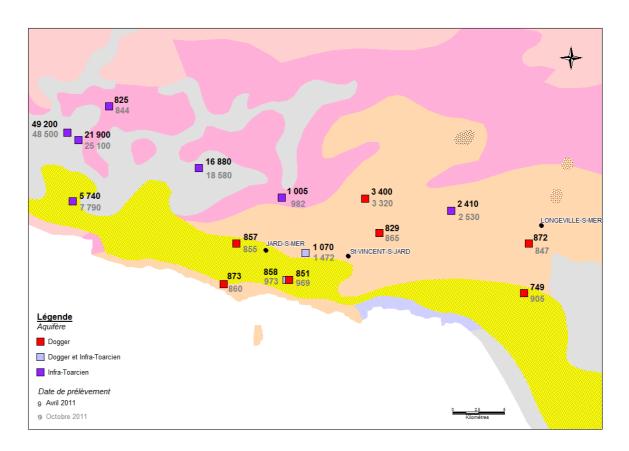


Illustration 88 : Conductivités électriques à 25 °C mesurées en hautes eaux (avril 2011) et basses eaux (octobre 2011).Unité en µS.cm<sup>-1</sup>.

Ces valeurs de conductivité supérieures à 700 µS.cm<sup>-1</sup> sont associées à une augmentation des teneurs en ions caractéristiques de l'eau de mer comme en témoignent les concentrations en chlorures et en sodium (Illustration 89, Illustration 90). Une influence marine, bien que modérée, ne peut donc être écartée ; deux sources peuvent alors être proposées :

- L'intrusion d'eau de mer au sein de l'aquifère,
- Les apports météoriques riches en aérosols marins rejoignant la nappe par infiltration. [Négrel et al. (2007)] démontrent ainsi que les teneurs en sodium et en chlorure des eaux de pluie collectée à Brest sont respectivement 16 fois et 14 fois plus importante que celles dans les eaux de pluie collectées à Clermont Ferrand.

De fait, les conductivités électriques mesurées étant indépendantes 1) de la distance entre l'ouvrage et le trait de côte, 2) de la profondeur de l'ouvrage et 3) de la présence ou non d'un cordon dunaire, l'impact de la composition chimique des eaux météoriques du secteur sur l'augmentation des teneurs en sels dissous paraît-être une hypothèse non négligeable.

	Concentration (g.L <sup>-1</sup> )
Chlorures Cl <sup>-</sup>	19,35
Sodium Na <sup>+</sup>	10,77
Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,71
Magnésium Mg <sup>2+</sup>	1,29
Calcium Ca <sup>2+</sup>	0,41
Potassium K <sup>⁺</sup>	0,4
Hydrogénocarbonates HCO <sub>3</sub> -, Carbonates CO <sub>3</sub> <sup>2</sup> -	0,12 à 0,15
Bromure Br <sup>-</sup>	0,07

Illustration 89: Composition chimique moyenne de l'eau de mer [Copin Montegut G. (1996)]

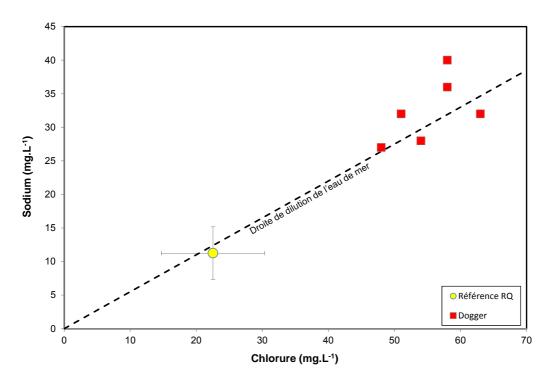


Illustration 90 : Relation sodium/chlorure dans les eaux prélevées au Dogger. La série RQ représente un échantillon moyen caractéristique des eaux du Dogger calculées sur la base des données 2001-2011 du réseau de suivi de la qualité des nappes de Poitou-Charentes (34 ouvrages).

Parmi les ouvrages échantillonnés au Dogger, seul un (06073XB) témoigne d'une eau classée saumâtre et associée à une minéralisation moyenne de 2000 mg/L et une conductivité électrique moyenne de 3350 µS.cm<sup>-1</sup> (Illustration 86, Illustration 88). Le faciès chimique de ce dernier point est de type chloruré sodique (Illustration 87). La relation Na/CI exposée sur l'Illustration 91 suppose une dilution entre un pôle salé marin et un pôle Dogger non salé. La relation Fluorure/Chlorure indique qu'une simple dilution Dogger/eau de mer conduirait à une concentration en fluorure plus faible que celle mesurée (Illustration 92). Les eaux de la nappe infra-toarcienne sont susceptibles de constituer ce second pôle de dilution. Cette hypothèse est appuyée par :

- Des teneurs en fluorures importantes dans les eaux de l'Infra-Toarcien [Goujou J.C. et al. (1994)],
- Une minéralisation des eaux de l'aquifère Infra-Toarcien supérieure à celle des eaux du Dogger (Illustration 86),
- la cote topographique du fond de l'ouvrage se situant à + 2 m NGF, i.e. à une altitude supérieure aux cotes NGF des ouvrages situés à proximité du littoral et ne témoignant pas d'une salinisation aussi prononcée,
- la mise en charge de l'aquifère infra-toarcien par rapport à l'aquifère du Dogger [Douez O. (2010)]. Cette caractéristique permet les échanges verticaux de l'Infra-Toarcien vers le Dogger dans le cas d'une mise en connexion hydraulique des deux aquifères.

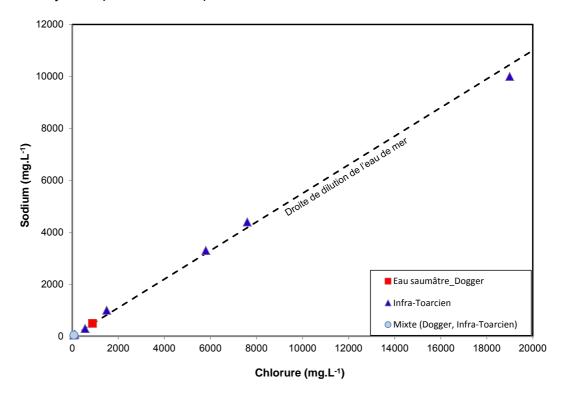


Illustration 91 : Relation Na/Cl pour les eaux prélevées à l'Infra-Toarcien et l'eau saumâtre prélevée au Dogger (Avril 2011). Les prélèvements effectués en hautes eaux témoignent d'une corrélation identique.

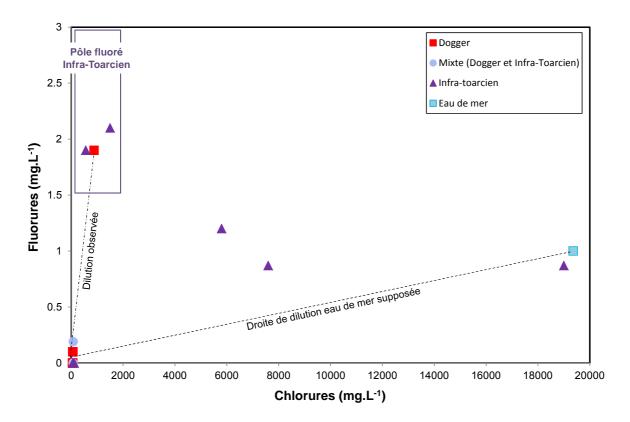


Illustration 92 : Relation F/Cl pour les échantillons prélevés en avril 2001. La relation est identique en octobre 2011.

## Nappe infra-toarcienne

Les eaux échantillonnées se partagent entre les 3 classes de salinité (douce/saumâtre/salée) avec une minéralisation variant de 631 à 34000 mg/L en hautes eaux et de 660 à 35000 mg/L en basses eaux (Illustration 86). Ces valeurs de minéralisation correspondent à des conductivités électriques mesurées sur le terrain de 825 à 42900  $\mu$ S/cm en hautes eaux et de 844 à 48500  $\mu$ S/cm en basses eaux (Illustration 88).

Les eaux les moins minéralisées (05846XA et 06073XA) présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Il s'agit de prélèvements dans des zones où l'aquifère infra-toarcien est libre ou semi-captif.

Les eaux saumâtres sont rencontrées sur des ouvrages captant l'aquifère captif de l'infra-toarcien (06072X0004 et 06074X0077). Les valeurs mesurées (de 2400 à 7790  $\mu S.cm^{-1}$ ) sont supérieures à la moyenne de 626  $\pm$  184  $\mu S.cm^{-1}$  calculées dans le cadre du réseau régional de suivi qualité des nappes en Poitou-Charentes. La relation Cl/Na atteste d'une origine marine de la salinisation (Illustration 91). Cette salinisation pourrait être à la fois fossile (ouvrage 06074X0077 situé en plaine) et actuelle (ouvrage

06072X0004 situé non loin du trait de côte et à proximité immédiate du Marais de la Boulinière).

Les eaux salées sont recensées sur 3 ouvrages implantés dans le marais de Talmont St Hilaire, zone où l'aquifère Infra-Toarcien est captif sous le bri flandrien. De par cette localisation, la salinisation de la nappe est susceptible de provenir, en partie, des échanges avec les eaux salées du marais (Illustration 91). L'ouvrage 05846X0007 atteint une salinité identique voire supérieure à celle de l'eau de mer. Bien que situé à l'aplomb d'une zone de surconcentration (marais salant), l'hypothèse d'une origine fossile de cette salinité mériterait d'être approfondie.

Entre hautes et basses eaux, 3 ouvrages situés en bordure ou au sein du marais de Talmont montrent une augmentation significative de leur minéralisation (06072X0004, 06072X0001, 06073X0025). Différents processus sont susceptibles de générer cette tendance : une sursaturation des eaux du marais liée à l'augmentation de l'évapotranspiration, une diminution des apports d'eaux superficielles (canaux du Payré) et une intrusion marine plus prononcée du fait d'une diminution des niveaux piézométriques au sein de l'aquifère.

#### Conclusion

Au regard des résultats obtenus sur l'année 2011, l'aquifère du Dogger ne semble pas faire l'objet d'une intrusion d'eau marine. Les concentrations en Na/Cl mesurées, légèrement supérieures à celles recensées sur ce même aquifère en plaine, trouveraient leur origine dans la composition chimique des eaux météoriques à proximité du littoral et dans des échanges probables avec l'aquifère infra-toarcien sous-jacent. Rappelons cependant que 1) les prélèvements constituent des échantillons moyens et 2) l'aquifère du Dogger est karstique, i.e. de productivité verticale hétérogène. Dans cette situation et en présence d'un biseau salé, il n'est pas assuré que l'eau salée plus dense ait été mobilisée par le pompage. Seuls des logs verticaux de conductivité permettrait de s'assurer de l'existence ou non d'un biseau salé au sein de l'aquifère.

Les prélèvements à l'Infra-Toarcien indiquent des eaux dont la minéralisation varie en fonction 1) de l'état libre ou captif de l'aquifère et 2) de sa localisation géographique. Ainsi l'aquifère libre se caractérise par des eaux « douce » soumis à un renouvellement saisonnier par les eaux météoriques. L'aquifère captif se caractérise par des eaux saumâtres en plaine à salées en zone de marais. Cette salinité, à signature marine, peut être fossile (piégeage de saumure) et/ou actuelle (biseau salé, échange avec les eaux superficielles du marais). Du fait de ces multiples sources possibles et du manque de connaissances sur ce secteur, il difficile d'affirmer l'existence d'un biseau salé. Peu probable sur la frange littoral où l'aquifère est captif, i.e. de la Faute sur Mer à Jard sur Mer, son existence devient potentielle entre Légère à l'ouest de Jard sur Mer et le Marais de Talmont. Des analyse isotopiques mériteraient d'être conduites sur cette aquifère pour préciser l'origine et dater la salinité mesurée.

#### Modélisation du biseau salé

#### Démarche

La modélisation d'une intrusion saline dans un aquifère impose une discrétisation du domaine suffisamment fine pour observer la forme biseautée de l'intrusion et son évolution spatiale. L'utilisation d'un maillage kilométrique associé à une discrétisation verticale supérieure à la dizaine de mètres tel que celui faisant foi pour le modèle régional des aquifères du Jurassique utilisé au cours de l'année 2010 (paragraphe 6.3.2.) n'est pas adapté à cette problématique. Pour simuler le biseau salé, deux modèles conceptuels en coupe ont ainsi été générés.

Ce changement d'échelle (modèle régional/modèle en coupe) associé à l'influence de la salinité sur les charges simulées engendre une phase de calage préliminaire destinée à adapter les paramètres issus du modèle régional (perméabilité, coefficient d'emmagasinement, prélèvement, paramètres rivières). L'objectif est de retranscrire les piézométries de référence issues :

- De données réelles lorsqu'elles existent (piézomètre 06074X0096 sur la coupe CD),
- De valeurs simulées par le modèle hydrodynamique régional des aquifères du Jurassique [Douez et al. (2010)].

Lorsque les calages sont satisfaisants, la phase de simulation débute.

Trois simulations d'élévation du niveau marin sont proposées. Deux des 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 unifier les évaluations effectuées dans le cadre des études sur les impacts du changement climatique, il est proposé d'utiliser les hypothèses suivantes pour l'élévation du niveau des mers à l'horizon 2100 :

- hypothèse pessimiste : 0,60 m,
- hypothèse extrême : 1 m,

Ces deux hypothèses ont été testées lors de la phase 1. On y ajoutera une dernière à +2 m.

Les simulations sont réalisées sur les années 2000 à 2007 (période de calage du modèle régional), avec les mêmes paramètres de calage (recharge, prélèvements, auteur d'eau imposée dans les canaux...) et au pas de temps mensuel. La remontée océanique est appliquée en faisant varier les potentiels imposés sur la bordure océanique de 0,6 mètre à 2 mètres. La position de la ligne rivage reste identique à l'actuel pour les différentes simulations.

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)]. Ce logiciel permet la

prise en compte des variations de densité du fluide. Il fonctionne en régime permanent ou transitoire et la densité peut être imposée ou calculée. Cette fonctionnalité est décrite dans [Thiery D. (1993)]. Le transport de salinité est ici résolu par la méthode TVD (Total Variation Dimishing).

# • Domaine de modélisation & discrétisation spatiale

Pour simuler le biseau salé, deux modèles locaux finement discrétisés ont été générés. Il s'agit de deux coupes implantées dans les secteurs clés cités en introduction, à savoir (Illustration 93):

- Une zone où le cordon dunaire est interrompu à l'embouchure du Goulet (Coupe AB),
- Une zone où le recouvrement dunaire existe (Coupe CD).

Les topographies associées à chacune des coupes sont présentées sur l'Illustration 94.

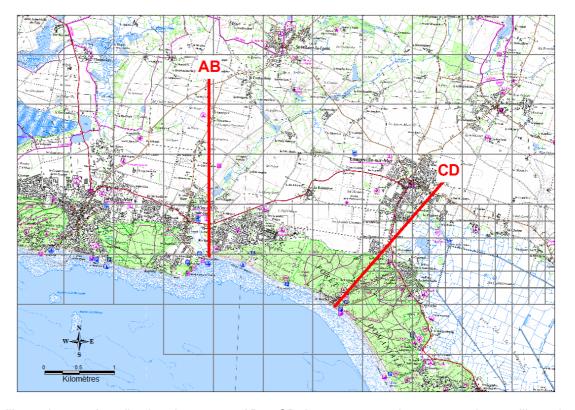


Illustration 93 : Localisation des coupes AB et CD. Le carroyage gris correspond au maillage du modèle hydrodynamique régional [Douez O. (2010)].

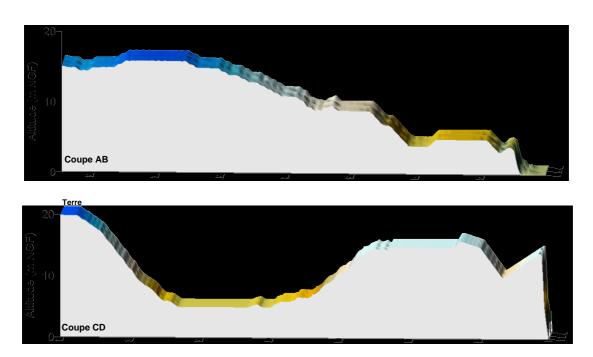


Illustration 94 : Topographies associées aux coupes AB et CD.

L'aquifère Infra-Toarcien étant faiblement développé et très probablement silicifié sur ce secteur, seul l'aquifère du Dogger est ici considéré. Préalablement à cette simplification, on s'est assuré que le modèle régional indiquait des flux d'échanges verticaux négligeables entre l'Infra-Toarcien et le Dogger.

Les caractéristiques du maillage sont décrites dans l' Illustration 95.

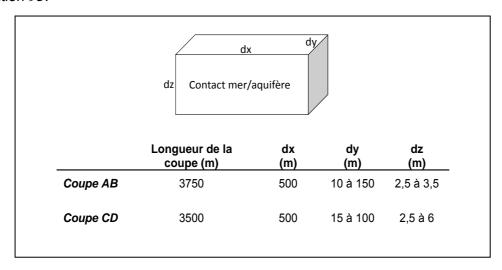


Illustration 95 : Caractéristiques du maillage des coupe AB et CD

#### Paramétrisation

#### Géométrie

#### Toit du substratum

La topographie forme le « toit » de la couche. Les valeurs intégrées dans les mailles sont calculées en faisant une interpolation des valeurs du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN au pas de 50 m (dy < 50 m) ou une moyenne des valeurs du MNT au pas de 50 m (dy  $\geq$  50 m). Pour les mailles intégrant un tronçon de rivière, des ajustements manuels sont parfois nécessaires pour ramener la cote d'une maille au niveau de la rivière. Dans ce cas, les points cotés figurant sur les cartes IGN 1/25 000 plus précis que les données du MNT sont utilisés. Cette manipulation est aussi appliquée au premier kilomètre des coupes afin d'affiner la topographie du front de mer.

#### - Mur du substratum

Les côtes de substratum du Dogger sont issues d'une interpolation des cotes définies à la maille kilométrique dans le modèle régional des aquifères du Jurassique. L'épaisseur du Dogger varie de 20 à 45 mètres sur la coupe AB et de 20 à 40 mètres sur la coupe CD. Les dunes représentées sur la coupe CD montrent une puissance maximum de 15 mètres.

#### Prise en compte des rivières et canaux

Le modèle hydrodynamique est ici couplé avec le réseau hydrographique. Ce dernier s'organise en affluent, chaque affluent étant constitué d'un ensemble de tronçons numérotés de manière croissante dans le sens de l'écoulement. Une maille rivière est donc définie par un numéro d'affluent, un numéro de tronçon et un jeu de caractéristiques (longueur, largeur, perméabilité du lit de rivière etc.) [Thiéry (2007)]. Le formalisme mathématique du calcul affecté aux échanges entre une nappe et une rivière sus-jacente est décrit dans le rapport BRGM-RP-40335-FR [Noyer M.L. et al. (1998)].

Selon AB, la rivière Le Goulet, dont la coupe retranscrit l'embouchure, est représentée sur le premier kilomètre. Le débit amont est imposé sur la base des débits calculés en transitoire entre 2000 et 2007 par le modèle régional.

Selon CD, la première phase de l'étude soulève le rôle non négligeable des canaux sur les charges au sein de l'aquifère: « En années humides, les niveaux sont soutenus par le maintien des canaux en eaux. » [Dörfliger et al. (2011)]. De fait, deux mailles du modèle fonctionnent comme des lacs en eau pendant les années humides ou asséché en période d'étiage et d'années sèches. Sur ces mailles, la hauteur d'eau est imposée sans qu'il y ait calcul d'un débit d'écoulement horizontal. En revanche, les échanges verticaux sont toujours possible.

# Zonation de la recharge et du ruissellement

Les zones de sol caractérisant la partition entre infiltration et ruissellement de la pluie efficace correspondent à celles présentes dans le modèle régional. Pour rappel, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR, cf. in [Putot E. et Bichot F. (2007)]), développé par le BRGM dans le cadre d'études de vulnérabilité des nappes, est utilisé pour évaluer le fractionnement de cette pluie efficace entre ruissellement et infiltration.

## **Prélèvements**

Un forage agricole est recensé sur la coupe AB à une distance de la ligne de rivage de 1670 m. Les volumes prélevés sont ceux issus du modèle régional.

Deux forages sont recensés à proximité de la coupe CD, ces forages sont projetés sur la coupe à une distance de 1880 m de la ligne de rivage. Les prélèvements initialement indiqués dans le modèle régional sont adaptés pour retranscrire la piézométrie environnante. Ils correspondent à 20 à 100 % de la somme des volumes prélevés sur les deux ouvrages.

Aucun prélèvement en rivière n'est ici recensé.

# Paramètres du transport de salinité

Salinité et densité

La densité du fluide est calculée à partir de la salinité, i.e. la concentration en sels dissous C, suivant une relation linéaire faisant l'approximation d'une température constante:

$$\rho = 1000 + a.C$$

Avec

C la concentration en ions chlorure Cl<sup>-</sup> a le coefficient de proportionnalité égal à 1,24

- Dispersion

Les données disponibles ne constituent pas un jeu suffisant pour appréhender l'extension du pied du biseau salé et contraindre ainsi la dispersion longitunale  $\alpha_L$  et transversale  $\alpha_T$ . La définition de la dispersivité longitunale se base sur une loi d'échelle proposée par [Schulze-Makuch D. (2005)] pour les aquifères carbonatés :

$$\alpha_{L} = 0.8(L)^{0.4}$$

Pour une hypothétique extension du biseau L comprise entre 500 et 3000 m, la dispersivité  $\alpha_L$  varie de 9,6 à 19.6 m. Une valeur moyenne de 15 m est retenue. La dispersivité transversale  $\alpha_T$  est fixée à 1 m.

La diffusion moléculaire est fixée à 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>.

# Paramètres hydrodynamiques

Les perméabilités et les porosités implémentées dans chacune des deux coupes sont présentées dans l'Illustration 96.

	Coupe AB	Coupe CD	Modèle régional [Douez O. et al. (2010)]
Perméabilité (m.s <sup>-1</sup> )	5.10 <sup>-6</sup> à 1,1.10 <sup>-3</sup>	3,4.10 <sup>-4</sup> à 2,6.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-4</sup> à 1,2.10 <sup>-3</sup>
Porosité (%)	1,5 à 10	1 à 5	1 à 1,9

Illustration 96 : Perméabilités et porosités implémentées dans les modèles AB et CD.

Concernant la coupe CD, une perméabilité de 5.10<sup>-5</sup> m.s<sup>-1</sup> et une porosité de 15 % est indiquée sur une distance à la côte de 1,3 km et une épaisseur de 5 à 18 m afin de retranscrire la présence des dunes.

# Conditions imposées

Conditions aux limites

Elles sont de plusieurs types :

En termes d'hydrodynamique :

- A flux nul sur la limité située en plaine.
- A potentiel imposé au contact avec l'océan.

# En termes de transport :

 Une salinité extérieure, i.e. une salinité appliquée à tout fluide entrant dans le système, est imposée au contact avec l'océan. Elle est de 19.5 g.L<sup>-1</sup>. D'après la relation ρ(C) convenue précédemment, la densité de l'eau de mer au contact de l'aquifère est de 1,025 g.dm<sup>-3</sup>.

La salinité des eaux superficielles de même que la salinité initiale de l'aquifère et de tout flux entrant dans l'aquifère est imposée à 40 mg.L<sup>-1</sup> de chlorure.

## Conditions internes

# Il s'agit ici:

- Des hauteurs de pluie infiltrée (en mm) définissant la recharge des nappes et imposées sur les mailles affleurantes,
- Des côtes de débordement dans les mailles où les couches affleurent. Cette côte de débordement est égale à la topographie. Il y a débordement si la charge calculée est supérieure à la côte topographique. La différence est alors traduite en débit de débordement allant rejoindre le cours d'eau le plus proche sur la base d'une grille de pente.

#### Résultats

# Appréciation du calage

L'Illustration 97 indique le statut des piézomètres de référence utilisé pour le calage de chaque coupe.

	Statut	Distance à la côte (m)
Coupe AB		
P5	Virtuel	285
P45	Virtuel	1600
P89	Virtuel	2660
Coupe CD		
P8	Virtuel	400
06074X0096	Observé	2084
P50	Virtuel	3320

Illustration 97: Statut des piézomètres de référence utilisés pour le calage des coupes AB et CD

Le calage des piézomètres apparait correct avec une moyenne des écarts de 30 à 40 cm (Illustration 98). Pour les deux coupes, la moyenne des charges simulées est comparable à celle de référence.

	Coupe AB	Coupe CD
Moyenne des charges de référence (m)	1,4	1,7
Moyenne des charges simulées (m)	1,6	1,4
Ecart-type des charges de référence (m)	1,1	1,1
Ecart-type des charges simulées (m)	1,4	1,2
Moyenne des écarts (m)	0,3	0,4
Ecart-type (m)	0,4	0,3

Illustration 98 : Caractérisation statistique des calages

De manière générale, on observe une surestimation des charges en année humide (2001). Les piézomètres P8 et P50 montrent tous deux une sous-estimation des charges en basses eaux des années 2000, 2001 et 2002 et en hautes eaux des années sèches 2003, 2004 et 2005.

Malgré ces quelques divergences entre charges simulées/références, les tendances importantes et les gammes de variations de charges sont respectées (

Illustration 99, Illustration 100). Les paramètres hydrodynamiques retenus permettent de retranscrire la réactivité du système aux différentes années climatiques et notamment, pour la coupe CD, le décrochage des charges en basses eaux des années sèches (2003, 2004, 2005) et le maintien des niveaux en basses eaux des années moyennes à humides (2000, 2001 et 2007).

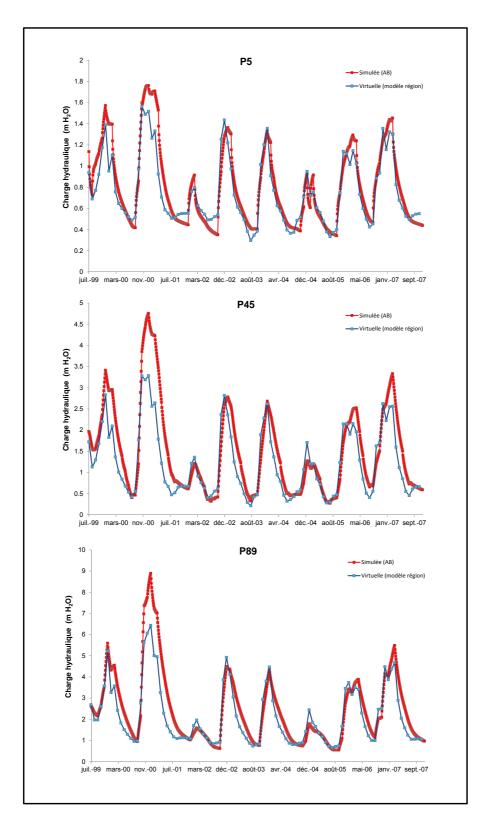


Illustration 99 : Charges simulées/références du modèle AB

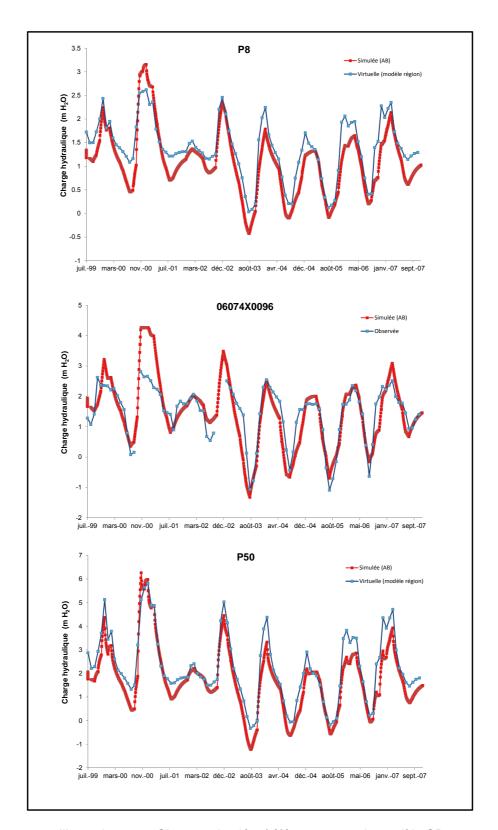


Illustration 100 : Charges simulées/références pour le modèle CD

# Evolution des charges pour les différentes simulations

L'influence de la remontée océanique sur les charges d'un modèle dépend, pour partie, des conditions internes du modèle (prélèvement, côte de débordement, charge et/ou débit imposé). Dans le cas des coupes AB et CD, rappelons que les limites des modèles coté terre sont à flux nuls et que les niveaux de nappe sont en partie contrôlés par le niveau des rivières sus-jacentes.

Quelle que soit la coupe, des comportements comparables sont observés (Illustration 101) :

- Les piézomètres situés à proximité du littoral (P5, P8) témoignent d'une remontée des charges hydraulique concomitante à celle du niveau océanique.
- Les piézomètres situés plus en terre (P45, P89, 06074X0096, P50) témoignent d'une augmentation limitée voire nulle des charges entre chaque scénarios, en période de hautes eaux, pour les années moyennes à humides (2000, 2001 et 2007 pour AB et 2001, 2002 pour CD). Plusieurs explications justifient se comportement :
  - o Le drainage de la nappe par les cours d'eau,
  - o L'atteinte des côtes de débordement, i.e. de la cote topographique.

Ces variations de comportement ont une influence sur le contrôle des gradients hydrauliques au sein de la nappe et donc incidemment sur le flux d'eau de la nappe vers la mer (ou inversement).

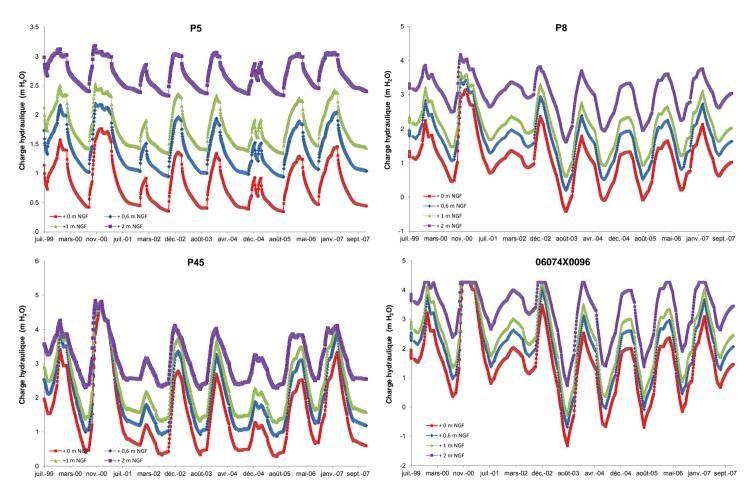


Illustration 101 : Evolution des charges hydrauliques en réponse aux différentes simulations de remontée océaniques. Coupe AB : P5, P45. Coupe CD : P8, 06074X0096.

# Evolution du biseau salé dans le temps

#### Coupe AB

L'Illustration 102 indique l'évolution temporelle de la somme des variations de concentrations V par rapport à un état initial fixé à février 2000. Cette date correspond à un biseau peu développé. Lorsque V/Vmax tend vers 1, l'intrusion du biseau atteint son maximum. Lorsque V/ Vmax tend vers 0, l'intrusion du biseau est faible et comparable à celle de février 2000. Les valeurs présentées correspondent à une simulation + 0 m NGF.

Les mois suivants les périodes de recharge sont associés à une diminution de l'intrusion saline. Seules les années de faible recharge hivernale (2001/2002 et 2004/2005) ne voient pas un retour du biseau à son état de référence. En comparaison des autres périodes de recharge, ces périodes de faible recharge hivernale sont caractérisées par un gradient hydraulique et une remontée du niveau piézométrique plus faibles (Illustration 103), facteurs favorisant ainsi le maintien du biseau établi en basses eaux.

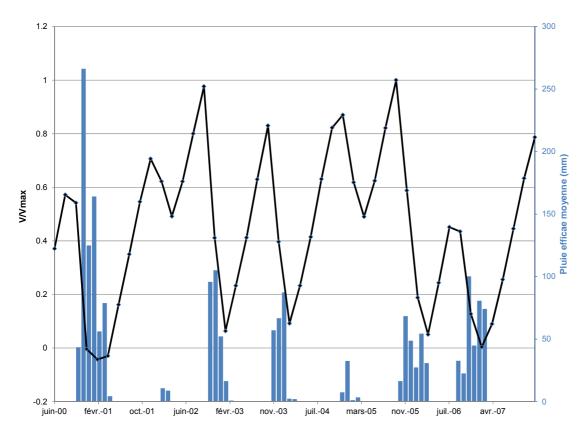


Illustration 102 : Evolution de la variation V de concentration dans le profil en fonction des périodes de recharge et d'étiage – Coupe AB- Simulation + 0 m NGF.

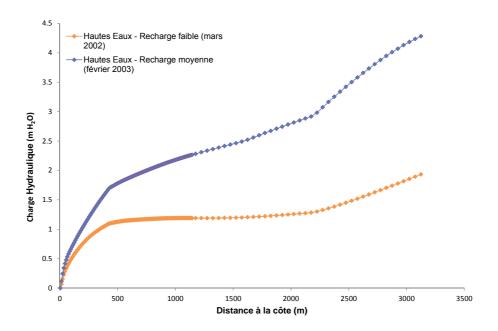


Illustration 103: Profils de charges hydrauliques pour une simulation à 0 m NGF - Coupe AB

A des fins de comparaison, 5 périodes caractéristiques des différents contextes climatiques et hydrodynamiques sont retenues :

- Février 2001 : Année humide, Hautes Eaux
- Avril 2005 : Année sèche, Hautes Eaux
- Octobre 2005 : Année Sèche, Basses Eaux
- Février 2007 : Année Moyenne, Hautes Eaux
- Août 2006 : Année moyenne, Basses Eaux

Rappelons que la dispersivité et les charges hydrauliques à proximité du littoral n'ayant pas fait l'objet d'un calage sur des valeurs mesurées, les valeurs absolues présentées par la suite sont à prendre avec précaution.

L'intrusion du biseau salé est tout d'abord apprécié pour une l'état initial à + 0 m NGF. Pour une dispersivité de 15 mètres, le pied du biseau varie de 100 à 360 m en fonction des conditions climatiques (Illustration 104). Les biseaux les plus faiblement développés (100 à 125 m) sont observés en hautes eaux - année humide et en hautes eaux - année moyenne. Les biseaux les plus développés sont simulés en année sèche avec un pied allant de 300 à 360 m.

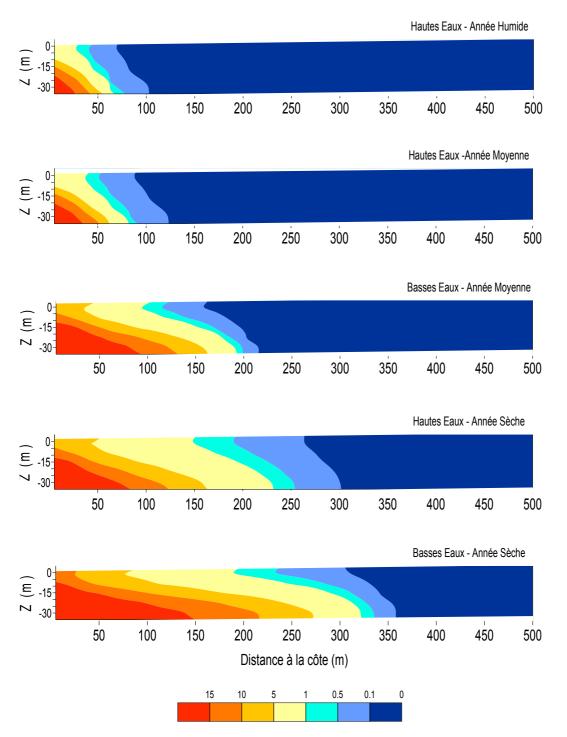


Illustration 104 : Biseau salé simulé au droit de la coupe AB pour un niveau océanique actuel (0 m NGF). Instantannés pour différentes années climatiques : année humide (2001), année sèche (2005), année moyenne (2006/2007). Echelle exprimée en g.L<sup>-1</sup> de chlorures.

L'Illustration 105 représente la courbe d'iso-concentration égale à 100 mg.L<sup>-1</sup> de chlorures pour différents scénarios de remontée du niveau océanique (+ 0 à +2 m NGF).

Les scenarios de remontée +0,6 et +1 m n'engendrent qu'un faible déplacement du front salé (variation relative de distance < 20 % correspondant au maximum à un déplacement du pied de 20 m). Les déplacements les plus importants sont générés par le scénario le plus pessimiste de + 2 m NGF. En fonction de l'année climatique, la variation relative de distance varie de 7 à 138 % soit une variation de distance de 20 m en basses eaux 2005 et de 130 m en hautes eaux 2001.

De fait, les variations maximum de distance sont observées en période de hautes eaux en année humide (2001) et année moyenne (2006/2007). Ce comportement est à mettre en relation avec le contrôle des charges dans l'aquifère sur ces mêmes périodes. En effet, en année humide comme en année moyenne, la remontée océanique impacte peu les charges hydrauliques de l'aquifère pour une distance supérieure à 300 m (P45-Illustration 101). Les charges sont alors en partie contrôlées par le drainage de la nappe par le cours d'eau du Goulet. Dans ce cas, une augmentation du niveau marin associée au maintien d'une charge constante dans les terres engendre une diminution du flux d'eau souterrain en direction de la mer (diminution du gradient hydraulique) qui favorise la migration du front salé.

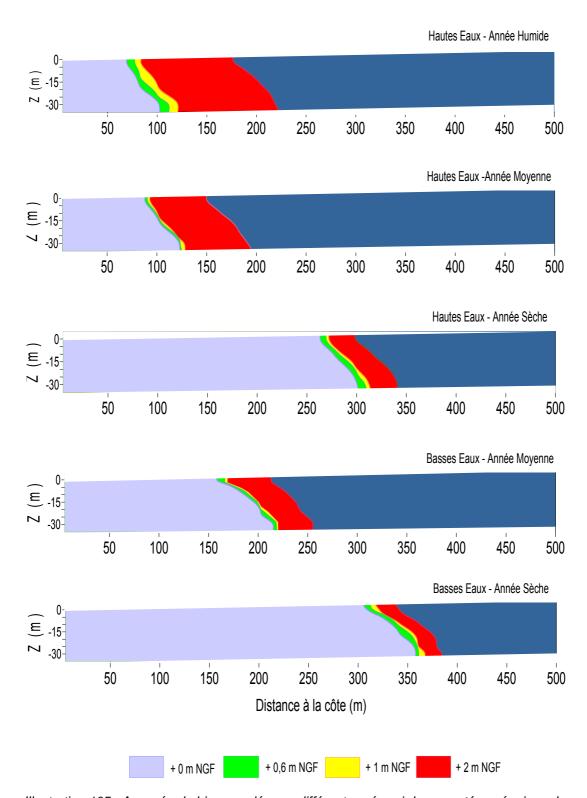


Illustration 105 : Avancée du biseau salé pour différents scénarri de remontée océanique. Le front équivaut à une concentration de 100 mg.L<sup>-1</sup> de chlorures.Coupe AB.

#### Coupe CD

Deux comportements contrastés sont observés pour la simulation à +0 m NGF (Illustration 106):

- Jusqu'en décembre 2002, les périodes de recharge conséquente sont associées à un retour du biseau à son emplacement de référence (février 2000). Ces périodes de recharge font suite à des périodes d'étiage pendant lesquelles le gradient hydraulique assure toujours un écoulement de la nappe vers l'océan ((Illustration 107, exemple des basses eaux 2000 et 2002).
- De septembre 2003 à juin 2006, les recharges hivernales 2003/2004 et 2005/2006 ne sont plus assorties d'un recul important du biseau tel qu'observé 1) sur les années précédentes et 2) aux mêmes dates sur la coupe AB. Ces périodes de recharge, caractérisées par des charges plus faibles qu'en 2000/2001 et 2002/2003 sont précédées par des étiages où les pompages engendrent de fortes dépressions en plaine. Cette réalité couplée au dôme piézométrique que constitue la dune engendre un fonctionnement hydrodynamique antagoniste (Illustration 107):
  - Entre la mer et le sommet de la dune, l'eau infiltrée s'écoule vers la mer.
  - Entre le sommet de la dune et l'arrière-pays, le gradient de charge s'inverse conduisant à des flux en nappe de la dune vers l'intérieur des terres. Ce gradient de charge inversé favorise le déplacement du pied du biseau vers l'intérieur des terres. Le retour à un gradient de charge positif étant progressif et le biseau largement avancé dans les terres, son recul en période de hautes eaux se trouve limité.

L'avancée du pied du biseau varie de 150 à 640 mètres (Illustration 108). Ces distances sont supérieures de celles mesurées aux mêmes dates pour la coupe AB. Comme expliqué précédemment le recul du biseau en période de hautes eaux est limité et dépend de l'antériorité de la distribution des charges dans le système.

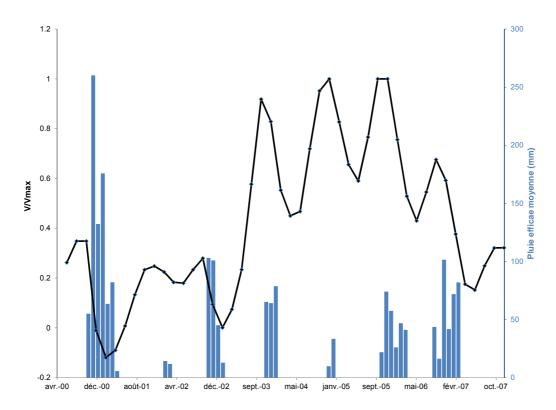


Illustration 106 : Evolution de la variation V de concentration dans le profil en fonction des périodes de recharge et d'étiage – Coupe CD- Simulation + 0 m NGF.

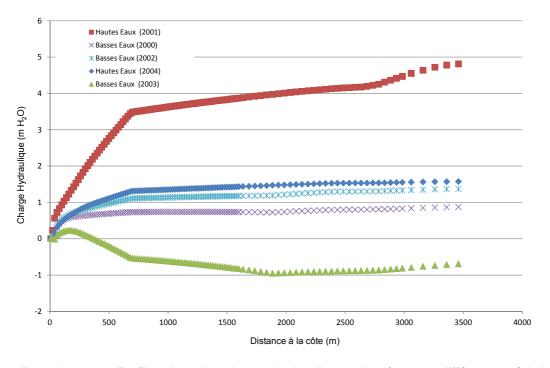


Illustration 107 : Profil en long des charges hydrauliques simulées pour différentes périodes et années climatiques. Simulation à + 0 m NGF.

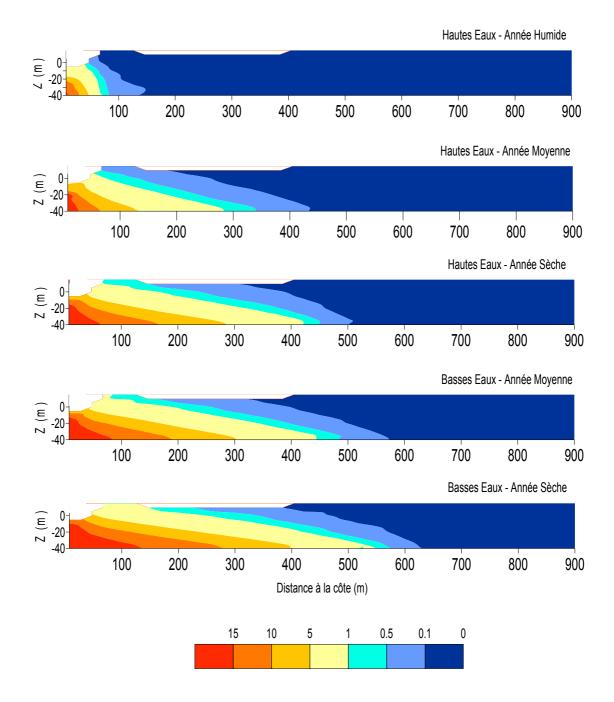


Illustration 108 : Biseau salé simulé au droit de la coupe CD pour un niveau océanique actuel (0 m NGF). Instantannés pour différentes années climatiques : année humide (2001), année sèche (2005), année moyenne (2006/2007). Echelle exprimée en g.L<sup>-1</sup> de chlorures.

L'Illustration 109 représente la courbe d'iso-concentration égale à 100 mg.L<sup>-1</sup> de chlorures pour différents scénarii de niveau océanique (+ 0 à +2 m NGF).

Les scenarios de remontée +0,6 et +1 m n'engendrent qu'un faible déplacement du front salé (variation relative de distance < 22 % correspondant au maximum à un déplacement du pied de 40 m). Les déplacements les plus importants sont générés par le scénario le plus pessimiste de + 2 m NGF. En fonction de l'année climatique, la variation relative de distance varie de 8 à 70 % soit une variation de distance de 40 m en basses eaux 2005 et de 100 m en hautes eaux 2001.

Les avancées du biseau sont plus importantes en périodes de hautes eaux sur les années humides à moyenne. Ce comportement s'explique par l'atteinte de la cote du débordement (i.e. de la topographie) qui impose alors une charge constante malgré la remontée du niveau océanique. Le processus est le même qu'en hautes eaux sur la coupe AB où le gradient hydraulique diminue de manière concomitante à la remontée du niveau océanique limitant les flux d'eau vers la mer et favorisant ainsi l'avancée du biseau.

Les années sèches ne constituent pas des années critiques vis-à-vis de la remontée océanique, les charges étant libres d'augmenter. Cette dernière observation est cependant à prendre avec précaution. Ainsi, la première phase réalisée en 2011 [Dörfliger et al. (2011)] prédisait un comportement quelque peu différent du piézomètre de Longeville ; sa charge n'était pas impactée par la remontée océanique. Si tel est le cas, le flux d'eau vers la mer est inférieur à celui prédit par le modèle en coupe et l'avancée du biseau s'en trouve sous-estimée.

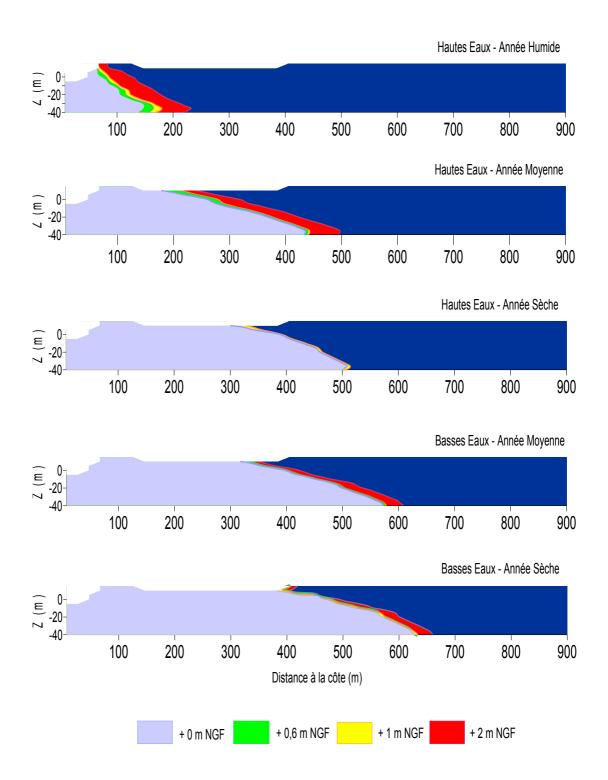


Illustration 109 : Avancée du biseau salé pour différents scénarri de remontée océanique. Le front équivaut à une concentration de 100 mg.L<sup>-1</sup> de chlorures.Coupe CD.

#### Conclusion

Les simulations conduites entre Longeville et Jard Sur mer indiquent une vulnérabilité variable de l'aquifère du Dogger aux intrusions marines.

Sur le secteur du Goulet, le biseau pour un niveau océanique actuel ne dépasserait pas 360 mètres d'intrusion pour une dispersivité de 15 m. L'augmentation du niveau océanique de 0,6 et 1 mètre engendre un faible déplacement du biseau (< 20 m) et ce quelles que soient les caractéristiques climatiques de l'année considérée. La sensibilité est plus prononcée pour une remontée du niveau océanique de 2 mètres, notamment en période de hautes eaux où les charges à l'intérieure des terres sont contrôlées par le drainage de la nappe par la rivière du Goulet.

La région entre le front de mer et Longeville caractérisée par la présence de dunes témoigne d'une vulnérabilité particulière vis-à-vis des conditions d'exploitation actuelle. Les dépressions dues au pompage d'irrigation en basses eaux génèrent une inversion des flux de la dune vers l'intérieur des terres. Ce fonctionnement exacerbé lors des années sèches favorise l'entrée du biseau salé. Ainsi, pour des paramètres hydrodynamiques comparables à ceux du secteur du Goulet, l'intrusion atteint 640 mètres. La dune, caractérisée par un coefficient d'emmagasinement élevé (15%) ne joue pas le rôle de barrière hydraulique comme supposé en phase 1. En revanche, le secteur est peu sensible, vis-à-vis de l'intrusion du biseau, à l'influence de la remontée océanique, la topographie autorisant une remontée concomitante des charges avec celle du niveau marin.

Quel que soit le secteur considéré, ces conclusions sont à prendre avec précaution. Si ces simulations permettent d'une part d'appréhender le fonctionnement contrasté de ces secteurs, elles soulèvent d'autre part l'importance du rôle joué par les conditions internes du modèle (cote topographique, niveau d'eau des rivières et canaux etc.) et la nécessité de prise en compte des échanges entre nappes et rivières. Des divergences de comportement sont d'ailleurs observées entre les charges simulées par le modèle en coupe et celles simulées par le modèle régional hydrodynamique. Ces divergences sont inhérentes au passage d'un modèle hydrodynamique tridimensionnel à un modèle en coupe, aux changements d'échelle imposés à la définition des paramètres (topographie, paramètre hydrodynamiques etc. définies sur des mailles de 5.10<sup>-2</sup> km<sup>2</sup> en lieu et place des 1 km<sup>2</sup> du modèle régional) et à la prise en compte du transport de salinité et des effets densitaires. Seul un jeu de paramètres de terrain densément répartis (logs de conductivité et suivi piézométriques) permettrait de contraindre le modèle de manière à assurer la validité des résultats de simulations, l'idéal étant de basculer vers un modèle tridimensionnel type modèle régional mais adapté à l'échelle du secteur étudié.

Entre Longeville sur Mer et Jard sur Mer, le Dogger, aguifère karstigue, est principalement sollicité à des fins agricoles. L'aquifère étant au contact de l'océan, le risque d'intrusion marine, potentiellement intensifiée par les conditions d'exploitation, mérite d'être pris en compte. Les analyses physico-chimiques réalisées en 2011 ne révèlent aucune intrusion marine majeure pour des ouvrages éloignés de 100 à 2500 mètres de la côte. L'influence d'une remontée océanique sur l'avancé d'un potentiel biseau est testée sur deux secteurs de topographie contrastée occupés ou non par un réseau d'eau de surface. Si le secteur avec recouvrement dunaire (Longeville) apparait actuellement sensible à l'intrusion marine du fait 1) d'une topographie concave à l'arrière des dunes et 2) des pompages d'irrigation, sa vulnérabilité à la remontée océanique est limitée. A l'inverse, l'intrusion marine actuelle sur le secteur au cordon dunaire interrompu (St Vincent sur Jard) semble faible. En revanche, sa sensibilité à une remontée océanique est plus forte que dans le cas précédent du fait d'un contrôle des charges par le drainage de la nappe par le cours d'eau Le Goulet. Ces simulations permettent d'appréhender le fonctionnement de différentes parties du littoral. Cependant, la confirmation de ces observations nécessiterait un jeu de paramètres d'entrée (logs de conductivité, suivi piézométriques) aujourd'hui absent afin de contraindre au mieux les modèles dont les résultats sont fortement dépendants des conditions internes imposées et notamment des échanges entre nappes et rivières/canaux.

## 7. Recommandations

La cartographie de la vulnérabilité en grand ou de sensibilité des aquifères côtiers visà-vis d'une remontée du niveau marin à l'échelle métropolitaine a mis en évidence des zones plus vulnérables que d'autres, à savoir :

- La côte orientale de la Corse :
- Une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ;
- La côte nord du Poitou-Charentes ;
- La côte au nord-est de la Bretagne ;
- La côte du Calvados

A noter que les zones méditerranéennes sont également les plus marquées par une influence anthropique qui peut accentuer le risque d'intrusion saline, comme en attestent les cartes de pression démographique et de prélèvements par usage.

Les sept zones tests de la cartographie de la vulnérabilité selon la méthode GALDIT ont mis en évidence des secteurs de forte à moyenne vulnérabilité d'extension variable, pour la situation actuelle et pouvant être accentuées pour un niveau marin extrême de +2m. Les zones les plus vulnérables peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres.

Les recommandations concernent de manière générale la gestion et suivi des aquifères côtiers pour lesquels l'intrusion saline naturelle peut être accentuée particulièrement par des prélèvements, d'ores et déjà et qui sont situés dans des zones dites sensibles à une remontée de niveau marin. Les recommandations sont de trois types pour contribuer à une gestion des aquifères côtiers comme l'indique l'illustration suivante.

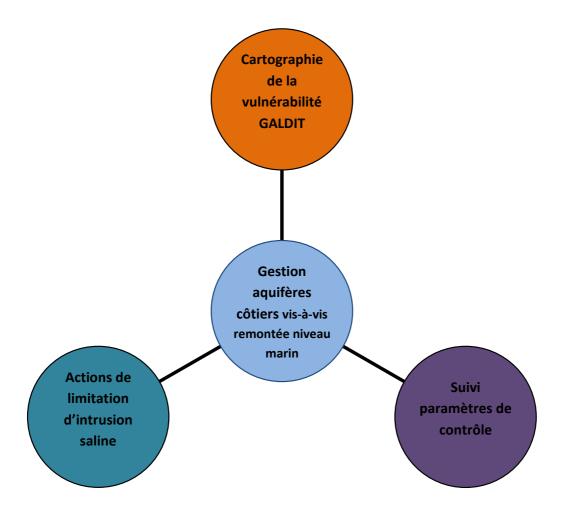


illustration 110 : schéma des trois types de catégories de recommandations pour la gestion des aquifères côtiers vis-à-vis d'une remontée du niveau marin

#### Les recommandations concernent :

L'établissement d'un réseau de suivi des eaux souterraines, tant du point de vue de la charge hydraulique que de la salinité. Ce réseau doit comprendre un nombre de piézomètres suffisant au regard de la taille de l'aquifère et des hétérogénéités hydrogéologiques identifiés à partir de données de concentration en chlorures dans des forages existants et d'autre part des profils géophysiques. En fonction de la complexité du contexte hydrogéologique, des piézomètres en flûte de pan peuvent être installés, afin de suivre la charge hydraulique et la salinité au niveau des horizons productifs. Des prélèvements peuvent être effectués pour des analyses de chlorures sur ces horizons particuliers une fois par année en période de basses eaux, en ayant vérifié

selon le guide de l'ONEMA 2010 de Kloppmann et al. (BRGM RP-59496-FR) l'origine de la salinité. Ces données permettent de disposer d'images à des instants donnés (basses eaux) et d'apprécier l'évolution année après année. Par ailleurs, des suivis de type log de conductivité électrique au niveau de certains piézomètres permettent de disposer de données plus précises sur les niveaux aquifères affectés par des intrusions salines. L'interprétation des variations piézométriques et de la salinité en considérant les facteurs influençant ces variations (recharge, prélèvement) permet de définir des seuils d'alerte. L'enregistrement peut être télétransmis et des alertes émises, permettant de procéder à des actions pour réduire les intrusions salines.

- L'acquisition de données complémentaires sont nécessaires pour la gestion des aquifères côtiers: piézométrie régionale en hautes et basses eaux à partir de points existants, voire de nouveaux forages au besoin, données spatiales de salinité voire échantillonnage pour analyse des concentrations en chlorures pour des conditions de basses eaux (étiage).
- La mise en œuvre de la cartographie de la vulnérabilité à l'échelle régionale ou locale à l'aide de la méthode GADLIT sur les aquifères côtiers identifiés comme sensibles au niveau national et d'autre part la caractérisation des aléas sur ces zones sont à réaliser.
- Pour les aquifères côtiers exploités pour différents usages (Alimentation en eau potable, agriculture, tourisme, industrie) et pour lesquels des zones vulnérables fortes ou moyennes sont définies à l'aide de la méthode GALDIT, il est nécessaire de disposer d'un inventaire des différents points d'eau et de connaître les points de prélèvements.
- Dans le cas des aquifères côtiers pour lesquels des intrusions salines sont d'ores et déjà avérées et pour lesquels les enjeux sont importants, des actions de gestion doivent être mises en place : (i) réduction des prélèvements de manière temporaire, (ii) recharge artificielle avec des eaux de surface ou des eaux traitées pour constituer une barrière hydraulique. Ces actions peuvent être gérées en ayant recours à une modélisation hydraulique spatialisée prenant en considération les effets de densité. Il s'agit ainsi de passer d'une gestion passive d'une intrusion saline (cf (i)) à une gestion active ou dynamique (cf (ii)) en optimisant les pompages et les réalimentations en fonction des prévisions apportées par la modélisation et le suivi en continu. Il s'agit de développer un système de gestion active des aquifères côtiers permettant au gestionnaire d'injecter de l'eau douce en fonction des prélèvements d'eau potable, de façon à maîtriser (repousser, stabiliser ou ralentir) la progression de l'intrusion saline, et d'étudier la possibilité d'avoir recours à des eaux résiduaires urbaines prétraitées pour la réalimentation en intégrant les impacts sanitaires et environnementaux liés à une injection dans la zone non saturée d'un aquifère.

## 8. Conclusion

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) pour les niveaux marins. 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. Suite aux premiers tests réalisés en 2010, la méthode a été appliquée au niveau de 7 zones d'études, ayant été identifiées comme sensibles de manière globale à l'aide de la méthode de cartographie de la sensibilité des aquifères côtiers à l'échelle de la métropole.

Les zones suivantes les plus vulnérables ont été mises en évidence à partir de la cartographie à l'échelle nationale:

- La côte orientale de la Corse ;
- Une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon ;
- La côte nord du Poitou-Charentes ;
- La côte au nord-est de la Bretagne ;
- La côte du Calvados

A noter que les zones méditerranéennes sont de plus les plus marquées par une influence anthropique pouvant également accentuer cette vulnérabilité, comme en attestent les cartes de pression démographique et de prélèvements par usage.

Les tests de simulation réalisés dans un premier temps au niveau de l'estuaire de la Gironde 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 ; l'impact associé aux prélèvements peut être tout aussi important. Il est possible que l'incertitude sur les flux entraine 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 côte moyenne de l'estuaire de +0.6m et un doublement de la salinité de l'estuaire entrainerait 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.

Les simulations conduites au niveau du Marais Poitevin selon des coupes indiquent une vulnérabilité variable de l'aquifère du Dogger aux intrusions marines. Sur le secteur du Goulet, le biseau pour un niveau océanique actuel ne dépasserait pas 360 mètres d'intrusion pour une dispersivité de 15 m. L'augmentation du niveau océanique de 0,6 et 1 mètre engendre un faible déplacement du biseau (< 20 m) et ce quelles que soient les caractéristiques climatiques de l'année considérée. La sensibilité est plus prononcée pour une remontée du niveau océanique de 2 mètres, notamment en période de hautes eaux où les charges à l'intérieur des terres sont contrôlées par le drainage de la nappe par la rivière du Goulet. La région entre le front de mer et Longeville caractérisée par la présence de dunes témoigne d'une vulnérabilité particulière vis-à-vis des conditions d'exploitation actuelle. Les dépressions dues au pompage d'irrigation en basses eaux génèrent une inversion des flux de la dune vers l'intérieur des terres. Ce fonctionnement exacerbé lors des années sèches favorise l'entrée du biseau salé. Ainsi, pour des paramètres hydrodynamiques comparables à ceux du secteur du Goulet, l'intrusion atteint 640 mètres. La dune, caractérisée par un coefficient d'emmagasinement élevé (15%) ne joue pas le rôle de barrière hydraulique comme supposé lors des premières simulations à l'échelle du Marais Poitevin. En revanche, le secteur est peu sensible, vis-à-vis de l'intrusion du biseau, à l'influence de la remontée océanique, la topographie autorisant une remontée concomitante des charges avec celle du niveau marin.

Les recommandations à mettre en œuvre sont d'une part de dimensionner un réseau piézométrique de surveillance, (charge hydraulique et salinité) afin de définir des niveaux d'alerte pour lesquels des actions de modification de l'utilisation de la ressource en eau doivent être mises en place et d'autre part de réaliser soit une cartographie de la vulnérabilité pour les aquifères les plus sensibles tels que caractérisés à l'échelle national, soit une modélisation permettant de simuler différents scénarios de gestion pour des niveaux marins tels que proposés afin d'anticiper des adaptations. Ces adaptations peuvent passer par des limitations des prélèvements pour les différents usages voir à avoir recours à une gestion active, avec des actions de recharge artificielle pour limiter la progression d'un biseau salé.

## 9. Principales Références

Anongba B. (2007) – Identification du système hydrogéologique des formations quaternaires et callovio-oxfordiennes du Marais Poitevin par approche couplée minéralogique, hydrodynamique et géochimique. Thèse, Université de Poitiers, 379 p.

Astie H. et Bellegarde R., 1974, Etudes 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. These de doctorat en Hydrogéologie, Université Montpellier 2.

Auriol J. et Bellegarde R., 1977, Etude 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): 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: 67-80.

Bresson G. (1975) - Etude hydrogéologique des nappes jurassiques du sud de la Vendée (zone ouest)- BRGM/ 75-SGN-121-BPL, 55 p, 12 ill., 11 tab., 6 ann.

CALLIGEE (1995) – Plaine et marais du sud Vendée et de l'ouest des Deux-Sèvres : Etude globale pour la gestion de la ressource en eau souterraine. Partie 2 : La plaine. 87 p.

Canadell JG, Corinne Le Quéré, Michael R. Raupach, Christopher B. Field, Erik T. Buitehuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, RA. Houghton, Gregg Marland (2007): Contributions to accelerating atmospheric CO2 growth form 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 reevalutation 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, Pages 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 seawater 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, pp. 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 pages, 83 illustrations, 4 annexes. (Rapport BRGM)

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. (Rapport BRGM)

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 pp.

Custodio, E., 2002. Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures dans Bocanegra, Martines and Massone (Editors), Groundwater and human development, 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, 77p., 27 fig., 5 tabl. (Rapport BRGM)

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, 6p.

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

Dörfliger N., Schonburgk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O. (2011) – Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquence sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.

Douez O. et Touret Y. (2010) - Sectorisation des masses d'eau libres du bassin Adour-Garonne en Poitou-Charentes. Rapport BRGM RP-58878-FR, vol.2, 49 pages, 28 ill., 3 ann.

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.

Douez O., Revidon-Audry M., Touret Y. et Léonard S. (FREDON) (2009) - CPER 2007-2013 - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2009. Rapport BRGM RP-58877- FR, 75 p., 34 ill, 1 ann.

Douez O., Touret Y. et Léonard S. (2009) - CPER 2007-2013 - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2008. Rapport BRGM RP-57670-FR, 75 p., 39 ill, 1ann.

Feseker, T., 2007, Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany. Hydrogeology Journal 15 : 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. 30ill., 1ann. (Rapport BRGM)

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

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: 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,

Glénisson P. (1995) – Caractérisation du biseau salé dans la nappe du Dogger en bordure du Marais Poitevin (Région de Luçon – Fontenay-le-Comte). Thèse, Université de Nantes, 301 p.

Goujou J.C, Debrand Passard S., Hantzpergue P., Lebret P. (1994). Carte géologique de la France au 1/50000- Les Sables d'Olonne – Longeville. BRGM.

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/1748-9326/2/2024002/erl7 2 024002.html

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

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

IPCC. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group 1 to the Third Assessement 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 pp

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, 351-383.

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)

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

Lavie J., Bichot F., Fournier A., Léonard S., (2004) - CPER 2000 / 2006 Phase 3 – Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2003 – rapport BRGM/RP-53086-FR

Lavie J., Bichot F., Guilbert M., et Barrault M. (2006) - CPER 2000 / 2006 Phase 5 – Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2005 – rapport BRGM/RP-54710-FR

Lavie J., Bichot F., Léonard S., Bennani T., (2005) - CPER 2000 / 2006 Phase 4 – Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2004 – rapport BRGM/RP-53841-FR

Lavie J., Cluzaud M. et Barrault M. (2007) - CPER 2000 / 2006 Phase 6 - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2006 - rapport BRGM/RP-55515-FR

Lavie J., Léonard S., Baudry D., Douez O., Ollivier.G., (2002) - CPER 2000 / 2006 Phase 1 - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2001 - rapport BRGM/RP-51638-FR

Lavie J., Léonard S., Bichot F, Douez O., Gras E., Peset S., (2003) - CPER 2000 / 2006 Phase 2 - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2002 - rapport BRGM/RP-52390-FR

Lloyd J.W., Heathcote J.A. (1985) - Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater. Clarendon Press, Oxford, England

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 4th 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 : 463-470.

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoth 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 : 281-297.

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

Négrel P., Guerrot C. Millot R. (2007) – Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in France : influence of sources and hydrogeochemical implications. Isotopes in Environmental and Health Studies, Vol. 43 (3), 176-196.

Noyer M.L., Menjos A., Elsass Ph., Thiéry D., Martin J.C. avec la collaboration de SAUTY J.P., VANCON J.P. (1998) – Modèle de la nappe d'Alsace – Projet de développement 312 – Rap. Final. Rap BRGM R 40335, 207 p., 47 fig., 20 tab., 6 ann.

Petit V. (1996) - avec la collaboration pour les synthèses régionales: Caous JY. (Nord-Pas-de-Calais), Czernichowski I. (Picardie), de La Querière P. (Haute- Normandie), Mäzene 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 figures, 1 annexe.

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

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, pp. 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: 25-35.

Ranjan, S.P., Kazama, So., Sawamoto, M., Sana, A., 2009, Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources. Ocean & Coastal Management 52: 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. Schulze-Makuch, D. 2005. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. Ground Water 43, no. 3:443–456.

Sourisseau B., 1987, Etudes 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 AQI.

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. (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. (1993) – Modélisation des aquifères complexes – Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. Revue Hydrogéologie. 4, 325-336.

Thiéry D. (2008) - Code MARTHE 7.0 : Couplage Nappe-Rivières et Nappe-Drains ; Bilans Hydroclimatiques, Note technique NT EAU 2004/19, 2ème édition,19p

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.

Thiéry D., Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements, Rapport BRGM R-32210.

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 RP-52713-FR.

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

Vermeer, M., Rahmstrof, S. 2009. Global sea level linked to global temperature; PNAS, December 22, 2009, vol. 106, no. 51, 21527–21532

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

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

# **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 : interconnections 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 associes.

#### 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 Miehe 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. 30ill., 1ann.

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 6p. + 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., Dörfliger 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-quartenaire du Roussillon. Modélisation mathématique des risques d'intrusion marine dans l'aquifère plio-quartenaire. 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.

Debuisson 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-quartenaire 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 Pasde-Calais, relations eaux soutertaines - 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 - Prélevement et piezométrie. Mai 2010. BRGM/RP-59226-FR.

#### **Normandie**

Equilbey (2001) - Analyse succincte de dossiers E.S.R. zone industrielle de Caen Mondeville (Calvados) Contecte et vulnérabilité hydrogéologique BRGM/RP-51432-Fr.

Dassibat C. (1978) - Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'orne a 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 a porosite 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 Camarque (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 deltaique 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 lalimenter 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.

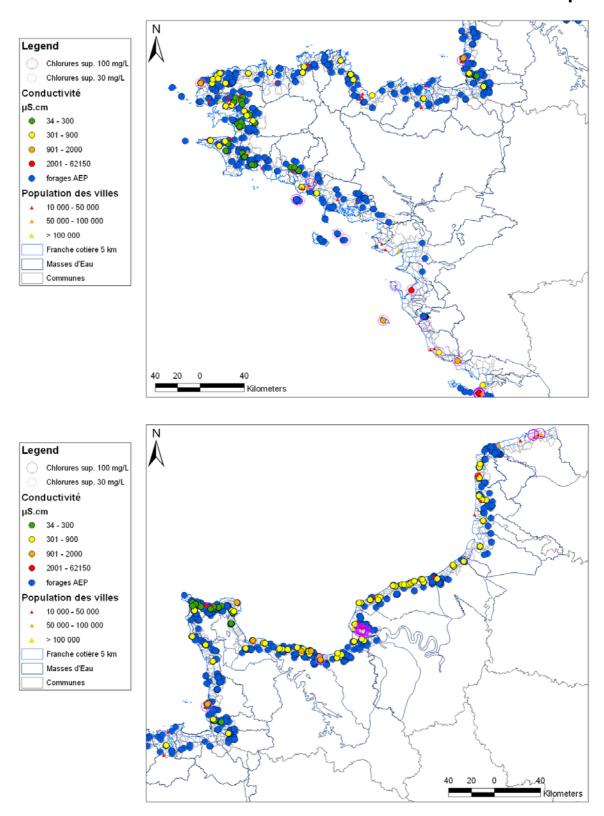
Lemordant Y., (2000) - Gestion des eaux souterraines en Poitou-Charentes - Année 3. Réseau qualité- Etude de faisabilité- Synthèse et validation des points de surveillance. Rapport BRGM/RP-50334-FR.

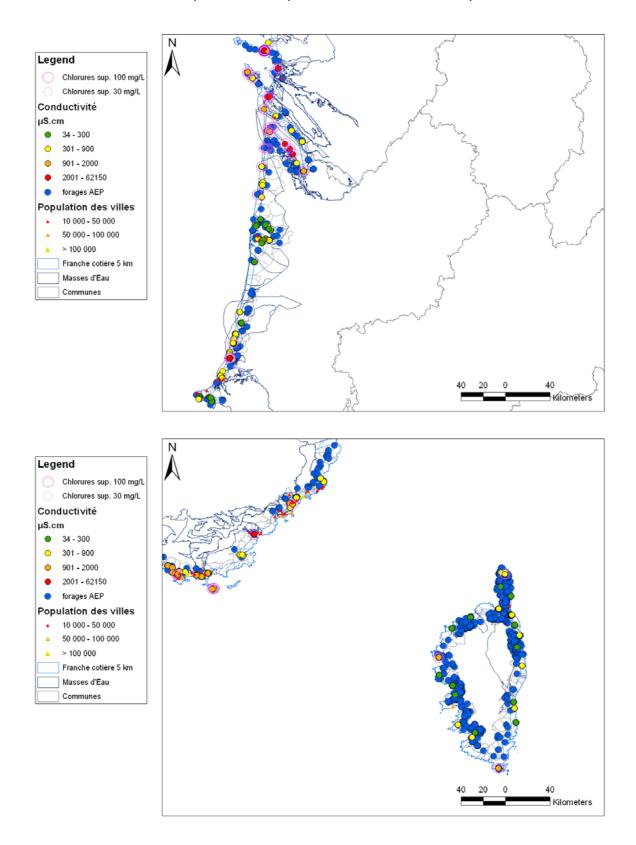
Lavie. J., Bichot. F., Guilbert M., Barrault M., (2006) - Réseau régional de suivi de la qualité des nappes en 2005. Volume 1 : Gestion du réseau et exploitation des résultats. Volume 2 : Résultats des analyses 2001-2005. Volume 3 : Synthèse et fiches des points.

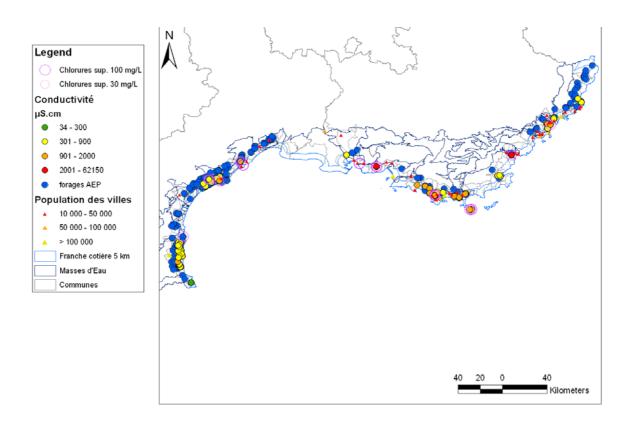
Giraud, F., P. Lachassagne, B. Ladouche, Ph. Weng, J.L. Pinault, C. Chevallier (2000) - Etude hydrologique et hydrogéologique du marais de Rochefort (Charente-Maritime). Rapport BRGM/RP-50247-FR, 121 pages + annexes.

# **Annexe 2**

# Cartographie des forages pour l'AEP et des conductivités électriques







# **Annexe 3**

#### 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 le caractéristiques hydrodynamiques générales des aquifères côtiers languedociens), une démarche plus simpliste et moins exigeante en termes de données, en première approximation a été testée.

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 guaternaires 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 1).

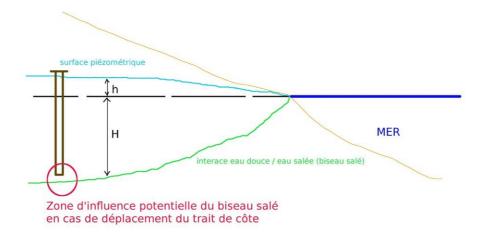


Illustration 1 : Description schématique de la caractérisation de la vulnérabilité d'un forage à l'intrusion saline.

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 2).

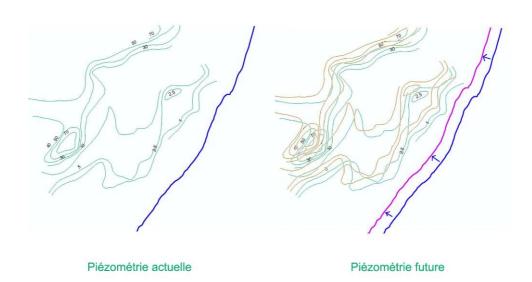


Illustration 2 : Schématisation de l'impact théorique du déplacement du trait de côte sur la piézométrie.

Le déplacement du trait de côte n'étant pas assimilable à une simple translation comme sur l'exemple de l'Illustration 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.

### 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 3). 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 4).

Nom du captage	Usage	Indice BSS	Volume prélevé (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /an)	Profondeur (m)
Fles Nord	AEP	10163X0158	400	109
Fles 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 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.

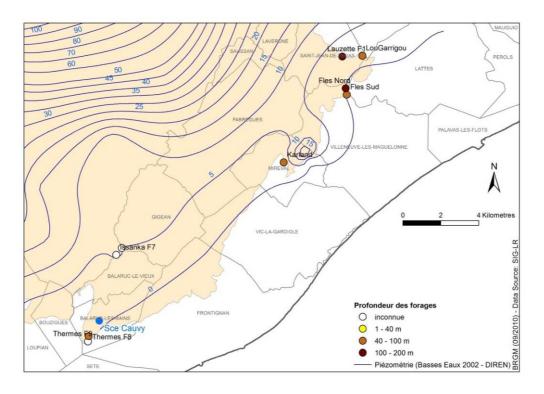


Illustration 3 : Situation de la nappe contenue dans les calcaires jurassiques de la Gardiole au cours des basses eaux de 2002 et des forages exploitant cette nappe.

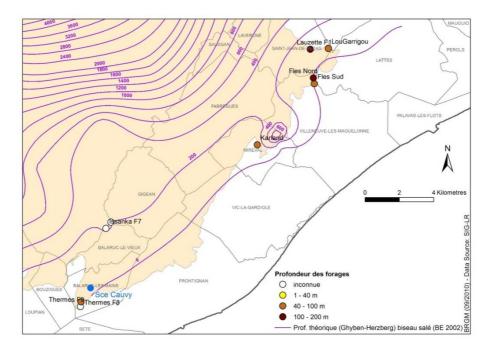


Illustration 4 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les calcaires jurassiques de la Gardiole, au cours des basses eaux de 2002.

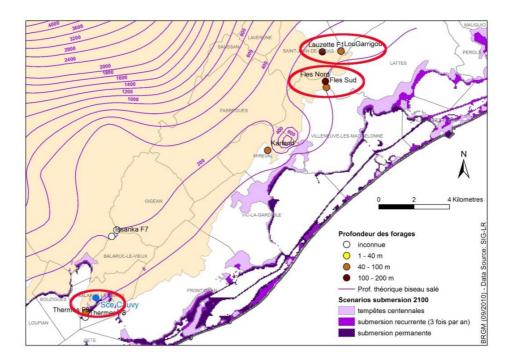


Illustration 5 : Localisation des ouvrages implantés dans les calcaires jurassiques et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

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 5). 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. 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 (103 m³/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.

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 ). 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 Vauguieres (09915X0201), Garrigues B (09908X0361), de Gastade 10 (09916X0087), d'Aubettes 1 (09912X0261), de Ginestie (09912X0240) et de C. F4 BON P (09913X0439).

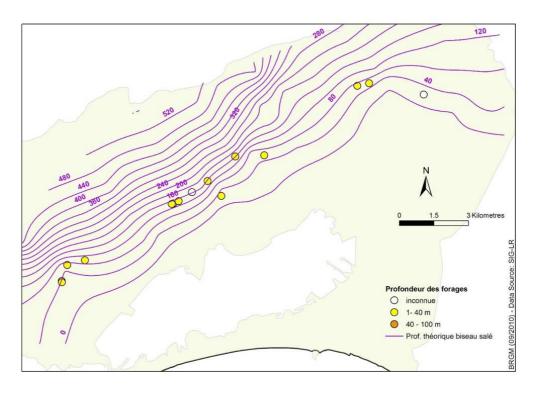


Illustration 6 - Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions villafranchiennes de la nappe de Mauguio-Lunel, en 2003.

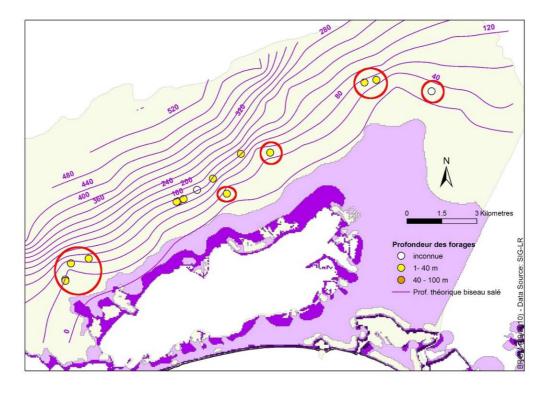


Illustration 7 - Localisation des ouvrages implantés dans la nappe de Mauguio-Lunel et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

# • 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 8), 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 considérée.

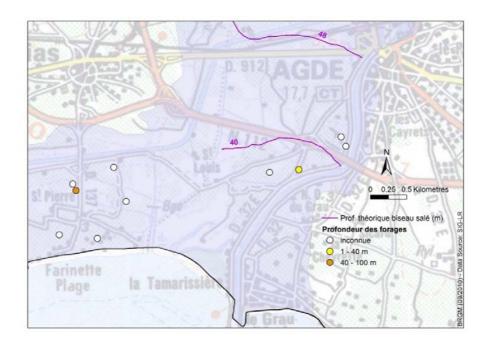


Illustration 8 - Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Hérault, en 1972.

L'illustration 8 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. 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 St 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 l'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). 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.

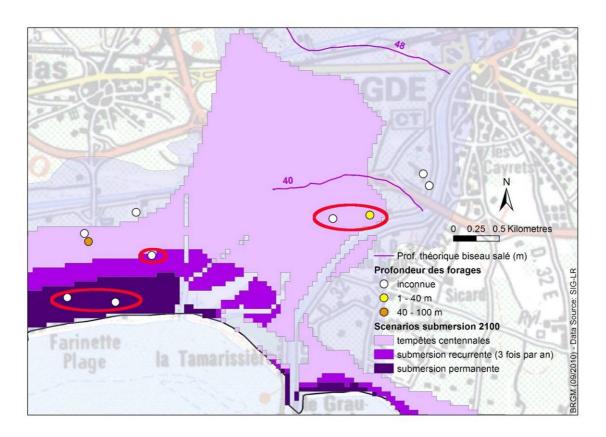


Illustration 9 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Hérault et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

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.

# 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 10), 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.

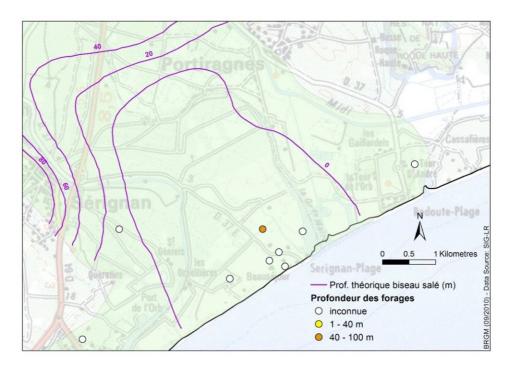


Illustration 10 - Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Orb, en 1976.

L'illustration 10 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.

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.

Si l'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 11). Cette progression serait à même d'impacter les ouvrages de F1 Mer et Soleil, F2 Les Vignes D'or, F1 les Orpellieres (10405X0176), F2 Beausejour (10406X0092), F1 Mini Golf Du Lion (10406X0093), F3 Le Grand Large (10406X0091), F2 Bleu Marine (10406X0090), et F3 Les Sablons (10406X0102).

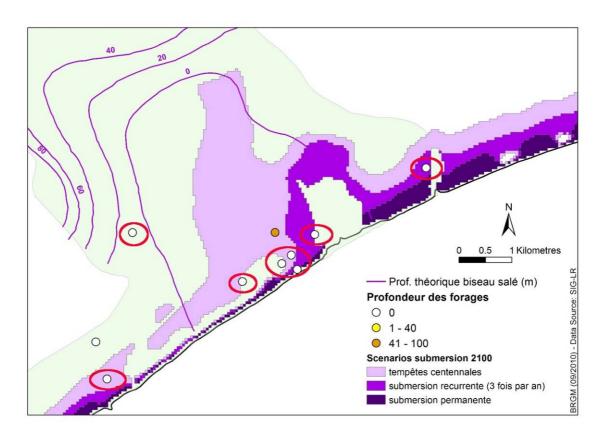


Illustration 11 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Orb et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

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 12), 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.

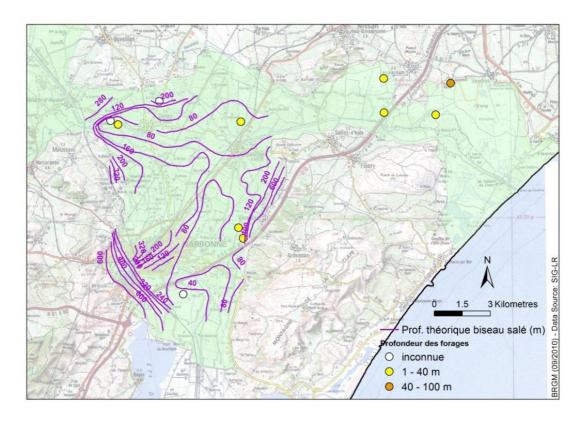


Illustration 12 : Situation théorique (formulation Ghyben-Herzberg) de la profondeur du biseau salé dans les alluvions quaternaires de la basse-vallée de l'Aude, en 1965.

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 l'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 13). En effet, le secteur de l'étang de Bages situé au contact avec l'entité alluviale serait à priori très peu submergé, la submersion gagnant plutôt du terrain ponctuellement un peu plus au sud et sur des distances inférieures à 500 m.

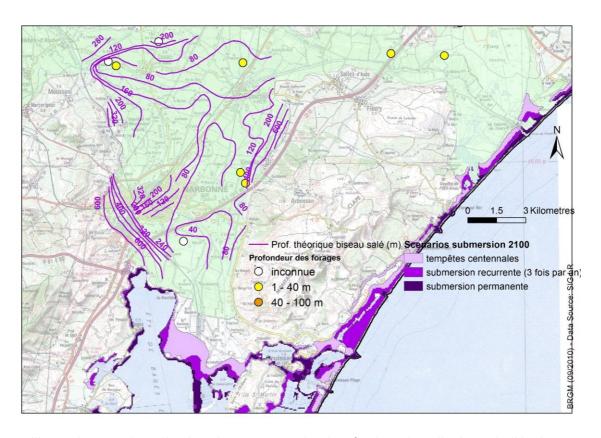


Illustration 13 : Localisation des ouvrages implantés dans les alluvions de l'Aude et potentiellement impactés par les scénarios de submersion récurrente et permanente.

Une démarche simplifiée 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 la cadre du projet MISEVA au niveau du Languedoc Roussillon. 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 lanquedociens contenant des nappes libres à semicaptives en bordure littorale. Cette démarche n'a pas été appliquée aux aquifères contenant des nappes captives d'importance régionale que sont celui 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. A 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 salée 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.

# **Annexe 4**

# Calcaires karstifiés du Dogger dans le marais poitevin

Dans le Marais Poitevin, l'aquifère des calcaires karstifiés du Dogger présente des concentrations en chlorures élevés dans la partie captive. Une campagne de terrain indique des taux peu élevés dans la partie libre. Cet aquifère a été choisi pour un test cartographique de la méthode GALDIT car un modèle hydrodynamique a déjà été réalisé sur la zone (Douez et al. 2010, Douez et al. 2011). La zone d'étude prend en compte la partie de l'aquifère à proximité de la côte jusqu'à 40 km à l'intérieur des terres.

# • Paramètre G-Type d'aquifère

Le premier paramètre de la méthode demande de connaître le type de l'aquifère. Les terrains du Bajocien/Bathonien affleurent entre Niort et le littoral selon une bande qui borde le marais. A cet endroit, la nappe libre du Dogger vient alimenter le Marais Poitevin au nord à la faveur de nombreuse sources de débordement sortant à la limite calcaires-argiles du Marais. Vers le sud, la nappe devient captive sous les calcaires marneux du Callovien et du Jurassique supérieur (Douez et al., 2010).

Le référentiel BDLISA a été utilisé pour délimiter les "Marnes et calcaires du Bajocien-Bathonien du sud Vendée", qui sont libres au nord, et captives au sud. Ces résultats de la BDLISA ont été traduits selon la méthode GALDIT pour obtenir une carte de type d'aquifère (paramètre G) (Figure 1).

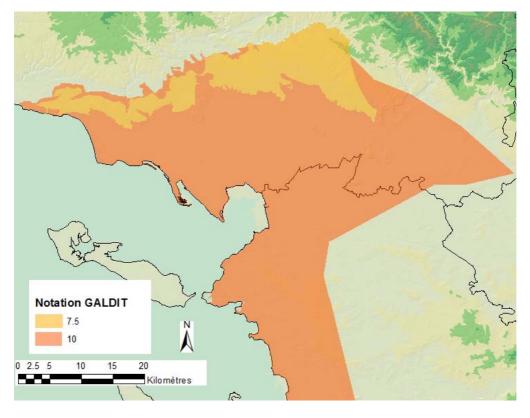


Figure 1 : Carte de répartition des classes du type d'aquifère (paramétre G)

# • Paramètre A- Conductivité hydraulique de l'aquifère

En ce qui concerne les paramètres hydrodynamiques, l'interprétation des pompages d'essai donne des valeurs de transmissivité comprises habituellement entre 10<sup>-5</sup> m²/s et 10<sup>-2</sup> m²/s et des valeurs d'emmagasinement pour les secteurs libres de cet aquifère comprises entre 10<sup>-3</sup> et 10<sup>-2</sup> (Douez, Bichot, Dequit, Dugruillon, Putot and Petit, 2010).

La carte de perméabilité issue du modèle régional (Figure 2) a permis d'établir la carte de conductivité selon la méthode GALDIT (paramètre A, Figure 3). La zone étudiée est caractérisée par une grande variabilité de perméabilité. Ceci s'explique notamment par la zone au sud recouverte par le marais, où la perméabilité est plus faible et dépasse rarement les 5 m/j. Au nord, les perméabilités sont plus importantes et dépassent régulièrement les 40 m/j par jour.

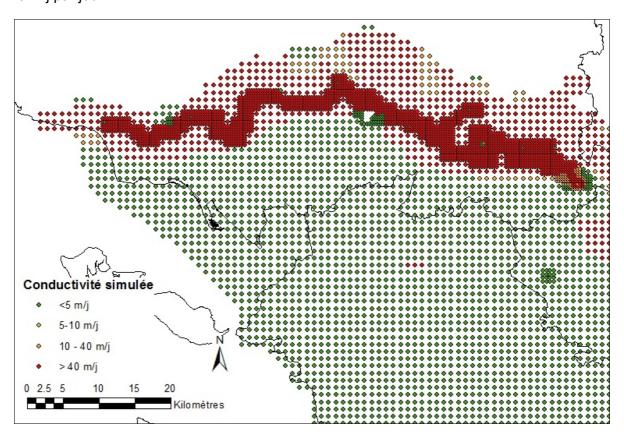


Figure 2: Carte de la conductivité hydraulique issue des simulations du modèle hydrodynamique

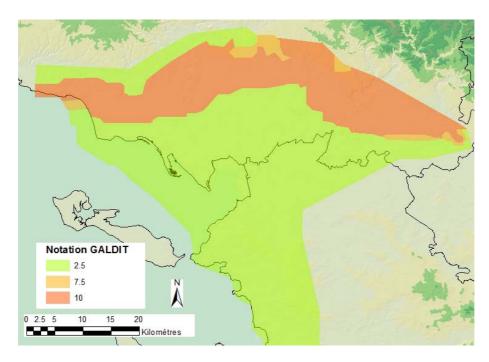


Figure 3 : Carte de répartition des classes de conductivité hydraulique de l'aquifère (paramétre A)

# Paramètre L – Hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de la hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer sont issues d'une extraction de la piézométrie du modèle hydrodynamique à l'étiage en 2005 (Figure 4).

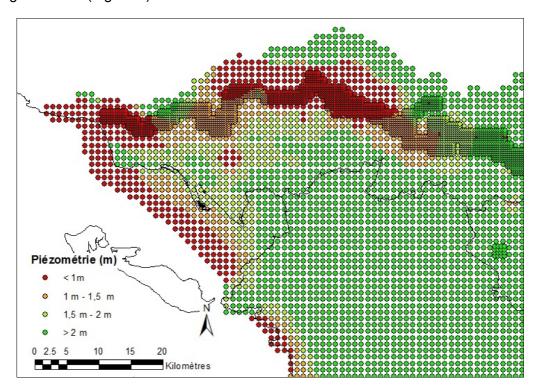


Figure 4 : Carte de la piézomètrie issue du modèle hydrodynamique

La zone étudiée est caractérisé par une grande variabilité de piézométrie, allant de -13 m à +20 m de hauteur NGF. Les niveaux les plus hauts sont mesurées à l'Est de la zone étudiée, les niveaux les plus pas sont mesurés dans une dépression isolée au Nord-Est de la zone. Le modèle continue au-delà du trait de côte sous la mer. Ces résultats du modèle ont été traduits selon la méthode GALDIT pour obtenir une carte des 4 classes de hauteur de la nappe (Figure 5). La partie de l'aquifère sous la mer n'est néanmoins pas incluse dans les calculs de vulnérabilité, qui intègrent uniquement la partie de l'aquifère dans les terres.

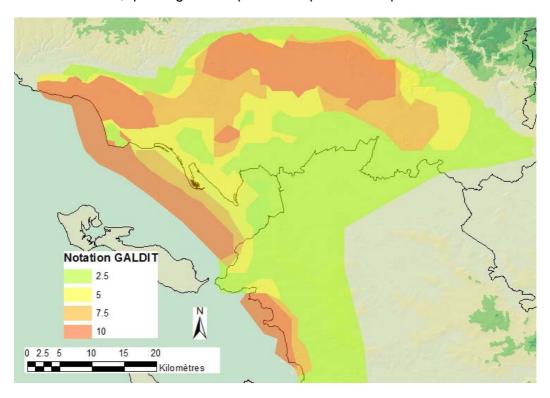


Figure 5 : Carte de répartition des classes de l'hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer (paramétre L)

# • Paramètre D- Distance par rapport à la côte

La distance de la côte a été calculée avec la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte. En complémentaire pour les zones de lagunes et de baies, avec le trait de côte Histolitt (source : © IGN-SHOM 2007 www.ign.fr et www.shom.fr).

Ces résultats de cette méthode ont été traduits selon la méthode GALDIT pour obtenir une carte des classes de distance par rapport à la côte (paramètre D, Figure 6).

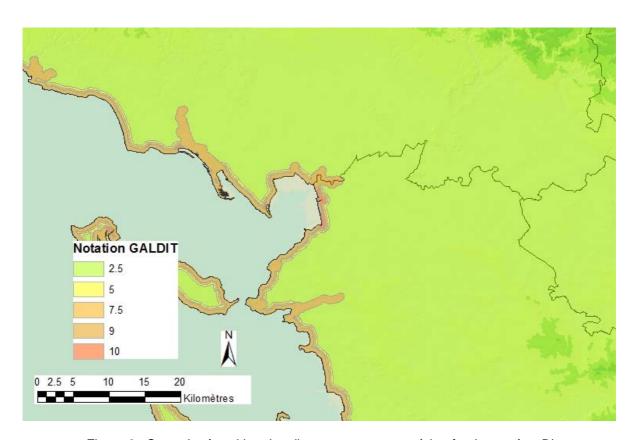


Figure 6 : Carte de répartition des distances par rapport à la côte (paramétre D)

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

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport  $Cl/HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}$  pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer.

Il n'a pas été possible d'appliquer la méthode GALDIT comme définie dans l'article original. En effet, la zone dispose d'avantage de données de chlorures, représentatives de la salinisation de l'aquifère, la somme  $HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}$  n'est généralement pas réalisable par manque de données. Pour cette raison, uniquement des données de concentration en chlorure, issues de

- la base de données ADES
- des mesures de terrain menées au sein du SGR en 2011(Figure 7)

ont été utilisées pour élaborer la carte I (Figure 8).

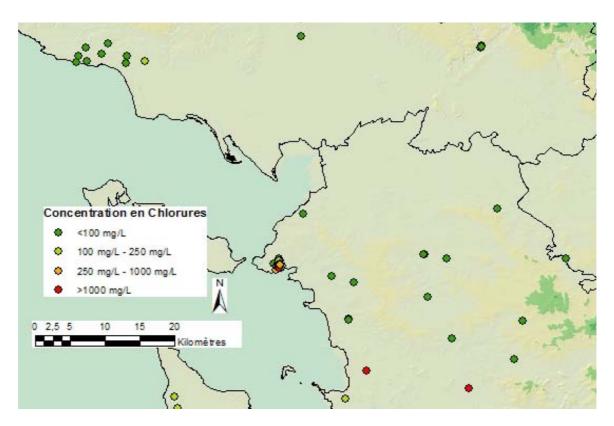


Figure 7 : Données de concentrations en chlorures selon 4 classes

De manière générale, peu d'intrusions salines importantes ont été recensées dans cet aquifère. La seule intrusion particulièrement importante est visible au sud de la zone avec des concentrations pouvant atteindre plus de 10 000 mg/L à plus de 17 km de la côte. La relation entre l'influence marine et cette mesure de chlorure peut être posée au vue de la distance. En effet, les propriétés aquifères ont tendance à diminuer vers le sud et des eaux salées piégées au Quaternaire se trouvent sous le Marais. Cette salinité "ancienne" a été conservée du fait de l'absence de renouvellement des eaux (Douez et al., 2010). Ces valeurs de la base de données ADES ont été traduites selon la méthode GALDIT pour obtenir une carte du paramètre I (Figure 8).

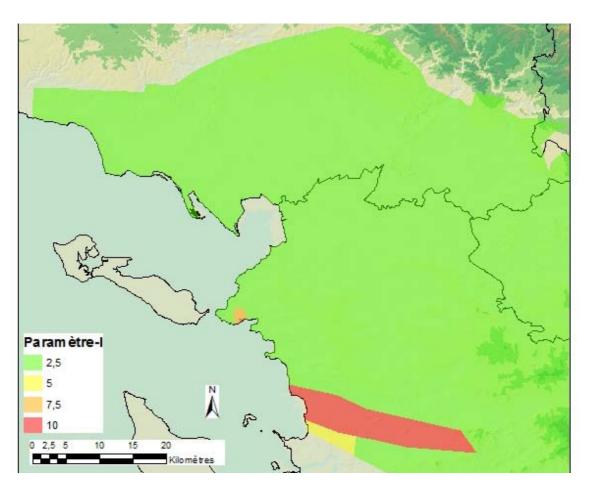
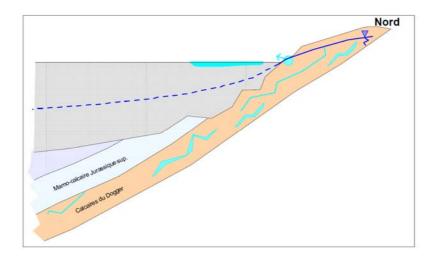


Figure 8 : Carte de répartition des classes de l'Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude (paramétre I)

# • Paramètre T – Epaisseur de l'aquifère

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de l'épaisseur de l'aquifère sont issues d'une extraction du modèle régional (Figure 9).



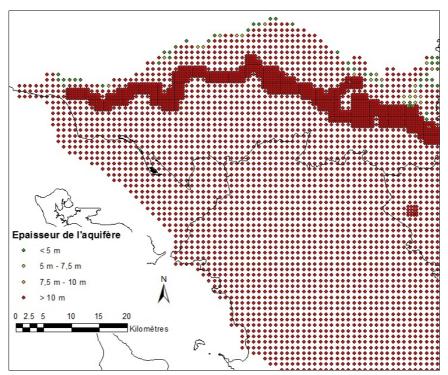


Figure 9 : Epaisseur de la couche du modèle de l'aquifère du Dogger et coupe (RR-58297)

L'épaisseur est pratiquement partout supérieure à 10 m dans la zone d'étude, à part au niveau de l'extrémité nord dans la zone affleurante correspondant à la limite de l'aquifère. Ces résultats du modèle ont été traduits en deux classes d'épaisseur de l'aquifère (paramètre T) selon la méthode GALDIT (Figure 10).

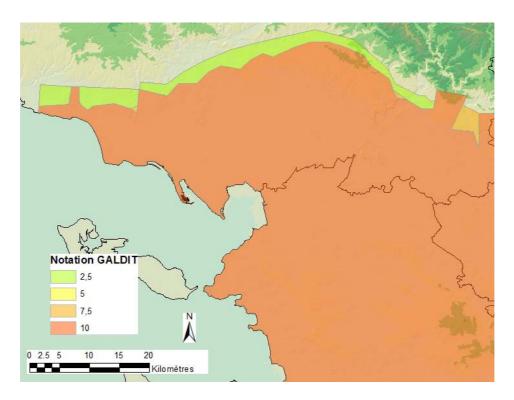


Figure 10 : Carte de répartition des classes de l'épaisseurs de l'aquifère (paramétre T)

Considérant les poids et les notes proposés ci-dessous, le calcul de la vulnérabilité globale est effectué selon la méthode GALDIT (Figure 11)

		Rangs			
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contrainte	semi-captif	captif	libre
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline Chlorures (mg/L)	1	< 100	100-250	250-1000	> 1000
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 10

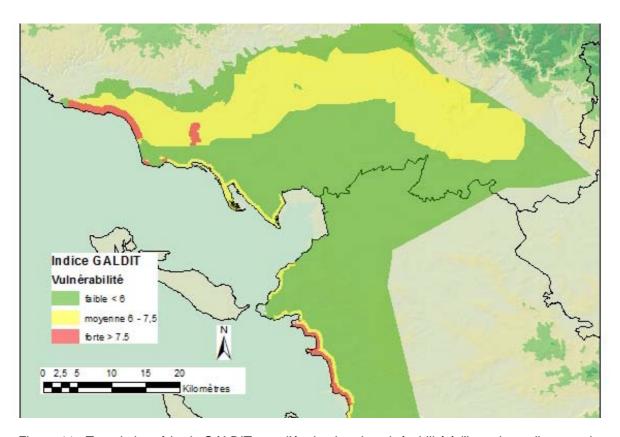


Figure 11 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline pour le Marais Poitevin

Cette zone test montrent la forte influence des deux paramètres "épaisseur", " et "perméabilité", lorsqu'ils occupent le rang le plus élevé. Cela a pour conséquence une vulnérabilité moyenne, égale à 5 dans ces secteurs. Avec le classement initial de GALDIT, toutes les zones éloignées de la mer de plus de 500 m seraient notées en tant que zone de "vulnérabilité" moyenne (avec le seuil de 5 entre vulnérabilité faible et moyenne).

Une zone de vulnérabilité très forte apparait au nord principalement à cause de l'influence d'une zone classée "moyenne" (notation GALDIT 5) dans la carte de répartition du paramètre I (impact de l'intrusion). Ceci montre l'influence que peut avoir un paramètre malgré une pondération d'une valeur de 1.

La zone captive des calcaires est moins vulnérable sauf à proximité immédiate de la côte. Le paramètre "distance à la côte" lorsqu'il a une notation de 10 selon la méthode GALDIT peut entrainer le passage de la catégorie "vulnérabilité faible" à la catégorie "vulnérabilité moyenne" du fait de sa pondération élevée (4 sur 15). Ainsi, les secteurs pour lesquels l'"épaisseur" et la "distance à la côte" ont la notation maximale, la valeur de l'indice GALDIT est de 5 au minimum correspondant à une classe de "vulnérabilité moyenne" quelle que soit la valeur des autres paramètres.

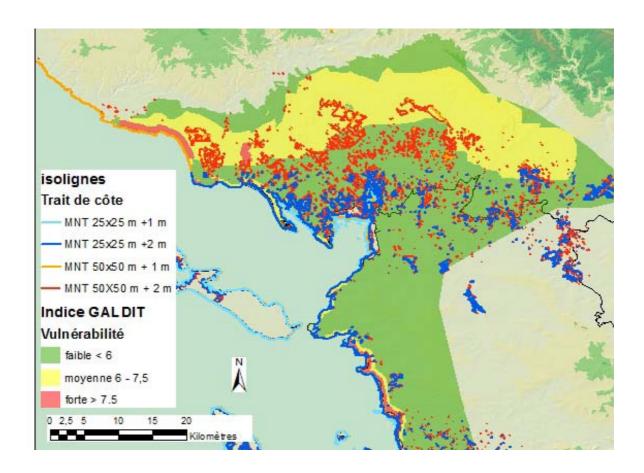


Figure 12 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline pour le Marais Poitevin

Les deux grilles des niveaux altimétriques de l'IGN, avec la longueur de maille de 25X25 m et de 50x50 m servent à recalculer une ligne de côte avec un niveau de la mer + 1 m et de + 2 m. En effet, les deux isolignes résultantes indiquent une ligne de côte très proche de la côte actuelle, avec des zones submergées de très faible extension.

Néanmoins, plus éloignées de la côte dans le marais Poitevin, de nombreuses zones actuellement situées entre 1 et 2 mètres seront sous le niveau de la mer. Ces zones pourraient être vulnérables en cas de forts pompages dans des aquifères connectés hydrauliquement avec les zones plus proches de la mer.

La méthodologie GALDIT ne permet pas de prendre en compte ces zones, car elles sont plus éloignées de 1000 m de la côte.

# Zone Midi Libre de l'aquifère des Calcaires Jurassiques du pli au sud-ouest de Montpellier

Au Sud-Ouest de Montpellier, l'aquifère des calcaires jurassiques du pli ouest de Montpellier est connu pour être influencé par des intrusions marines. Plusieurs études ont déjà été concernées cet aquifère (Vigouroux, Marchal, LeStrat et Tissier, 2008, Fleury et Ladouche, 2011). Le point bleu situé au centre de la zone d'étude correspond au pompage de l'imprimerie du journal Midi Libre (BSS : 09907X0350/MLF1) et donne son nom à la zone d'étude.

## Paramètre G-Type d'aquifère

Le référentiel BDLISA a été utilisé pour délimiter la zone affleurante des "calcaires jurassiques du pli ouest de Montpellier et du massif de la Gardiole". Dans la zone étudiée, l'aquifère est libre sur une bande réduite au sud-ouest de Montpellier et captif sur le reste du secteur. Selon ces formations, deux classes ont été définies selon le paramètre « type d'aquifère » (paramètre G,Figure 13).

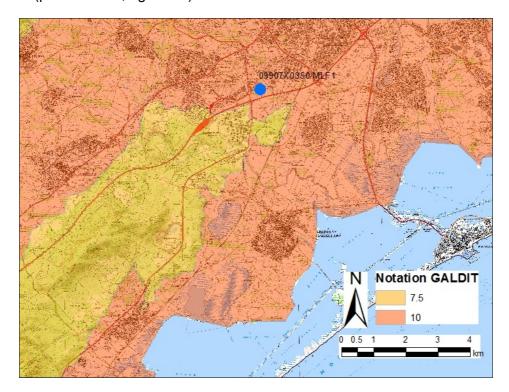


Figure 13 : Carte de répartition du type d'aquifère (paramétre G)

# • Paramètre A- Conductivité hydraulique de l'aquifère

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de la conductivité hydraulique sont issues de travaux antérieurs réalisés sur la zone obtenues, notamment par la thèse de V. Bailly-Comte (Bailly-Comte, 2008). Une valeur moyenne de 1\*10<sup>-3</sup> m/s (~86 m/j) a été appliquée à toute la zone. Cette valeur permet de classer cette zone l'aquifère par rapport à la conductivité en sensibilité élevée (paramètre A=10, Figure 14).

Une distinction entre la perméabilité de chaque drain karstique et la perméabilité de la matrice n'est pas possible faute de connaître l'emplacement des drains karstiques avec précision.

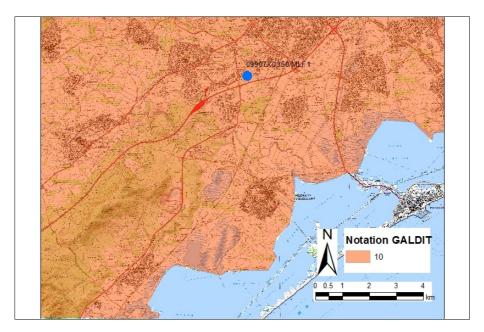


Figure 14 : Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramétre A (conductivité hydraulique de l'aquifère)

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

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de la hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer sont issues de deux rapports:

- la carte piézométrique de la zone au sud-ouest de Montpellier (Figure 15)
- l'étude réalisée en 2011 (Fleury et Ladouche, 2011) a montré que notamment au droit du piézomètre Midi Libre- les niveaux d'eau ont évolués fortement, avec un niveau situé sous la cote d'1m NGF (Figure 16).

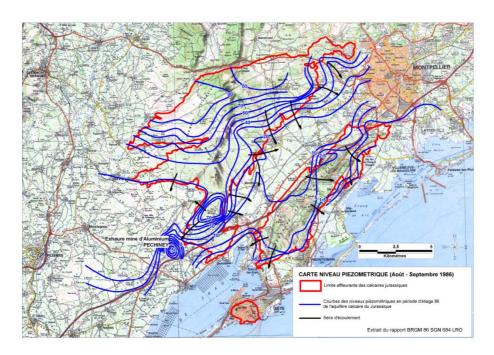


Figure 15 : Carte des niveaux piézométrique.

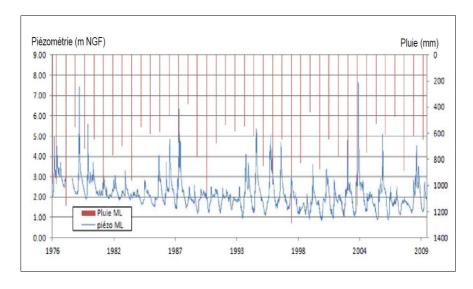


Figure 16 : Piézométrie au site midi libre (données BRGM) et précipitations (données MétéoFRANCE)

La zone étudiée est caractérisée par une faible variabilité de piézométrie. Les niveaux piézométriques mesurés varient entre 0 m et +10 m. Pour le paramètre de la hauteur de la nappe (paramètre L) une zone importante se trouve ainsi sous la cote d'1m NGF, ce qui correspond ainsi à la classe « élevée ». La zone du piézomètre Midi Libre se trouve suivant la carte piézométrique dans la zone de la classe 1.5 à 2 m, mais le niveau est très variable est peut atteindre des niveaux inférieurs à 1 m NGF (Figure 17).

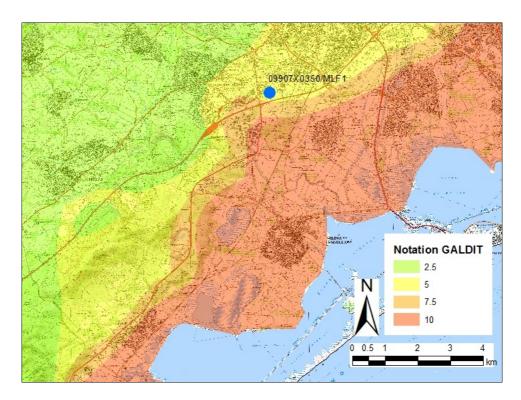


Figure 17 : Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L (Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer)

# • Paramètre D- Distance par rapport à la côte

La distance de la côte a été calculée sous ArcGis selon un trait simplifié du trait de côte. De plus pour les zones de lagunes, le trait de côte Histolitt (source : © IGN-SHOM 2007 www.ign.fr et <a href="https://www.shom.fr">www.shom.fr</a>) a été utilisé.

Les résultats obtenus ont permis d'obtenir la carte pour le paramètre D (Figure 18).

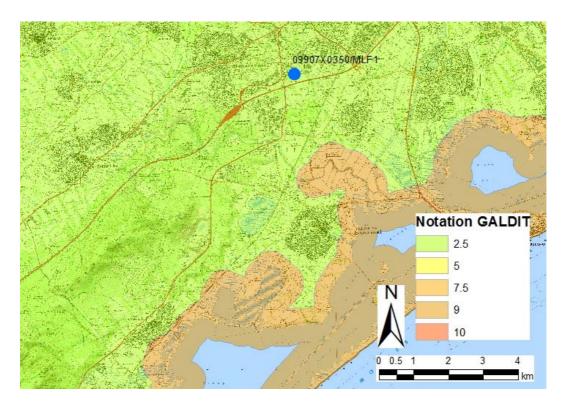


Figure 18 : Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramétre D (Distance par rapport à la côte)

Les étangs ont une importance particulière dans le cas de l'aquifère des Calcaires Jurassiques du pli au sud-ouest de Montpellier.

# • Paramètre I – Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl/HCO<sub>3</sub>-1 + CO<sub>3</sub>-2 pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer.

Il n'a pas été possible d'appliquer ce rapport faute de données. Par contre des données de chlorures sont disponibles dans la base de données ADES et ont ainsi été utilisées pour cartographier ce paramètre (Figure 19).

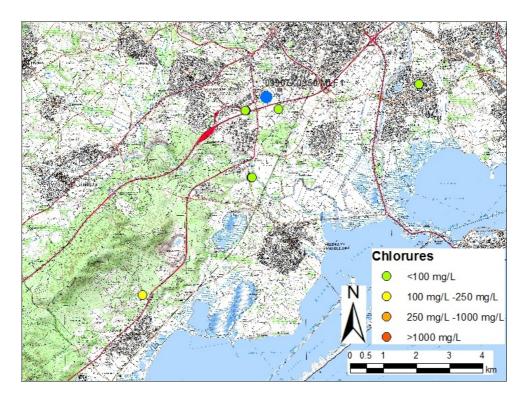


Figure 19 : Données de concentrations en chlorures selon 4 classes (source : ADES)

Les données de chlorures montrent une nappe peu atteinte par la salinisation, ce qui semble être en contradiction avec les connaissances préalables. Cela est dû notamment du nombre et du type de points à disposition dans la base ADES. La méthode utilisée pour l'agrégation (moyenne interannuelle) a aussi une influence. A partir de ces données, la plupart de la zone indique des valeurs inférieures à 100 mg/L, l'aquifère est alors classé en sensibilité faible (Figure 20).

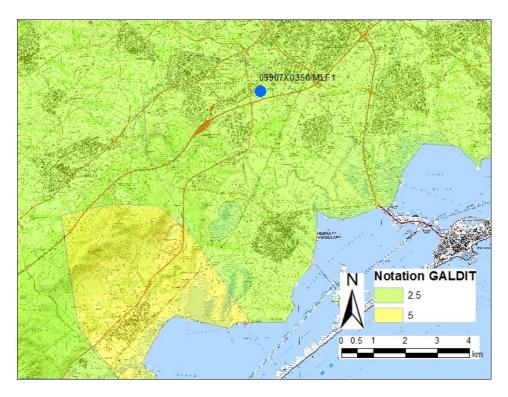


Figure 20 : Carte de répartition des classes de l'Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude (paramétre I)

# • Paramètre T - Epaisseur de l'aquifère

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de l'épaisseur de l'aquifère sont issues du rapport Calcaires jurassiques - Pli ouest de Montpellier et Massif de la Gardiole (Vigouroux, Marchal, LeStrat et Tissier, 2008). La carte du toit du calcaire jurassique est calée sur les ouvrages profonds disponibles dans le secteur. Sur la zone étudiée, le calcaire jurassique plonge franchement en mer pour se retrouver à quelques centaines de mètres en profondeur sous les étangs littoraux et les communes littorales. Il convient de noter l'existence d'un haut fond jurassique au sud de Montpellier, le toit se situe tout de même à 50 m de profondeur.

# NW Bassin de Villeveyrac La Languette Balaruc les bains Gardiole Frontignan 500 500 500 2000 2000

# COUPE EN PROFONDEUR PASSANT AU SUD DE LA MASSE D'EAU 6124 (ME 6124 = Calcaires jurassiques du pli Ouest de Montpellier et du Massif de la Gardiole)

Figure 21 : Coupe géologique ((Vigouroux, Marchal, LeStrat et Tissier, 2008)

L'épaisseur est toujours supérieure à 10 m dans la zone d'étude. Selon ces données, le paramètre de l'épaisseur de l'aquifère est défini comme « forte (paramètre T), Figure 22).

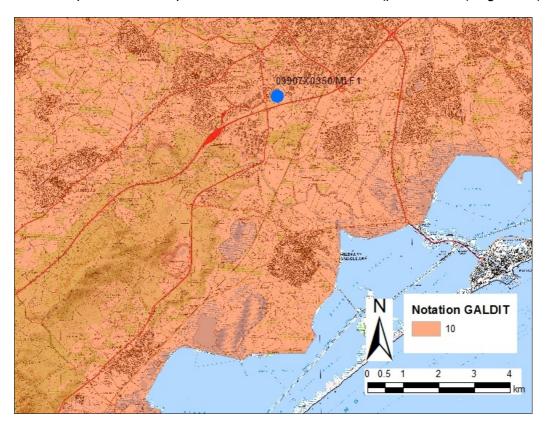
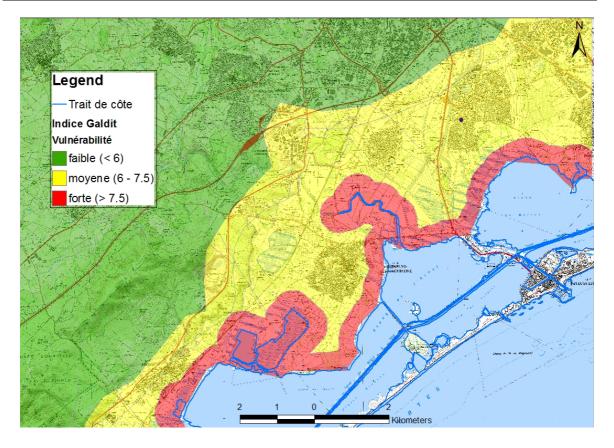


Figure 22 : Carte de répartition de l'épaisseur de l'aquifère (paramètre T)

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

Considérant les poids et les notes proposés ci-dessous, le calcul de la vulnérabilité globale est effectué selon la méthode GALDIT (Figure 23).

		Rangs			
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contrainte	semi-captif	captif	libre
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline Chlorures (mg/L)	1	< 100	100-250	250-1000	> 1000
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 10



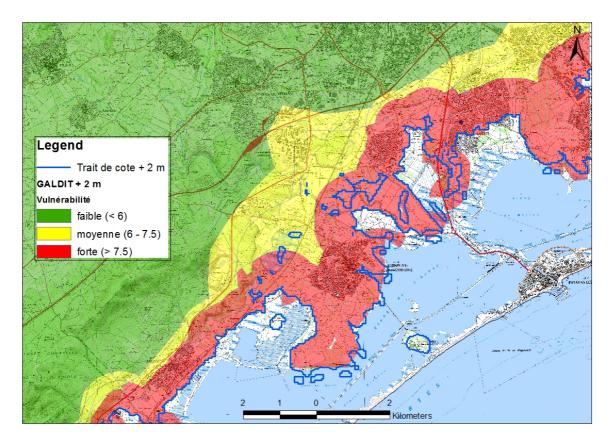


Figure 24 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline (avec le trait de côte actuel et un niveau de mer +2 m)

La classification GALDIT montre une nappe avec une vulnérabilité moyenne et forte sur la majeure partie de la zone étudiée, cela semble être cohérent avec les connaissances de la zone.

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 15, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 6

Cet exemple montre l'importance d'une notation de 10 pour "l'épaisseur", " et "la perméabilité". Cela implique une note minimale résultante de 5. Avec la notation initiale de GALDIT, toute la zone nord serait notée en tant que zone de "vulnérabilité" moyenne. Avec un seuil de classe de 6 entre la vulnérabilité faible et moyenne, on peut distinguer les 3 zones de vulnérabilité.

Dans ce cas d'étude, la perméabilité est mal connue et une valeur moyenne issue de données bibliographiques a été appliquée sur l'ensemble de la zone d'étude. Or la méthode donne un poids important à cette valeur qui influence ainsi la carte de vulnérabilité résultante. Les conclusions sont donc à considérer avec précaution.

# L'aquifère des calcaires et marnes du Dogger de l'île de Ré

L'île de Ré a été choisie pour tester la méthodologie GALDIT sur une île. L'aquifère de calcaires et des marnes du Dogger couvrent pratiquement toute l'île. Cette zone est caractérisée par un relief de faible altitude occupant une grande superficie ainsi que par une piézométrie avec à priori un faible gradient.

#### Paramètre G-Type d'aquifère

Cette aquifère est considéré comme libre sauf au centre est de l'île où se trouve une couverture importante de sédiments du Paléocène (Danien).

Dans la méthode GALDIT, on différencie les zones libres des zones captives. Le paramètre G prend ainsi deux valeurs différentes pour l'île de Ré, comme représenté sur la Figure 25 .

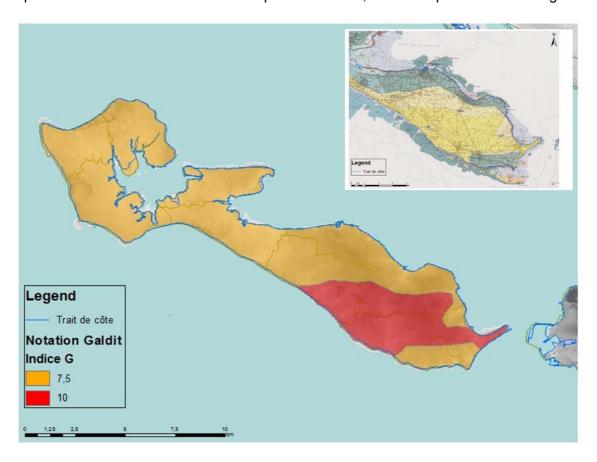


Figure 25 : Carte de répartition des classes du type d'aquifère (paramètre G) et carte géologique

#### • Paramètre A- Conductivité hydraulique de l'aquifère

En absence de données, cet aquifère est considéré comme ayant une conductivité hydraulique moyenne d'environ 1 à 4 \* 10<sup>-4</sup>m/s (10-40 m/j) dans la zone de l'aquifère libre. L'aquifère sous couverture présente vraisemblablement une perméabilité moindre, une classe de conductivité plus faible a donc été appliquée, comme cela a été fait dans la même formation dans la zone test de la plaine de Caen.

Dans la méthode GALDIT, les perméabilités de l'aquifère libre correspondent à la classe de perméabilité moyenne (note 7.5), celles de l'aquifère captif à la classe de faible conductivité (note 5) comme présentées sur la Figure 26.

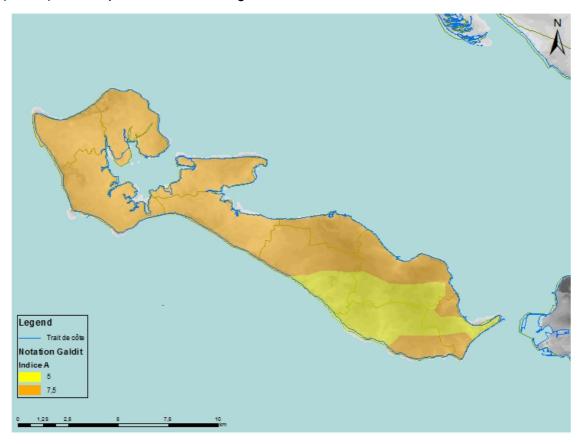


Figure 26 : Carte de répartition des classes de conductivité hydraulique de l'aquifère (paramétre A)

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

La hauteur du niveau piézométrique par rapport au niveau marin est estimée en absence d'une carte piézométrique à partir de deux points avec un enregistrement piézométrique disponible dans ADES.

- hauteur en basses eaux de la nappe de 1.5 m NGF à une altitude de 8 m et
- hauteur en basses eaux de de la nappe de 0.5 m NGF à une altitude de 4 m.

Ces données ne sont pas suffisantes pour avoir une idée très précise de la piézométrie sur l'ensemble du site d'étude. En considérant une structure simple de l'aquifère, l'extrapolation simplifiée de la hauteur de la nappe suivant le niveau altimétrique a été appliquée comme approximation.

La carte suivante (Figure 27) qui représente les différentes classes du niveau piézométrique correspondant au paramètre L de la méthode GALDIT est donc à considérer avec prudence.

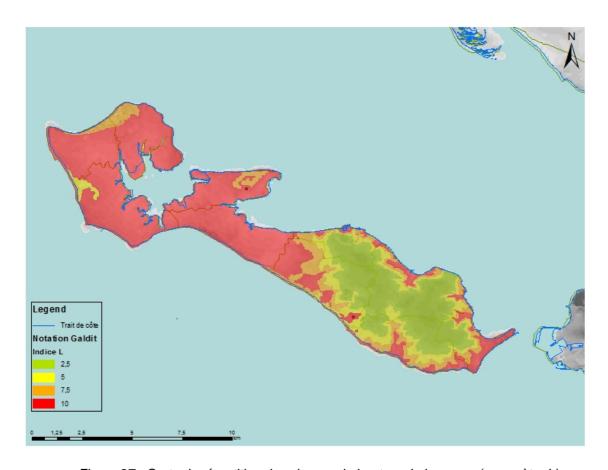


Figure 27 : Carte de répartition des classes de hauteur de la nappe (paramètre L)

# • Paramètre D- Distance par rapport à la côte

La distance de la côte a été calculée :

- A partir la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte.
- Et en complément, pour les zones de lagunes et de baies, avec le trait de côte Histolitt (source : ©IGN-SHOM 2007 <a href="www.ign.fr">www.ign.fr</a> et <a href="www.schom.fr">www.schom.fr</a>)

Pour l'île, le trait de la cote Histolitt a été retenu. La Figure 28 représente les différentes classes de vulnérabilité relatives au paramètre D.

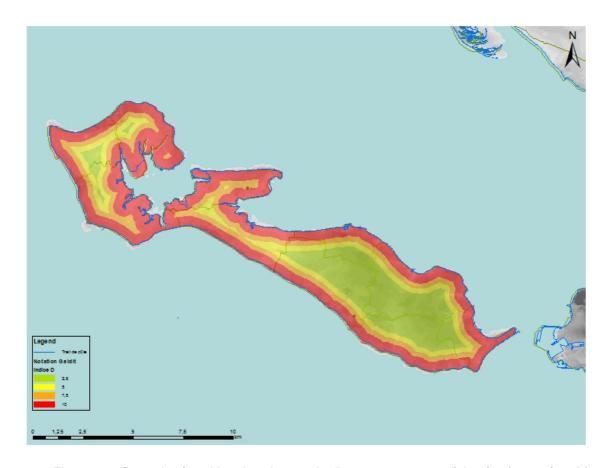


Figure 28 : Carte de répartition des classes de distance par rapport à la côte (paramètre D)

#### • Paramètre I – Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl/(HCO3<sup>-</sup> + CO3<sup>2-</sup>) pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer.

Pour caractériser ce paramètre, nous disposons de plusieurs informations :

- les données de qualité issues de la base ADES ont été recherchées. Un seul point de mesure sur la côte nord-est existe. Ce point 06332X0002/F indique des concentrations moyennes en chlorures de 62 mg/L.

Le rapport BRGM RP50936 (2001) indique dans la commune de Loix-en Ré une intrusion saline due à l'exploitation intensive de la nappe, qui avait créé un déséquilibre entre la lentille d'eau douce de la presqu'île reposant sur l'eau salée. Le point piézométrique à proximité indique des niveaux piézométriques périodiquement inférieurs au niveau de la mer.

Dans tout le reste de la zone, aucune intrusion saline n'est reportée, il existe néanmoins un risque. Cette zone pourrait être vulnérable à une intrusion saline.

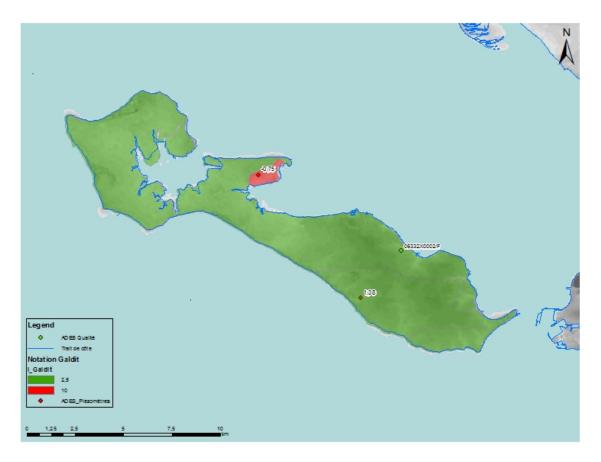


Figure 29 : Carte de répartition des classes de distance par rapport à la côte (paramètre D)

L'impact est considéré comme très fort (paramètre l= 10) sur la presqu'île de Loix-en-Ré et faible (l= 2.5) dans le reste de l'île comme faible comme représenté sur la Figure 29.

# • Paramètre T - Epaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère est considérée dans toute la zone comme ayant une épaisseur supérieure à 10 m.

Selon la méthode GALDIT, les épaisseurs supérieures à 10 m font partie de la classe de vulnérabilité maximale, la note maximale (10) est ainsi attribuée à l'ensemble de la zone.

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

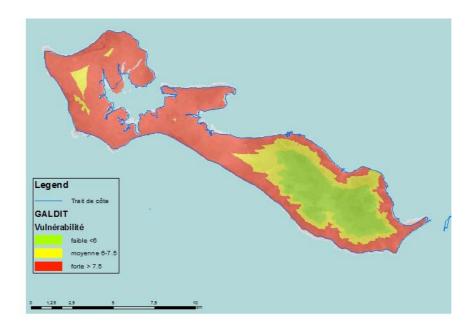
		Rangs			
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contrainte	semi-captif	captif	libre
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline ⇒ Conc. CI (mg/L)	1	Pas d'impact connu	100-250	250-1000	Impact connu
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 10

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

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

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 15, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 6



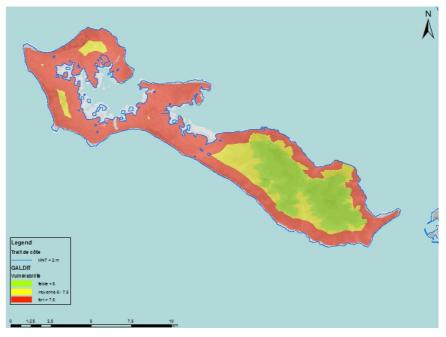


Figure 30 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline (avec le trait de côte actuel et un niveau de mer +2 m)

La Figure 30 montre les classes de vulnérabilité globale à l'intrusion saline établies selon la méthode GALDIT. La frange littorale apparaît comme étant à forte vulnérabilité sur pratiquement toute la largeur de l'île à l'ouest, tandis que dans la zone est de l'île, avec une relief plus important et plus large, la vulnérabilité calculée est faible à moyenne.

En cas d'une remontée de la mer de + 2 m, la zone nord-ouest est affectée dans les zones de faible altitude directement par submersion. Dans la partie sud-ouest la vulnérabilité est comparable à celle obtenue pour le niveau marin actuel.

Remarque: Une grande partie de l'île de Ré est caractérisée par des zones d'altitude faibles. Dans ces zones, la piézométrie peut être considérée comme proche de la surface. Ces deux paramètres représentent un poids important dans le calcul de l'indice de vulnérabilité GALDIT. La vulnérabilité est ainsi très forte dans la moitié de l'île.

## Quartenaire de la plaine de Roussillon

#### Paramètre G-Type d'aquifère

Les sédiments quaternaires de la plaine de Roussillon forment des nappes alluviales, qui sont d'une manière générale libres ou très légèrement captives et localement impactées par des intrusions salines. Cette zone dispose d'un grand nombre de données grâce à une thèse et une modélisation des ressources en eau (Aunay, 2007).

Le référentiel BDLISA a été utilisé pour délimiter les "Alluvions récentes", qui sont affleurantes dans toute la zone d'étude (Figure 31). Selon ces informations, l'entité est classée en aquifère libre, correspondant à la classe de 7.5 pour le paramètre G.

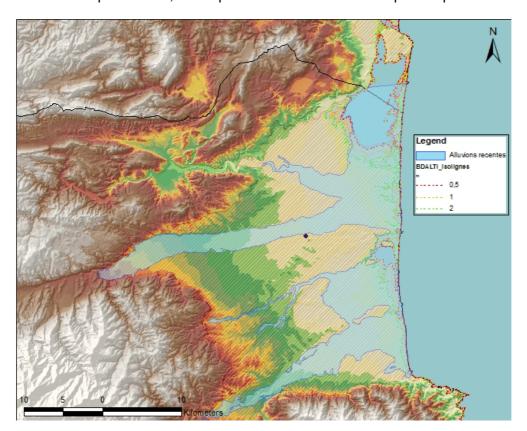


Figure 31 : Carte de répartition des classes du type d'aquifère (paramétre G)

# • Paramètre A- Conductivité hydraulique de l'aquifère

Selon les données historiques synthétisées dans la thèse de B. Aunay (2007), la transmissivité T des alluvions guaternaires varie de 1\*10<sup>-2</sup> à 2\*10<sup>-2</sup> m²/s, avec une épaisseur

de 10 à 30 m en générale (proche de la cote supérieure à 30 m, et vers les terres dans les bras des rivières, localement autour de 5 m). (Figure 32, aguifère 146)

La perméabilité K= T/E varie entre

- $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} / 30 \text{ m} = 3*10^{-4} \text{ m/s et}$
- $-2*10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s / 10 m = 2\* 10 <sup>-3</sup> m/s.

Le modèle hydrodynamique (Rapport BRGM R-34881, III. 2) confirme ces valeurs supérieures à 3\* 10<sup>-3</sup> m/s à proximité de la mer et avec des valeurs autour de 1\*10<sup>-3</sup> m/s dans les terres.

L'indice de GALDIT A a ainsi la valeur de 10 (> 40 m/j =4.6 \*10-4m/s) à proximité de la mer et la valeur de 7.5 (10-40 m/j) en amont au niveau des bras des cours d'eau occupés par des alluvions (Figure 33).

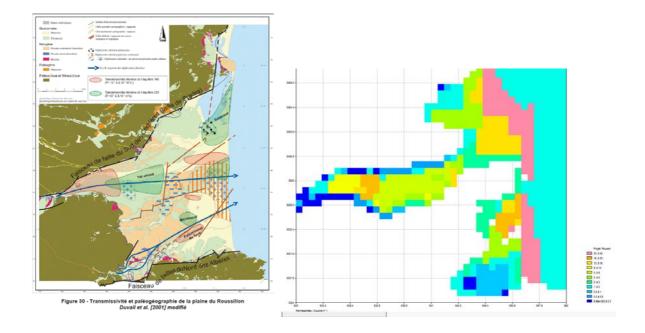


Figure 32 : Carte de répartition des perméablités suivant le modèle hydrodynamique et le travail de synthèse de B. Aunay

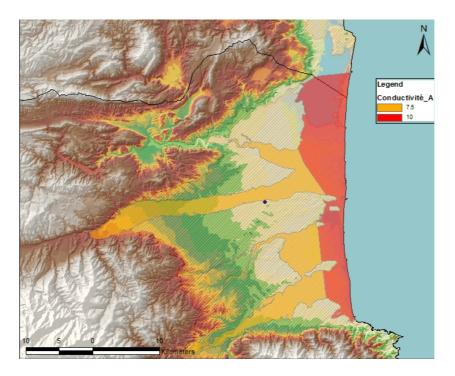


Figure 33 : Carte de répartition des classes de conductivité hydraulique de l'aquifère (paramétre A)

#### Paramètre L – Hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer

Le niveau piézométrique est renseigné par deux sources de données (Figure 34) :

- Les charges hydrodynamiques calculées par le modèle hydrodynamique
- Les piézomètres dans la zone d'étude suivant la base de données ADES

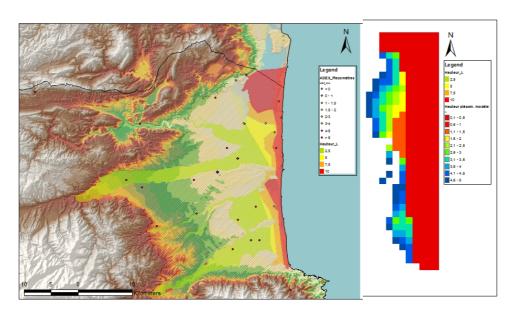
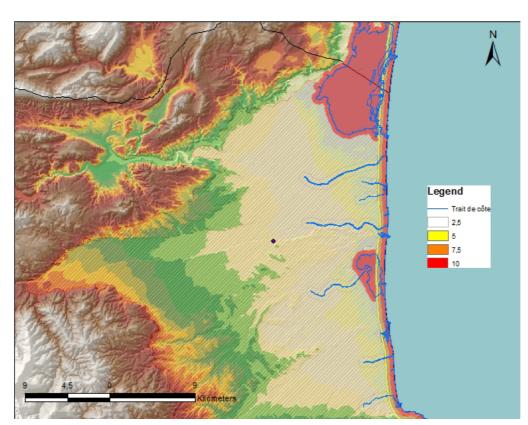


Figure 34 : Carte de répartition des classes de la hauteur de la nappe par rapport au niveau de la mer du (paramètre L) (sources de données : modèle hydrodynamique et piézomètres)



# Paramètre D– Distance par rapport à la côte

Figure 35 : Carte de répartition des distances par rapport à la côte (paramétre D)

La distance à la cote a été calculée

- avec la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte et
- pour les zones de lagunes et de baies, avec le trait de côte Histolitt (source : © IGN-SHOM 2007 www.ign.fr et www.shom.fr)

#### • Paramètre I – Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl/HCO<sub>3</sub>-1 + CO<sub>3</sub>-2 pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer.

Il n'a pas été possible d'appliquer la méthode GALDIT en utilisant ce rapport. En effet, la zone dispose d'avantage de données de chlorures, représentatives de la salinisation de l'aquifère. Pour cette raison, seules les données de concentration en chlorure, issues de

- la base de données ADES
- des mesures de terrain effectuées dans le cadre de la thèse B. Aunay (Figure 36) sont utilisées.

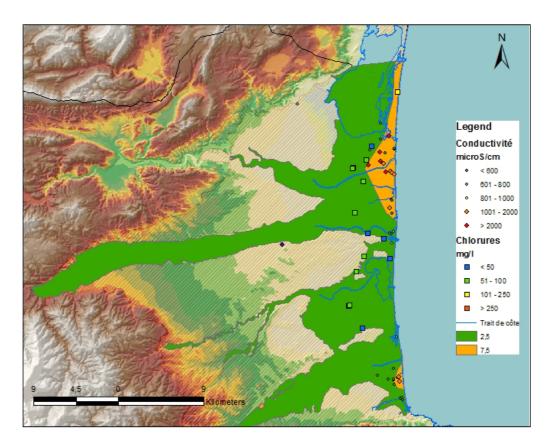


Figure 36 : Carte de répartition des classes de l'Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone d'étude (paramétre I) (Données de concentrations en chlorures et de conductivité selon 4 classes)

De manière générale, de nombreuses zones d'intrusions ont été recensées dans cet aquifère à proximité de la côte lors de mesures de terrain de conductivité électrique. Selon B. Aunay, les conductivités très élevées, supérieures à 1000  $\mu$ S/cm dénotent une minéralisation anormale. Elles peuvent être corrélées à des concentrations en chlorures supérieur à 200 mg/L. De même, les concentrations de 2000  $\mu$ S/cm correspondent à environ 400 mg/L. Ces dernières valeurs ont été traduites selon la méthode GALDIT attribuant à une note de 7.5, pour deux zones situées à proximité de la mer ; la valeur de 2,5 est attribuée au reste de la zone d'étude classée ainsi comme très faiblement vulnérable pour ce paramètre (Figure 36).

## • Paramètre T – Epaisseur de l'aquifère

Les données utilisées pour la réalisation de la carte de l'épaisseur de l'aquifère sont issues d'une extraction du modèle hydrodynamique (Figure 37).

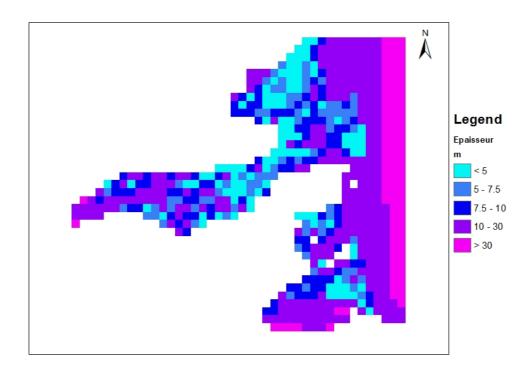


Figure 37 : Epaisseur de la couche du modèle de l'aquifère

L'épaisseur est définie à proximité de la mer comme étant supérieure à 10 m ; vers l'intérieur des terres au niveau des bras des cours d'eau, les alluvions ont une épaisseur de l'ordre de quelques mètres. Ces résultats du modèle ont été traduits en deux classes d'épaisseur de l'aquifère (paramètre T) selon la méthode GALDIT (Figure 38).

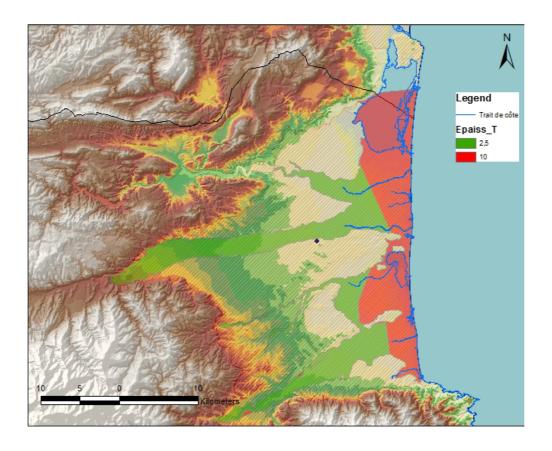


Figure 38 : Carte de répartition des classes de l'épaisseurs de l'aquifère (paramétre T)

# Tableau de synthèse des résultats pour la zone d'étude:

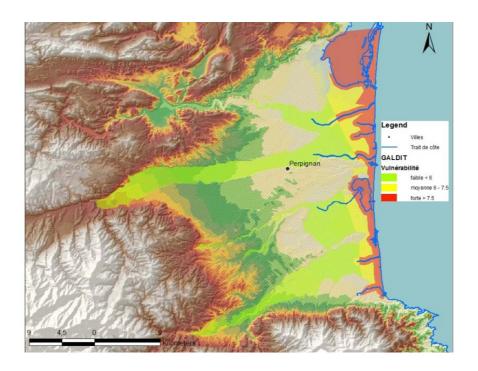
		Rangs				
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé	
		2.5	5	7.5	10	
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contrainte	semi-captif	captif	libre	
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40	
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1	
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500	
I : Impact de l'intrusion saline Chlorures (mg/L)	1	< 100	100-250	250-1000	> 1000	
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 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] \* 4+[I\_GALDIT=7.5\*1]+[T\_GALDIT=10\*2].

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 15, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 6



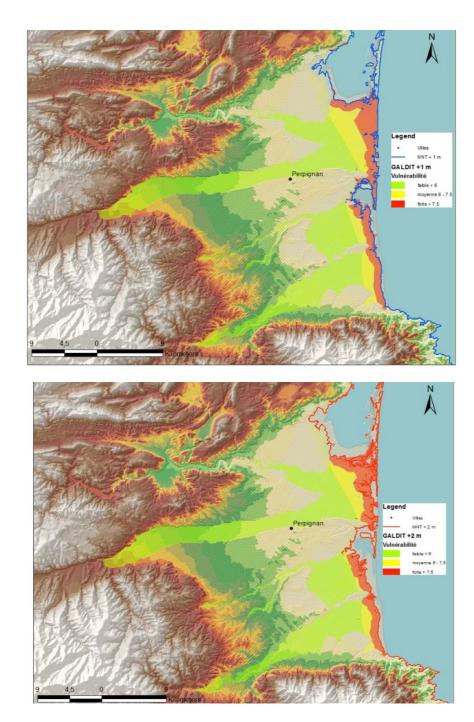


Figure 39 : Carte de vulnérabilité selon la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline (avec le trait de côte actuel et un niveau de mer +1 m et +2 m) pour la plaine du Roussillon

La Figure 39 montre les classes de vulnérabilité globale à l'intrusion saline établie par la méthode GALDIT. La partie située en bordure de la côte et en bordure de l'étang de Salses est caractérisée par une forte vulnérabilité tandis que la partie éloignée de la côte en amont, est de vulnérabilité faible.

Entre ces deux classes, une vulnérabilité moyenne s'étend sur une surface importante. Dans ces zones, aucune intrusion saline n'est connue. Il n'y a pas de mesures de conductivité électrique disponibles, pouvant attester d'une plus forte vulnérabilité localement.

# L'aquifère des alluvions de la plaine de Marana-Casinca, Corse.

Dans cette zone, située au Sud de Bastia, deux importants prélèvements AEP (Communauté d'Agglomération de Bastia et Syndicat Intercommunal à Vocation Multiple de la Marana) sollicitent l'aquifère côtier. Une étude de modélisation a été réalisée par le BRGM (Barbut et al., 1993) afin de comprendre et maîtriser la remontée du biseau salé au droit des ouvrages de captage.

Cette zone est également sensible d'un point de vue environnemental, l'étang de Biguglia constituant la plus importante zone humide de Corse. Une étude a été réalisée par le BRGM sur les relations hydrauliques entre les différents compartiments de l'hydrosystème : nappe, rivières et étang (Orofino et al., 2010).

#### Paramètre G-Type d'aquifère

Les niveaux conducteurs de l'aquifère se trouvent dans les alluvions quaternaires correspondant aux alluvions du Golo, du Bevinco et autres cours d'eau. Dans ces dépôts hétérogènes, on trouve des niveaux limoneux qui rendent localement la nappe captive. La carte présentée à la Figure 40 présente la localisation des zones captives.

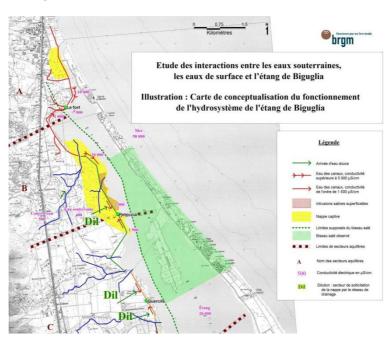


Figure 40 : Carte de conceptualisation du fonctionnement de l'hydrosystème de l'étang de Biguglia (Orofino et al., 2010)

Dans la méthode GALDIT, les zones libres et les zones captives, sont différentiées. Le paramètre G prend ainsi deux valeurs différentes telles que représentées sur la Figure 41.

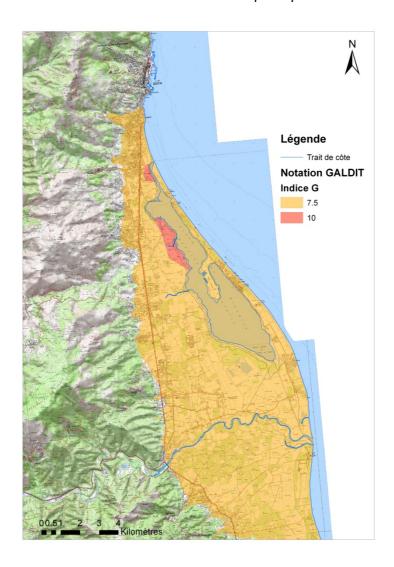


Figure 41 : Carte de répartition des classes du type d'aquifère (paramètre G)

#### Paramètre A– Conductivité hydraulique de l'aquifère

L'aquifère est caractérisé par une hétérogénéité de faciès et de perméabilité se rapportant à l'influence des deux principales rivières du secteur le Golo et le Bevinco. La perméabilité des alluvions récentes peut atteindre des valeurs de 10<sup>-2</sup> m/s. Les alluvions les plus anciennes présentent une perméabilité moindre, inférieure à 10<sup>-4</sup> m/s.

Dans la méthode GALDIT, les perméabilités supérieures à 4.10<sup>-4</sup> m/s correspondent à la classe de perméabilité maximale. La note maximale (10) est attribuée à l'ensemble de la zone des alluvions récentes et la note de 5 est attribuée aux alluvions anciennes (Figure 42).

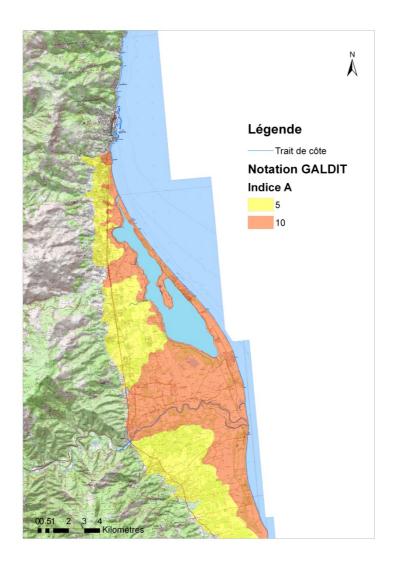


Figure 42 : Carte de répartition des classes de conductivité hydraulique de l'aquifère (paramétre A)

# • Paramètre L- Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer

La hauteur du niveau piézométrique par rapport au niveau marin est estimée à partir des données piézométriques disponibles dans ADES et des données acquises dans les études de Barbut et al. (1993) et d'Orofino et al., 2010.

La hauteur considérée est la hauteur en condition de basses eaux.

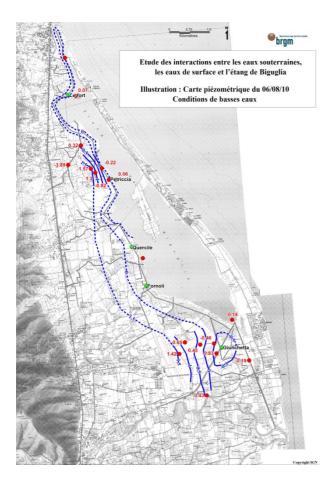


Figure 43 : Carte piézométrique du 06/08/10. Conditions de basses eaux (Orofino et al., 2010).

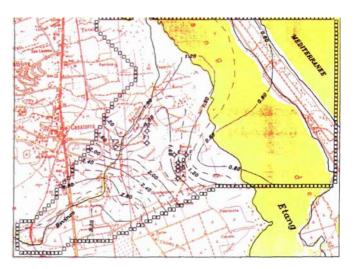


Figure 44 : Carte piézométrique d'août 1992. Echelle : 1-20000 (Barbut et al., 1993).

Ces données ne sont pas suffisantes pour avoir une idée très précise de la piézométrie sur l'ensemble du site d'étude. En effet la structure de l'aquifère est assez complexe et il est difficile d'extrapoler les niveaux piézométriques au Sud de lac de Biguglia où il n'y a pas de données.

La Figure 45 représente les différentes classes du niveau piézométrique correspondant au paramètre L de la méthode GALDIT; cette carte est donc à considérer avec précaution.

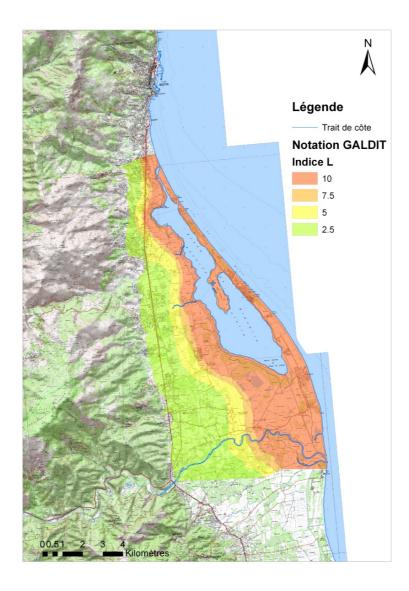


Figure 45 : Carte de répartition des classes de hauteur de la nappe (paramètre L)

## • Paramètre D- Distance par rapport à la côte

La distance de la côte a été calculée :

- A partir de la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte.
- Et pour les zones de lagunes et de baies, avec le trait de côte Histolitt (source : ©IGN-SHOM 2007 <a href="www.ign.fr">www.ign.fr</a> et <a href="www.schom.fr">www.ign.fr</a> et <a href="www.schom.fr">www.schom.fr</a>)

Une classe supplémentaire par rapport à la méthode GALDIT traditionnelle a été créée pour les zones situées à moins de 500 m des lagunes et baies, dans lesquelles l'eau est saumâtre. La note de 10 est attribuée à ces zones. Cela correspond au voisinage de l'étang. La Figure 46 représente les différentes classes de vulnérabilité relatives au paramètre D.

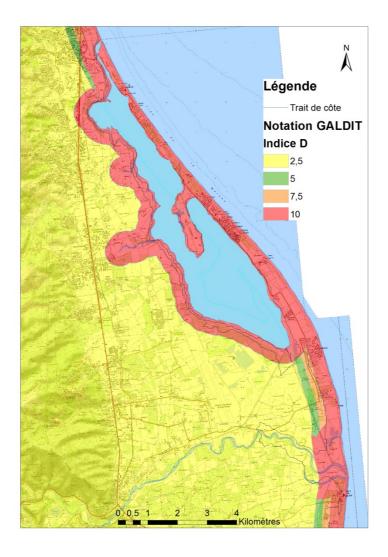


Figure 46 : Carte de répartition des classes de distance par rapport à la côte (paramètre D)

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

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl<sup>-</sup>/(HCO3<sup>-</sup> + CO3<sup>2-</sup>) pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer. Cependant les données de qualité ne sont pas suffisamment nombreuses dans la zone pour appliquer cette méthode.

Pour caractériser ce paramètre nous avons choisi d'utiliser d'autres informations :

- Les études géophysiques effectuées par la DIREN et par le BRGM ont permis d'estimer la localisation du biseau salé. La carte établie par le BRGM suite à ces études est présentée sur la Figure 40. Les zones où le biseau salé est identifié ont été classées avec impact élevé. La note de 10 a donc été attribuée.
- Le biseau salé est connu pour affecter épisodiquement le champ captant de l'AEP de Bastia (Orofino et al., 2010), les mesures des chlorures restent néanmoins en dessous des concentrations de 100 mg/L, avec des valeurs moyennes maximales de 34 mg/L et d'un maximum mesuré en 2007 de 75 mg/L. Dans cette zone, l'impact est considéré ainsi comme moyen: la note de 7.5 est attribuée.

Dans tout le reste de la zone, aucune intrusion saline n'est reportée, l'impact est considéré comme très faible et la note de 2.5 est attribuée pour le paramètre I. Ces données permettent d'établir la carte d'impact constaté de l'intrusion correspondant au paramètre I (Figure 47).

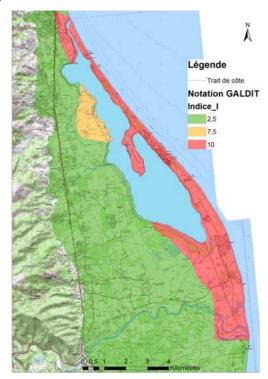


Figure 47 : Carte de la répartition des classes d'impact de l'intrusion salée (paramètre I)

# • Paramètre T – Epaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère varie dans la zone d'étude entre 10 m et plusieurs dizaines de mètres.

Dans la méthode GALDIT, les épaisseurs supérieures à 10 m font partie de la classe de perméabilité maximale, la note maximale (10) est ainsi attribuée à l'ensemble de la zone d'étude (Figure 48).

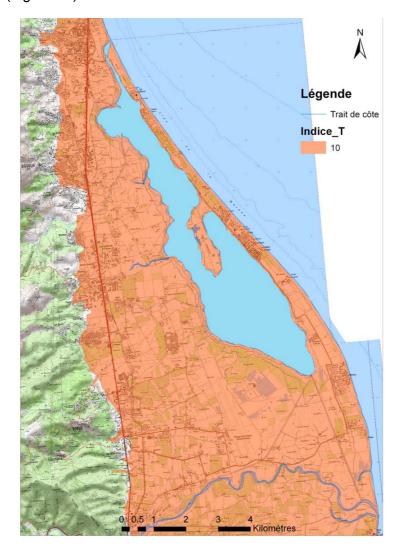


Figure 48 : Carte de la répartition des classes d'épaisseur de l'aquifère ( paramètre T).

# Tableau de synthèse des résultats pour la zone d'étude:

		Rangs			
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contrainte	semi-captif	captif	libre
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500
I : Impact de l'intrusion saline	1	Aucun biseau observé		Biseau salé supposé	Biseau salé observé
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 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]\*4+[I\_GALDIT=7.5\*1]+[T\_GALDIT=1 0\*2].

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 15, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5
Vulnérabilité faible	<6

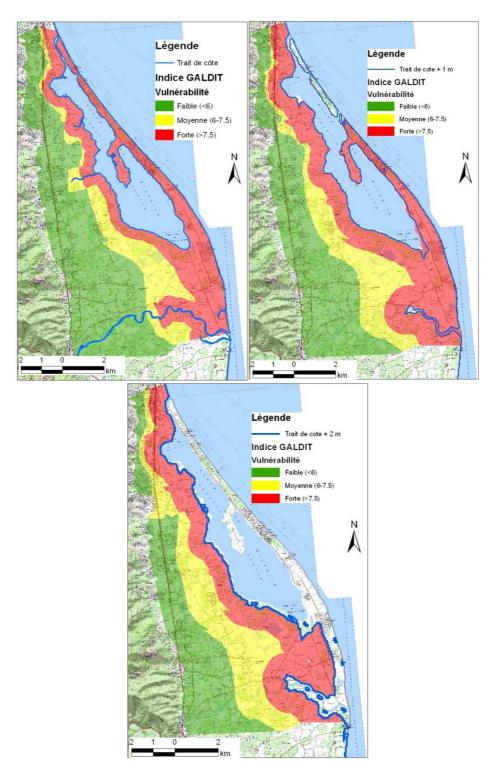


Figure 49 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline (avec le trait de côte d'aujourd'hui, un niveau de mer +1m et +2 m)

La Figure 49 montre les classes de vulnérabilité globale à l'intrusion saline établie à l'aide de la méthode GALDIT. La frange littorale est caractérisée par une zone de forte vulnérabilité sur environ 1.5 km de large, puis de vulnérabilité moyenne sur environ 1km. Plus loin de la côte, la vulnérabilité est faible. En cas d'une remontée du niveau de la mer, la vulnérabilité avancera de quelques centaines de mètres vers l'intérieur des terres.

# L'aquifère de la nappe de Crau

La nappe de Crau s'étend à l'ouest du delta du Rhône et des Alpilles et est constituée par les alluvions anciennes déposées par la Durance. La nature des matériaux est telle que le milieu est très perméable, mais il existe des niveaux indurés (poudingues) imperméables jouant le rôle d'écran, susceptibles de mettre la nappe en charge. De plus, les alluvions de la Durance s'enfoncent sous les limons de la Camargue, la nappe de la Crau étant captive dans sa partie sud (la limite de ces alluvions sous couverture n'est pas connue précisément).

Pour le test de la méthode, seule la nappe située près de la côte a été étudiée, car vulnérable aux intrusions salines. Cette zone est complexe, du fait de l'existence d'un système multicouches captif en aval, libre en amont et en en relation avec l'eau de surface du delta du Rhône, qui est lui-même influencé par la mer.

#### • Paramètre G-Type d'aquifère

La zone est constituée des cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau. Libre dans la partie Ouest, l'aquifère est captif sous couverture holocène (nappe de Camargue) en bordure du Rhône.

En se basant sur le référentiel BDLISA, on distingue la partie libre de la partie captive. Le paramètre G est défini ainsi par deux classes d'aquifère différentes, comme présentée à la Figure 50.

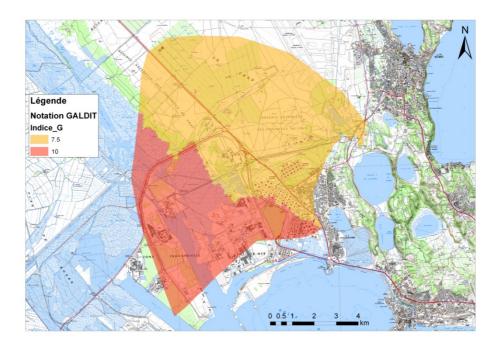


Figure 50 : Carte de répartition des classes du type d'aquifère (paramètre G)

# • Paramètre A- Conductivité hydraulique de l'aquifère

Cet aquifère est caractérisé par des perméabilités importantes, comprises entre 4.10<sup>-4</sup> m/s et 10<sup>-2</sup> m/s (De Montety, 2008). Selon la méthode GALDIT, les perméabilités supérieures à 4.10<sup>-4</sup> m/s correspondent à la classe de vulnérabilité maximale. La note maximale (10) est donc attribuée à l'ensemble de la zone (Figure 51).

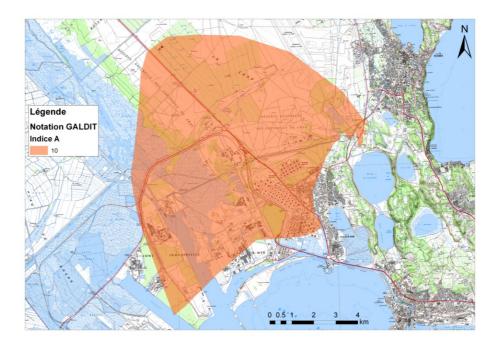


Figure 51 : Carte de répartition des classes de conductivité hydraulique de l'aquifère (paramètre A)

# • Paramètre L- Hauteur à la nappe par rapport au niveau de la mer

La hauteur du niveau piézométrique par rapport au niveau marin est estimée à partir

- des données piézométriques disponibles dans ADES et
- de la carte piézométrique établie dans l'étude d'ANTEA sur les prélèvements en nappe de Crau.

Les données utilisées sont représentées sur la Figure 52.

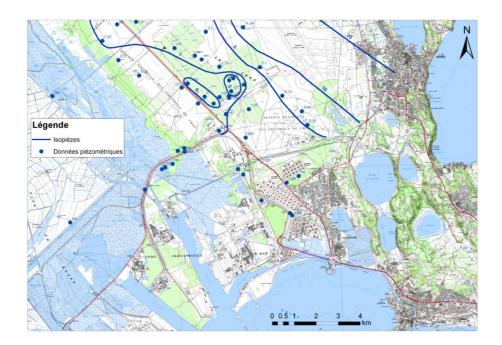


Figure 52 : Données piézométriques (source : ANTEA)

Ces données ne permettent pas d'établir une carte piézométrique suffisamment précise pour établir la carte de vulnérabilité relative au paramètre L selon la méthode GALDIT. En effet la méthode est basée sur des isopièzes distantes de 0.5 m; les isopièzes disponibles sont établies au mieux tous les 4 mètres. Les données ont donc été interpolées pour établir la figure suivante (Figure 53). Cette carte est donc à considérer avec précaution, car peu précise.

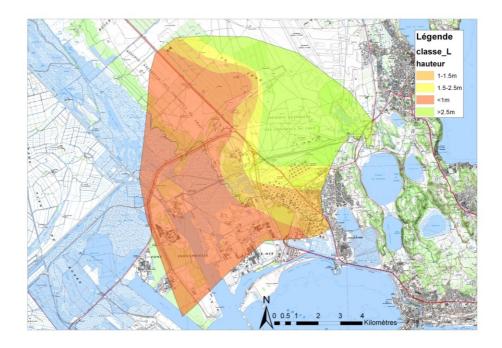


Figure 53 : Carte de répartition des classes de hauteur de la nappe (paramètre L)

# • Paramètre D- Distance par rapport à la côte

La distance de la côte a été calculée :

- à partir la cartographie SIG suivant un trait simplifié du trait de côte.
- et pour les zones de lagunes et de baies, avec le trait de côte Histolitt (source : ©IGN-SHOM 2007 www.ign.fr et www.schom.fr )

Une classe supplémentaire par rapport à la méthode GALDIT traditionnelle a été créée pour les zones situées à moins de 500 m des lagunes et rivières, dans lesquelles l'eau est saumâtre. La note de 9 est attribuée à ces zones.

La Figure 54 représente les différentes classes de vulnérabilité relatives au paramètre D.

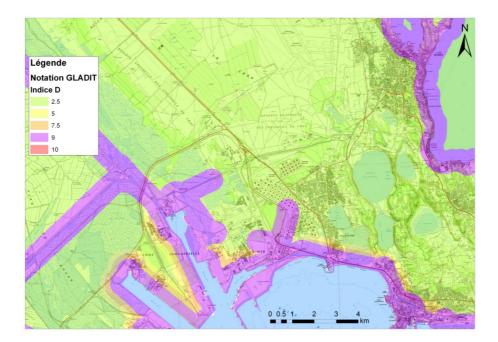


Figure 54 : Carte de répartition des classes de distance par rapport à la côte (paramètre D)

#### • Paramètre I – Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl<sup>-</sup>/(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2</sup><sup>-</sup>) pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères influencées par la mer. Faute de données, les données de concentrations en chlorure, issues de la base de données ADES ont été utilisées. Les concentrations moyennes sont représentées sur la Figure 55. On observe un grand nombre de points de mesures supérieurs à 250 mg/L.

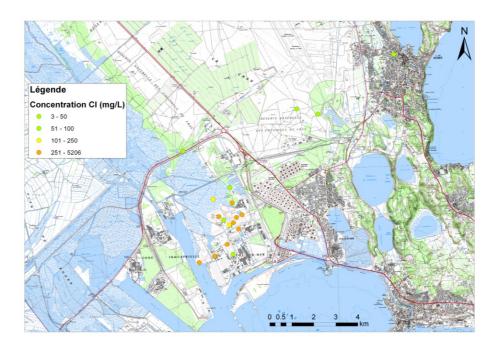


Figure 55 : Concentration moyennes en chlorures

La Figure 56 présente la carte de vulnérabilité relative au paramètre I. Suivant les concentrations, deux classes ont été appliquées.

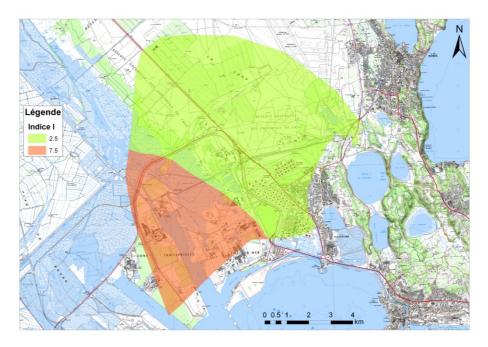


Figure 56 : Carte de la répartition des classes d'impact de l'intrusion salée (paramètre I)

A noter que les données de concentration sont assez éparses, l'interpolation des classes à l'ensemble de la zone d'étude comporte donc une part d'incertitude importante. D'autre part, nous avons choisi de considérer les moyennes interannuelles par point d'eau pour les concentrations en chlorures. Le choix d'une autre méthode d'agrégation (maximum, médiane...) aurait entraîné des résultats différents, probablement plus pessimistes.

# • Paramètre T – Epaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère varie dans la zone d'étude entre 10 m et plusieurs dizaines de mètres.

La note maximale (10) est donc attribuée à l'ensemble de la zone (Figure 57).

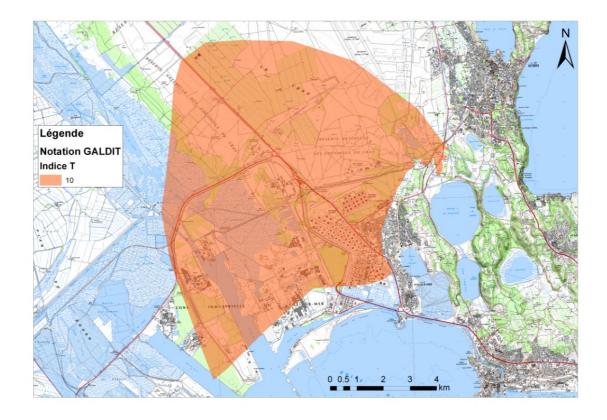


Figure 57 : Carte de la répartition des classes d'épaisseur de l'aquifère ( paramètre T).

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

			Rangs				
Paramètres	Poids	Très faible	faible	Moyen	Elevé		
		2.5	5	7.5	10		
G : Type d'aquifère	1	Aquifère contraint	semi-captif	captif	libre		
A : conductivité hydraulique (m/jour)	3	< 5	5-10	10-40	>40		
L : Hauteur de la nappe / niveau de la mer (m)	4	> 2	1.5 - 2	1 – 1.5	<1		
D : Distance de la côte (m)	4	> 1000	750-1000	500-750	< 500		
I : Impact de l'intrusion saline Chlorures (mg/L)	1	< 100	100-250	250-1000	> 1000		
T : Epaisseur de l'aquifère (m)	2	< 5	5-7,5	7,5-10	> 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]\*4+[I\_GALDIT\*1]+[T\_GALDIT\*2])
/15

La valeur de vulnérabilité obtenue, divisée par la somme des poids, soit 15, peut être répartie en trois classes de vulnérabilité :

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	6 – 7.5
Vulnérabilité faible	< 6

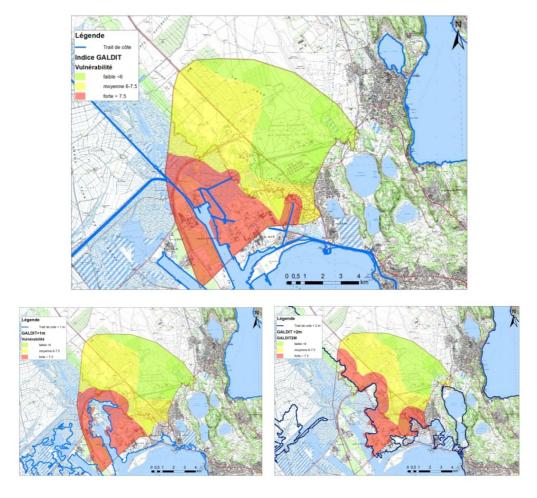


Figure 58 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline (avec le trait de côte actuel, un niveau de mer +1m et +2 m)

La Figure 58 montre les classes de vulnérabilité globale à l'intrusion saline établie à l'aide de la méthode GALDIT. La partie située en bordure du Rhône correspond à une vulnérabilité forte tandis que la partie située au Nord-Est est caractérisée par une vulnérabilité moyenne à faible.

On peut remarquer que la classe de vulnérabilité faible n'apparaît que dans la zone la plus septentrionale, correspondant à des valeurs inférieures à 6. Cette zone est caractérisée par un gradient hydraulique faible et les paramètres A (conductivité) et T (épaisseur de l'aquifère) étant maximum sur toute la zone, l'indice GALDIT global est toujours relativement élevé.

En cas d'une remontée du niveau de la mer, la vulnérabilité s'avancera de plusieurs kilomètres vers l'intérieur des terres, considérant l'altitude de ces zones très plates et le gradient hydraulique de la nappe très faible.

Test de sensibilité suivant le poids du type d'aquifère :

Si on augmente le poids du type d'aquifère, qui augmentera le poids de la zone captive, la zone de vulnérabilité forte s'étend de quelques kilomètres en plus vers le nord (Figure 59).

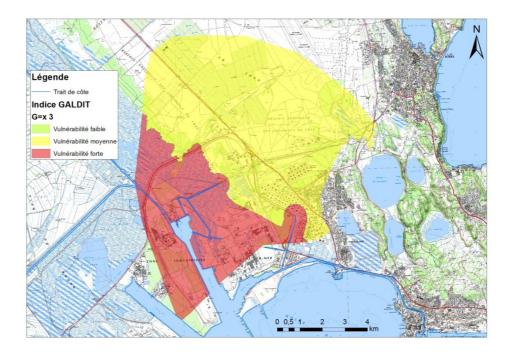


Figure 59 : Test de la méthode GALDIT pour l'évaluation de vulnérabilité à l'intrusion saline

## 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	
Туре	1	Aquifère capif	10	
d'aquifère		semi-captif	7.5	
		Aquifère libre	5	
		Aquifère contraint (1)	2.5	
(1) Recharge et/ou barrière alignée parallèlement à la côte				

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.

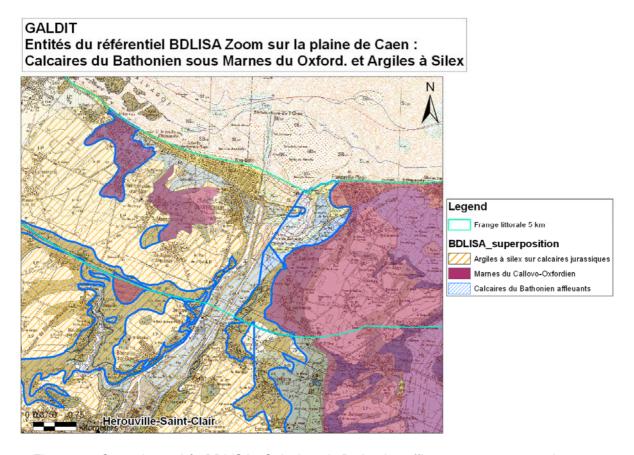


Figure 60 : Carte des entités BDLISA : Calcaires du Bathonien affleurants, couverts par les Argiles à silex et les Marnes du Callovo-Oxfordien

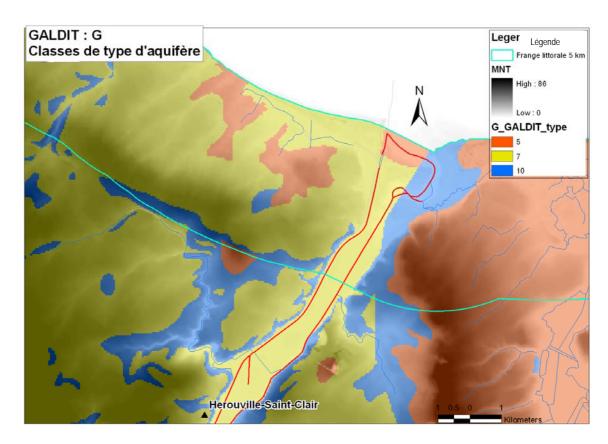


Figure 61 : Carte des 3 classes de type d'aquifère méthode GALDIT

## Paramètre A– Conductivité hydraulique de l'aquifère

Paramètre A	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
conductivité	3	Elevée	> 40	10
hydraulique de		Moyenne	10 – 40	7.5
l'aquifère (m/j)		Faible	5 – 10	5
		Très faible	< 5	2.5

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\*10<sup>-7</sup> à 5\*10<sup>-5</sup> 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  $10^{-1}$  m²/s. L'épaisseur moyenne étant de 50 m, la conductivité hydraulique varie de  $2*10^{-5}$  à  $2*10^{-3}$  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, ...).

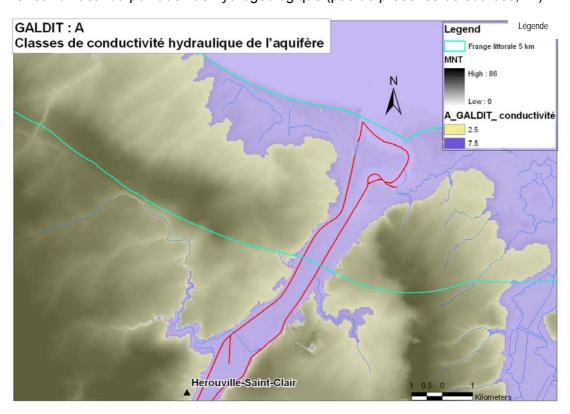


Figure 62 : Carte des 3 classes de conductivité hydraulique de l'aquifère méthode GALDIT

## • 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	4	Elevée	< 1.0	10
par rapport au		Moyenne	1.0 – 1.5	7.5
niveau de la mer		Faible	1.5 – 2.0	5
(m)		Très faible	> 2.5	2.5

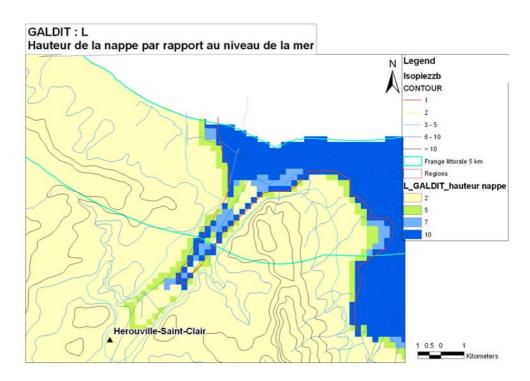


Figure 63 : Carte des 4 classes de hauteur de la piézométrie par rapport au niveau marin selon la méthode GALDIT

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 étés 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	4	Très courte	< 500	10
rapport à la côte		Courte	500 – 750	7.5
(m)		Moyenne	750 – 1000	5
		Eloignée	> 1000	2.5

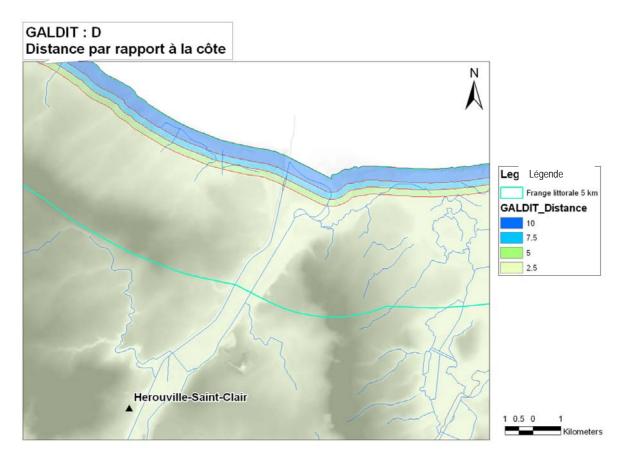


Figure 64 : Carte des 4 classes de distance par rapport à la côte méthode GALDIT

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

#### • 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	1	Elevé	> 2	10
l'intrusion saline de la		Moyen	1.5 – 2	7.5
zone d'étude :		Faible	1 – 1.5	5
$Cl^{-}/(HCO_{3}^{-1} + CO_{3}^{2-})$		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<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) ; 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).

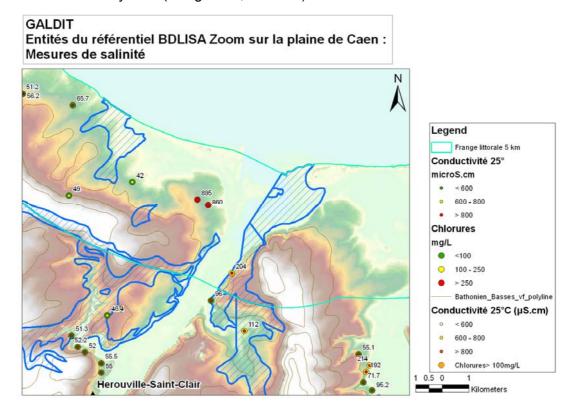


Figure 65 : Carte des mesures de salinité dans la zone d'étude

## Paramètre T – Epaisseur de l'aquifère

Paramètre T		Poids	Attributs du paramètre		Note
			Classe	Rang	
Epaisseur	de	2	Forte	> 10	10
l'aquifère (m)			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).

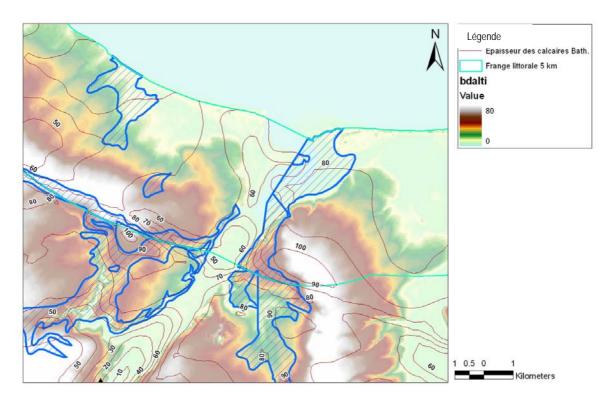


Figure 66 : Carte des épaisseurs de la nappe des calcaires du Bathonien

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

Paramètres	Poids	Rangs			
		Très faible	faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
G : Type d'aquifère	1	-	semi- captif	captif	libre
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- 1000	> 1000
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=1 0\*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

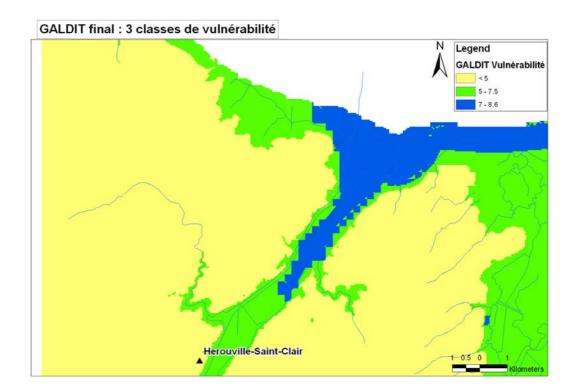


Figure 67 : Carte résultant des 6 paramètres GALDIT : 3 classes de vulnérabilité aux intrusions salines

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 n'a pu être réalisé faute de données fines disponibles pour le MNT.

# **Annexe 5**

Nom	Aquifère		Conductivité électrique à 25°C	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	K⁺ mg.L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2</sup> · mg.L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> ·	NO <sub>2</sub> -	NH₄ <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> · mg.L <sup>-1</sup>	F mg.L <sup>-1</sup>
06074X0115	Dogger	<i>m</i> 1530	<b>μS.cm-1</b> 749	130	<b>mg.L</b> 5.4	27	2.8	- Ing.L	322	48	33	40	< 0.03	< 0.05	0.06	< 0.1
06073X0056	Dogger	1720	829	140	6.8	32	1.9	-	306	63	26	78	<0.03	< 0.05	< 0.05	0.1
06073X0037	Dogger	400	851	140	8.8	32	8	-	365	51	47	44	<0.03	< 0.05	1.1	<0.1
06073X0052	Dogger	1140	857	140	8.2	36	3.1	-	342	58	47	53	<0.03	< 0.05	0.09	<0.1
06074XD	Dogger	2490	872	160	6	28	1.4	-	373	54	28	61	<0.03	< 0.05	< 0.05	0.1
06073X0047	Dogger	100	873	130	9.1	40	17	-	349	58	51	45	<0.03	< 0.05	0.13	<0.1
06073XB	Dogger	2555	3400	120	65	500	44	-	248	880	150	< 0.5	<0.03	< 0.05	< 0.05	1.9
06073X0061	Dogger et Infra-Toarcien	1180	1070	180	13	45	5.4	-	416	75	35	105	<0.03	< 0.05	< 0.05	0.19
06073X0036	Dogger et Infra-Toarcien	400	858	130	9.8	50	8.5	1	356	72	49	40	<0.03	< 0.05	0.18	<0.1
05846XA	Infra-Toarcien	3450	825	77	33	50	3.6	-	293	64	34	76	<0.03	< 0.05	< 0.05	<0.1
06073XA	Infra-Toarcien	2650	1005	95	29	76	21	1	343	115	80	< 0.5	<0.03	< 0.05	< 0.05	<0.1
06074X0077	Infra-Toarcien	2510	2410	120	47	300	30	-	291	560	135	< 0.5	<0.03	< 0.05	< 0.05	1.9
06072X0004	Infra-Toarcien	900	5740	150	100	1000	43	-	519	1500	390	< 0.5	<0.03	< 0.05	< 0.05	2.1
06073X0025	Infra-Toarcien	2570	16880	230	370	3300	110	-	469	5800	700	< 0.5	<0.03	< 0.05	0.33	1.2
06072X0001	Infra-Toarcien	2090	21900	190	490	4400	190	22	228	7600	1100	< 0.5	<0.03	< 0.05	< 0.05	0.87
05846X0007	Infra-Toarcien	1999	49200	500	1200	10000	380	-	320	19000	2600	< 0.5	<0.03	< 0.05	0.08	0.87

Tableau 1 : Analyses physico-chimiques des eaux prélevées en avril 2011

Nom	Aquifère	Distance à la côte	Conductivité électrique à 25°C μS.cm-1	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	K⁺ mg.L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub>	CI <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2</sup> · mg.L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> ·	NO <sub>2</sub> · mg.L <sup>-1</sup>	NH₄ <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> · mg.L <sup>-1</sup>	F mg.L <sup>-1</sup>
06074X0115	Dogger	1530	905	140	8.1	42	2.6	352	86	32	50	< 0.03	< 0.5	< 0.5	< 0.1
06073X0056	Dogger	1720	865	140	7	37	4.9	307	86	29	78	< 0.03	< 0.5	0.15	< 0.1
06073X0037	Dogger	400	973	155	9.2	44	10	390	80	46	51	< 0.03	< 0.5	1.4	< 0.1
06073X0052	Dogger	1140	855	145	8.4	37	2.7	360	59	49	47	< 0.03	< 0.5	0.09	< 0.1
06074XD	Dogger	2490	847	150	5.7	25	1.8	344	58	23	79	< 0.03	< 0.5	< 0.5	< 0.1
06073X0047	Dogger	100	860	135	9.2	38	15	353	58	49	45	< 0.03	< 0.5	0.12	< 0.1
06073XB	Dogger	2555	3320	115	61	470	40	245	920	145	0	< 0.03	0.41	< 0.5	1.6
06073X0061	Dogger et Infra-Toarcien	1180	1472	160	22	140	13	414	210	78	67	0.28	< 0.5	< 0.5	0.94
06073X0036	Dogger et Infra-Toarcien	400	969	125	9.5	68	9.8	361	94	55	38	< 0.03	0.06	0.22	0.36
05846XA	Infra-Toarcien	3450	844	73	38	50	3.8	310	74	37	72	< 0.03	< 0.5	< 0.5	0.27
06073XA	Infra-Toarcien	2650	982	115	16	73	9	327	125	72	1.3	< 0.03	0.06	< 0.5	0.61
06074X0077	Infra-Toarcien	2510	2530	105	44	340	31	287	610	125	< 0.5	< 0.03	0.27	< 0.5	2.1
06072X0004	Infra-Toarcien	900	7790	190	120	1500	48	518	2300	540	< 0.5	< 0.03	1	< 0.5	2.5
06073X0025	Infra-Toarcien	2570	18580	210	390	3600	120	584	6600	690	4.6	< 0.03	6.1	0.36	0.56
06072X0001	Infra-Toarcien	2090	25100	250	530	5200	210	289	9900	1300	0.7	0.04	0.5	0.07	0.39
05846X0007	Infra-Toarcien	1999	48500	450	1200	11000	370	319	19000	2600	< 0.5	< 0.03	2.7	0.07	0.89

Tableau 2 : Analyses physico-chimiques des eaux prélevées en octobre 2011

Montée du niveau marin – conséquences sur les aquifères côtiers de la France métropole



# Direction Eau, Environnement & Ecotechnlogies

3 avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél.: + 33 (0)2 38 64 34 34