

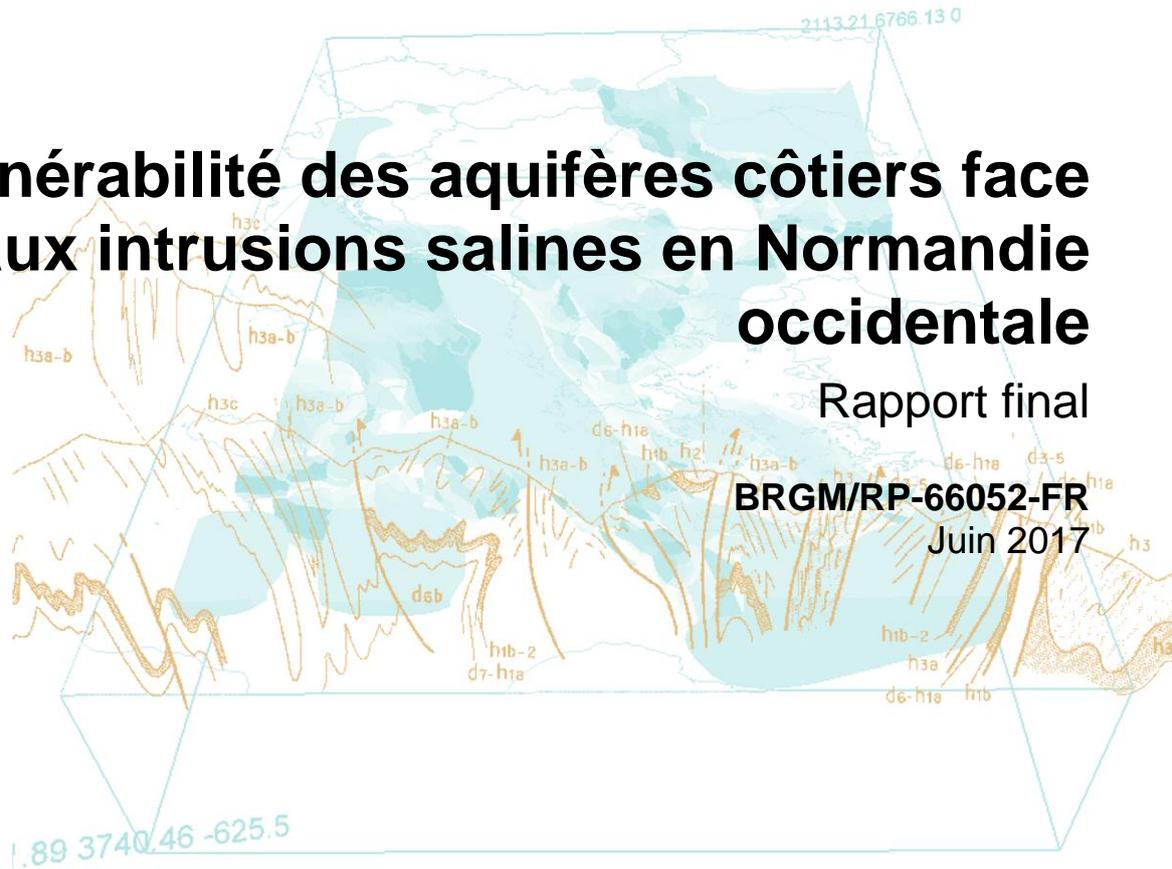


Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale

Rapport final

BRGM/RP-66052-FR

Juin 2017



Vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines en Normandie occidentale

Rapport final

BRGM/RP-66052-FR

Juin 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2015-2016 (projet AP15BNO012)

A. Laurent, G. Le Cozannet, R. Couëffé, J-M. Schroetter, N. Croiset, J. Lions

Vérificateur :

Nom : O. DOUEZ

Fonction : Responsable scientifique de programme

Date : 24/06/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Pennequin

Fonction : Directeur régional Normandie

Date : 03/07/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Remerciements à :

Frédéric Gresselin de la DREAL Normandie (SMCAP) pour les informations et données transmises,



Maurice Freslon de la DDTM de la Manche, aujourd'hui jeune retraité.

Mots-clés : Hydrogéologie et géologie littorale, Intrusions salines, Changement climatique, Vulnérabilité, Modélisation

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

A. LAURENT, G. LE COZANNET, R. COUEFFE, J-M. SCHROETTER, N. CROISSET, J. LIONS (2017) – Vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines en Normandie occidentale. Rapport final BRGM/RP-66052-FR, 189 p., 103 ill., 6 annexes.

Synthèse

L'étude réalisée par le BRGM en 2011 (Dörfliger et al, 2011) sur la vulnérabilité des aquifères côtiers métropolitains aux intrusions salines a mis en évidence de nombreux secteurs fortement sensibles, notamment les côtes du Calvados. L'intrusion d'eau salée (salt water wedge), phénomène naturel, est définie comme le déplacement et le maintien d'eau salée dans un aquifère à eau douce. La partie de l'aquifère littoral envahi par l'eau salée est comprise entre le substratum de l'aquifère et une interface eau douce/salée (Castany et Margat, 1977, Dictionnaire français d'hydrogéologie). L'intensité de l'intrusion dépend de plusieurs facteurs, notamment de la nature du réservoir d'eau souterraine, mais peut être amplifiée par des prélèvements d'eau souterraine ou encore par une élévation du niveau marin dans un contexte de changement climatique.

Les intrusions salines vont modifier les teneurs en éléments dissous dans l'eau douce (augmentation des ions chlorures) et engendrer des conséquences sur les usages directs de l'eau (alimentation en eau potable, agricole, aquacole) et indirects (écosystèmes terrestres et aquatiques). Afin de définir les risques liés aux intrusions salines dans les aquifères littoraux et de préserver les usagers et les milieux naturels, il est nécessaire :

- d'une part, de caractériser l'interface eau douce-eau salée et définir les paramètres du réservoir et du milieu environnant qui vont influencer sur l'intensité du phénomène,
- d'autre part, de définir les secteurs les plus vulnérables.

La façade maritime de la Basse-Normandie est ouverte sur environ 450 km de côtes. Les aquifères littoraux sont constitués de formations lithologiques variées (socle, sédimentaire) et sont exploités différemment en fonction de l'année, mais aussi des secteurs géographiques. C'est pourquoi la réalisation d'une étude spécifique sur le littoral bas-normand s'est avérée nécessaire.

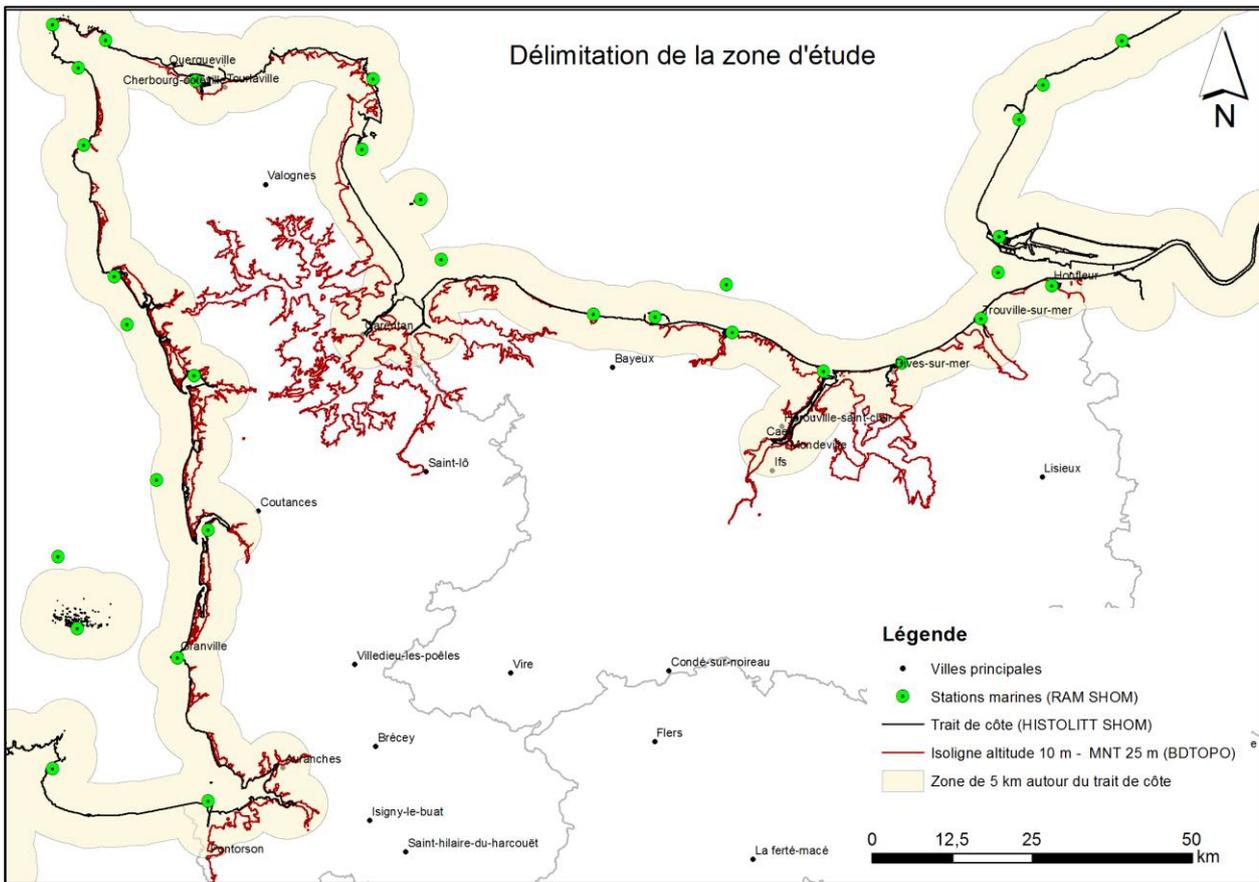
Suite à ce constat, à la mise en évidence en 2011 de secteurs fortement sensibles aux intrusions salines (Dörfliger et al., 2011) et afin de répondre aux exigences de la directive cadre sur l'eau 2000/60/DCE, la direction territoriale et Maritime des Bocages Normands de l'Agence de l'eau Seine-Normandie et le BRGM se sont associés pour financer une étude sur l'ensemble du littoral bas-normand. Mené par le BRGM durant un an, le projet s'inscrit dans la poursuite du travail d'état des lieux et d'identification des zones les plus à risques, à l'échelle de la Basse-Normandie.

Les objectifs fixés étaient les suivants :

- Synthèse bibliographique des données hydrogéologiques, hydrochimiques et géologiques existantes dans le Calvados et dans la Manche (ic. secteurs bas-normand de la baie du Mont Saint Michel et de la baie de Seine) ;
- Identification et cartographie des secteurs à enjeux (territoires agricoles, AEP, biodiversité, urbanisme) ;
- Utilisation du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour l'identification des secteurs vulnérables à la montée du niveau marin et aux intrusions salines associées (réalisation de simulations d'évolution des niveaux piézométriques et des flux associés) ;
- Cartographie des secteurs potentiellement sensibles et recommandations pour la mise en place de dispositifs de suivi des intrusions salines.

La zone d'étude dans l'ancienne région Basse-Normandie (cf. Illustration 1) a été définie à partir des critères suivants :

- Une distance au trait de côte Histolitt® (SHOM) inférieure à 5 km. Le trait de côte Histolitt® (SHOM) correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptibles d'élever le niveau de la mer) ;
- Les zones basses topographiques ouvertes sur le littoral d'une altitude inférieure à 10 m selon le MNT 25 m (BDTOPO).



La revue des données disponibles sur **l'élévation contemporaine du niveau de la mer** en Normandie occidentale ne permet pas de confirmer la subsidence régionale de l'ordre de -1mm/an suggérée par l'analyse des données de nivellement. L'analyse est limitée par le fait que beaucoup des données ne sont disponibles qu'à Cherbourg, alors que la subsidence identifiée par nivellement affecterait dans une moindre mesure l'extrémité de la presqu'île du Cotentin. Nous concluons donc que les données disponibles sont insuffisantes pour confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une subsidence régionale.

La **caractérisation hydrochimique** a permis par ailleurs de mettre en évidence des processus géochimiques dominants dans les grands types d'aquifères de Normandie occidentale, tels que la dissolution des carbonates dans l'aquifère de la craie dans l'est du Calvados, mais aussi dans l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien et dans les aquifères du Bajocien et du Bathonien. Les aquifères de socle sont soumis à l'hydrolyse des silicates (principalement le socle

crystallin) ; dans ces compartiments les processus d'interaction eau-roche sont dominants. L'activité anthropique joue un rôle non négligeable dans les aquifères du Bajocien et bathonien, notamment dans l'évolution des concentrations en chlorures.

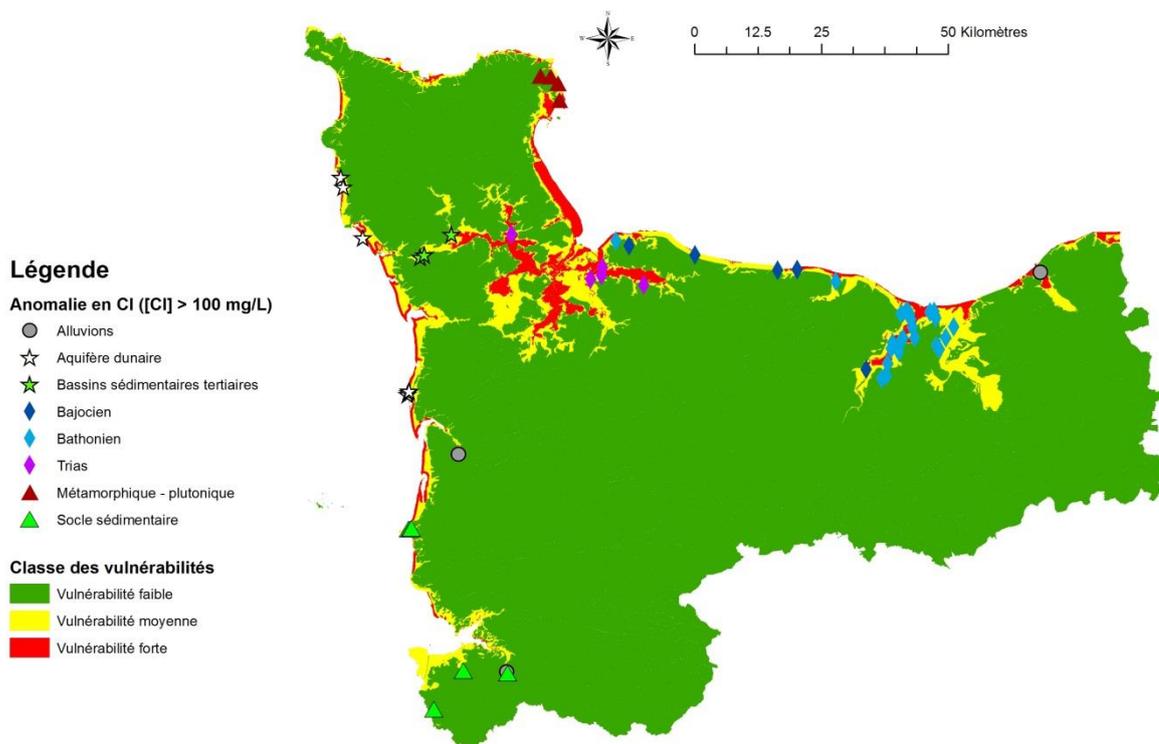
Les chlorures, éléments conservatifs, sont souvent utilisés comme référentiel. En effet, les chlorures, avec le sodium, permettent d'identifier la salinisation des aquifères. Les eaux souterraines des aquifères côtiers sont généralement plus chargées en chlorures et les valeurs de conductivité sont également plus élevées. Le ratio Na/Cl se rapproche du ratio Na/Cl pour l'eau de mer. L'intérêt de suivre ces paramètres est ainsi démontré, néanmoins, il est nécessaire de mener dans certains secteurs des études géochimiques approfondies (analyse des ions majeurs et traces, analyse isotopique, datation des eaux) pour identifier les processus en jeu et mettre en évidence des intrusions salines actuelles.

Une analyse plus fine des données disponibles (hydrochimiques, hydrogéologiques) et la réalisation de coupes géologiques a montré la complexité des **processus d'intrusions salines**, qui peuvent s'établir par le biais de biseaux salés, mais aussi par submersion ou par drainance/infiltration verticale d'eau salée récente ou ancienne. Dans cette dernière configuration, les formations du Quaternaire (dépôts du Flandrien par exemple) renfermeraient par exemple des eaux saumâtres, actuelles ou anciennes, et joueraient un rôle de vecteur de pénétration du sel dans des aquifères sous-jacents. Il serait nécessaire d'acquérir de nouvelles connaissances hydrogéologiques pour mieux comprendre les échanges entre les eaux saumâtres contenues dans les formations superficielles récentes (Quaternaire) et les aquifères sous-jacents (Bathonien, Bajocien, socle, Trias, Lias).

Pour la constitution de scénarios devant être pris en compte, par **le modèle hydrogéologique appliqué au Bessin et à la Plaine de Caen** : le comité de suivi a retenu les hypothèses d'une élévation du niveau marin de +0,5 m et +1 m, l'augmentation des prélèvements de 10 %, une baisse des précipitations et de la recharge (cf. rapport BRGM RP-66229-FR, Croiset et al., 2016, paragraphe 2.2). Les résultats montrent une sensibilité plus importante des estuaires des fleuves côtiers au phénomène d'intrusion saline. La période de basses eaux est également une période plus sensible qui favoriserait le phénomène. A priori, l'augmentation des prélèvements n'entraînerait pas de modification significative sur la position du biseau salé.

Afin de définir la **vulnérabilité des aquifères côtiers** aux intrusions salines, une méthode d'analyse multicritères a été développée au cours de cette étude. Cette approche multicritères, basée sur la méthode GALDIT, permet d'apprécier, à l'échelle de la Normandie occidentale, la vulnérabilité aux intrusions salines actuelles, et dans un contexte de changement climatique. Cette méthode s'appuie notamment sur les paramètres : conductivité hydraulique-épaisseur de la zone saturée, épaisseur de la nappe au-dessus du niveau de la mer pour évaluer la vulnérabilité actuelle et la prise en compte des résultats du modèle, sur la zone du Bessin et de la plaine de Caen, et la prise en compte du risque de submersion marine pour évaluer la vulnérabilité en contexte de changement climatique.

Les anomalies en chlorures et conductivités constatées sont considérées comme des facteurs aggravants.



Carte de la vulnérabilité actuelle

Les enjeux sont appréciés par rapport aux prélèvements. Ce dernier critère permet de considérer, de façon indirecte, les risques potentiels sur la ressource en eau souterraine.

La synthèse des éléments hydrochimiques, de la vulnérabilité, des enjeux aboutit à permis d'aboutir à **proposer plusieurs actions** à mettre en œuvre dans la zone d'étude, soit pour améliorer la connaissance, soit pour installer un réseau de suivi des intrusions salines. Des éléments de précisions ont été présentés quant à l'enrichissement de la connaissance dans certains secteurs.

Sommaire

1. Avant-propos	17
2. Synthèse documentaire	19
2.1. PROCESSUS DE SALINISATION DES EAUX	19
2.2. CONCEPTUALISATION DU PHENOMENE D'INTRUSIONS SALINES.....	20
2.2.1. Le biseau salé, interface eau douce-eau salée	20
2.2.2. Interface Fleuves/OCEAN.....	23
2.2.3. Processus d'intrusion saline.....	25
2.3. QUELS OUTILS POUR CARACTERISER L'INTRUSION SALINE	26
2.3.1. Méthodologie Générale (Dörfliger, Augeard - 2013).....	26
2.3.2. Méthode de caractérisation de l'interface eau douce-eau salée.....	27
a) L'hydrogéochimie appliquée aux intrusions salines.....	27
b) La géophysique appliquée aux intrusions salines	28
3. Contexte géologique et géomorphologique de la zone d'étude	31
3.1. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE.....	31
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	33
3.3. COUPES GEOLOGIQUES	40
4. L'élévation contemporaine du niveau de la mer en Normandie occidentale : observations, causes et projections	41
4.1. ELEVATION CONTEMPORAINE DU NIVEAU DE LA MER : OBSERVATIONS, CAUSES ET VARIATIONS REGIONALES	41
4.1.1. Observations.....	41
4.1.2. Causes de l'élévation du niveau marin.....	43
4.1.3. Variabilité régionale et variations du niveau marin relativement à la côte.....	44
4.2. LES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER EN BASSE-NORMANDIE : ANALYSE D'OBSERVATIONS GEODESIQUES ET CAUSES POTENTIELLES	45
4.2.1. Données de nivellement	45
4.2.2. Données altimétriques et marégraphiques	47
4.2.3. Données GPS.....	51
4.2.4. Modèles de GIA	52
4.2.5. Etude des paléorivages	53
4.2.6. Conclusion du chapitre	54
5. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines	55

5.1. EXTRACTION ADES ET QUALITOMETRES	55
5.2. CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE DES PRINCIPAUX AQUIFERES	58
5.2.1. Principaux processus en jeu	58
5.2.2. Vulnérabilité aux pollutions anthropiques	62
5.2.3. Processus de salinisation	64
5.2.4. Comparaison avec la zone d'étude (aquifères côtiers)	66
6. Etat des connaissances des intrusions salines	71
6.1. APPROCHE REGIONALE	71
6.2. BAIE DU MONT-SAINT-MICHEL ET BASSE VALLEE DE LA SELUNE	74
6.2.1. Contexte géologique	74
6.2.2. Caractérisation de l'intrusion saline	74
6.3. LITTORAL OUEST DE LA MANCHE	79
6.3.1. Contexte géologique	79
6.3.2. Caractérisation de l'intrusion saline	80
6.4. VAL DE SAIRE	84
6.4.1. Contexte géologique	84
6.4.2. Caractérisation de l'intrusion saline	85
6.5. BASSINS SEDIMENTAIRES DU CENOZOÏQUE – SEUIL DU COTENTIN	88
6.5.1. Contexte géologique	88
6.5.2. Caractérisation de l'intrusion saline	90
6.6. LE PLAIN LITTORAL	91
6.6.1. Contexte géologique	91
6.6.2. Caractérisation de l'intrusion saline	92
6.7. BASSE VALLEE DE L'AURE	93
6.7.1. Contexte géologique	93
6.7.2. Caractérisation de l'intrusion saline	93
6.8. LITTORAL DU BESSIN	99
6.8.1. Secteur de Grandcamp-Maisy	99
6.8.2. Secteur d'Omaha Beach	101
6.8.3. Secteur d'Arromanches-les-Bains	103
6.9. PLAINE DE CAEN ET BASSIN DE LA DIVES	105
6.9.1. En rive droite de la Seulles	105
6.9.2. Vallée de l'Orne	106
6.9.3. Bassin de la Dives	115
6.9.4. Synthèse plaine de Caen et du bassin de la Dives	116
6.10. VALLEE DE LA TOUQUES	118

6.10.1.	Contexte géologique	118
6.10.2.	Caractérisation de l'intrusion saline	118
6.11.	SYNTHESE DES PROCESSUS D'INTRUSIONS SALINES ACTUELLEMENT EN JEU	119
7.	Présentation des principaux résultats du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères face aux intrusions salines	123
7.1.	OUTILS ET METHODES MIS EN ŒUVRE	123
7.1.1.	Utilisation du Modèle Maillé et du modèle analytique	123
7.1.2.	Scénarii	123
7.1.3.	Limites	124
7.2.	PRINCIPAUX RESULTATS	124
8.	Evaluation de la vulnérabilité	127
8.1.	PRESENTATION DE LA METHODE GALDIT	127
8.2.	LA VULNERABILITE ACTUELLE V_{ACT}	128
8.2.1.	La Conductivité Hydraulique (A) et épaisseur de zone saturée (E)	128
8.2.2.	Altitude de la nappe/Niveau de la Mer (L)	131
8.2.3.	La distance à la côte (D)	132
8.2.4.	Impact actuel de l'intrusion saline (I)	133
8.2.5.	Résultat	135
8.3.	VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE VCC	137
9.	Proposition d'actions	141
9.1.	LOCALISATION DES SECTEURS A ENJEUX	141
9.2.	EVALUATION DU RISQUE	143
9.3.	PROPOSITIONS D' ACTIONS	144
9.3.1.	Outils	144
a)	Mesures hydrochimiques	144
b)	Investigations physiques	144
c)	Mise en place d'un réseau de surveillance	145
d)	Réseaux de surveillance existants	146
e)	Modélisation	148
9.3.2.	Actions proposées	148
9.3.3.	Pistes de réflexion	151
10.	Conclusions	153
11.	Bibliographie	155

11.1.	BIBLIOGRAPHIE GENERALE.....	155
11.2.	REFERENCES – ELEVATION CONTEMPORAINE DU NIVEAU MARIN (CHAPITRE 4).....	157
11.3.	REFERENCES PAR SECTEUR D'OBSERVATION.....	160
11.3.1.	Baie du Mont-Saint-Michel et vallée de la Sélune	160
11.3.2.	Littoral ouest de la Manche.....	160
11.3.3.	Val de Saire.....	160
11.3.4.	Bassin sédimentaire – seuil du Cotentin	161
11.3.5.	Littoral du Bessin	161
11.3.6.	Plaine de Caen et bassin de la Dives.....	162

Liste des illustrations

Illustration 1 : Zone d'étude le long du littoral de la Normandie occidentale	18
Illustration 2 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines (Kloppmann et al., 2011).....	19
Illustration 3 : Position de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg – échelle verticale exagérée par rapport à l'échelle horizontale (d'après Custodio, 2002, Dorfliger et al., 2011)	21
Illustration 4 : Zone de transition eau douce/eau de mer et organisation des écoulements dans un aquifère côtier homogène (d'après Cooper et al.1964 ; dans Barlow, 2003, De Montety, 2008)	21
Illustration 5 : Zones de transition dans un système aquifère côtier multicouches (d'après Custodio, 2002, in De Montety, 2008)	22
Illustration 6 : Scénarii types d'intrusion d'eau salée dans un aquifère côtier (In Barbecot, 1999).....	22
Illustration 7 : Salinité moyenne dans l'estuaire de la Seine 2010 – variation temporelle des classes de salinité en différents points (GIP Seine-Aval, 2013).....	24
Illustration 8 : Salinité à la surface de la mer, source : PREVIMER.....	25
Illustration 9 : Gammes de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2003, in Kloppmann et al., 2011b).....	27
Illustration 10 : Composition moyenne des océans (Copin-Montegut, 1996, Chimie de l'eau mer)	28
Illustration 11 : Exemple de moyens mis en oeuvre afin de déterminer la position de l'interface eau douce eau salée (BRGM).....	29
Illustration 12 : Profondeur de l'interface eau douce – eau salée en Guadeloupe (Ducreux et al., 2014) .29	
Illustration 13 : Carte topographique de la Normandie occidentale, MNT 25m (BDTOPO).....	31
Illustration 14 : Carte Géologique simplifiée, DREAL Normandie	34
Illustration 15 : Log stratigraphique des formations géologiques du Jurassique inférieur à supérieur avec localisation des principaux aquifères en bleu (d'après Dugué et al., 1998 modifié).	34
Illustration 16 : Carte morphologique du littoral Nord Cotentin (échelle 1 :360 000) ; 1 : Courbes bathymétriques, 2 : Laisse de basse mer, 3 : Cordons littoraux actuels, 4 : Dépôts littoraux anciens, 5 : Dunes a) littorales b) perchées, 6 : Alluvions récentes, 7 : Dépôts quaternaires de solifluction, 8 : Hauts niveaux, 9 : Falaises mortes et vallées encaissées, 10 : Falaises rajeunies ; d'après Joly, 1939.....	35
Illustration 17 : Photographie du marais arrière littoral de Vauville, © Alexandra LAURENT	36
Illustration 18 : Photographie du cordon dunaire à Surtainville, © Alexandra LAURENT	37
Illustration 19 : Tangué de la Baie du Mont Saint Michel (crédit photo : givernynews).....	38
Illustration 20 : Localisation des formations géologiques récentes dans la zone d'étude, d'après les cartes géologiques au 1/50000 ^{ème} harmonisées, BRGM	38
Illustration 21 : Localisation des coupes géologiques, fond de carte géologique1/1000000 ^{ème} simplifiée, BRGM	40
Illustration 22 : Mesure de l'élévation de la mer au cours du XXème siècle et depuis 1992 par analyse des données marégraphiques et altimétriques (Figure adaptée de Cazenave et le Cozannet, 2014).....	42
Illustration 23 : Comparaison des vitesses d'élévation du niveau de la mer à différentes échelles de temps (D'après GIEC, WG1, Ch5, 2013)	43
Illustration 24 : Contribution des principaux processus causant l'élévation du niveau marin entre 1993 et 2010 et comparaison aux observations (Source : GIEC, WG1, Ch13, 2013).....	43
Illustration 25 : Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques (Source : AVISO – CNES/LEGOS/CLS).....	44

Illustration 26 : Schéma conceptuel du phénomène de « rebond post-glaciaire » (GIEC, 2013)	45
Illustration 27 : Poster présentant les résultats de la comparaison des deux campagnes de nivellement général de la France et IGN 69 (Source : Lenôtre et al. 1999). Légende : subsidences en couleurs bleues et surrections en couleurs rouges.	46
Illustration 28 : Carte des tendances de variations du niveau marin mesurées par les missions altimétriques spatiales (période 1993-2014) ; (données AVISO, graphique réalisé sous R).....	47
Illustration 29 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Cherbourg et tendances entre 1974 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	48
Illustration 30 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Cherbourg et tendances entre 1993 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	48
Illustration 31 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe du Havre et tendances entre 1993 et 2015 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	49
Illustration 32 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Saint Helier (Jersey) et tendances entre 1993 et 2015 (Données NOC, distribuées par le PSMSL, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	49
Illustration 33 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de St Malo et tendances entre 1993 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	50
Illustration 34 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe du Havre et tendances entre 1938 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.....	50
Illustration 35 : Stations GPS colocalisées avec des marégraphes dans la base de données SONEL (www.sonel.org).....	51
Illustration 36 : Réseau GNSS permanent de l'IGN (Source : rgp.ign.fr).....	52
Illustration 37 : Enregistrements des Station de Saint-Lô (STLO), Villedieu-les-Poêles (VLPL), Caen (CAEN) du réseau GNSS IGN (Source : IGN)	52
Illustration 38 : Contribution du GIA à l'élévation du niveau de la mer selon différents modèles de GIA (Source : Jevrejeva et al., 2014 ; Modèle SELEN – G. Spada ; ICE-XG : données W.R. Peltier ; ANU : données K. Lambeck).....	53
Illustration 39 : Localisation des points de prélèvement associés à un type d'aquifère sur fond de carte géologique au 1/1 000 000 ^{ème} (BRGM)	56
Illustration 40 : Localisation des points situés dans la zone d'étude (distance à la côte < 5 km et/ou altitude < 10 m NGF) sur fond de carte géologique au 1/1 000 000 ^{ème} (BRGM)	57
Illustration 41 : Valeurs de conductivité (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) mesurées dans les différents grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualitomètres de la base de donnée ADES (2016)	58
Illustration 42 : Concentrations en calcium (en mg/L) détectées dans les grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualitomètres de la base de données ADES (2016)	59
Illustration 43 : Représentation des points classés par type d'aquifères dans deux diagrammes de Piper (à gauche avec NO_3 , à droite sans NO_3)	61
Illustration 44 : Concentrations en nitrites (en mg/L) mesurées dans les grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualitomètres de la base de données ADES (2016)	62
Illustration 45 : Diagramme des ions chlorures versus les ions nitrates (en mg/L) et fer versus nitrates dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie	63

Illustration 46 : Diagrammes sodium versus chlorures (meq/L) dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer)	64
Illustration 47 : Diagrammes calcium vs bicarbonates et calcium vs chlorures dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en noir, droite de mélange 1 :1)	65
Illustration 48 : Diagrammes sulfates vs chlorures, calcium et nitrates dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en noir, droite de mélange 1 : 1 en bleu, droite de dilution de l'eau de mer).....	65
Illustration 49 : Boîte à moustaches des teneurs en chlorures (en mg/L) dans les aquifères de Basse-Normandie	66
Illustration 50 : Statistiques descriptives sur le paramètre « chlorures » (mg/L), par classe aquifère, sur l'ensemble de la région et au niveau de la frange littorale (zone d'étude) I	67
Illustration 51 : Diagrammes de la conductivité en fonction des concentrations en chlorures (mg/L) en Basse-Normandie et dans la zone d'étude (frange littorale)	67
Illustration 52 : Diagramme silice en solution (mg/L) en fonction des concentrations en chlorures (mg/L)	68
Illustration 53 : Statistiques sur le rapport molaire Na/Cl par classe aquifère et vis-à-vis de la proximité avec le littoral.....	68
Illustration 54 : Localisation des anomalies en chlorures ([Cl] > 100 mg/L) dans les eaux souterraines, sources ADES et BSS	71
Illustration 55 : Diagrammes sodium versus chlorures et sulfates versus chlorures (en meq/L) pour les points ayant une forte salinité situés à Argences (Callovien) et Donville-les-Bains (source : ADES), en bleu : droite de dilution de l'eau de mer	72
Illustration 56 : Coupe géologique n°1 de la baie du Mont-Saint-Michel, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM	74
Illustration 57 : Cartes de conductivité (en mS/cm) dans les couches profondes de l'aquifère (à gauche) et dans le réseau de drainage (à droite), source : Sogreah, 2002, rapport phase 6	75
Illustration 58 : Coupe transversale à la côte en rive droite du Couesnon, source : Sogreah, 2002, rapport phase 6	76
Illustration 59 : Diagrammes a) sodium versus chlorures, b) calcium versus chlorures c) sodium versus bicarbonates d) fer versus nitrates e) sulfates versus calcium f) sulfates versus nitrates pour les en contact avec les terrains Briovérien	78
Illustration 60 : Chronique piézométrique entre juillet 2005 et juillet 2016 du piézomètre situé à Gouville-sur-mer (01423X0044/F4), source : ADES	80
Illustration 61 : Mesures de salinité dans les aquifères côtiers (Freslon, 1983)	80
Illustration 62 : Localisation des points de surveillance des intrusions salines du réseau du SILEBAN, zoom sur le havre de Saint-Germain-sur-Ay (Lessay)	81
Illustration 63 : Profil de conductivité en fonction de la profondeur – Forage 01167X0090 – Année 2015, source : SILEBAN.....	82
Illustration 64 : Zoom sur deux secteurs de la côte de la Manche avec une anomalie en chlorures.....	83
Illustration 65 : Coupe géologique n°5 dans le Val de Saire, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM.....	85
Illustration 66 : Conductivité (en mS/cm) en fonction de la profondeur dans un ouvrage situé à Réville (27/07/2016)	86
Illustration 67 : Coupe géologique n°2 – Secteur havre de Saint-Germain-sur-Ay (Lessay), sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM	88
Illustration 68 : Coupe géologique n°3 dans la havre de Portbail et le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM	89

Illustration 69 : Rapports inter-éléments pour les points avec une anomalie en chlorures dans le secteur du seuil du Cotentin (en bleu : droite de dilution de l'eau de mer, en noir : droite de mélange 1 : 1).....	90
Illustration 70 : Coupe géologique n°6 du plain littoral dans l'est du département de la Manche (codes BSS raccourcis)	92
Illustration 71 : Localisation des points présentant une anomalie en chlorures dans la basse vallée de l'Aure	94
Illustration 72 : Rapport molaire Na/Cl dans les eaux du secteur de la basse vallée de l'Aure (en bleu : droite de dilution de l'eau de mer)	96
Illustration 73 : Coupe géologique n°7 à l'est de la baie des Veys	97
Illustration 74 : Rapports inter-éléments pour les points avec une anomalie en chlorures dans le secteur du Bessin	100
Illustration 75 : Coupe géologique dans le Bessin, secteur d'Omaha	101
Illustration 76 : Carte du réseau karstique (Equipe spéléologique d'Hérouville-St-Clair)	102
Illustration 77 : Coupe géologique n°9 dans le Bessin, secteur d'Arromanches-les-Bains.....	103
Illustration 78 : Coupe géologique n°11 dans la plaine de Caen, secteur Bretteville/Saint-Aubin	105
Illustration 79 : Coupe géologique n°12 dans la plaine de Caen, secteur vallée de l'Orne et bassin de la Dive	106
Illustration 80 : Salinité de l'Orne à l'amont du barrage (en g/L), échelle 1/20000 en longueur et 1/100 en hauteur (Etude Sogreah Verdet, 1975)	109
Illustration 81 : Suivi de la conductivité (en $\mu\text{S/cm}$) sur le site de Renault Trucks (données : Renault Trucks)	112
Illustration 82 : Teneurs en chlorures en mg/L dans les eaux souterraines sur le site de Blainville-sur-Orne pendant un pompage d'essai (Dassibat et Pascaud, 1975)	113
Illustration 83 : Diagrammes Na vs Cl pour les points ayant une anomalie en chlorures dans le secteur de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (en bleu : droite de l'eau de mer)	116
Illustration 84 : Diagramme strontium versus chlorures dans les eaux souterraines de la basse vallée de l'Orne (Dassibat et Pascaud, 1975 à 1978)	117
Illustration 85 : Coupe stratigraphique du forage 00975X0049/F2 à Deauville implanté dans la vallée de la Touques	118
Illustration 86 : Schéma de la méthode de travail faisant intervenir un modèle maillé suivi d'un modèle analytique	123
Illustration 87 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortants du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence (niveau marin +1 m avec augmentation des prélèvements de 10 %).	125
Illustration 88 : Tableau de synthèse des poids et rangs de la méthode GALDIT (Dörfliger, 2011)	127
Illustration 89 : Cartes schématiques des principales formations aquifères avec leur notation agrégée pour les paramètres Conductivité hydraulique (A) et épaisseur de la zone saturée (E)	130
Illustration 90 : Carte des épaisseurs de la zone saturée au dessus du niveau marin (source : DREAL Normandie)	132
Illustration 91 : Distance à la côte, donnée trait de côte Histolitt (SHOM)	133
Illustration 92 : Rappel des points susceptibles d'être affectés par une intrusion saline	134
Illustration 93: Carte de vulnérabilité Vact aux intrusions salines	136
Illustration 94 : Avancée du biseau salé sur le secteur modélisé, scénario 4, RP6629-FR - BRGM.....	138
Illustration 95 : Zones sous le Niveau Marin (DREAL Normandie).	138

Illustration 96 : Carte de la vulnérabilité au changement climatique, Vcc	139
Illustration 97 : Localisation des points de prélèvements de la ressource en eau souterraine dans la zone d'étude en fonction de l'usage de l'eau souterraine (à gauche) et leurs volumes (à droite).....	141
Illustration 98 : Représentation des secteurs urbanisés, source : CorineLandCover, 2012	142
Illustration 99 : Tableau récapitulatif des secteurs de Basse-Normandie à enjeux vis-à-vis de l'exploitation de la ressource en eau souterraine	143
Illustration 100 : Exemple de suivi de l'intrusion saline par SMD (IMAgeau)	145
Illustration 101 : Producteurs des données des réseaux de surveillance DCE (source : http://www.eaufrance.fr/donnees/)	146
Illustration 102 : Liste des piézomètres situés en bordure du littoral	147
Illustration 103 : Propositions d'actions	150

Liste des annexes

Annexe 1 - Boîtes à moustaches des ions majeurs (mg/L) par classe aquifère	165
Annexe 2 - Liste des points avec une anomalie en chlorures.....	167
Annexe 3 - Coupes géologiques	171
Annexe 4 - Localisations des anomalies en chlorures	179
Annexe 5 - Analyses physico-chimiques de la nappe du Dogger en 1975, 1976, 1977 et 1978 (Rapports BRGM Dassibat, 1977, 1978).....	185
Annexe 6 - Localisation des points de suivi de la qualité de la nappe du Dogger (Dassibat et Pascaud 1975 à 1978)	189

1. Avant-propos

Suite à la mise en évidence en 2011 dans le cadre d'une étude nationale, de secteurs fortement sensibles aux intrusions salines (Dörfliger et al, 2011), et afin de répondre aux exigences de la directive cadre sur l'eau 2000/60/DCE, la direction territoriale et Maritime des Bocages Normands de l'Agence de l'eau Seine-Normandie et le BRGM se sont associés pour financer une étude complémentaire sur l'ensemble du littoral bas-normand, destinée à mieux préciser ces résultats à l'échelle régionale. Mené par le BRGM durant un an, le projet s'inscrit donc dans la poursuite du travail d'état des lieux et d'identification des zones les plus vulnérables face au risque d'intrusion saline.

Les objectifs fixés étaient les suivants :

- Synthèse bibliographique des données hydrogéologiques, hydrochimiques et géologiques existantes dans le Calvados et dans la Manche (ic. secteurs bas-normand de la baie du Mont Saint Michel et de la baie de Seine) ;
- Identification et cartographie des secteurs à enjeux (territoires agricoles, AEP, biodiversité, urbanisme) ;
- Utilisation du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour l'identification des secteurs vulnérables à la montée du niveau marin et aux intrusions salines associées (réalisation de simulations d'évolution des niveaux piézométriques et des flux associés) ;
- Cartographie des secteurs potentiellement sensibles et recommandations pour la mise en place de dispositifs de suivi des intrusions salines.

La zone d'étude dans l'ancienne région Basse-Normandie (cf. Illustration 1) a été définie à partir des critères suivants :

- Une distance au trait de côte Histolitt® (SHOM) inférieure à 5 km. Le trait de côte Histolitt® (SHOM) correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptibles d'élever le niveau de la mer) ;
- Les zones basses topographiques ouvertes sur le littoral d'une altitude inférieure à 10 m selon le MNT 25 m (BDTOPO).

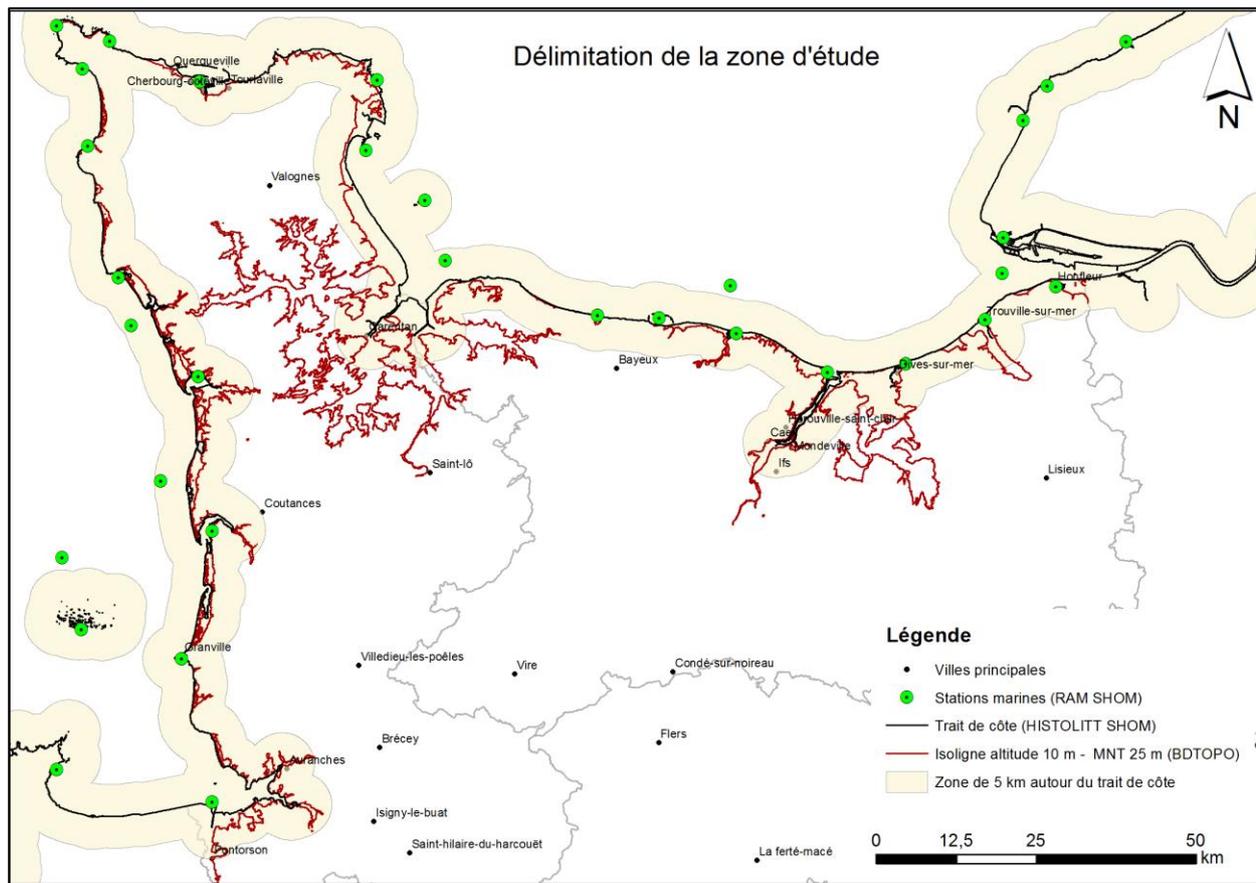


Illustration 1 : Zone d'étude le long du littoral de la Normandie occidentale

Le contenu du présent rapport est le suivant :

- Etat des lieux des connaissances des intrusions salines sur le littoral bas-normand (chapitres 1 à 4 et 6) ;
- Analyse hydrochimique des aquifères côtiers (chapitres 5 et 6) ;
- Présentation des résultats des simulations issues du modèle maillé hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (Wuilleumier et al., 2014) afin d'évaluer l'évolution du biseau salé dans les aquifères côtiers dans un contexte de changement climatique (Rapport RP66052-FR, Croiset et al., 2016) ;
- Evaluation de la Vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines (chapitres 7 et 8) ;
- Recommandations pour la mise en place d'un réseau de suivi des intrusions salines dans les aquifères (chapitre 8).

2. Synthèse documentaire

2.1. PROCESSUS DE SALINISATION DES EAUX

D'après Kloppmann et al., 2011a, le cycle de la salinité dans les eaux continentales peut être subdivisé en deux grands domaines : le domaine « marin » et le domaine « continental/interactions eaux-roches » (Illustration 2).

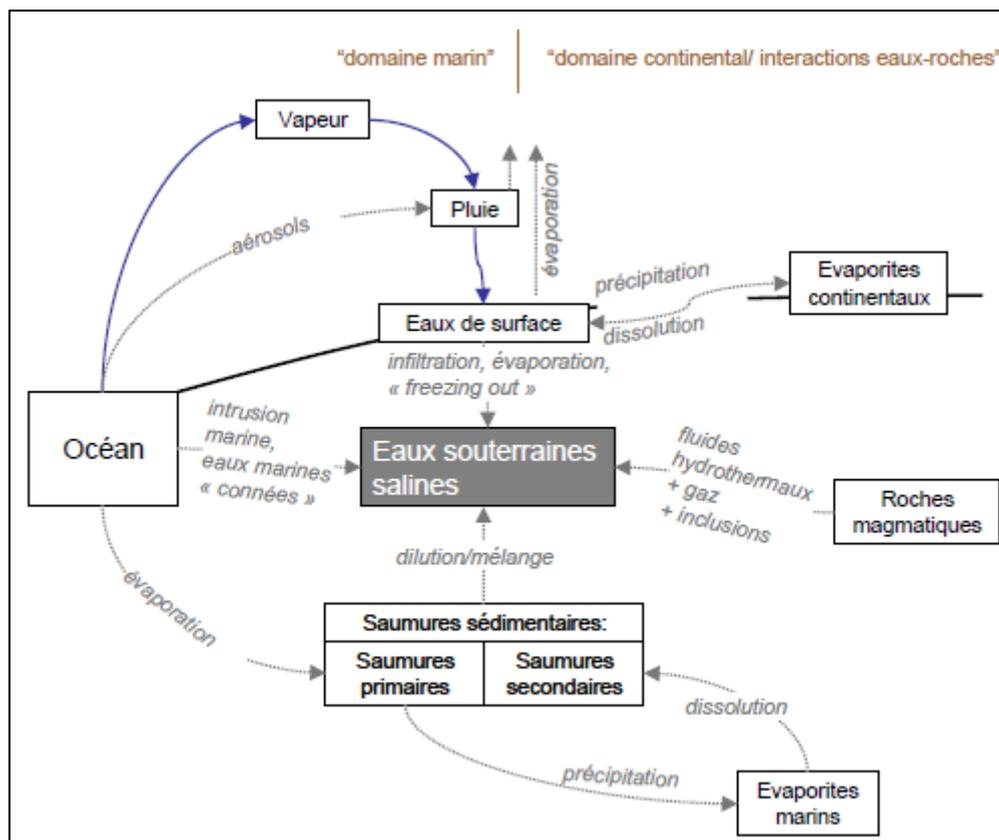


Illustration 2 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines (Kloppmann et al., 2011)

Plusieurs processus peuvent être à l'origine des sels trouvés dans les eaux souterraines et plus généralement de leur salinisation (Kloppmann et al., 2010) :

- L'apport des eaux météoriques en provenance de la mer ; la mer influence en effet la composition chimique des eaux de pluie qu'elle tend à charger en sels lors des phénomènes d'évaporation. Au cours de la migration des masses d'air des océans vers le continent, les précipitations successives appauvrissent ensuite les nuages en éléments dissous d'origine marine. A Brest, les teneurs en chlorures des eaux de pluie s'élèvent en moyenne à 9 mg/L (Millot et al., 2010) ;
- L'infiltration des eaux à travers des sols salins : la salinisation des sols est due à des forts taux d'évaporation favorisant les remontées capillaires et l'accumulation des sels solubles à la surface des sols ;

- La percolation des eaux à travers des dépôts évaporitiques ;
- Le mélange avec une eau de mer actuelle (cf. paragraphe 2.1) ;
- Le mélange avec une solution salée issue d'eau de mer ancienne ou eau connée. Les phénomènes de diffusion et/ou convection de saumures dites « primaires », issues de l'évaporation d'une eau de mer ancienne (eaux connées) rencontrés principalement dans des aquifères profonds des grands bassins sédimentaires ou dans les boucliers cristallins ;
- Le mélange avec une saumure issue de la dissolution d'évaporites (sels géologiques) ;
- Le mélange avec certains fluides hydrothermaux ;
- L'apport de sels d'origine anthropique ; en zone urbaine le rejet des eaux usées et le salage des routes contribuent à la salinisation des eaux souterraines, ainsi que l'épandage de fertilisants et autres engrais en zone rurale.

Les intrusions marines et donc salines représentent un des processus de salinisation des eaux souterraines.

2.2. CONCEPTUALISATION DU PHENOMENE D'INTRUSIONS SALINES

2.2.1. Le biseau salé, interface eau douce-eau salée

L'intrusion d'eau salée (en Anglais « salt water wedge »), phénomène naturel, est définie comme le déplacement et le maintien d'eau salée dans un aquifère à eau douce. La partie de l'aquifère littoral envahi par l'eau salée est comprise entre le substratum de l'aquifère et une interface eau douce/eau salée (Castany et Margat, 1977, Dictionnaire français d'hydrogéologie).

La position du biseau salé a été définie en tenant compte de la différence de densité entre deux types d'eau (Banton et Bangoy, 1997). Les premiers travaux ont été menés par Badon-Ghyben (1888) et Herzberg (1901). Ils montrèrent que, dans les aquifères libres côtiers, la profondeur de l'eau douce en dessous du niveau de la mer est d'environ 40 fois la hauteur de l'eau douce située au-dessus de la mer (Illustration 3) du fait du rapport des densités (Banton et Bangoy, 1997). Le principe de Ghyben-Herzberg ainsi défini repose sur le principe d'équilibre hydrostatique entre eau douce et eau salée, eaux considérées comme deux fluides non miscibles en contact par l'intermédiaire d'une interface (De Wiest, traduit par Debuissou et al., 1969), selon l'équation suivante :

$$z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h \cong 40 h$$

Avec,

z : profondeur de l'interface eau douce-eau salée sous le niveau de la mer

h : le niveau de la surface libre au-dessus de la mer

ρ_w : la masse volumique de l'eau douce ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$)

ρ_s : la masse volumique de l'eau salée ($\rho_s = 1,025 \text{ g/cm}^3$, soit 25 g de sel/L d'eau de mer)

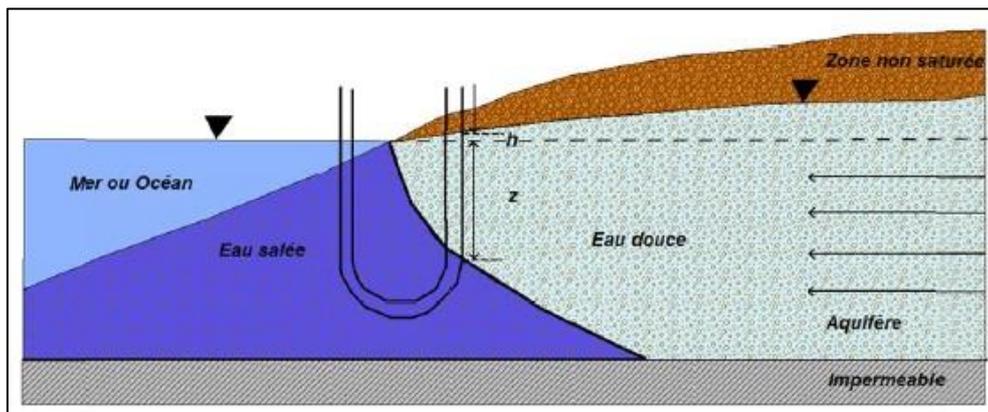


Illustration 3 : Position de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg – échelle verticale exagérée par rapport à l'échelle horizontale (d'après Custodio, 2002, Dorfliger et al., 2011)

D'autres approches ont été développées considérant l'interface eau douce – eau salée du point de vue dynamique, plutôt que du point de vue hydrostatique. Ces méthodes ont été synthétisées par De Wiest dans son ouvrage *Geohydrology* (1965) et traduit par Debuissou et al., 1969. Cette synthèse a été reprise par Daum et al., 1996 et Frissant et al., 2005.

L'approche de Cooper (Illustration 34) tient compte de la miscibilité de l'eau douce et de l'eau salée. L'interface constitue une zone de transition ou une zone de mélange, induite par des phénomènes de dispersion hydrodynamique (Cooper et al., 1964, Dorfliger et al., 2011).

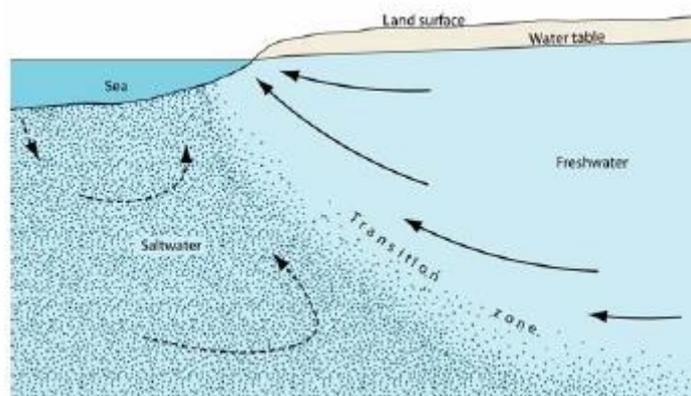


Illustration 4 : Zone de transition eau douce/eau de mer et organisation des écoulements dans un aquifère côtier homogène (d'après Cooper et al. 1964 ; dans Barlow, 2003, De Montety, 2008)

L'épaisseur de la zone de transition varie en fonction des caractéristiques géologiques et hydrodynamiques de l'aquifère. Dans les aquifères côtiers présentant de faibles gradients hydrauliques, la zone de transition peut s'étendre sur plusieurs kilomètres (Cooper et al., 1964, De Montety, 2008).

L'épaisseur de la zone de transition tend à augmenter lorsque l'équilibre entre la charge d'eau douce et la charge d'eau de mer change par exemple sous l'influence de la marée ou de la variation de la recharge (De Montety, 2008).

Les aquifères côtiers présentent une grande diversité géologique : on distingue les aquifères côtiers libres, les aquifères côtiers captifs ou semi-captifs et les aquifères côtiers multicouches.

Les aquifères côtiers libres sont représentés au niveau des plaines côtières et des cordons dunaires littoraux. Dans des contextes géomorphologiques complexes, tels que les systèmes de lagunes, polders ou des marais arrière littoraux, l'interface eau douce-eau salée présente une structure plus complexe (Comte, 2008).

Les aquifères côtiers captifs ou semi-captifs sont représentés principalement dans les bassins sédimentaires côtiers. La couche aquifère est surmontée par une couche peu à pas perméable et affleure en mer à une distance variable de la ligne de côte. L'interface saline est alors repoussée en mer pour permettre la sortie de l'eau de la nappe (Comte, 2008).

Dans le cas d'aquifère multicouches, chaque niveau aquifère est affecté par une zone de transition, qui dépend en partie de la charge d'eau douce dans la zone continentale de chaque aquifère et de la perméabilité de l'aquitard (De Montety, 2008).

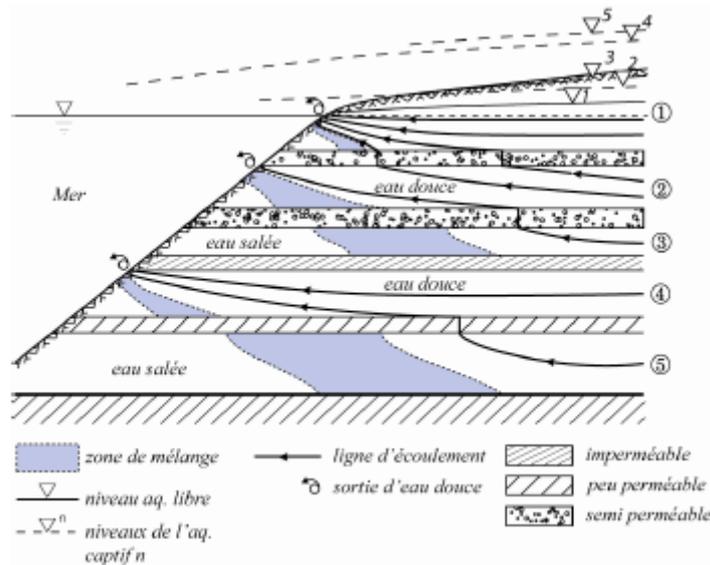


Illustration 5 : Zones de transition dans un système aquifère côtier multicouches (d'après Custodio, 2002, in De Montety, 2008)

Dans la thèse de Barbecot, 1999, trois types de processus d'intrusions marines sont proposées (Illustration 6).

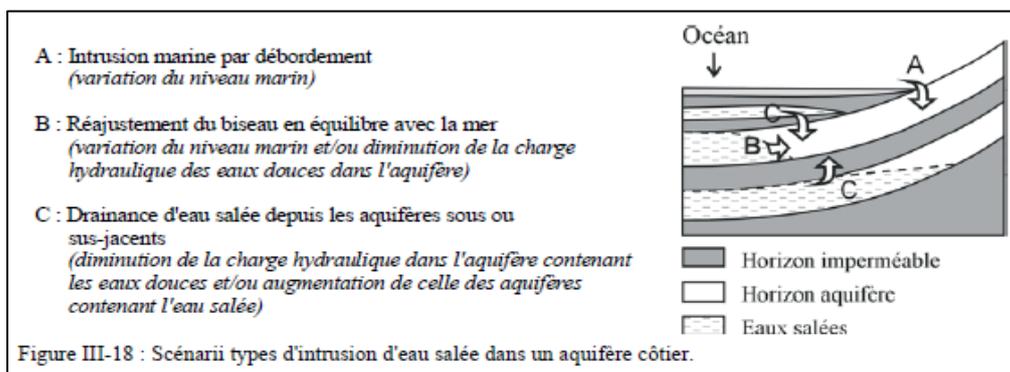


Illustration 6 : Scénarii types d'intrusion d'eau salée dans un aquifère côtier (In Barbecot, 1999)

L'intrusion marine par débordement (A) se rencontre également dans le cas de rentrant salé, par exemple les eaux de l'Orne sont probablement en contact avec l'aquifère du Bathonien, le contaminant.

L'intrusion marine depuis des aquifères sous ou sus-jacents peut s'introduire par drainance verticale (C), mais aussi par des failles, fractures mettant ainsi en contact des eaux salées ou saumâtres avec les eaux douces de l'aquifère cible.

Le processus de réajustement du biseau (B), plus communément appelé biseau salé est un processus subactuel, tandis que les autres processus peuvent s'être mis en place au cours de périodes plus anciennes.

Durant les périodes de transgression marine, la mer a pu envahir les aquifères côtiers. Lors des phases de régression, l'intrusion marine n'a pas toujours pu être repoussée dans les aquifères à faible gradient hydraulique, laissant place à une paléosalinisation de ces aquifères (De Montety, 2008).

2.2.2. Interface Fleuves/OCEAN

Les eaux marines peuvent contaminer les embouchures des fleuves. Par exemple dans l'estuaire de la Seine, le front salé remonte à plus de 20 km en amont de l'embouchure du fleuve comme le montre la figure suivante.

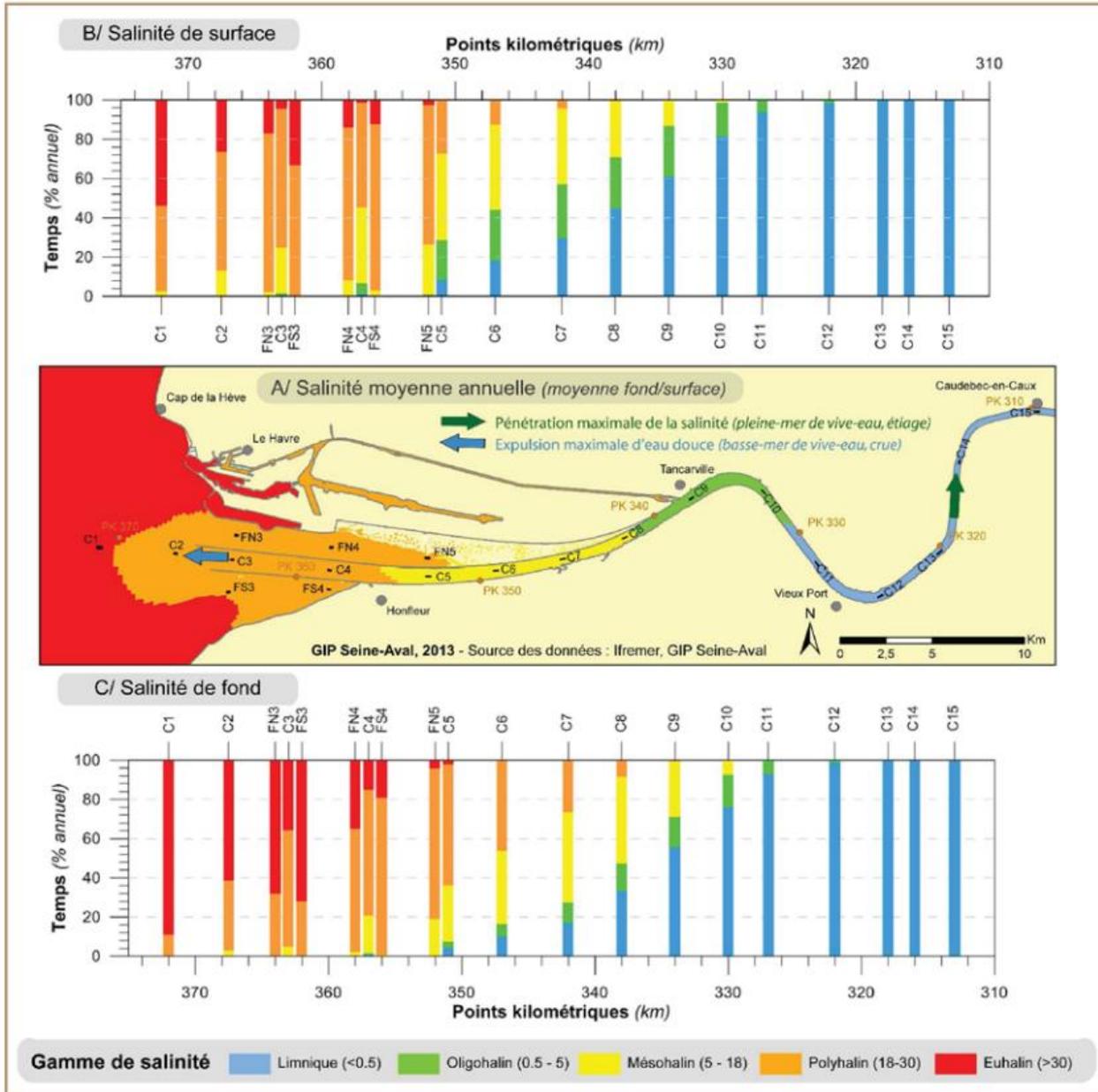


Illustration 7 : Salinité moyenne dans l'estuaire de la Seine 2010 – variation temporelle des classes de salinité en différents points (GIP Seine-Aval, 2013).

La pénétration du front de salinité et l'expulsion des eaux douces ou faiblement salées sont guidées par la combinaison de l'alternance crue/étiage et morte-eau/vive-eau. En période d'étiage, la salinité remonte plus en amont dans l'estuaire. En période de crue, des eaux douces peuvent s'écouler jusqu'à la limite de l'engainement et des eaux de faible salinité être expulsées en baie de Seine. En vive-eaux, la remontée du front de salinité est plus importante et les eaux douces sont expulsées plus en aval. L'inverse est observé en morte-eau, avec un gradient plus restreint (GIP Seine-Aval, 2013).

La carte de salinité réalisée par PREVIMER (Illustration 8) montre également un phénomène de faible salinisation dans les embouchures des fleuves dû à l'apport d'eau douce continentale.

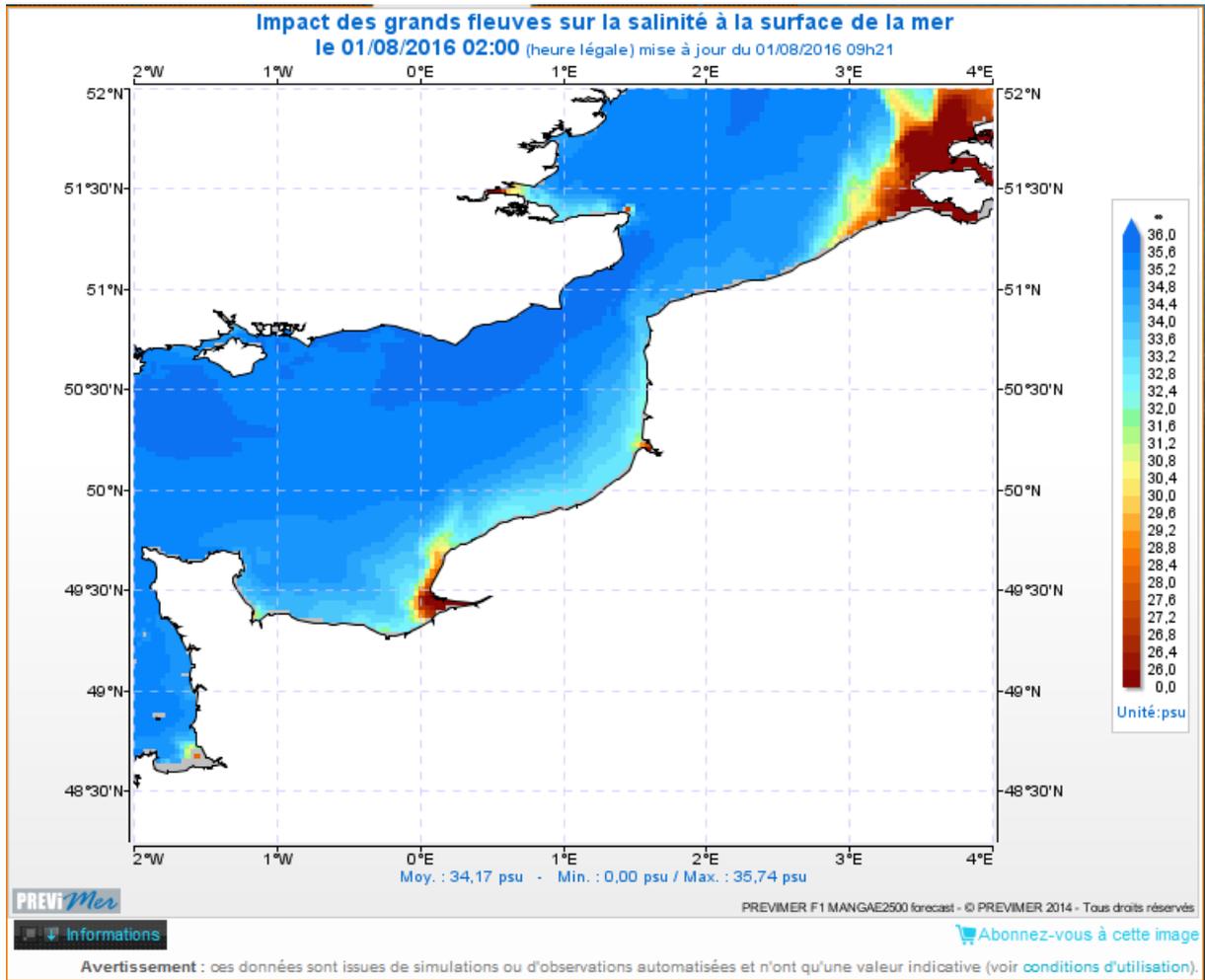


Illustration 8 : Salinité à la surface de la mer, source : PREVIMER

2.2.3. Processus d'intrusion saline

Le phénomène d'intrusion saline dans un aquifère côtier devient actif lorsque l'équilibre hydrodynamique entre l'eau de mer et l'eau douce est rompu, soit par une baisse importante de la charge hydraulique souterraine et des flux d'eau douce, soit par une augmentation de la charge d'eau de mer (De Montety, 2008).

Ce déséquilibre peut être engendré par :

- Une surexploitation de l'aquifère côtier ;
- Une diminution des flux des cours d'eau et de leurs nappes d'accompagnement ;
- Une baisse de la recharge de l'aquifère ;
- Une montée du niveau marin.

2.3. QUELS OUTILS POUR CARACTERISER L'INTRUSION SALINE

2.3.1. Méthodologie Générale (Dörfliger, Augeard - 2013)

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

- **détecter la salinité et suivre son évolution** : la mesure régulière des chlorures (le chlorure de sodium étant le sel majoritaire de l'eau de mer) ou de la conductivité électrique (dépendant de la quantité de sels dissous dans l'eau) des eaux souterraines constitue un premier outil de surveillance au niveau d'un aquifère, de manière spatiale et temporelle ; un réseau de forages existants ou dédiés peut permettre ces analyses en plus du suivi du niveau piézométrique ; plusieurs options de suivi sont possibles : mesures ponctuelles en continu de la conductivité électrique, mesures périodiques sur des profils verticaux ou encore mesures en continu de la conductivité électrique sur une verticale à partir d'observatoires géophysiques développés récemment ;
- **identifier l'origine de la salinité** : lorsqu'une salinité est détectée, l'utilisation des outils géochimiques et isotopiques sur des analyses d'échantillons prélevés dans des forages permet de déterminer l'origine de la salinité. En particulier, cette méthode permet de distinguer une salinité d'origine marine d'une salinité liée à la présence de formations géologiques salifères dans le réservoir souterrain ou d'une salinité associée à des eaux usées ;
- **évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline** : lorsque les données de salinité d'un aquifère sont limitées, la vulnérabilité à l'échelle d'un aquifère peut être estimée de façon simplifiée à l'aide d'une cartographie intégrant les différentes composantes ayant une influence sur l'intrusion du biseau salé ;
- **tester des scénarii** : enfin, la modélisation hydrogéologique d'un aquifère littoral peut être utilisée pour comprendre l'intrusion saline et tester différents scénarii. Ces scénarii permettent par exemple d'explorer l'impact des modifications de changement de niveau marin ou l'impact d'une évolution des prélèvements. Cependant, la réalisation d'une modélisation nécessite de disposer d'une connaissance suffisante tant du point de vue de la géométrie que des paramètres physiques du réservoir souterrain. L'acquisition de données nécessite des investigations géophysiques ou la réalisation de forage avec des essais de pompages et des caractérisations hydrochimiques.

2.3.2. Méthode de caractérisation de l'interface eau douce-eau salée

Afin d'étudier le phénomène d'intrusion saline, plusieurs approches sont possibles. Le projet de recherche mené par le BRGM en 1970 (Margat et Monition, 1970) en collaboration avec le Burgeap, le C.E.A. de Saclay, le cabinet d'études P.RUBY aux Milles montre que la position du contact eau douce-eau salée peut être caractérisée par des moyens simples. Les conclusions de l'étude indiquent que les moyens les plus aptes à définir le contact eau douce – eau salée dans les forages sont :

- la mesure de résistivité par sondage électrique ;
- l'analyse chimique portant sur les ions majeurs et certains éléments traces (Li, Sr, B, F) ;
- l'analyse isotopique (deutérium) ;
- l'appareil enregistreur d'observation des interfaces dans les forages (station S.O.I.F. brevetée).

Dans Kloppmann et al., 2011a, les outils géochimiques et géophysiques sont décrits dans le but de caractériser les processus de salinisation des aquifères et en particulier l'étude de l'interface eau douce/eau salée. Les deux paragraphes suivants s'appuient amplement sur cette étude.

a) L'hydrogéochimie appliquée aux intrusions salines

Les outils géochimiques peuvent permettre de déterminer l'origine de la salinisation des eaux. En effet, le phénomène d'intrusions salines constitue l'un des mécanismes de salinisation des aquifères, mais la présence de sel dans les eaux souterraines peut être d'origine variée.

Afin d'étudier le phénomène d'intrusions salines, plusieurs paramètres peuvent permettre de caractériser le mécanisme. La **salinité** peut être représentée par la charge totale dissoute (CTD), et s'exprime alors en g/L. La salinité peut également être déterminée indirectement et approximativement à partir de la conductivité électrique (mS/cm).

La conductivité électrique de l'eau et la concentration en chlorures constituent les paramètres de base des études de salinisation (Kloppmann et al., 2011a), puisque leur acquisition est relativement simple et réalisée en routine.

Les eaux douces, les eaux saumâtres et les saumures peuvent être classées selon leur salinité (Illustration 9).

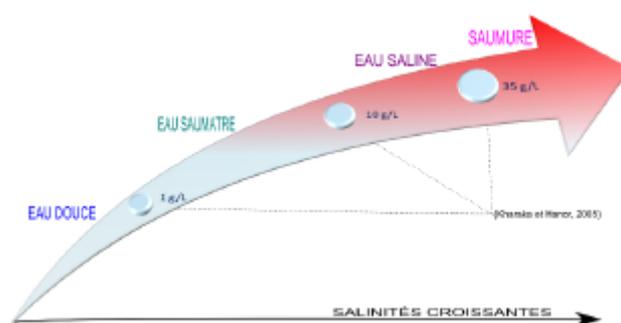


Illustration 9 : Gamme de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2003, in Kloppmann et al., 2011b)

Par ailleurs, les teneurs en éléments majeurs (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃) déterminent le faciès chimique de l'eau. Leur interprétation graphique, notamment avec le

diagramme de Piper, permet d'identifier des mélanges et des pôles de mélange, donc de caractériser le ou les pôles salins dans le système (Kloppmann et al., 2011a).

La comparaison des teneurs en éléments majeurs dans les eaux souterraines et l'eau de mer donne des indications sur les intrusions salines. A cet effet, différents ratios molaires sont utilisés, tels que Na/Cl, Ca/Mg, HCO₃/Cl.

Les éléments traces, interprétés également sous forme de rapports X/Cl ou dans des diagrammes binaires X vs Cl ou X/Cl vs Cl permettent de différencier les saumures primaires et secondaires, eau de mer, eau de mer évoluée par interaction eau-roche. (Kloppmann et al., 2011a

Eléments majeurs	Composition de l'eau de mer (mg/L)
Na	10699
K	383
Mg	1289
Ca	418
Cl	19237
HCO ₃	139
SO ₄	2683
Somme	34850

Illustration 10 : Composition moyenne des océans (Copin-Montegut, 1996, Chimie de l'eau mer)

D'après Kloppmann et al., 2011a, « les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ sont des traceurs conservateurs de la molécule d'eau en dehors du contexte des eaux géothermales ou carbogazeuses. Ils permettent l'identification d'eau marine ou d'eau marine évaporée. Les isotopes stables des sulfates ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$) permettent d'identifier les sources de sulfates, de tracer de l'eau mer actuelle ou ancienne [...] ».

b) La géophysique appliquée aux intrusions salines

Les outils géophysiques permettent également d'étudier les phénomènes de salinisation, on distingue les approches :

- En forage : diagraphies électriques, diagraphies de résistivité/conductivité ;
- En surface : méthodes électriques, méthodes électromagnétiques (TDEM).

Les méthodes géophysiques de surface sont capables de fournir des informations intéressantes sur des situations d'intrusions salines, comme la méthode des panneaux électriques pour la cartographie en profondeur de l'interface eau douce-eau salée ou la résonance magnétique protonique (RMP) pour la mise en évidence de drains en profondeur contenant des eaux salées.

Les diagraphies de conductivité des formations géologiques en forage accompagnent les mesures de surface pour un suivi plus détaillé en profondeur et pour calibrer ces dernières.

En 2014, la méthode combinée de mesures par panneaux électriques et de la réalisation de log de conductivité en forage a été utilisée en Guadeloupe pour déterminer la profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Ducieux et al., 2014).

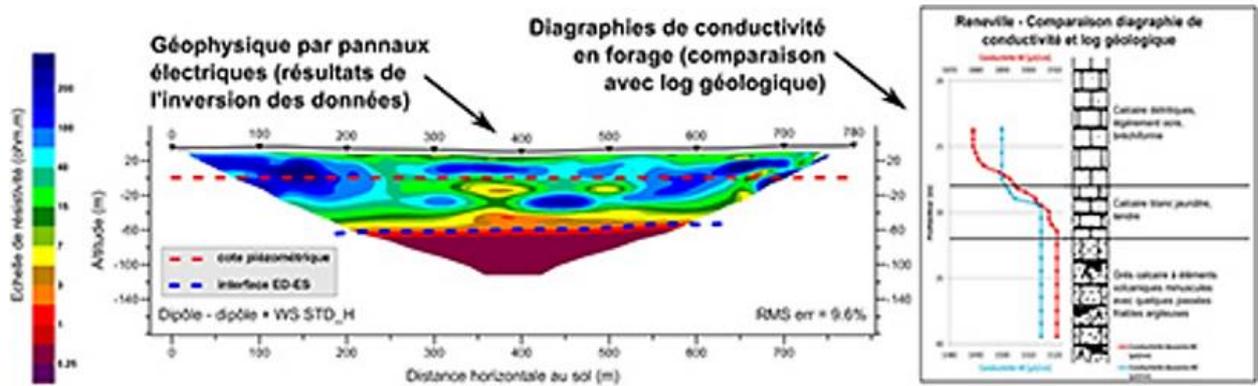


Illustration 11 : Exemple de moyens mis en oeuvre afin de déterminer la position de l'interface eau douce eau salée (BRGM)

Ce travail a permis la réalisation d'une cartographie de l'interface eau douce eau salée à partir des données piézométriques (interpolation).

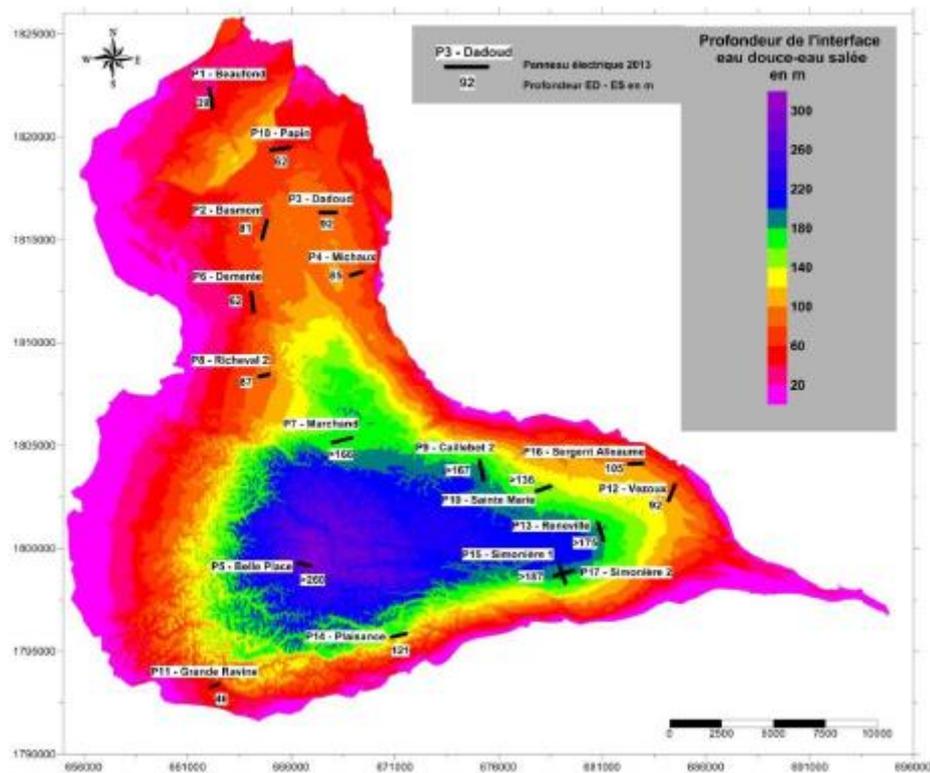


Illustration 12 : Profondeur de l'interface eau douce – eau salée en Guadeloupe (Ducreux et al., 2014)

Les méthodes hydrochimiques et géophysiques permettent de caractériser la présence de phénomènes d'intrusions salines. Ainsi, des moyens techniques combinés permettent aujourd'hui de préciser la géométrie du phénomène et leur importance à l'échelle des hydrosystèmes littoraux.

3. Contexte géologique et géomorphologique de la zone d'étude

3.1. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

Le MNT (BDTOPO au pas de 25 m), montre toute la diversité du littoral de l'ex Basse-Normandie (cf. Illustration 13 ci-après). Les classes d'altitudes proposées sur la figure permettent de distinguer les côtes rocheuses des côtes plus basses (cordons dunaires, plaines, marais, estuaires...).

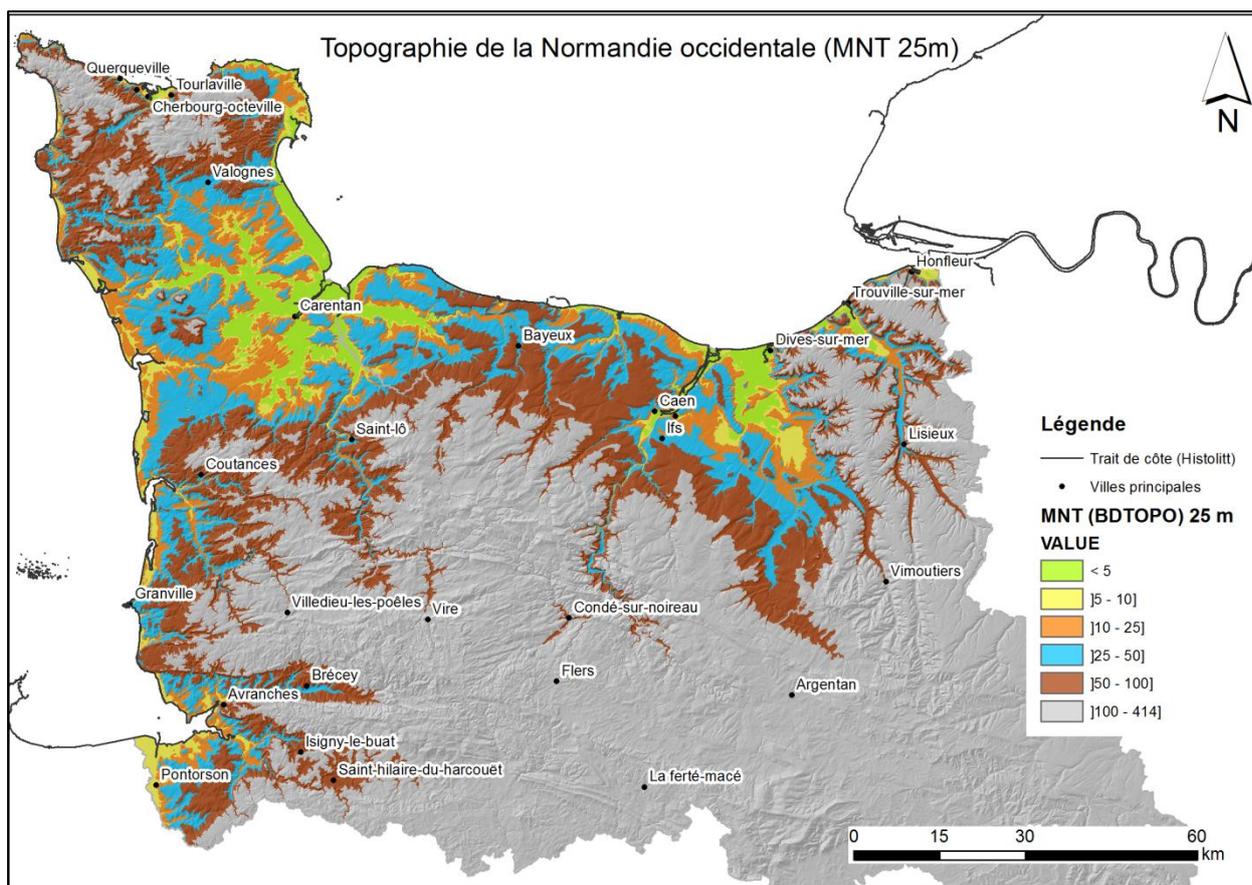


Illustration 13 : Carte topographique de la Normandie occidentale, MNT 25m (BDTOPO)

Le littoral bas-normand s'étend sur 450 km environ entre l'estuaire de la Seine et la baie du Mont-Saint-Michel, et présente des aspects très variés : côtes basses sableuses où se développent des formations dunaires (en particulier sur la côte ouest du Cotentin), falaises accores ou côtes rocheuses basses, éperons rocheux.

La géomorphologie du littoral bas-normand est variée, la typologie des côtes couramment utilisée (Mercier et al., 2013) différencie :

- Les côtes d'accumulation (cordons dunaires, côtes sableuses) ;
- Les côtes rocheuses moyennes et basses (< 20 m) ;
- Les côtes rocheuses hautes (>20m) ;

- Les plains maritimes et marais littoraux ;
- Les platiers rocheux et plateformes d'érosion.

La Basse-Normandie comprend deux zones fondamentales que séparent la presqu'île du Cotentin : à l'est la baie de Seine ; à l'ouest, le golfe normand-breton. Les fonds de ce golfe sont tourmentés et parsemés de nombreuses îles alors que ceux de la baie de Seine sont beaucoup plus réguliers.

L'étude de Thillaye du Boullay (1994) présente une classification des unités de gestion du littoral bas-normand. Les éléments de géomorphologie sont repris dans la suite du paragraphe.

La **côte du golfe normand-breton** est relativement uniforme, hormis la zone rocheuse de la Hague, où la mer et le vent ont modelé le rivage en une bande dunaire sableuse que percent des éperons rocheux (Flamanville, Carteret, Granville, Carolles) et qu'échancrent des havres, débouchés en mer d'une zone terrestre dépressionnaire (marais), où s'écoulent le plus souvent une rivière. Entre **l'estuaire de la Seine et la baie des Veys**, la côte offre une alternance de liserés dunaires et de falaises marneuses ou calcaires. La **côte nord du Cotentin**, de la Hague à Barfleur, est le plus souvent occupée par des côtes relativement basses et rocheuses (Thillaye du Boullay, 1994).

Thillaye du Boullay, 1994 distingue quatre ensembles géomorphologiques fondamentaux pour le littoral bas-normand :

- La baie de Seine, de l'estuaire de la Seine à la pointe de Saire, caractérisée par un tracé relativement régulier ponctué d'une suite d'ondulations.
- De la pointe de Saire à Cherbourg ; ce secteur est caractérisé par des affleurements rocheux sous-marins abondants, correspondant à un plateau bas et à pente douce qui s'étend depuis la falaise morte jusqu'aux fonds de – 20 m.
- De Cherbourg au cap de la Hague, composé de plages de sables et de galets, de falaises à pentes fortes (80 à 90 m), mais aussi d'une côte basse et rocheuse.
- Du cap de la Hague à la pointe de Champeaux (Carolles), la côte est marquée par de grands développements de cordons littoraux sableux interrompus par des éperons rocheux.
- La baie du Mont-Saint-Michel se caractérise par un estran très large parcouru par des chenaux aux tracés variables, ponctué par des falaises rocheuses (massif de Carolles, zone de Cancale), et par un cordon dunaire (bec d'Andaine).

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La Normandie occidentale se divise entre deux grands domaines géologiques distincts, cf. Illustration 14 page suivante :

- à l'ouest, le Massif Armoricaire, composé de terrains plissés précambriens et paléozoïques, et ses paysages vallonnés de bocage ;
- à l'est, la bordure occidentale du vaste Bassin Parisien, composée de terrains carbonatés (calcaires et marnes) jurassiques et crétacés parfois recouverts de formations cénozoïques argileuses (argiles à silex), et ses paysages ouverts de plaines (Caen, Argentan) et plateaux (Pays d'Auge).

La diversité géologique de la Basse-Normandie témoigne d'une histoire géologique longue de près de deux milliards d'années, dont les premiers témoins sont visibles très localement au cap de la Hague. Aujourd'hui métamorphisés sous forme de gneiss, il s'agit d'anciens granites intrusifs dans des formations volcaniques et sédimentaires, vestiges d'une très ancienne chaîne de montagne, la chaîne icartienne.

L'essentiel des terrains du Massif armoricain, constitués de roches magmatiques et métamorphiques, datent de la fin du Précambrien (terrains briovériens) et du Paléozoïque. Durant toute cette période, les roches, qu'elles soient d'origine sédimentaire, volcanique ou magmatique, ont été déformées et métamorphosées sous l'effet de la mise en place de complexes volcaniques et de plutons granitiques mis en place aux orogénèses cadomienne et varisque.

A la fin du Paléozoïque, les mouvements tectoniques le long de failles importantes génèrent plusieurs fossés d'effondrement où s'accumulent, sous l'effet du démantèlement des importants reliefs formés lors de l'orogénèse varisque, de puissants dépôts continentaux carbonifères et permien.

Les terrains anciens du Massif armoricain s'enfoncent vers l'est sous la couverture sédimentaire jurassique et crétacée de la bordure ouest du bassin de Paris. Au Jurassique inférieur, la transgression de la mer jurassique se fait sur une surface irrégulière où subsistent des paléoreliefs armés par les barres gréseuses des synclinaux paléozoïques. Au cours du Jurassique, ont lieu plusieurs phases de transgression conduisant à la succession d'ensembles marins calcaires (Hettangien-Sinemurien, Aalénien-Bathonien, Oxfordien) et marneux (Pliensbachien-Toarcien, Callovien-Oxfordien), cf. Illustration 15 page suivante.

A la fin du Jurassique, la mer se retire et durant une grande partie du Crétacé inférieur, la Basse-Normandie est un domaine continental émergé soumis à l'érosion et l'altération des carbonates jurassiques. Les terrains crayeux armant les plateaux du pays d'Auge témoignent du retour de la mer à la fin du Crétacé inférieur (Aptien) et durant la majeure partie du Crétacé supérieur.

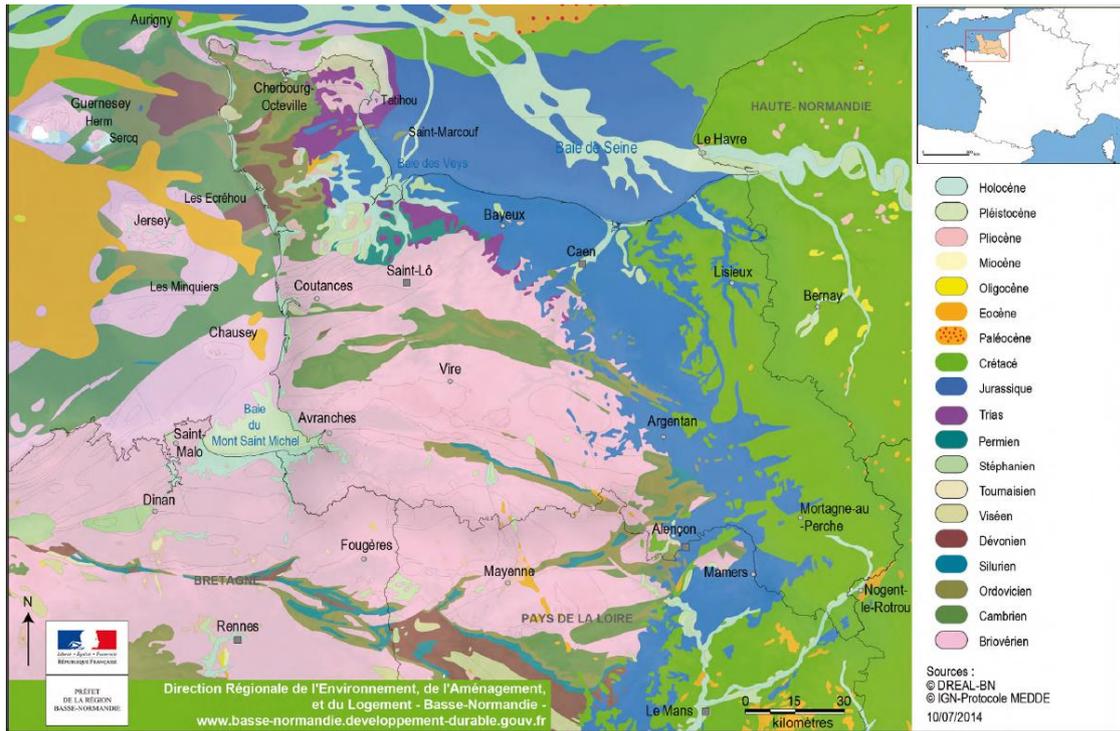


Illustration 14 : Carte Géologique simplifiée, DREAL Normandie

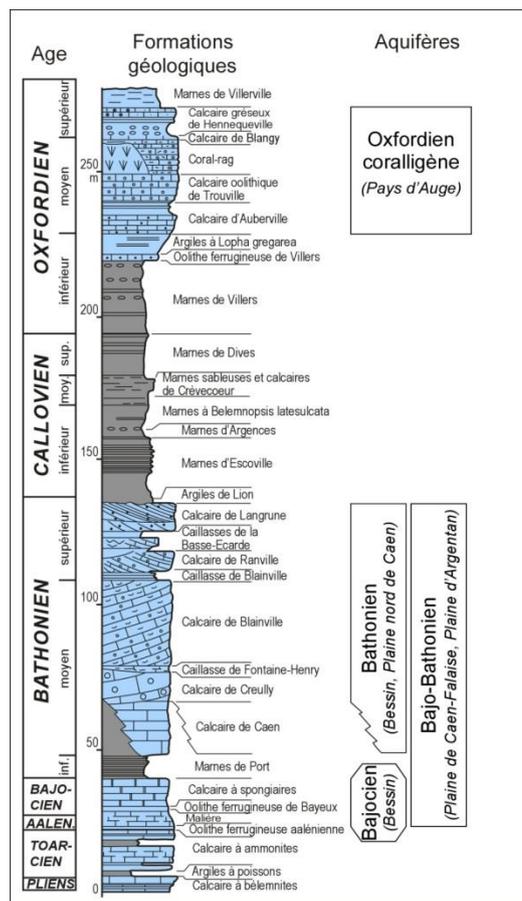


Illustration 15 : Log stratigraphique des formations géologiques du Jurassique inférieur à supérieur avec localisation des principaux aquifères en bleu (d'après Dugué et al., 1998 modifié).

Pour l'histoire géologique récente de la presqu'île du Cotentin, les changements climatiques quaternaires :

Les dépôts de pente au sens large que sont les fameux « head », et qui sont venus beurrer les pentes par solifluxion et cryoreptation lors des alternances de périodes chaudes et froides. Les variations eustatiques et géomorphologiques ont ainsi permis de créer des terrasses et des cordons littoraux à partir de ces formations qui jalonnent le rivage au-dessus comme au-dessous du niveau actuel de la mer (Joly, 1939).

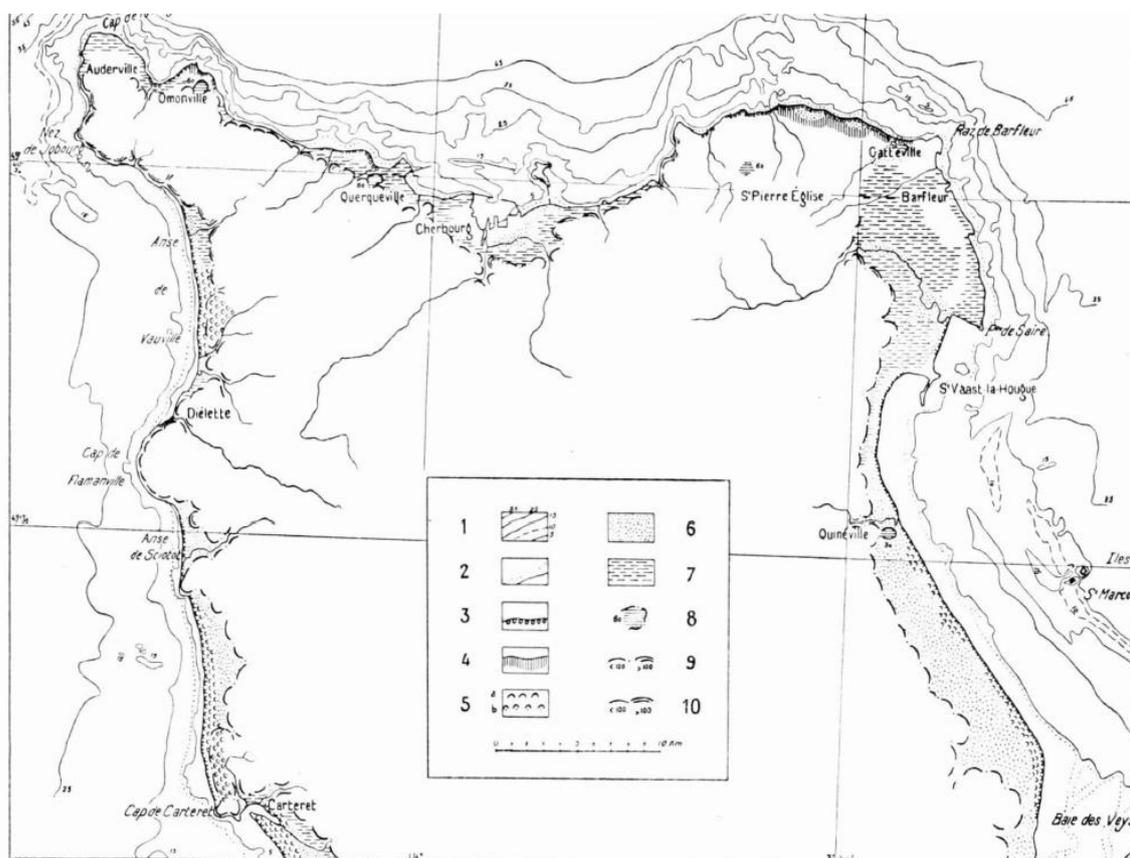


Illustration 16 : Carte morphologique du littoral Nord Cotentin (échelle 1 :360 000) ; 1 : Courbes bathymétriques, 2 : Laisse de basse mer, 3 : Cordons littoraux actuels, 4 : Dépôts littoraux anciens, 5 : Dunes a) littorales b) perchées, 6 : Alluvions récentes, 7 : Dépôts quaternaires de solifluxion, 8 : Hauts niveaux, 9 : Falaises mortes et vallées encaissées, 10 : Falaises rajeunies ; d'après Joly, 1939.

Les côtes d'accumulation résultent soit,

- du dépôt des débris arrachés dans les pointes et transportés par les courants (formes d'accumulation marine proprement dite),
- de l'amoncellement en arrière de la ligne des plus hautes mers et des éléments les plus fins emportés par le vent (formes d' « ensablement »),
- d'un comblement fluvio-lacustre à l'abri d'une digue ou d'une flèche littorale.

La conséquence la plus importante de l'**accumulation marine** fut la formation en certains points du rivage (côte orientale au Sud de Saint-Vaast ; côte occidentale au Sud de Carteret) d'une flèche littorale isolant de la mer une zone lagunaire allongée et aujourd'hui comblée. Sur la côte occidentale, plus exposée, cette flèche est encore percée par endroits de chenaux, véritables *graus* par où pénètre la marée, lors des hautes mers, inondant régulièrement une

vaste région marécageuse appelée **havre**, vers laquelle convergent les rivières de l'intérieur. L'allongement des flèches se fait vers le sud suivant la direction du courant dominant, la pointe tendant à se recourber sous l'influence des courants de marée.

Des **cordons littoraux**, formés de sable, de graviers très fins ou de galets provenant de la destruction des roches locales ou de la reprise par la mer des éléments anguleux des terrasses, tapissent le fond des anses jusqu'à une hauteur variable suivant la violence des vagues, mais pouvant atteindre 3 ou 4 m au-dessus des plus hautes mers (Diélette).

Ils isolent quelquefois des lagunes encore marécageuses (Vauville, Gattemare) et peuvent souder à la terre ferme de petits îlots (côte Nord de la pointe de Barfleur). Quant à l'alluvionnement à l'abri de digues artificielles, il fait de la région des *penesmes* de la baie des Veys un véritable polder récemment gagné sur la mer.



Illustration 17 : Photographie du marais arrière littoral de Vauville, © Alexandra LAURENT

Les **formes d'ensablement** sont plus complexes. Une exposition de la côte au vent, une grande amplitude de la marée, des sédiments abondants, particulièrement fins, ni trop humides ni trop argileux sont un ensemble de conditions tout à fait favorables à leur développement : d'où leur grande extension sur la côte occidentale.



Illustration 18 : Photographie du cordon dunaire à Surtainville, © Alexandra LAURENT

Mais le plus souvent, grâce au climat humide, ces formes sont fixées par la végétation (oyat, carex, argousier, etc...) et ne se modifient qu'en de rares endroits. On peut distinguer cependant les dunes bordières et les dunes perchées. Dans le premier cas, il s'agit d'amoncellements bordant le rivage sur une largeur de quelques centaines de mètres, souvent moins, dont l'altitude ne dépasse pas 10 à 15 m : ce sont les *mielles*, dunes confuses, dans l'ensemble parallèles à la côte ; leurs altitudes les plus fortes sont au bord de la mer (alimentation abondante) et vers l'intérieur (mouvements ascendants de l'air au contact du continent) ; entre deux, quelques rares formes de remaniement : sillons allongés ou petites barkhanes.

Vers l'intérieur, les dunes s'élèvent parfois sur l'ancienne falaise abandonnée (partie Sud de l'anse de Vauville, dunes de Carteret) : on peut parler de dunes perchées ; les formes topographiques ainsi noyées donnent l'allure générale du paysage sur laquelle se greffe toute la variété d'aspects rencontrés dans les mielles ; ces formes de détails (sillons, entonnoirs, grandes dunes dissymétriques) tapissent les flancs des anciennes vallées envahies et à demi comblées par le sable. La progression des dunes vers l'intérieur s'arrête au premier ruisseau perpendiculaire à sa direction et possédant un débit suffisant : le sable glissant le long de la rive tombe dans le cours d'eau qui l'entraîne à nouveau vers la mer.

La tanguie est un sédiment qui se dépose dans les zones de vasières littorales recouvertes par les hautes marées et qui est formée d'une fraction sableuse principalement à base de débris coquilliers calcaires et d'une fraction vaseuse de limons et d'argiles.



Illustration 19 : Tangue de la Baie du Mont Saint Michel (crédit photo : givernynews)

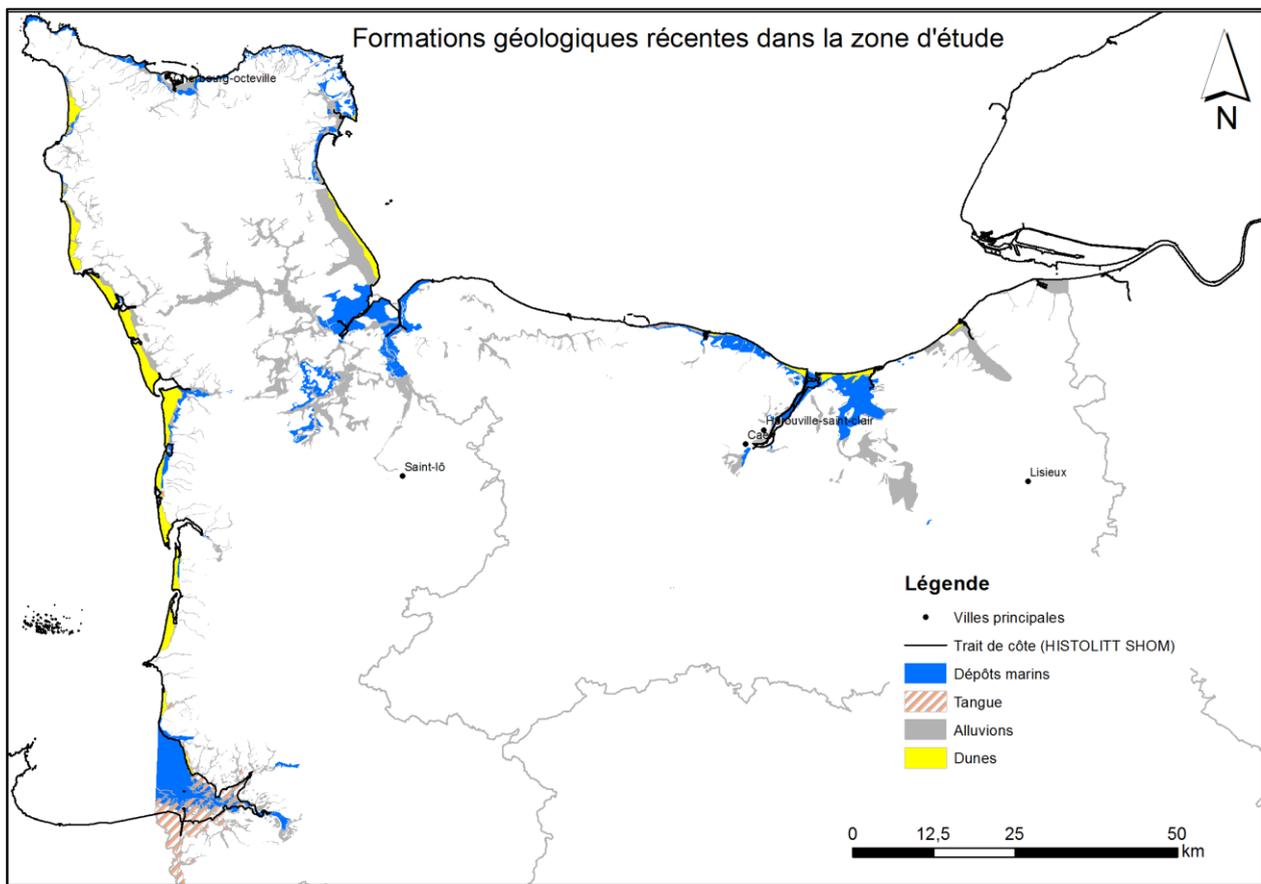


Illustration 20 : Localisation des formations géologiques récentes dans la zone d'étude, d'après les cartes géologiques au 1/50000^{ème} harmonisées, BRGM

Le littoral bas-normand renferme des réservoirs d'eau souterraine de nature variée :

- Les terrains de socle constituent des réservoirs d'eau souterraine ; ces types de système sont relativement complexes, et encore aujourd'hui la compréhension de leur dynamique n'est que partielle.
- Les aquifères sédimentaires Mésozoïques sont contenus dans les formations du Trias, Lias, Bajocien, Bathonien, ainsi que dans les formations du Crétacé (cénomaniens, sénonturonien) renfermant l'aquifère de la craie.
- Il existe de petits bassins sédimentaires de remplissage Cénozoïque dont l'importance locale s'apprécie en termes de volume disponible. L'extension de ces bassins et leur fonctionnement hydrogéologique est encore mal connu.
- Les formations du Quaternaire contiennent des aquifères, tels que les cordons dunaires ou les alluvions déposées dans un contexte fluvio-marin. Ils sont peu étendus et limités à la frange côtière et aux principaux cours d'eau. Leur importance est liée aux importantes variations climatiques et eustatiques récentes. Ils constituent par ailleurs une ressource facilement accessible et abondamment exploitée par l'homme.

Pour d'avantage de précisions il convient de consulter l'atlas hydrogéologique du Calvados et les rapports associés au modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du Bessin (liens actifs vers le SIGES Seine-Normandie). Ces deux études ont établi une synthèse hydrogéologique des formations sédimentaires aquifères. Ces études sont présentées et décrites sur le SIGES Seine-Normandie.

3.3. COUPES GEOLOGIQUES

Afin de mieux comprendre la géologie du littoral, plusieurs coupes géologiques ont été réalisées dans le cadre de ce projet tout le long du littoral bas-normand (Illustration 21).

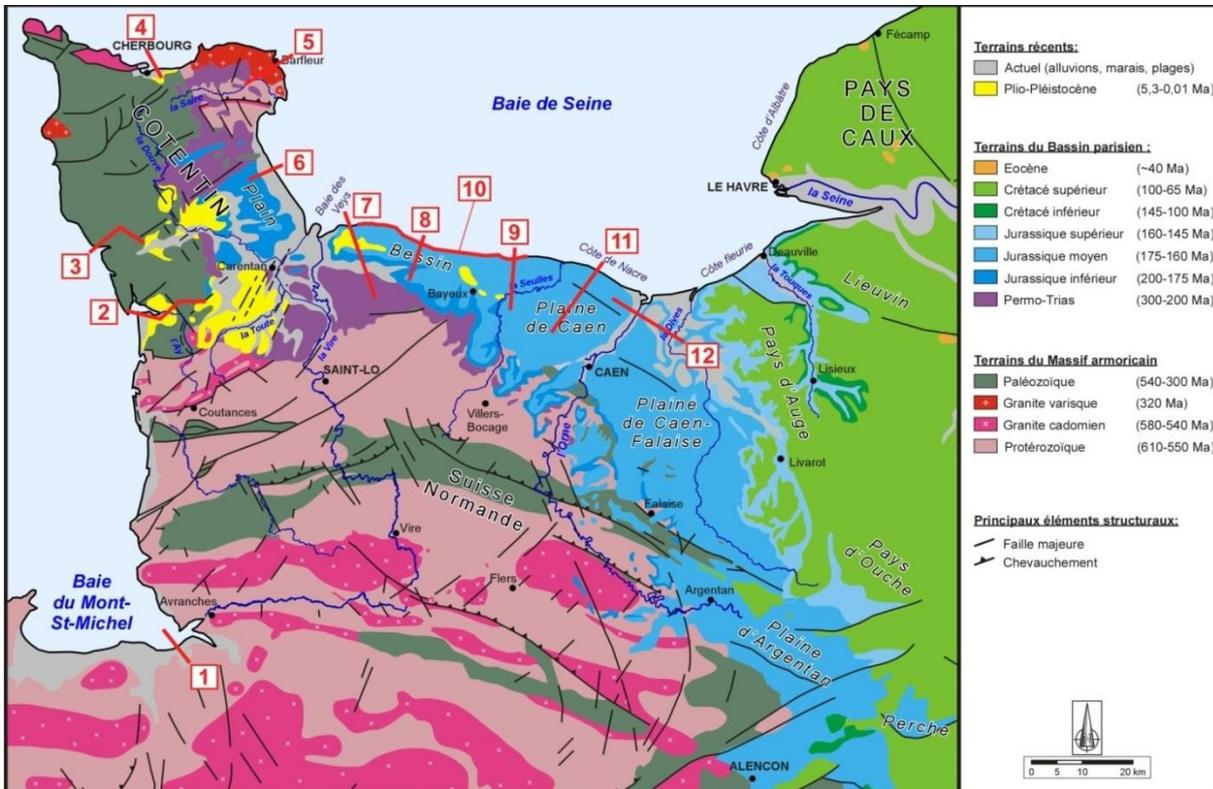


Illustration 21 : Localisation des coupes géologiques, fond de carte géologique 1/1000000^{ème} simplifiée, BRGM

Ces coupes sont présentées et discutées dans le chapitre 6 ci-après.

4. L'élévation contemporaine du niveau de la mer en Normandie occidentale : observations, causes et projections

L'objectif de ce chapitre est de proposer des scénarii d'élévation du niveau de la mer en Basse-Normandie. Ces scénarii seront ultérieurement utilisés pour la modélisation des intrusions salines dans les aquifères côtiers (cf. rapport BRGM RP-66229-FR, les conclusions sont présentées au chapitre 7).

Pour atteindre cet objectif, nous examinons les processus induisant des variations du niveau marin moyen (i.e., ici : moyenné sur quelques années), puis nous élaborons des scénarii pour chacun des processus considérés.

Cette approche comprend trois parties :

- Une revue rapide des processus à l'origine des variations contemporaines du niveau de la mer (synthèse bibliographique) (cf. paragraphe 4.1) ;
- Une analyse des causes de l'élévation du niveau de la mer au niveau du littoral Bas-Normand (analyse de données géodésiques, des incertitudes, interprétation) (cf. paragraphe 4.2) ;
- Des propositions de scénarii d'élévation du niveau marin futur, basés sur une synthèse des connaissances et l'analyse de la section 2 (cf. rapport BRGM RP-66229-FR, chapitre 2.2).

Pour une revue complète et en Français de l'état des connaissances concernant l'élévation du niveau de la mer et de ses conséquences pour le littoral, nous renvoyons le lecteur au rapport 5 de la mission Jouzel (Planton et al., 2015').

4.1. ELEVATION CONTEMPORAINE DU NIVEAU DE LA MER : OBSERVATIONS, CAUSES ET VARIATIONS REGIONALES

Dans cette partie, nous introduisons brièvement le phénomène d'élévation du niveau de la mer observé actuellement, ses causes, et sa variabilité régionale. Enfin, nous examinons à la fin de cette partie les différentes composantes de l'élévation du niveau marin relativement à la côte.

4.1.1. Observations

Depuis la fin du XIXème siècle, les données marégraphiques et des satellites altimétriques montrent que le niveau de la mer s'élève en s'accéléralant (Church and White, 2006 ; 2011 ; Illustration 22). En effet, au cours des 2000 dernières années et jusqu'au XIXème siècle, on estime que le niveau de la mer est resté relativement stable (ex : Kemp et al., 2011 ; Grinsted et al., 2010).

¹http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_5_VF_revisee_27fevrier2015.pdf

Au contraire, les vitesses d'élévation du niveau de la mer sont estimées à 1.7mm/an au cours du XXème siècle, et 3.3mm/an depuis 1992 (Cazenave et al., 2014)².

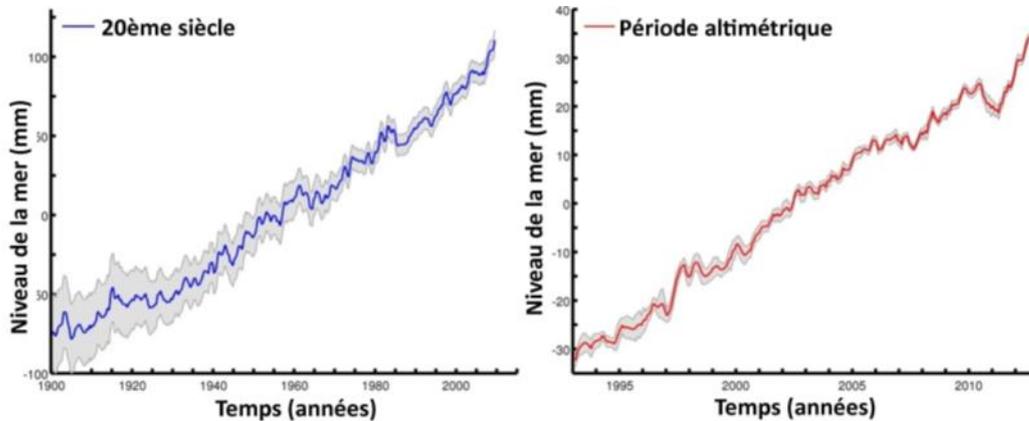


Illustration 22 : Mesure de l'élévation de la mer au cours du XXème siècle et depuis 1992 par analyse des données marégraphiques et altimétriques (Figure adaptée de Cazenave et le Cozannet, 2014).

L'illustration 23 compare les taux d'élévation du niveau de la mer observés actuellement à ceux estimés pour des périodes géologiques récentes. Ainsi, si l'élévation du niveau marin actuel apparaît comme un changement majeur par rapport aux deux derniers millénaires, on peut noter que les taux observés actuellement sont relativement modérés si on les compare à ceux de la dernière transgression post-glaciaire (-21000 à -6000 ans), au cours de laquelle des taux allant de 1 à plusieurs centimètres par an ont été observés (ex : Bard et al., 1996). Ainsi, ce ne sont pas les taux observés actuellement qui préoccupent les gestionnaires des zones côtières, mais bien le retour à des taux comparables à ceux de la dernière transgression post-glaciaire (Nicholls and Lowe, 2004).

² De nouvelles estimations ont été publiées en 2015 (Hay et al., 2015 ; Watson et al., 2015). Ces études suggèrent que l'élévation du niveau de la mer a été moins rapide au cours du XXème siècle. Elles concluent donc que l'accélération de l'élévation du niveau de la mer est plus marquée que ce que l'on pensait jusqu'à présent. En attendant que de nouvelles études viennent apporter de nouveaux éléments, les valeurs que nous indiquons dans le rapport sont celles retenues pour le 5ème rapport du GIEC.

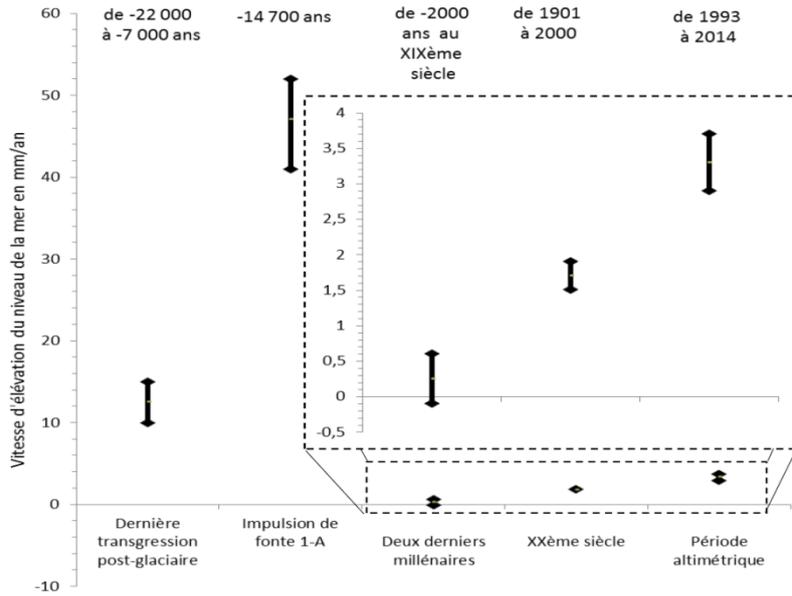


Illustration 23 : Comparaison des vitesses d'élévation du niveau de la mer à différentes échelles de temps (D'après GIEC, WG1, Ch5, 2013)

4.1.2. Causes de l'élévation du niveau marin

La cause principale de l'élévation du niveau de la mer observée actuellement est le réchauffement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (GIEC, WG1, Ch. 13, 2013). En effet, ce phénomène de réchauffement climatique provoque :

- Un réchauffement de l'océan, causant sa dilatation, et entraînant ainsi une élévation du niveau de la mer sans variation de masse.
- La fonte des glaciers de montagne, et des calottes polaires, accroît le volume d'eau des océans.

Pour la période 1993-2010, ces deux processus expliquent la plus grande partie de l'élévation du niveau de la mer observée (Illustration 24). On peut noter par exemple que la contribution des échanges entre l'océan et les eaux souterraines et de surface ne contribue que pour 0.4 mm/an environ, ce qui est l'ordre de grandeur des incertitudes de la mesure du niveau marin global par altimétrie.

Processus	Expansion thermique (modélisé)	Glaciers de montagne (modélisés)	Calotte Groenlandaise (observé)	Calotte Antarctique (observé)	Echanges avec les eaux continentales et souterraines	Somme	Observations
Hausse du niveau de la mer (mm/an)	1.49	0.78	0.33	0.27	0.38	3.25	3.3 +/- 0.4

Illustration 24 : Contribution des principaux processus causant l'élévation du niveau marin entre 1993 et 2010 et comparaison aux observations (Source : GIEC, WG1, Ch13, 2013)

4.1.3. Variabilité régionale et variations du niveau marin relativement à la côte

Loin d'être homogène à l'échelle du globe, l'élévation du niveau de la mer présente des disparités régionales (Meyssignac et Cazenave, 2013 ; Stammer et al., 2013). Cette variabilité régionale est liée en premier lieu au réchauffement inhomogène des couches superficielles des océans (Illustration 25). D'autres processus jouent un rôle tel que les variations de salinité de l'océan et les déformations du géoïde induites par les redistributions de masses passées et actuelles (fonte des glaciers et des calottes). Ces derniers sont examinés dans le paragraphe ci-dessous.

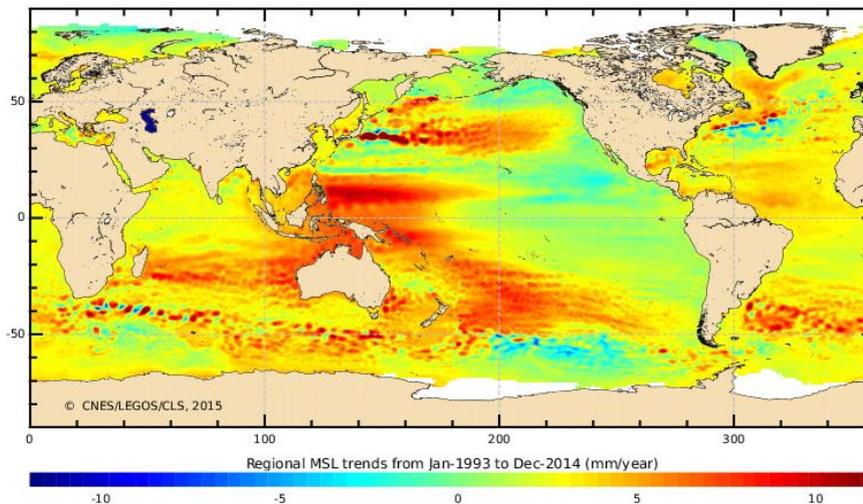


Illustration 25 : Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques (Source : AVISO – CNES/LEGOS/CLS)

Si l'on s'intéresse à l'élévation du niveau de la mer relativement à la côte (i.e. telle qu'elle pourrait être mesurée à l'aide d'un marégraphe), les mouvements verticaux du sol doivent être pris en compte. Ces mouvements du sol correspondent à une multitude de processus s'exprimant à des échelles spatiales locales, régionales et globales.

Les phénomènes globaux sont la conséquence des changements climatiques passés et actuels : il s'agit de la réponse de la croûte terrestre aux redistributions de masses des calottes entre les périodes glaciaires et interglaciaires (Illustration 25 ; Tamisiea, 2011). Ainsi, lors de la dernière déglaciation, la calotte fennoscandienne s'est retirée, ce qui a libéré les contraintes qui s'exerçaient sur la croûte terrestre. Le sol se réhausse (surrection) là où se trouvait précédemment la calotte. Au contraire, il peut s'affaisser au niveau de ses marges (Illustration 26). Ce phénomène, est connu sous le nom d'ajustement isostatique global (ou rebond « post-glaciaire ») et est noté GIA ci-après. On peut noter que le réchauffement climatique actuel causera également des phénomènes similaires (Slangen et al., 2014 ; GIEC, WG1, Ch13 2013).

Ces phénomènes peuvent être modélisés : pour cette étude, nos collègues Giorgio Spada et Svetlana Jevrejeva nous ont permis d'accéder aux résultats des principaux modèles de rebonds post-glaciaires au niveau des marégraphes de Basse-Normandie (voir l'analyse au paragraphe 4.2).

A l'opposé, aux échelles régionales et locales, on trouve toute une série de mouvements verticaux du sol d'origine naturelle (volcanique, tectonique, variations naturelles ou anthropogénique de la teneur en eau des sédiments récents, mouvements de remblais...). Ces types de mouvements sont généralement mal connus, et ne peuvent pas être modélisés. La seule possibilité pour les caractériser est donc de disposer d'observations.

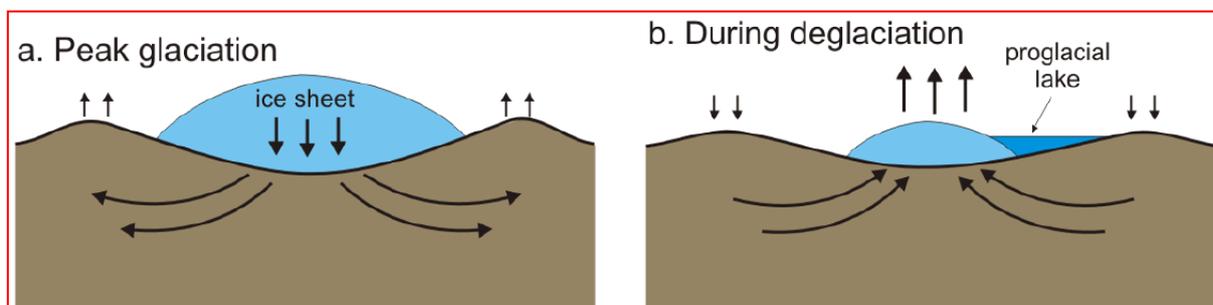


Illustration 26 : Schéma conceptuel du phénomène de « rebond post-glaciaire » (GIEC, 2013)

Pour résumer, on peut considérer que les variations du niveau de la mer, tels qu'elles seraient mesurées par un marégraphe au niveau de la côte sont la somme des composantes suivantes (Nicholls et al., 2014):

$$\Delta\xi_{\text{local}} = \Delta\xi_{\text{global}} + \Delta\xi_{\text{regional}} + \Delta\xi_{\text{grav}} + \Delta\xi_{\text{mvs}} \quad (1)$$

Dans laquelle les changements du niveau marin relatifs $\Delta\xi_{\text{local}}$ sont décomposés en quatre termes correspondant aux variations du niveau marin global, à la déviation régionale due aux facteurs hydro-météorologiques, aux effets des changements du champ de gravité et aux déformations du sol actuelles (y-compris GIA).

Dans la section suivante, nous examinons dans quelle mesure les données disponibles en Basse-Normandie permettent d'estimer chacun des termes de cette équation.

4.2. LES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER EN BASSE-NORMANDIE : ANALYSE D'OBSERVATIONS GEODESIQUES ET CAUSES POTENTIELLES

Dans cette deuxième partie, nous analysons les données disponibles qui nous permettraient d'évaluer chacun des termes de l'équation (1).

4.2.1. Données de nivellement

Lenôtre et al. (1999) présentent une carte des déformations du sol à l'échelle de la Bretagne. Cette étude, est basée sur la comparaison de deux campagnes de nivellement :

- Nivellement général de la France NGF (1884-1922) ;
- Nivellement IGN 69 (1962-1985).

La comparaison de ces deux jeux de données suggère l'existence d'une subsidence en Basse-Normandie (Illustration 27). Cette subsidence affecterait l'ensemble des côtes Bas-Normandes, et serait de l'ordre de 1mm/an (supérieure à la précision théorique de la méthode).

Les données de nivellement suggèrent donc l'existence d'une subsidence régionale dans toute la Basse-Normandie. Celle-ci serait toutefois plus limitée au niveau de la presqu'île du Cotentin. Cette subsidence, si elle est confirmée par d'autres données indépendantes, viendrait se superposer à l'élévation du niveau de la mer, et devrait être prise en compte comme facteur régional aggravant pour l'élaboration de scénarii. Dans les sections suivantes, nous examinons si des indices de subsidence régionale sont détectables dans les autres données disponibles (altimétrie et marégraphie, GPS permanents).

Dans les sections suivantes, nous allons comparer des mesures de déformations du sol basées sur des techniques géodésiques différentes. Il est important de rappeler jusqu'à quel point les mesures des différents outils peuvent être comparées. Les mesures de nivellement sont basées sur des mesures d'angles relativement à l'axe formé par la ligne passant par le point de mesure et le centre de la terre (soit la direction du champ de pesanteur local). Le nivellement estime donc les altitudes par rapport au géoïde, qui peut éventuellement évoluer dans le temps. Les mesures de mouvement du sol estimées par nivellement ne sont donc pas directement comparables aux mesures de déplacement verticales d'un GPS, qui estiment un déplacement perpendiculairement à l'ellipsoïde de référence. Cependant, dans le cas présent, nous considérons que les écarts sont négligeables, en particulier parce que l'on n'a pas connaissance de variations de masses dans la région Basse-Normandie qui viendraient déformer le géoïde au point de contribuer de manière importante à la mesure des mouvements verticaux actuels entre les deux campagnes de nivellement NGF et IGN 69.

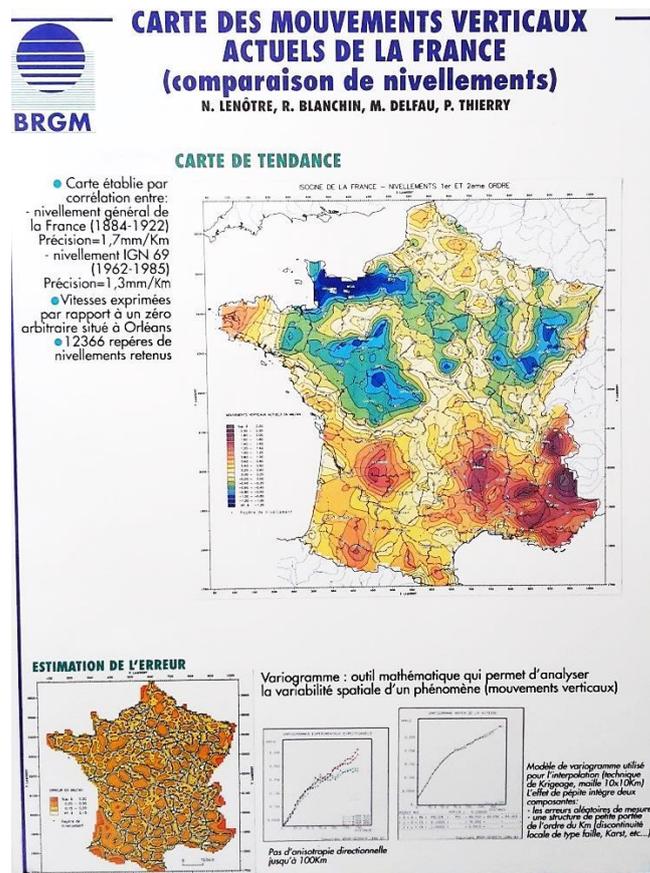


Illustration 27 : Poster présentant les résultats de la comparaison des deux campagnes de nivellement général de la France et IGN 69 (Source : Lenôtre et al. 1999). Légende : subsidences en couleurs bleues et surrections en couleurs rouges.

4.2.2. Données altimétriques et marégraphiques

Nous examinons dans un premier temps les données altimétriques et les données marégraphiques au niveau de Cherbourg.

Les tendances des données altimétriques mesurent l'évolution du terme $\Delta\xi_{\text{global}} + \Delta\xi_{\text{regional}}$. Elles sont présentées dans l'illustration 28. Elles indiquent que le niveau marin s'est élevé d'environ 1,5mm/an dans un référentiel géocentrique. La barre d'erreurs associée à cette mesure est de l'ordre de 1 à 2 mm/an (Ablain et al. 2015).

Les données marégraphiques évaluent le terme $\Delta\xi_{\text{local}}$. Celles de Cherbourg sont les seules mises à disposition par le SHOM via son portail RÉFMAR³ en Basse-Normandie⁴. Ces données indiquent une élévation du niveau de la mer de 1.4 +/- 0.3mm/an entre 1974 et 2014 et de 1.7 +/-0.8 mm/an entre 1993 et 2014 (Illustration 29 et Illustration 30).

En apparence, on a une bonne cohérence entre les mesures altimétriques et marégraphiques à Cherbourg, qui suggèrent l'absence de mouvements du sol (termes $\Delta\xi_{\text{grav}} + \Delta\xi_{\text{mvs}}$ dans l'équation 1). En réalité, les barres d'erreurs associées à chacune des mesures représentent 1 à 2mm/an (Ablain et al., 2015), de sorte que l'on ne peut pas réellement exclure l'existence de mouvements verticaux du sol dans cette gamme de valeurs.

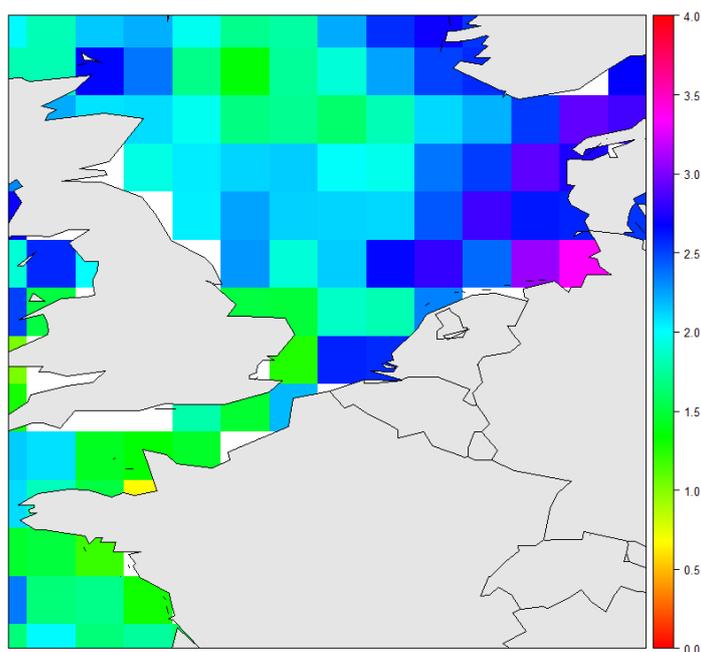


Illustration 28 : Carte des tendances de variations du niveau marin mesurées par les missions altimétriques spatiales (période 1993-2014) ; (données AVISO, graphique réalisé sous R).

³ <http://refmar.shom.fr/fr/liste-des-maregraphes>

⁴ Les marégraphes les plus proches en Haute-Normandie et en Bretagne sont respectivement Le Havre et Saint-Malo.

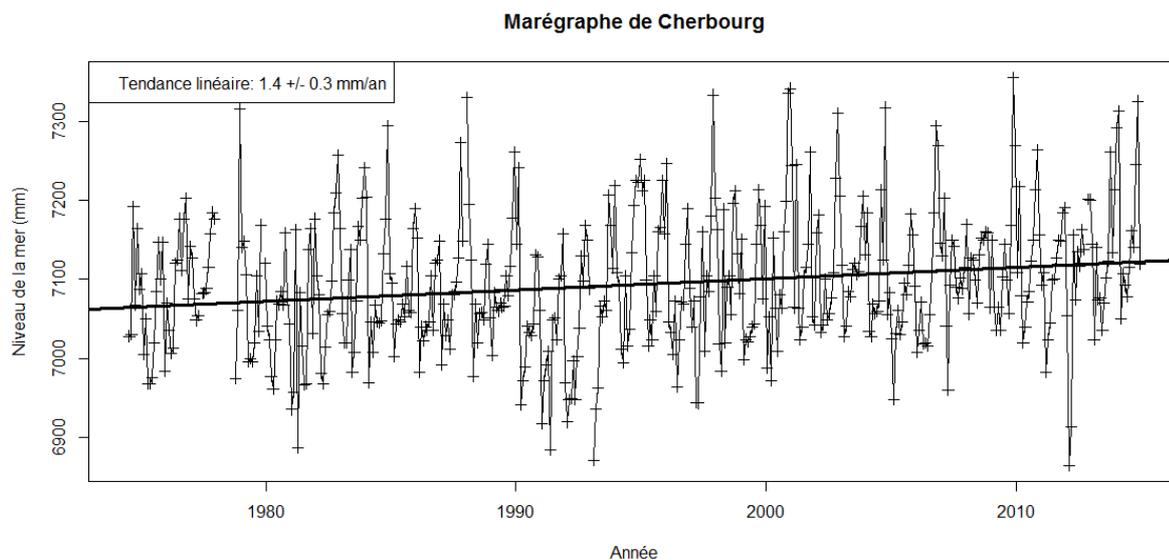


Illustration 29 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Cherbourg et tendances entre 1974 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

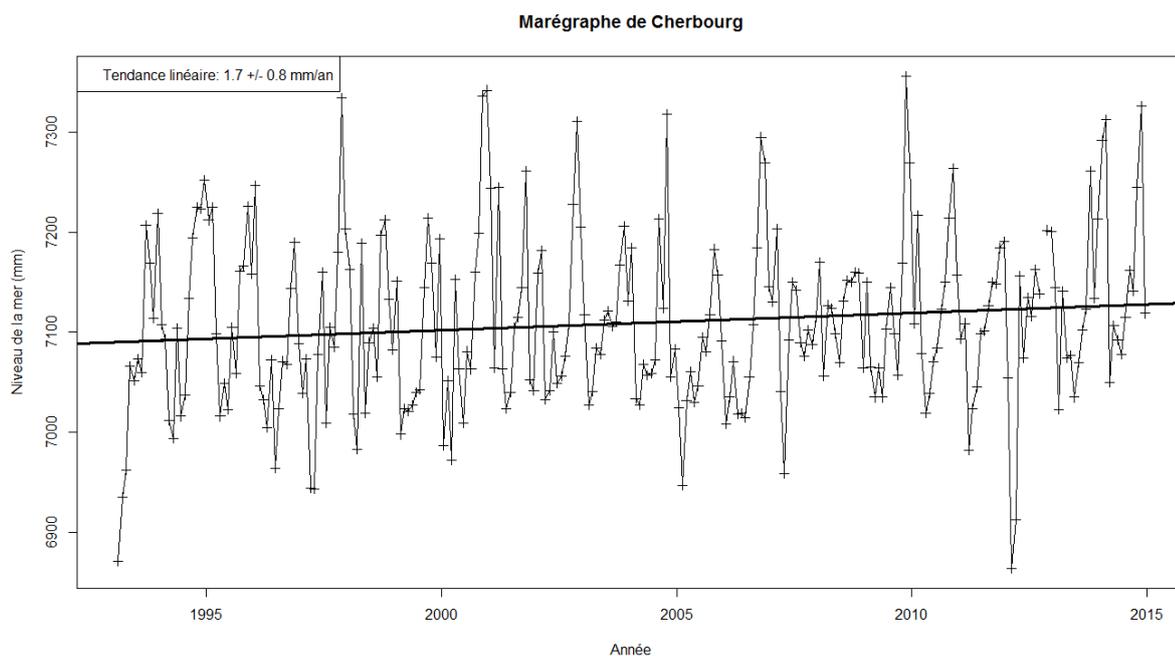


Illustration 30 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Cherbourg et tendances entre 1993 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

Nous procédons à une analyse similaire au niveau du marégraphe du Havre, de Saint Helier (Jersey) et Saint Malo. Les résultats sont présentés dans l'illustration 31, Illustration 32, Illustration 33 et Illustration 34. On observe que les données au Havre et surtout à Jersey s'écartent de la tendance observée par le satellite altimétrique, mais pour les mêmes raisons de justesse de la mesure, il est difficile de tirer des conclusions définitives de ce résultat.

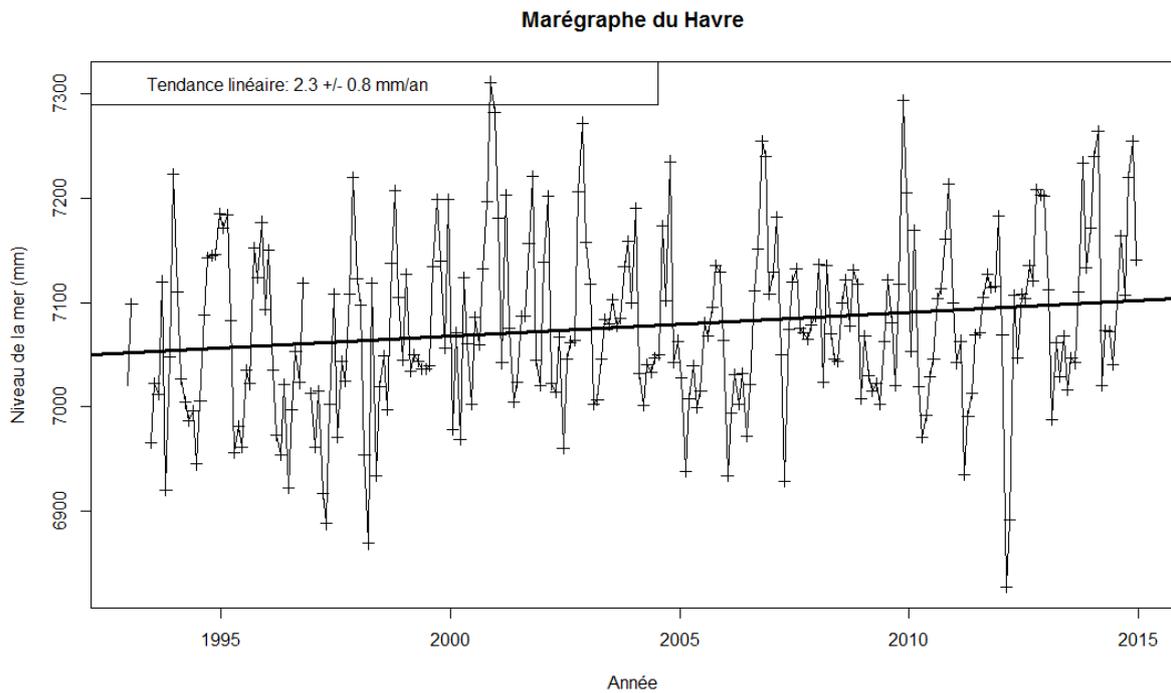


Illustration 31 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe du Havre et tendances entre 1993 et 2015 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

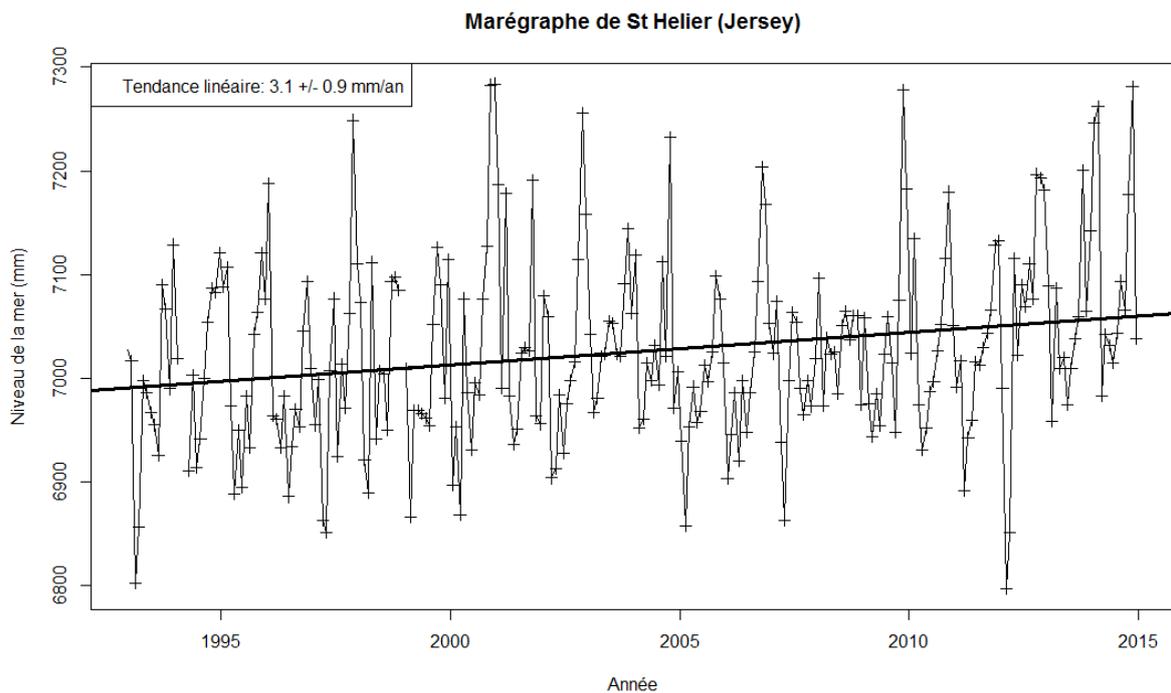


Illustration 32 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de Saint Helier (Jersey) et tendances entre 1993 et 2015 (Données NOC, distribuées par le PSMSL, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

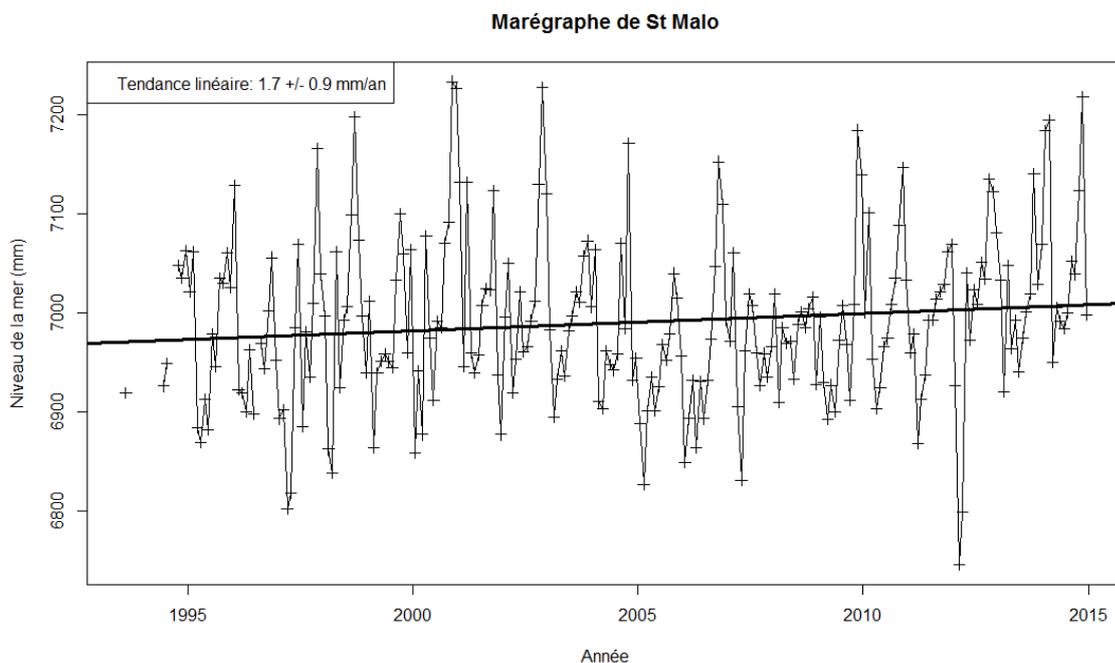


Illustration 33 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe de St Malo et tendances entre 1993 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

Des données validées remontant jusqu'à 1938 sont disponibles au niveau du marégraphe du Havre. Ces données donnent une tendance d'élévation du niveau de la mer de 2 mm/an environ, ce qui est de l'ordre de grandeur de la tendance globale sur la même période.

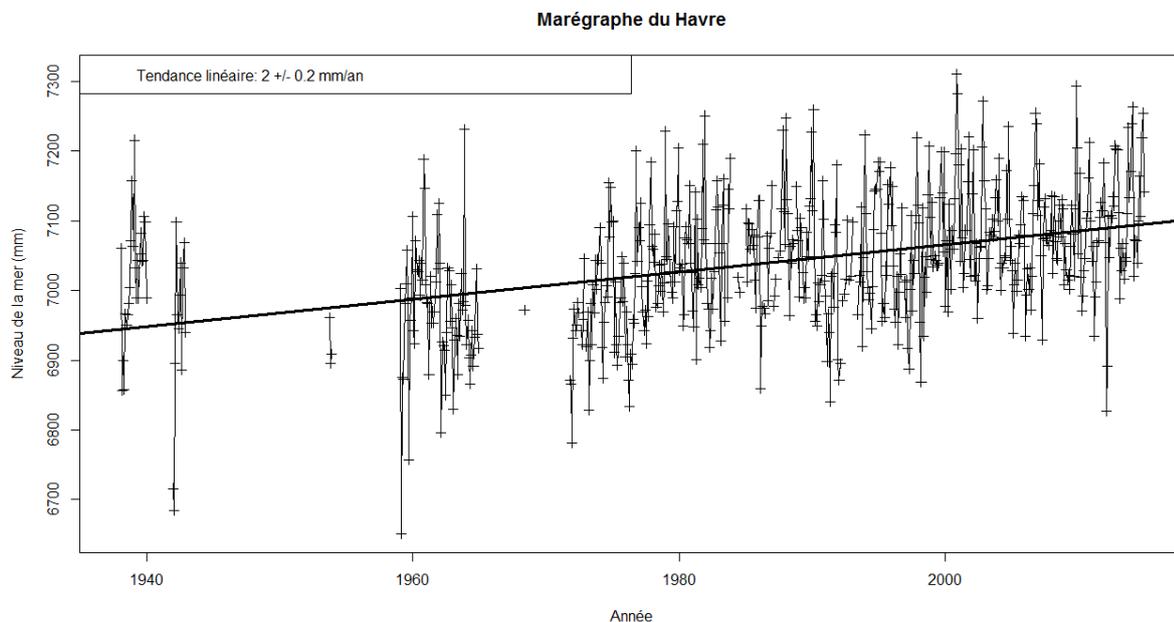


Illustration 34 : Niveaux marins mensuels au niveau du marégraphe du Havre et tendances entre 1938 et 2014 (Données SHOM, graphique réalisé sous R). La barre d'erreur de la tendance linéaire correspond ici à une erreur formelle.

4.2.3. Données GPS

Cette section examine les données de GPS permanents actuellement disponibles. L'illustration 35 présente les stations GPS couplées à des marégraphes dans la base de données SONEL. Malheureusement, les tendances ne sont pas disponibles pour ces GPS à la date de rédaction de cette note. La prochaine solution de l'Université de La Rochelle (ULR6) devrait inclure des tendances au niveau de ces marégraphes.



Illustration 35 : Stations GPS colocalisées avec des marégraphes dans la base de données SONEL (www.sonel.org)

D'autres données de GPS permanents sont disponibles via le réseau GNSS de l'IGN (Illustration 36). Sans procéder à l'analyse de ces données, on peut constater à ce stade qu'un modèle linéaire sera vraisemblablement inadapté pour Caen. On constate également que la tendance sera vraisemblablement positive à Saint-Lô, et vraisemblablement négative avec des fluctuations importantes à Villedieu-les-Poêles. **On voit donc que le schéma général de subsidence suggéré par les données de nivellement n'est à ce stade pas confirmé par les données GPS existantes.**

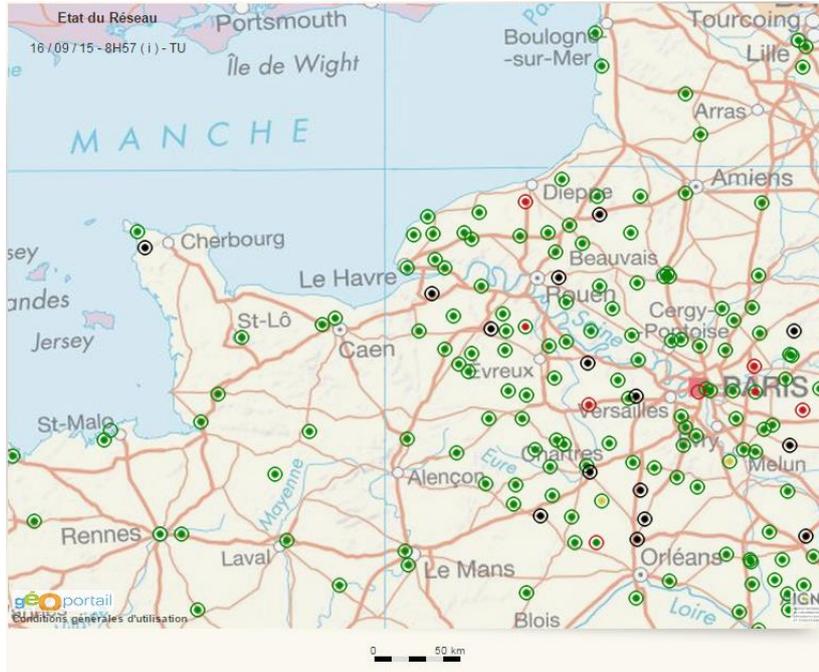


Illustration 36 : Réseau GNSS permanent de l'IGN (Source : rgp.ign.fr)

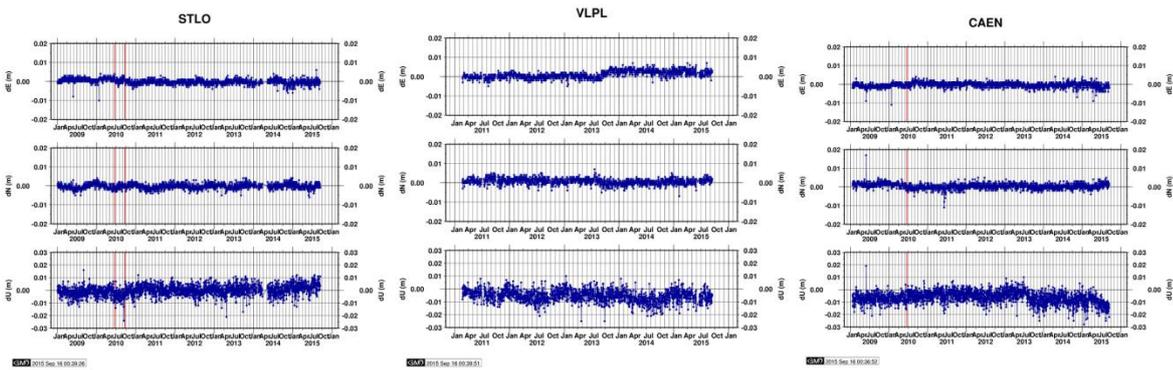


Illustration 37 : Enregistrements des Station de Saint-Lô (STLO), Villedieu-les-Poêles (VLPL), Caen (CAEN) du réseau GNSS IGN (Source : IGN)

4.2.4. Modèles de GIA

Pour cette étude, nos collègues Svetlana Jevrejeva et Giorgio Spada (Universités de Liverpool et d'Orbino) nous ont donné accès à des données donnant les valeurs des modèles de GIA au niveau des marégraphes de la base de données PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level). Ces données ont été publiées dans l'article Jevrejeva et al. (2014).

Nous souhaitons examiner si une anomalie de GIA est identifiée dans les différents modèles de GIA actuellement disponibles. Nous extrayons ici la quantité correspondant aux variations du niveau marin induites par le GIA. Cette quantité est une contribution au terme $\Delta\xi_{grav} + \Delta\xi_{mvs}$. L'illustration 38 présente ces résultats. Le GIA semble induire une subsidence allant de 0 à 0.5mm/an à Cherbourg. C'est le même ordre de grandeur que pour la subsidence identifiée par Lenôtre et al. (1999) par comparaison des données de nivellement.

En apparence, on a donc une cohérence entre les mesures de nivellement et les valeurs de GIA. En réalité, il serait assez difficile de tirer une conclusion du bon accord entre ces données : en effet, les ordres de grandeur de la contribution du GIA sont les mêmes pour les stations marégraphiques avoisinantes. Or, la comparaison des données de nivellement de Lenôtre et al. (1999) identifie une surrection à l'ouest de la Bretagne. On doit donc constater à ce stade qu'il n'y a pas de relation évidente entre les données de GIA disponibles et les données de nivellement.

Station	Élévation du niveau de la mer mesurée par le marégraphe	Contribution du GIA à l'élévation du niveau de la mer (les valeurs positives indiquent une subsidence)			
		ICE 1G	ICE 3G	ICE 5G	ANU
Le Havre	2.34 +/- 0.3 mm/an (1942-2009)	0.557 mm/an	-0.083 mm/an	0.057 mm/an	0.007 mm/an
Cherbourg	1.25 +/-0.45 mm/an (1975-2008)	0.369 mm/an	0.022 mm/an	0.128 mm/an	0.135 mm/an
Saint Malo	Non significatif	0.484 mm/an	-0.004 mm/an	0.150 mm/an	0.201 mm/an
Brest	1.44 +/- 0.08 mm/an (1880-2009)	0.551 mm/an	0.216 mm/an	0.313 mm/an	0.429 mm/an

Illustration 38 : Contribution du GIA à l'élévation du niveau de la mer selon différents modèles de GIA (Source : Jevrejeva et al., 2014 ; Modèle SELEN – G. Spada ; ICE-XG : données W.R. Peltier ; ANU : données K. Lambeck).

4.2.5. Etude des paléorivages

Stéphan et Goslin (2014) ont effectué une revue des anciennes positions du rivage le long des côtes françaises de Manche et d'Atlantique. Tout en reconnaissant que les données disponibles sont trop disparates pour en tirer des conclusions définitives, ces auteurs suggèrent une élévation du niveau marin de 0.8mm/an le long des côtes du Calvados et de 0.6mm/an au cours des 4500 dernières années, qui n'est pas significativement différent des taux trouvés pour les autres régions.

4.2.6. Conclusion du chapitre

Cette revue des données disponibles ne permet pas de confirmer la subsidence régionale de l'ordre de -1mm/an suggérée par l'analyse des données de nivellement. L'analyse est limitée par le fait que beaucoup des données topographiques ne sont disponibles qu'à Cherbourg, alors que la subsidence identifiée par nivellement n'affecterait la presqu'île du Cotentin que dans une moindre mesure. **Nous concluons donc que les données disponibles sont insuffisantes pour confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une subsidence régionale actuelle suggérée par l'analyse des données de nivellement.**

Ce résultat ne doit pas nous surprendre : dans le cas de la Mer du Nord, Wahl et al. (2012) n'ont pas davantage pu isoler les mouvements verticaux du sol dans les observations marégraphiques, en raison des incertitudes qui pèsent sur chacune des mesures géodésiques. Cette difficulté d'estimer l'amplitude de mouvements du sol faibles (de l'ordre du mm/an), reste donc un problème général, qui se pose pour de très nombreuses zones côtières.

Une tendance d'élévation globale du niveau de la mer de 2 mm/an environ est retenue à partir de l'observation des marégraphes du Havre, de Jersey et de Cherbourg (tendance régionale) pour la période de 1995 à 2015. Cette information est du même ordre de grandeur que la mesure altimétrique réalisée par observation satellite.

Pour la constitution de scénarii de niveau marin devant être pris en compte en modélisation (cf. rapport BRGM RP-66229-FR, Croiset et al., 2016, paragraphe 2.2), nous ferons donc l'hypothèse que les mouvements verticaux du sol en Basse-Normandie peuvent induire une subsidence allant de 0 à 1 mm/an. Ce qui revient à proposer une élévation du niveau marin de l'ordre du mètre à l'horizon 2100.

Pour réduire les incertitudes, un travail d'acquisition, de traitement et de mise en cohérence de données géodésiques serait nécessaire. La poursuite des acquisitions de données GPS renseignera ponctuellement sur les mouvements verticaux du sol. Pour une analyse sur une zone plus étendue, le recours à une analyse par interférométrie radar pourrait être envisagé. Il convient cependant de préciser que cette application resterait un exercice de recherche assez complexe, notamment en raison de la présence de végétation dans les zones d'intérêt.

5. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines

Ce chapitre s'attachera à décrire succinctement les caractéristiques hydrochimiques des aquifères à l'échelle régionale, regroupés en classe aquifère, selon différentes approches :

- par faciès chimique représenté en diagramme de Piper ;
- par rapport ionique molaire ;
- par statistiques représentées en boîtes à moustaches.

La caractérisation de la chimie des eaux et de leur faciès chimique contribue à mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique des aquifères. En effet, les éléments dissous dans l'eau renseignent sur les processus de minéralisation des eaux et permettent de mettre en évidence les différents processus, notamment les enrichissements naturels ou anthropiques ainsi que l'influence de l'eau de mer.

Selon la nature lithologique des roches encaissantes, les eaux souterraines acquièrent des faciès différents contrôlés par la nature de la roche. Il est ainsi possible de distinguer des eaux à l'équilibre avec des aquifères carbonatés, silicatés ou de socle.

Les phénomènes maritimes liés à la proximité de l'eau de mer sont liés aux embruns marins, au biseau salé, ou aux eaux saumâtres de bord de mer. En raison du caractère côtier, les eaux souterraines peuvent être influencées par la composition chimique de ces eaux plus ou moins salées.

5.1. EXTRACTION ADES ET QUALITOMETRES

Afin de caractériser la chimie des eaux des aquifères, une extraction de la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES, <http://www.ades.eaufrance.fr/>) a été réalisée sur l'ensemble de la Basse-Normandie pour 18 paramètres (pH, conductivité, O₂, potentiel électrique (Eh), ions majeurs, Fe, Mn, F, B, SiO₂ dissous), ce qui représente 186 621 analyses collectées, réparties sur 1 011 qualitomètres. Les producteurs de données sont l'agence de l'eau Seine-Normandie, l'agence de l'eau Loire-Bretagne et l'ARS (base de données SISE-Eaux).

La base de données a fait l'objet d'un nettoyage (suppression des doublons, des données aberrantes, ex : pH > 10) et la balance ionique a été calculée quand les données le permettaient. Pour ces dernières, seules les valeurs comprises dans l'intervalle -10%, 10% ont été gardées.

Une classe aquifère a été attribuée à chaque qualitomètre, lorsque les informations disponibles le permettaient (Illustration 39). 692 qualitomètres ont ainsi été associés à une classe aquifère.

Les classes aquifères retenues sont :

- Les aquifères du Bajocien et du Bathonien, étendus sur les départements du Calvados et de l'Orne ;
- Les aquifères de socle composés de roches plutoniques et métamorphiques (Laurent et al., 2015) qui sont représentés dans le massif armoricain, principalement dans le sud-Manche et dans l'Orne ;
- Les aquifères de socle ancien composés de formations du Paléozoïque et du Briovérien qui se situent également dans le Massif Armoricain, et sont principalement exploités dans le nord du Cotentin et dans la zone bocaine ;
- Les aquifères de la craie et l'aquifère de l'Oxfordien qui se situent dans l'est de la Basse-Normandie ; ils sont peu exploités en bordure du littoral dans la zone d'étude ;
- L'aquifère du Trias qui s'étend sur toute la bordure ouest du bassin Parisien en contact avec le massif Armoricain. Il est partiellement recouvert par les formations du Mésozoïque dans l'est du département de la Manche et en limite avec le Calvados ;
- Les aquifères dunaires localisés sur le littoral ouest de la Manche, exploités par plusieurs ouvrages ;
- Les bassins sédimentaires du Cénozoïque qui sont localisés dans l'isthme du Cotentin ; ils sont composés des bassins de Saint-Sauveur-le-Vicomte, de Lessay, du Merderet et de Sainteny-Marchésieux (Illustration 54) ;
- Les aquifères alluvionnaires recoupés par quelques qualitomètres.

Ces aquifères sont décrits dans leur partie littorale dans le chapitre 6.

Quelques formations n'ont pas fait l'objet de classe aquifère, car trop peu de points permettaient de les caractériser (elles sont par ailleurs peu exploitées) : Lias, formation de Montsurvent par exemple.

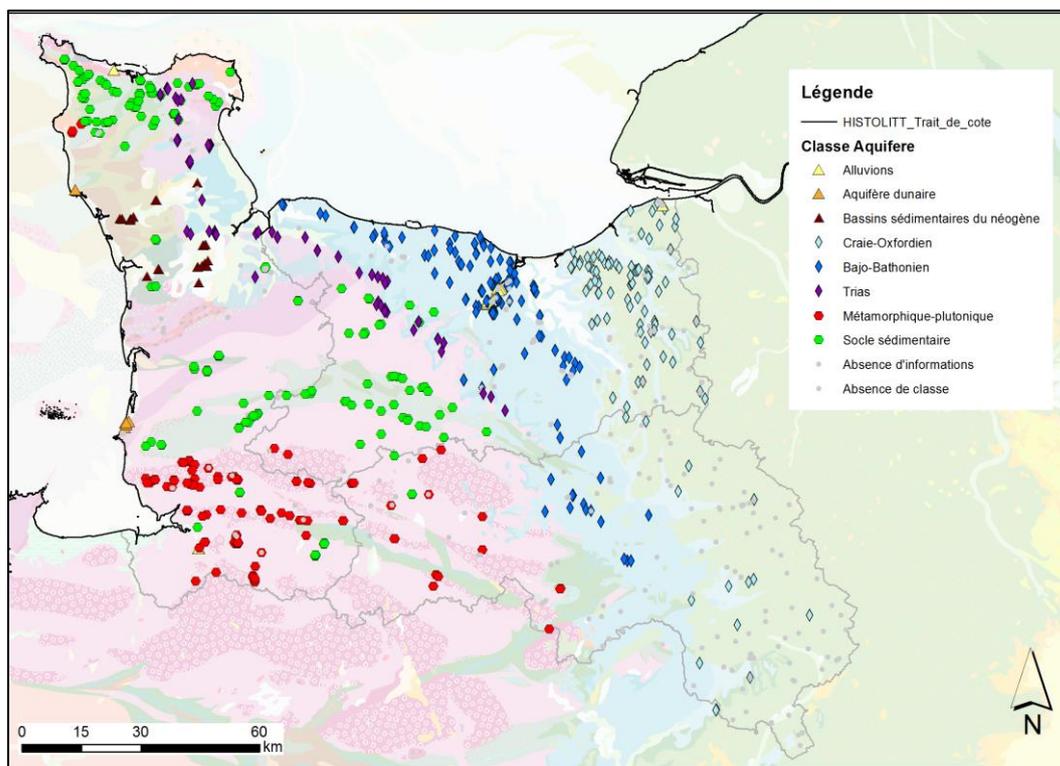


Illustration 39 : Localisation des points de prélèvement associés à un type d'aquifère sur fond de carte géologique au 1/1 000 000^{ème} (BRGM)

Les qualitomètres situés dans la zone d'étude, laquelle est définie au chapitre 1 (Illustration 1), sont représentés sur l'illustration 40. 33 % des qualitomètres sont situés dans la zone d'étude.

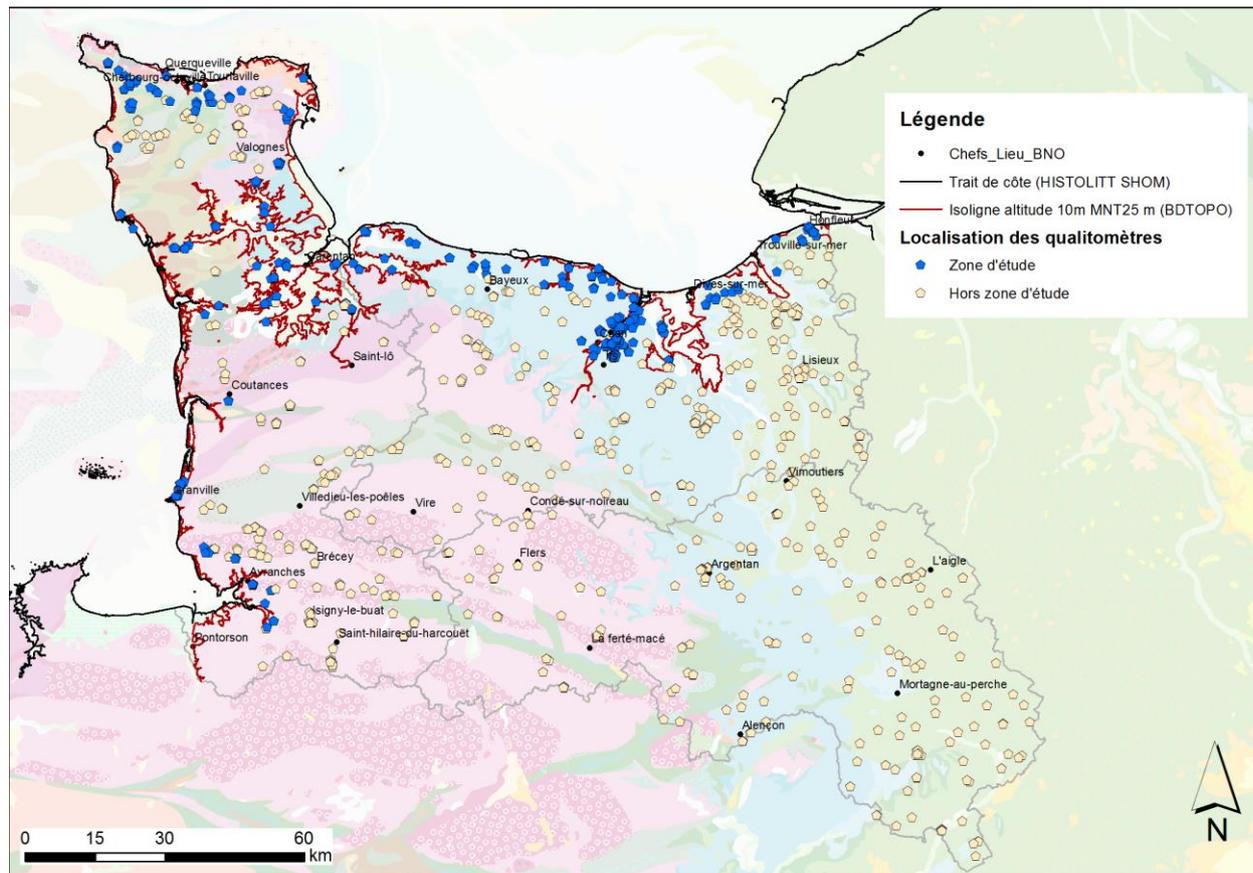


Illustration 40 : Localisation des points situés dans la zone d'étude (distance à la côte < 5 km et/ou altitude < 10 m NGF) sur fond de carte géologique au 1/1 000 000^{ème} (BRGM)

L'ensemble des points situés dans les bassins sédimentaires du Cénozoïque sont tous situés dans la zone d'étude (basse altitude), sauf un qualitomètre.

Afin d'exploiter cette base de données, une concentration médiane a été calculée par élément et par qualitomètre. A l'aide du logiciel R, le calcul des concentrations minimales, maximales, moyennes, médianes, percentile10 et percentile90 a été réalisé pour chaque élément et pour chaque classe aquifère, à l'échelle régionale et à l'échelle de la zone d'étude.

5.2. CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE DES PRINCIPAUX AQUIFERES

5.2.1. Principaux processus en jeu

Les statistiques descriptives calculées, à l'échelle régionale par point d'eau et par classe aquifère ont été représentées en boîte à moustaches. Le calcul de la significativité des différences entre groupe a été réalisé à l'aide du test de Kruskal-Wallis et du test post-hoc de Conover. Sur les boîtes à moustaches, les lettres montrent les classes significativement différentes selon le test de Kruskal-Wallis et du test post-hoc de Conover.

Vis-à-vis de la conductivité, les principaux aquifères, regroupés en classe, que sont le bajo-bathonien, la craie-oxfordien, le socle (métamorphique-plutonique), le socle sédimentaire ancien et le trias sont significativement différents ; ce seul aspect justifie déjà la classification géochimique des grands types d'aquifères (Illustration 41).

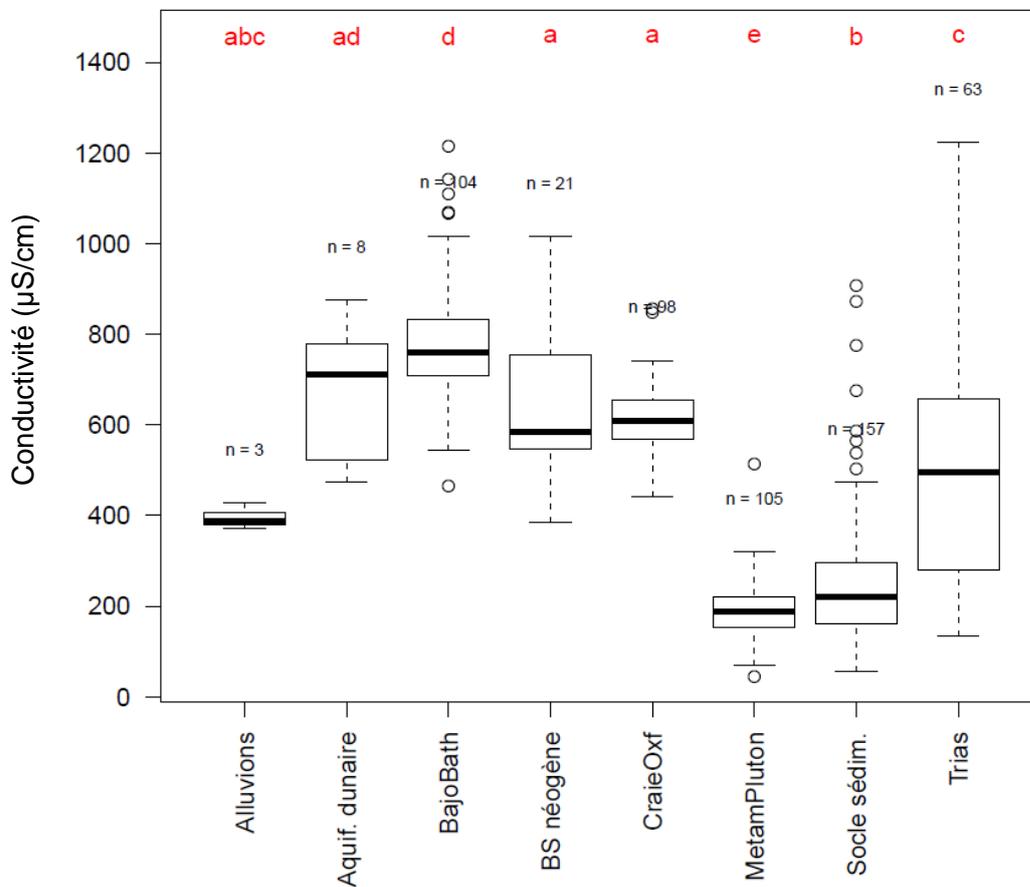


Illustration 41 : Valeurs de **conductivité** (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) mesurées dans les différents grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualitomètres de la base de donnée ADES (2016)

Observations et remarques :

- Au niveau régional, les aquifères de socle sont moins minéralisés (médiane environ 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les aquifères sédimentaires (médiane 600-700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont plus minéralisés. L'aquifère du Trias se situe entre les deux, ainsi que les alluvions.
- Les eaux des aquifères sédimentaires sont plus minéralisées car elles contiennent plus d'éléments en solution, notamment le calcium représenté sur l'illustration 42. Les teneurs en ions calcium sont contrôlées par la solubilité de certains minéraux (notamment la calcite).
- Concernant les aquifères carbonatés (bajo-bathonien et craie-oxfordien), le processus d'altération des roches carbonatées est mis en évidence avec de fortes concentrations en Ca et HCO_3 (Annexe 1) ; les teneurs sont contrôlées par l'équilibre calco-carbonique (pCO_2 , et saturation de minéraux carbonatés tels que la calcite, la dolomite, etc)

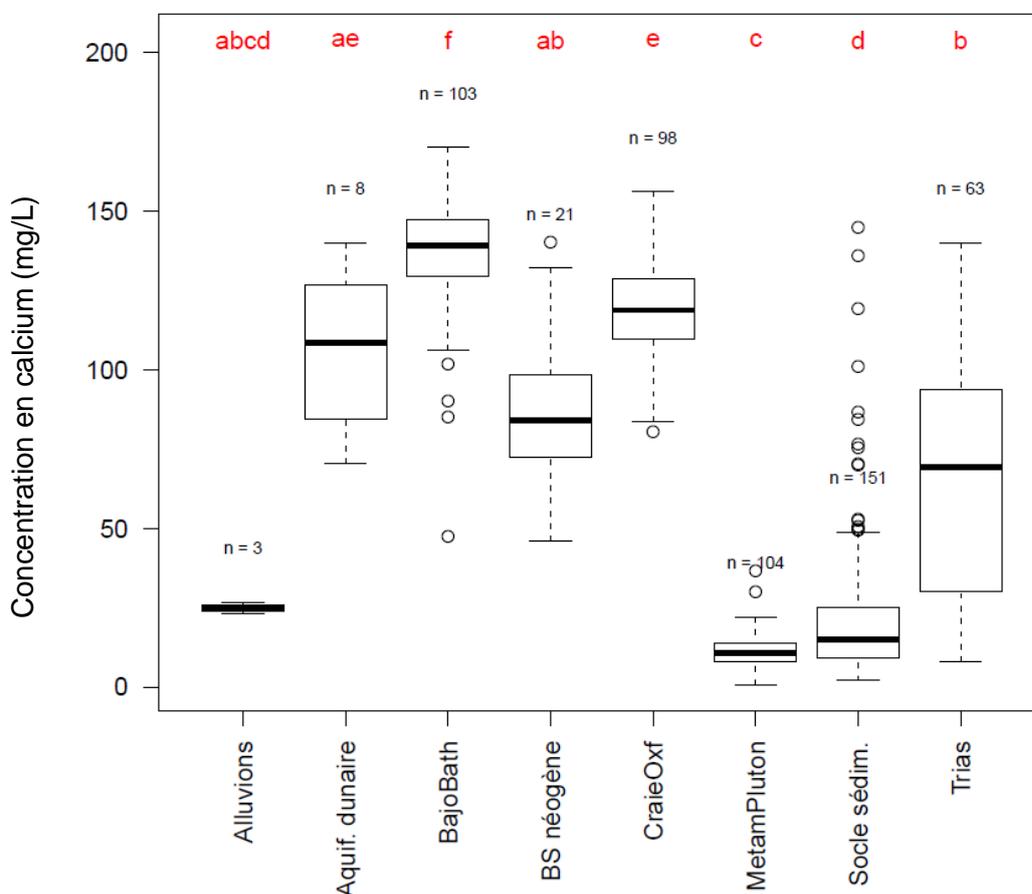


Illustration 42 : Concentrations en **calcium** (en mg/L) détectées dans les grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualimètres de la base de données ADES (2016)

Le **diagramme de PIPER** (Illustration 43) permet de mettre en évidence les faciès chimiques des eaux des différents aquifères en fonction de la dominance des anions et des cations.

- Les aquifères de la craie et des calcaires de l'Oxfordien, situés dans l'est du territoire Bas-normand présentent une chimie dominée par les ions calcium et bicarbonates, leur faciès est de type bicarbonaté-calcique. Dans le pôle anion, le pourcentage de chlorures (5-20 %) dans les eaux est très faible par rapport aux bicarbonates. Dans le pôle cation, le pourcentage de calcium est compris entre 80 et 100 %.
- Les aquifères du bajocien et bathonien présentent également un faciès bicarbonaté-calcique, les points sont moins circonscrits au niveau du pôle calcique, puisque le pourcentage en sodium et potassium est compris entre 10 et 30 % et le pourcentage en calcium est quant à lui compris entre 60 et 100 %.
Dans le pôle anion, le pourcentage de chlorures est compris entre 10 et 40 % et le pourcentage maximum en NO_3 s'élève à 22 % ; l'aquifère semble soumis aux pressions anthropiques, pouvant être lié à des apports en Nitrates, potassium, sodium et chlorures (engrais).
- Les eaux contenues dans les roches métamorphiques et plutoniques présentent un faciès chloruré et nitraté (Illustration 44), plutôt sodique et potassique. Dans le pôle cation, le pourcentage en sodium et potassium est compris entre 25 et 70 %, les points plus pauvres en sodium sont plus riches en calcium.
Dans le pôle anion, le pourcentage maximal en nitrates est de 52 % et le pourcentage en chlorures est compris entre 74 et 22 %. Par conséquent, les aquifères sont vulnérables aux pollutions anthropiques, et sont alimentés par les précipitations percolant dans les horizons supérieurs.
- Les eaux circulant dans les aquifères de socle du Briovérien et du Paléozoïque ne présentent pas de pôle circonscrit. Les eaux du socle Paléozoïque présentent un faciès chloruré-nitraté, plutôt sodique et potassique ; la lame d'eau infiltrée percole dans les horizons de subsurface avant de recharger l'aquifère. Les eaux du Briovérien semblent plutôt dominées par les bicarbonates et, pour quelques points, par les ions calcium.

Effectuer une classe géochimique pour le socle sédimentaire ne semble pas pertinent, vu la représentation du diagramme de Piper. Il serait nécessaire d'effectuer des tests supplémentaires et développer cette approche selon d'autres critères que la lithologie des formations géologiques, du moins en ce qui concerne le socle sédimentaire.

- L'aquifère du Trias présente un faciès des eaux dispersé entre deux pôles, un faciès bicarbonaté-calcique et un faciès chloruré-sodique et potassique, liés à la position du Trias situé à l'affleurement en bordure du massif armoricain dans le calvados ou sous-jacent aux formations du Jurassique dans l'est du Cotentin.
- Les eaux circulant dans les bassins sédimentaires du Cénozoïque sont dominées par les ions calcium et hydrogénocarbonates, sauf dans le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte, où les deux points sont dominés par les ions Na-Cl-HCO_3 . Quatre bassins constituent les bassins sédimentaires dans le département de la Manche présentés au chapitre 6.5 et représentés sur l'illustration 54.
- Les eaux des aquifères dunaires sont dominées par les ions calcium et bicarbonates, leur faciès est de type bicarbonaté calcique.

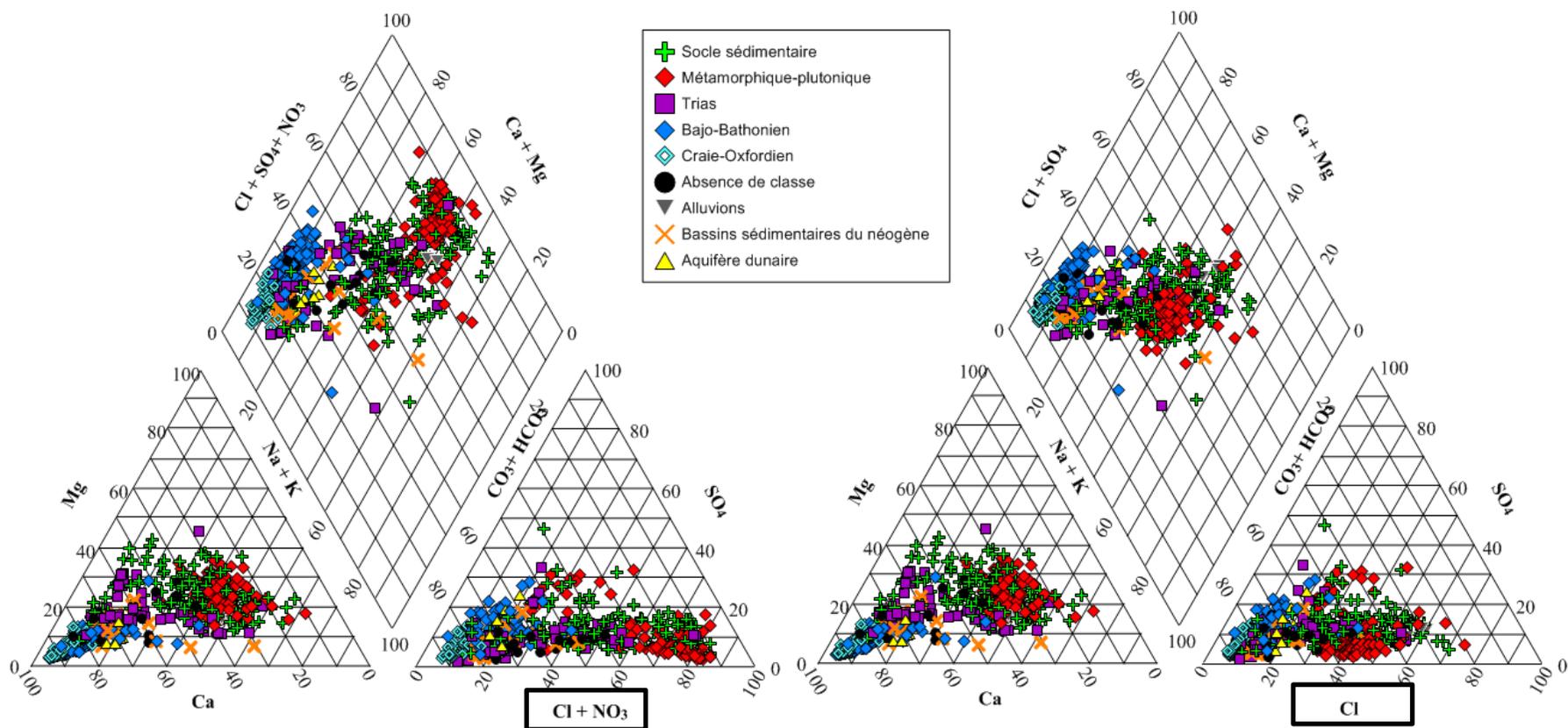


Illustration 43 : Représentation des points classés par type d'aquifères dans deux diagrammes de Piper (à gauche avec NO3, à droite sans NO3)

5.2.2. Vulnérabilité aux pollutions anthropiques

Les aquifères du Bajocien et du Bathonien présentent des valeurs de nitrates élevées (médiane = 35,3 mg/L) par rapport aux autres aquifères mais aussi par rapport à la norme de potabilité qui s'élève à 50 mg/L (Illustration 44). Pour la classe aquifère du socle métamorphique et plutonique, la médiane s'élève à 27 mg/L.

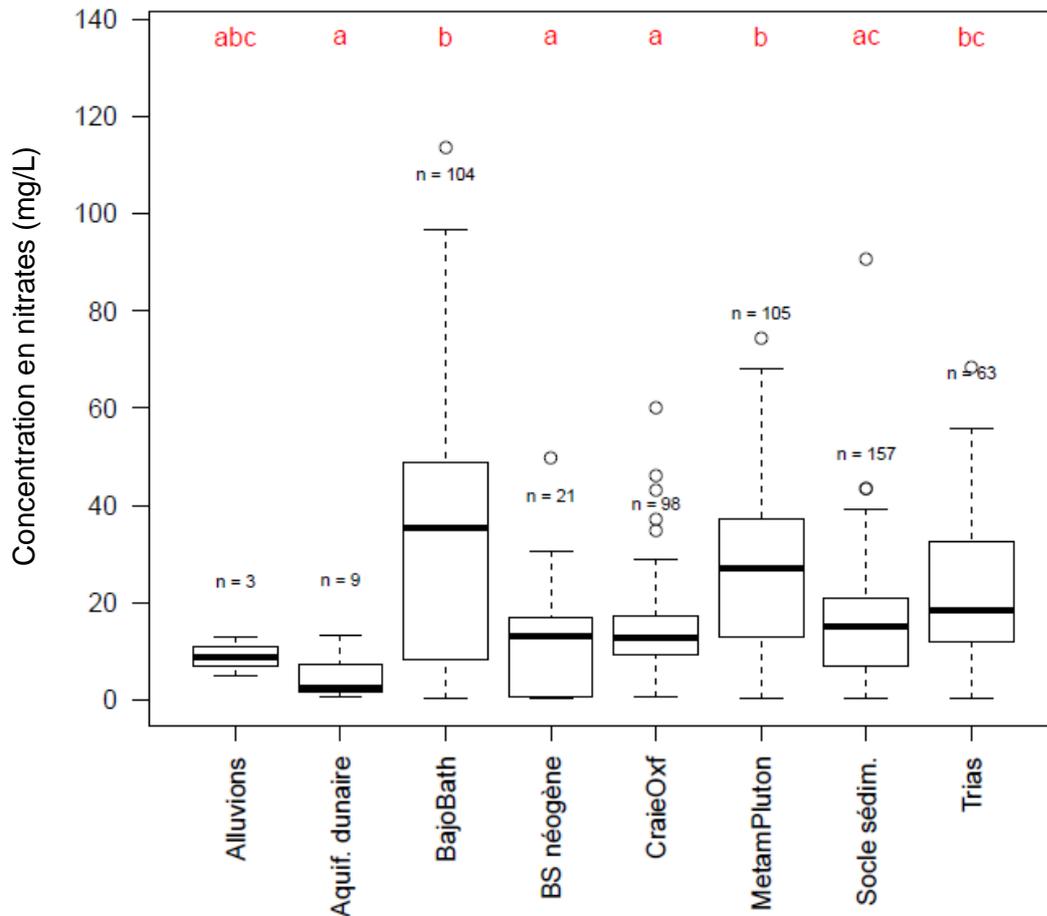


Illustration 44 : Concentrations en **nitrates** (en mg/L) mesurées dans les grands types d'aquifères en Basse-Normandie, données des qualitomètres de la base de données ADES (2016)

Les teneurs élevées en nitrates s'accompagnent parfois de valeurs élevées en chlorures pour la classe aquifères du Bajo-bathonien et les aquifères de socle plutonique et métamorphique (Illustration 45). De fortes teneurs en chlorures peuvent être liées à une activité anthropique intense d'origine agricole.

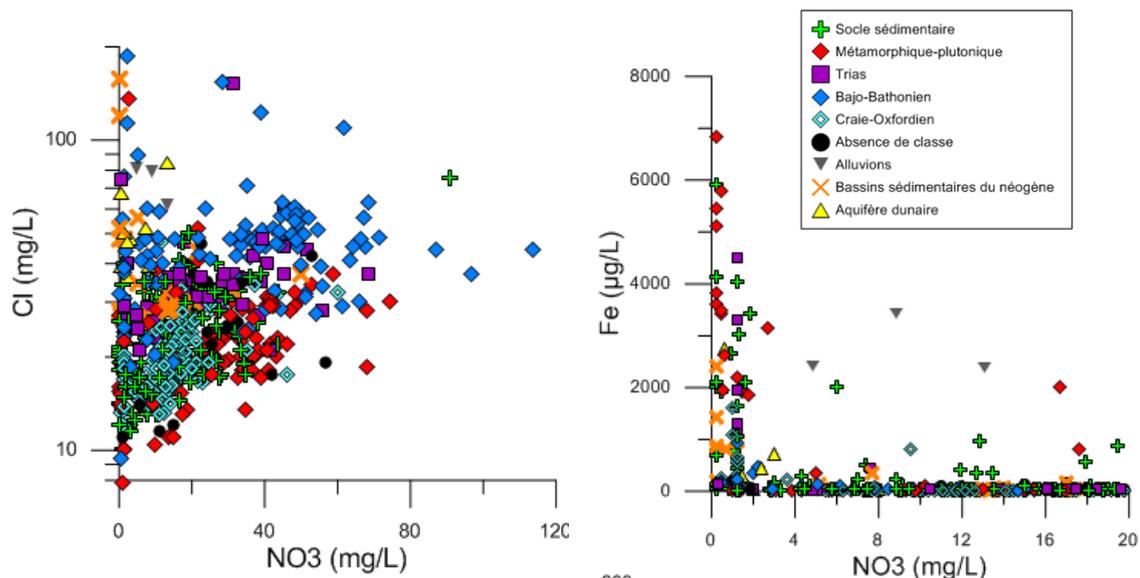


Illustration 45 : Diagramme des ions chlorures versus les ions nitrates (en mg/L) et fer versus nitrates dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie

Comme indiqué dans l'illustration 45 (Fe vs. NO₃), les faibles teneurs en nitrates (< 20 mg/L) dans l'aquifère du Bajo-Bathonien ne correspondent pas à de fortes teneurs en fer. Les faibles teneurs en nitrates (< 20 mg/L) ne sont donc a priori pas liées à des phénomènes de dénitrification autotrophe par oxydation de la pyrite, lesquels sont souvent associés à de fortes concentrations en fer. Toujours dans l'aquifère du Bajo-bathonien, quelques points révèlent de faibles teneurs en nitrates et de fortes teneurs en chlorures ; ces chlorures ne seraient toutefois a priori pas liées à une activité anthropique d'origine agricole. Ce point nécessitera d'être confirmé ultérieurement.

Plus généralement, d'après les deux illustrations ci-dessus, on observe que :

- ➔ L'apport agricole semble être confirmé par une augmentation conjointe des teneurs en NO₃ et Cl, principalement dans les aquifères plutoniques-métamorphiques et Bajo-Bathonien
- ➔ Dans certaines zones, l'aquifère du Bajo-bathonien ne montre pas de fortes valeurs en Fe pour des teneurs en NO₃ < 20 mg/L. Par contre, il peut souvent y avoir de fortes teneurs en chlorures. Dans ces zones, les faibles teneurs en NO₃ et fortes teneurs en chlorures ne sont pas liées à l'activité anthropique. Donc ces chlorures (en l'absence de NO₃) sont liés à d'autres processus. Proviennent-ils d'un mélange avec l'eau de mer pour les points situés dans la zone d'étude ?
- ➔ Dans les roches de socle, quelques points montrent de fortes teneurs en Fe pour des concentrations en NO₃ < 20 mg/L ; dans ces cas, un processus de dénitrification pourrait être en jeu, expliquant des concentrations importantes en chlorures, mais faibles en NO₃. Les chlorures seraient alors liés à un apport agricole.

5.2.3. Processus de salinisation

Les analyses des points d'eau présentent toutes des salinités largement inférieures à l'eau de mer (Illustration 46). Les chlorures, éléments conservatifs, sont souvent utilisés comme référentiel. Les éléments sodium et chlorures permettent d'identifier la salinisation des aquifères.

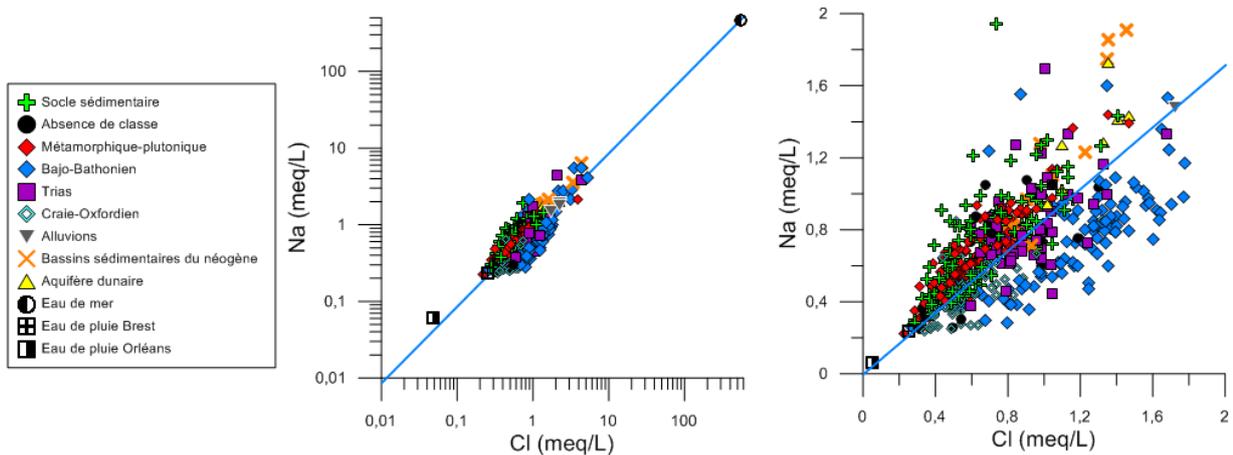


Illustration 46 : Diagrammes sodium versus chlorures (meq/L) dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer)

D'après l'illustration 46, les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines ne dépassent pas la norme de potabilité (200 mg/L). Par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (Illustration 46) :

- les eaux du socle (plutonique-métamorphique et sédimentaire) sont enrichies en sodium, indiquant la domination des interactions eau-roche sur les processus géochimiques.
- Les eaux de la craie-oxfordien se situent à proximité du pôle eaux de pluie, signature de la recharge sur un système dominé par le processus d'infiltration.
- les eaux du Bajo-Bathonien sont enrichies en chlorures, enrichissement probablement dû à l'influence d'une activité anthropique (Illustration 45) mais aussi par d'autres processus (interactions eau-roche, influence marine,..). Il est possible que les eaux, appauvries en sodium soient influencées par un échange cationique Na-Ca ; l'illustration 47, représentant les ions calcium en fonction des ions chlorures, montre un enrichissement en calcium vis-à-vis des chlorures.

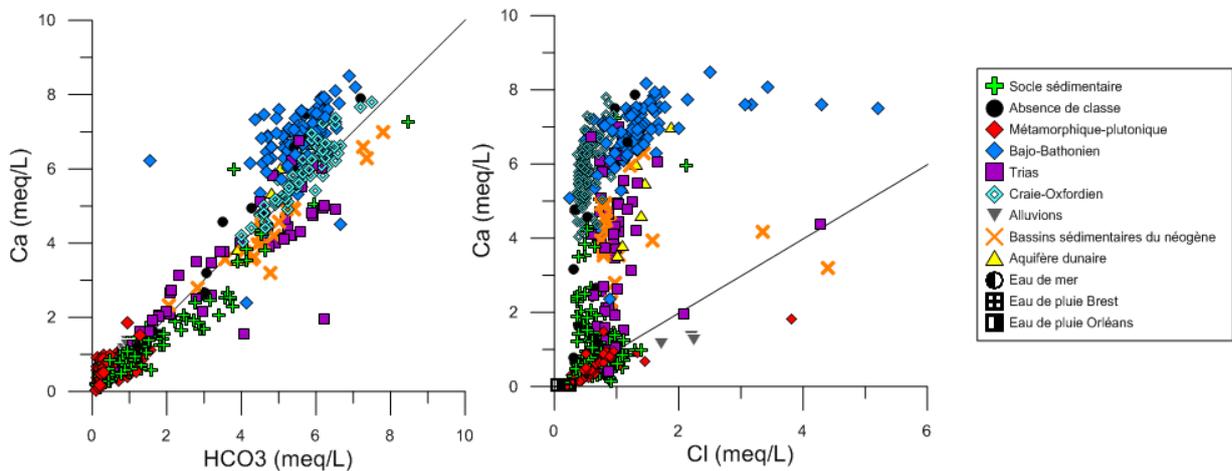


Illustration 47 : Diagrammes calcium vs bicarbonates et calcium vs chlorures dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en noir, droite de mélange 1 : 1)

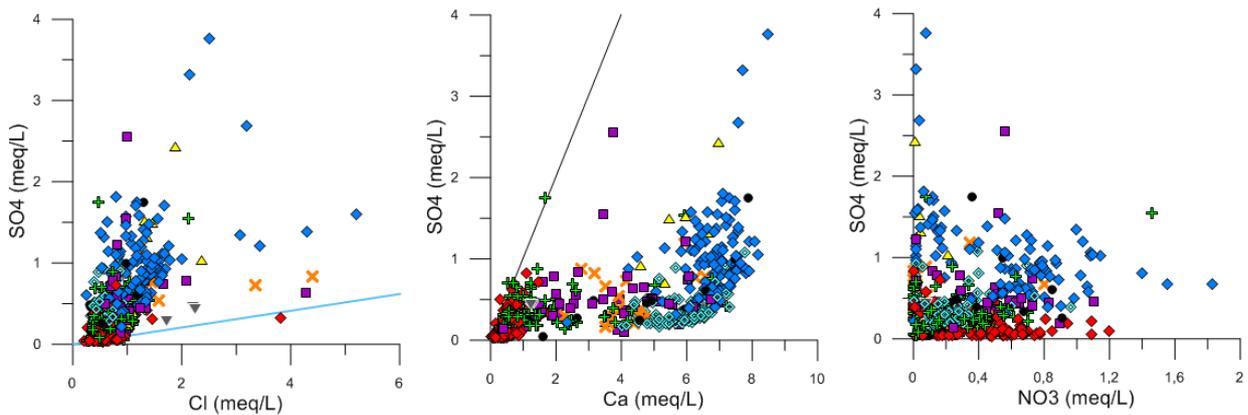


Illustration 48 : Diagrammes sulfates vs chlorures, calcium et nitrates dans les grands types d'aquifères de Basse-Normandie (en noir, droite de mélange 1 : 1 en bleu, droite de dilution de l'eau de mer)

L'illustration 48 permet d'observer plusieurs points :

- le pôle apports agricoles est identifié par de fortes teneurs en sulfates, nitrates et chlorures, ce pôle peut également correspondre à une diminution des teneurs en nitrates, liée à la dénitrification naturelle. Les fortes teneurs en sulfates pourraient être liées à la dénitrification naturelle par oxydation de la pyrite.
- le pôle dissolution du gypse correspondant à de fortes teneurs en sulfates et calcium, peut être retrouvé ponctuellement, mais ce processus ne semble pas dominant dans les aquifères en Basse-Normandie.
- dans l'aquifère du Bajo-bathonien, on observe un enrichissement en sulfates, l'origine de ces sulfates ne serait pas de nature marine, mais plutôt liée aux variations des conditions d'oxydoréduction et certainement, dans une moindre mesure, à la composition minéralogique des formations (pyrite, ...) ou à une activité anthropique.

5.2.4. Comparaison avec la zone d'étude (aquifères côtiers)

Globalement sur l'ensemble des aquifères, les teneurs en chlorures sont plus importantes dans la zone d'étude à proximité du littoral. Cet état est lié en grande partie probablement aux apports météoriques plus riches en chlorures, mais des processus de mélange avec l'eau de mer ancienne ou actuelle sont également en jeu.

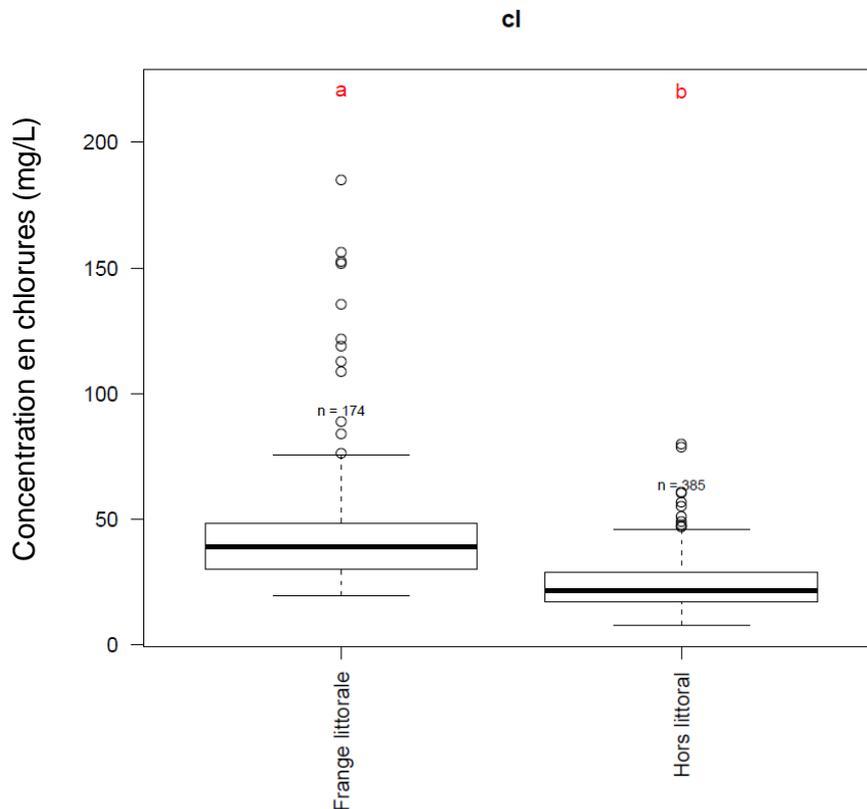


Illustration 49 : Boîte à moustaches des teneurs en chlorures (en mg/L) dans les aquifères de Basse-Normandie

Dans l'aquifère « craie-oxfordien », la différence des teneurs en chlorures (test Kruskal-Wallis) entre la zone d'étude et l'ensemble de l'aquifère est significative (Illustration 50). D'après la position du groupe de points sur le diagramme Na vs Cl (Illustration 46) se rapprochant du pôle eaux de pluie, les chlorures seraient d'origine météoriques, expliquant cette différence de concentration avec les points proches du littoral.

Dans les aquifères du Bajocien et du Bathonien, il y a une différence significative pour le paramètre chlorures (Illustration 50) mais pas pour le paramètre nitrates (Annexe 1). Cette augmentation en chlorures à proximité du littoral n'est pas liée à l'activité agricole.

Chlorures	Zone d'étude	Perc. 10	Perc. 90	Conc. Med	Conc. Moy.	Conc. Min.	Conc. Max
Bajo-Bathonien	Frange littorale	40,5	81,4	48,5	57,8	30,8	185,0
	Total	28,3	60,3	45,1	48,0	9,4	185,0
Craie-Oxfordien	Frange littorale	21,0	31,3	24,3	26,1	19,6	46,9
	Total	14,0	26,5	18,3	19,7	12,0	46,9
MetamPluton	Frange littorale	25,3	51,6	30,5	41,8	24,0	135,5
	Total	13,9	31,0	21,8	23,7	7,9	135,5
Socle sedim.	Frange littorale	26,0	40,3	32,0	33,7	22,0	75,5
	Total	14,2	35,0	24,0	24,5	10,0	75,5
Trias	Frange littorale	31,0	57,0	36,0	44,0	28,0	152,0
	Total	25,0	43,6	31,0	35,0	21,0	152,0

Illustration 50 : Statistiques descriptives sur le paramètre « chlorures » (mg/L), par classe aquifère, sur l'ensemble de la région et au niveau de la frange littorale (zone d'étude) I

Les aquifères côtiers présentent une minéralisation plus importante associée à des concentrations en chlorures plus élevées (Illustration 51), liées :

- Aux apports météoriques plus chargés dus aux embruns marins et à la proximité à la côte ;
- Aux mélanges avec l'eau de mer ;
- Au temps de contact avec la roche encaissante. Les zones en bordure du littoral sont souvent des exutoires des nappes. Les aquifères côtiers peuvent contenir des eaux plus minéralisées liées à leur temps de résidence dans l'aquifère, plus long, par rapport aux eaux en amont hydraulique.

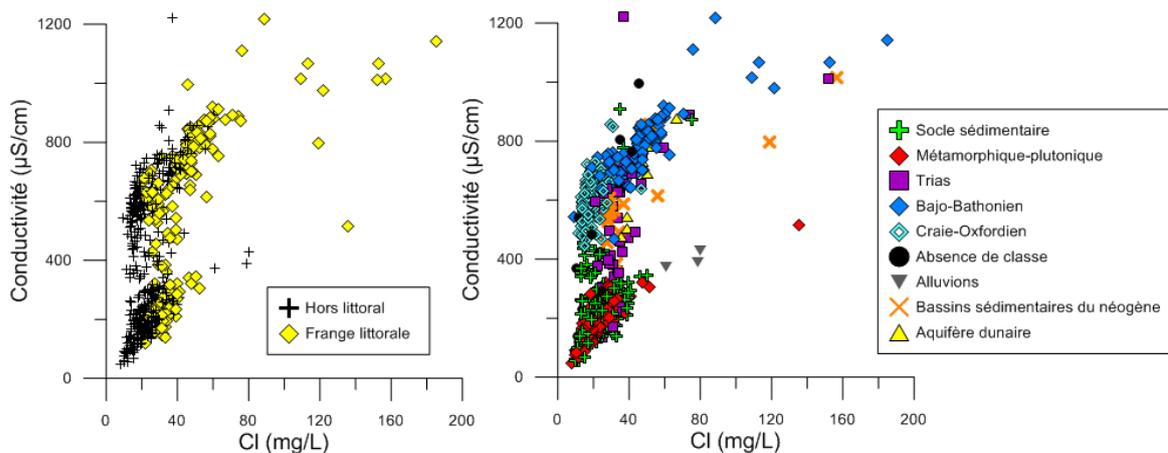


Illustration 51 : Diagrammes de la conductivité en fonction des concentrations en chlorures (mg/L) en Basse-Normandie et dans la zone d'étude (frange littorale)

Dans les différents types d'aquifères côtiers, il apparaît que les processus d'interactions eau-roche prédominent, sauf dans certains secteurs de l'aquifère du bajo-bathonien notamment où l'apport en chlorures est probablement lié à un mélange avec l'eau de mer, localement, et à des apports anthropiques d'origine agricole, plus globalement (Illustration 52).

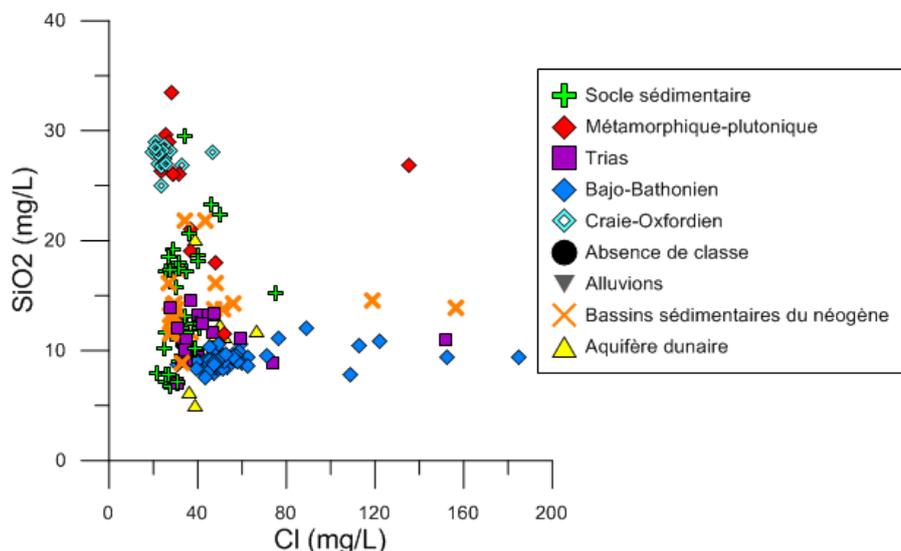


Illustration 52 : Diagramme silice en solution (mg/L) en fonction des concentrations en chlorures (mg/L)

Le rapport molaire Na/Cl (Illustration 53) semble souvent proche entre les aquifères à l'échelle régionale et leur frange côtière ; les processus hydrochimiques en jeu sont donc a priori souvent les mêmes. Néanmoins, on peut peut-être observer une tendance à se rapprocher du rapport molaire Na/Cl de l'eau de mer (Na/Cl = 0,858) dans la zone côtière de certains aquifères, comme ceux de la « Craie-Oxfordien », du « Bajo-Bathonien » et du « Socle sédimentaire » ; il faut toutefois rester très prudent dans cette interprétation. .

Rapport molaire Na / Cl	Zone d'étude	Perc. 90	Médiane	Max
Bajo-Bathonien	Frange littorale	0,915	0,656	1,740
	Total	0,885	0,623	2,425
BS neogene	Frange littorale	1,370	1,048	1,405
	Total	1,369	1,047	1,405
Craie-Oxfordien	Frange littorale	0,940	0,856	0,983
	Total	1,040	0,842	1,642
MetamPluton	Frange littorale	1,247	1,109	1,395
	Total	1,247	1,050	1,696
Socle sedim.	Frange littorale	1,185	0,933	1,399
	Total	1,397	1,002	2,548
Trias	Frange littorale	1,109	0,885	2,256
	Total	1,240	0,879	2,256

Illustration 53 : Statistiques sur le rapport molaire Na/Cl par classe aquifère et vis-à-vis de la proximité avec le littoral

Dans ce chapitre, sont donnés quelques premiers éléments et hypothèses qu'il conviendra de vérifier s'il est souhaité aller plus loin dans l'analyse.

6. Etat des connaissances des intrusions salines

6.1. APPROCHE REGIONALE

En première approche, une analyse des données de chlorures issues d'ADES et de la BSS a été réalisée à l'échelle régionale. Chaque qualitomètre ayant au moins une analyse avec une teneur en chlorures supérieure à 100 mg/L a été sélectionné et associé à un type d'aquifère, permettant de mettre en évidence les valeurs extrêmes de teneurs en chlorures et ainsi d'éventuelles intrusions salines. Les résultats sont représentés sur l'illustration 54.

Les chlorures, éléments conservatifs, sont souvent utilisés comme référentiel. Les éléments sodium et chlorures permettent d'identifier la salinisation des aquifères. A titre de rappel, la concentration en chlorures dans l'eau de mer s'élève à environ 19 237 mg/L (Illustration 10).

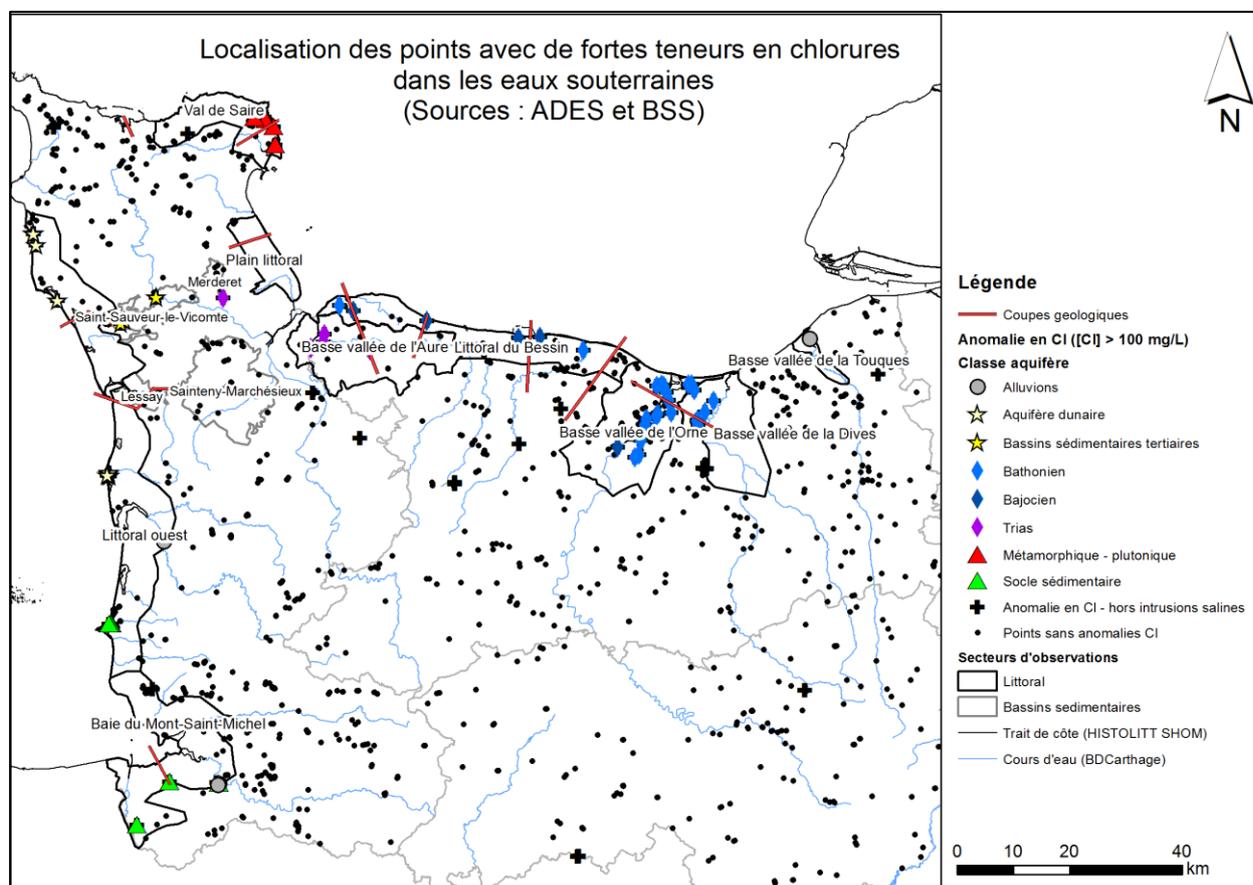


Illustration 54 : Localisation des anomalies en chlorures ($[Cl] > 100 \text{ mg/L}$) dans les eaux souterraines, sources ADES et BSS

Un export des données sur les chlorures dans ADES a été effectué à l'échelle de la Basse-Normandie : plus de 12 980 analyses ont ainsi été collectées. Il ressort qu'au moins 736 qualitomètres ont montré une analyse en chlorures enregistrée, dont la teneur est comprise entre 1 et 895 mg/l. La concentration médiane s'élève à 27 mg/L.

Par ailleurs, des teneurs en chlorures ont pu être récupérées également pour 983 points dans la banque de données du sous-sol (BSS). Au total, 92 ouvrages souterrains révèlent au moins une concentration en chlorures supérieure à 100 mg/l.

Une teneur en chlorures supérieure à 100 mg/l n'est pas un critère suffisant pour confirmer une intrusion saline actuelle dans un aquifère. En effet, d'autres phénomènes peuvent être à l'origine d'une forte teneur en chlorures, notamment :

- Une intrusion saline ancienne ;
- La présence d'évaporites ou de saumures sédimentaires (ex : halite) ;
- La circulation de fluides hydrothermaux très minéralisés ;
- Les pollutions anthropiques (agricole, industrielle).

Un premier examen des données a été effectué afin de détecter d'éventuelles données erronées ou d'identifier une salinisation liée à une activité anthropique ; les points ressortis de ce premier filtrage sont représentés sur l'illustration 54.

Ainsi, les deux secteurs suivants ont été écartés car ils sont vraisemblablement non impactés par une intrusion saline.

En effet, d'une part, les concentrations en chlorures de plusieurs points positionnés dans le Callovien (argiles) ont été reportés sur le diagramme « sodium versus chlorures » ci-après (Illustration 55), montrant un enrichissement en chlorures, marqueur d'une forte influence anthropique. Les ouvrages sont situés sur un centre d'enfouissement de déchets à Argences. Des éléments toxiques tels que l'arsenic, le zinc, le cadmium, le plomb ou le cuivre ont été détectés dans les eaux souterraines au droit du site, parfois dépassant les normes.

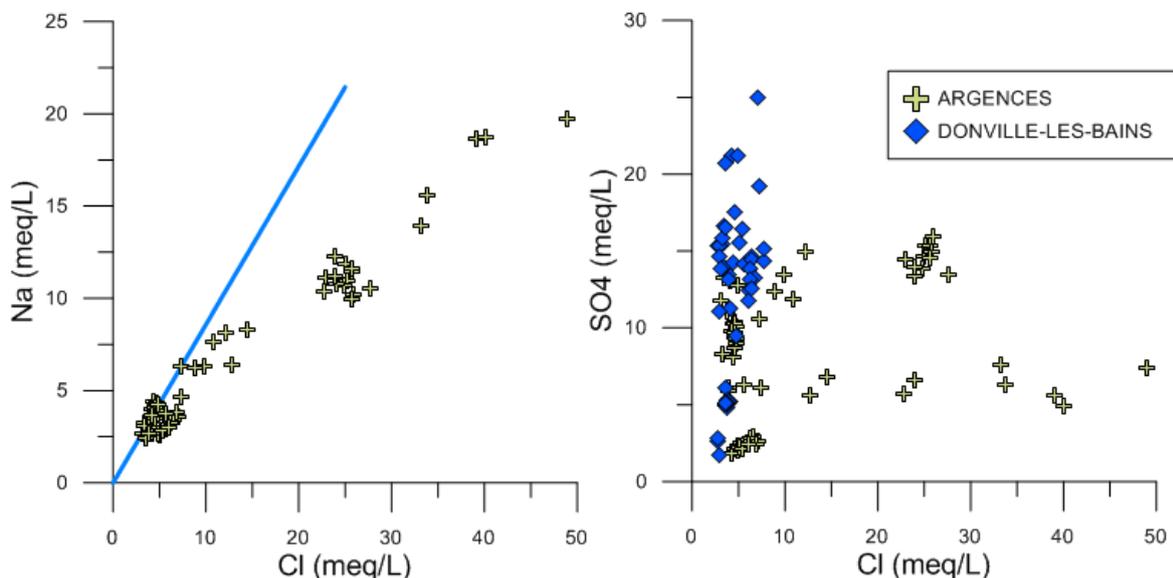


Illustration 55 : Diagrammes sodium versus chlorures et sulfates versus chlorures (en meq/L) pour les points ayant une forte salinité situés à Argences (Callovien) et Donville-les-Bains (source : ADES), en bleu : droite de dilution de l'eau de mer

D'autre part, à Donville-les-Bains, à proximité de Granville, des teneurs en chlorures élevées ont été détectées sur un site industriel. Les concentrations en sodium ne sont pas disponibles, en revanche les fortes teneurs en sulfates laissent supposer une influence anthropique. Des éléments, tels que l'arsenic et le plomb, ont été retrouvés dans les eaux souterraines.

76 points ayant une anomalie en chlorures ont par contre été retenus, comme étant potentiellement affectés par un phénomène d'intrusion saline. La liste de ces points est présentée en Annexe 2. Ainsi, les secteurs révélant des anomalies en chlorures liés à une intrusion saline ou à un début d'intrusion saline, qui figurent sur l'illustration 54, sont :

- a- La Baie du Mont-St-Michel (Substratum des formations de tange) et vallée de la Sélune (nappe d'accompagnement du cours d'eau et formation de socle sous-jacente)
- b- Le littoral ouest de la Manche (aquifères dunaires) et la basse vallée de la Seine (alluvions)
- c- Le Val de Saire (granite)
- d- Les bassins sédimentaires du Cénozoïque (bassins du Merderet, de Lessay, Sainteny-Marchésieux, Saint-Sauveur-le-Vicomte)
- e- Les basses vallées de l'Aure et de la Vire (aquifère du Trias et alluvions)
- f- Le littoral du Bessin (aquifère du Bathonien et du Bajocien)
- g- Les basses vallées de l'Orne et de la Dives (alluvions et aquifère du Bathonien)
- h- La basse vallée de la Touques (alluvions et aquifère de l'Oxfordien)

Sur les secteurs où une anomalie en chlorures a été identifiée, une analyse plus fine a été réalisée afin d'essayer de distinguer l'origine et les processus en jeux. L'analyse est présentée ci-après, elle se base sur une analyse du contexte géologique et une caractérisation hydrochimique des phénomènes, lorsque cela est possible.

6.2. BAIE DU MONT-SAINT-MICHEL ET BASSE VALLEE DE LA SELUNE

6.2.1. Contexte géologique

La Sée et la Sélune se jettent dans la baie à l'est du Mont-Saint-Michel et le Couesnon au pied du Mont-Saint-Michel. La baie est entourée de reliefs, que sont au nord le massif granitique cadomien de Carolles, à l'est et au sud les massifs granitiques d'Avranches et de Fougères entourés d'auréoles de métamorphisme, composées de schistes tachetés et de cornéennes. Le relief s'adoucit au Nord avec la présence de schistes et de grès du Briovérien supérieur (Formation de Granville). Les formations de tangues datant du Quaternaire (Flandrien) se sont déposées dans les zones basses, se situant actuellement à moins de 10 m d'altitude, selon le MNT (BDTOPO, 25 m). La vallée de la Sélune est composée d'alluvions fluviomarines datant du Flandrien.

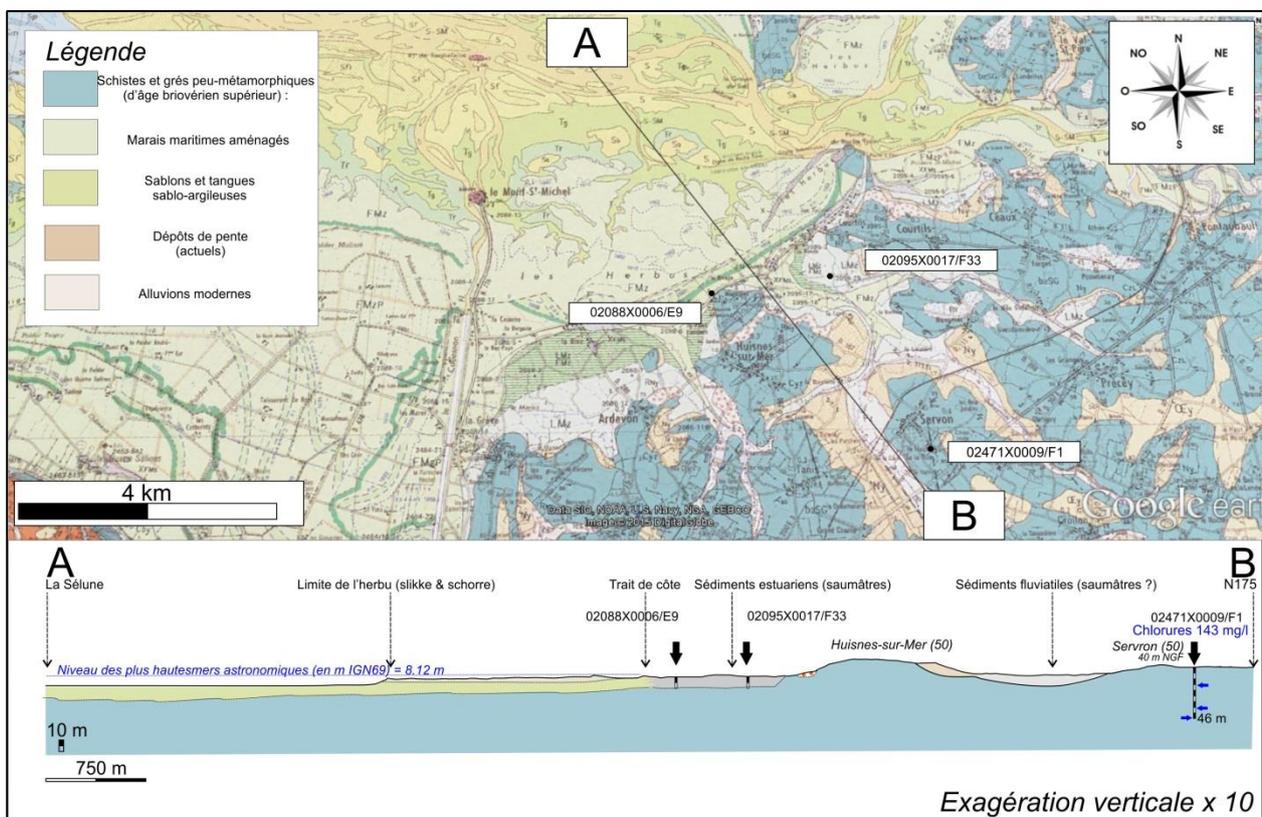


Illustration 56 : Coupe géologique n°1 de la baie du Mont-Saint-Michel, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM

6.2.2. Caractérisation de l'intrusion saline

Dans le cadre du projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel, une étude hydrogéologique de la **nappe alluviale du Couesnon** a été menée par Sogreah entre 2000 et 2002, et consista à quantifier les impacts des modifications du régime hydraulique sur la salinité des eaux souterraines. Les principaux résultats sont présentés ci-après.

L'aquifère étudié est contenu dans les alluvions fluviomarines, composés de tange, sables fins et grossiers, d'une épaisseur d'environ 20 m. L'aquifère repose sur les formations de socle du Briovérien supérieur, également aquifère. Des paléochenaux du Couesnon, à l'ouest du

Couesnon et des paléochevaux de la Sélune au nord de la zone d'étude parcourent l'aquifère superficielle, apportant des sédiments fluviaux grossiers avec une perméabilité plus importante.

La pluviométrie annuelle à Pontorson est de 552 mm/an, la lame d'eau infiltrée est estimée à 47,5 mm/an (Sogreah, 2000, rapport phase 2).

La conductivité dans l'horizon profond de l'aquifère étudié varie entre 60 mS/cm au nord et à l'ouest de la zone d'étude et 25 mS/cm au sud en rive droite du Couesnon (Illustration 57). Des valeurs élevées de conductivité (entre 2 et 22 mS/cm) ont également été relevées dans les réseaux de drainage, alimentés par la nappe et les pluies, sur l'ensemble de la zone d'étude.

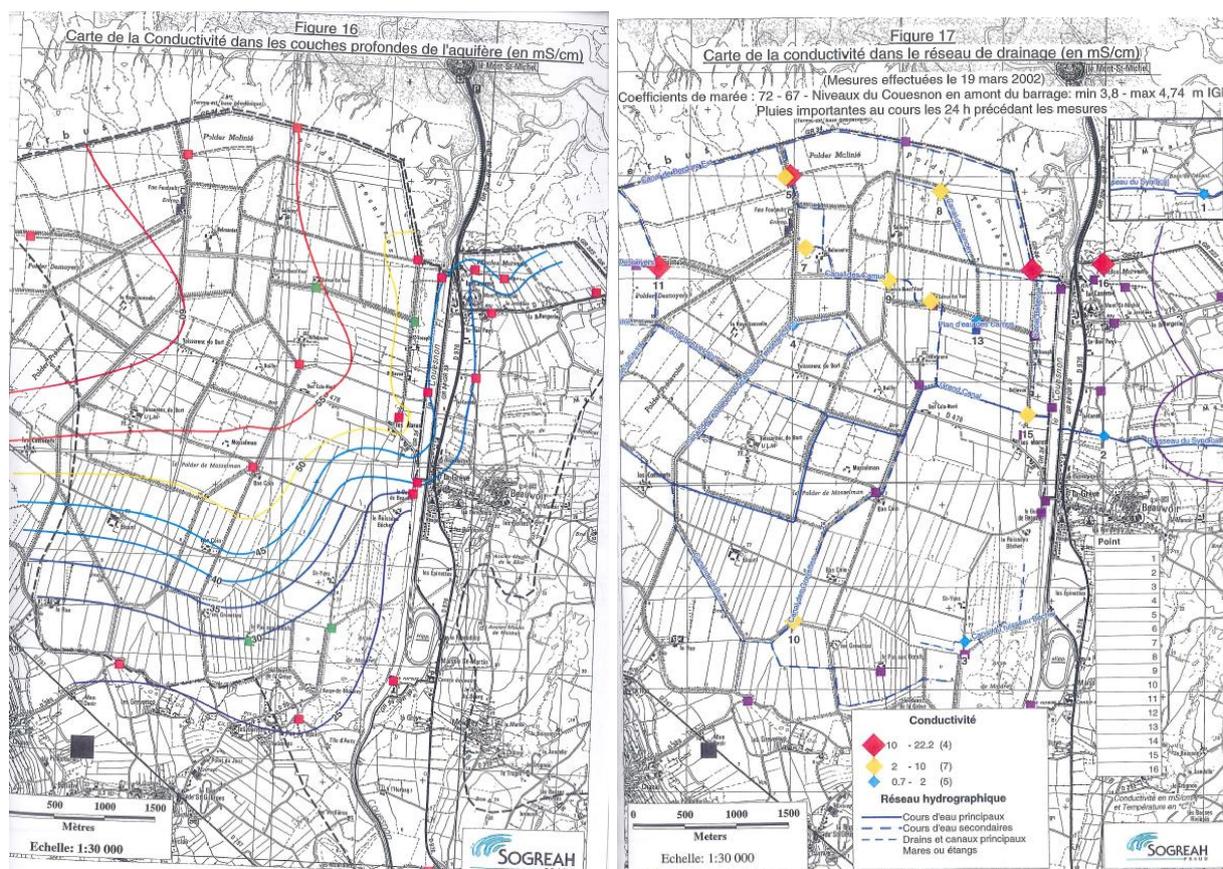


Illustration 57 : Cartes de conductivité (en mS/cm) dans les couches profondes de l'aquifère (à gauche) et dans le réseau de drainage (à droite), source : Sogreah, 2002, rapport phase 6

D'après Sogreah, 2002, une zone de transition eau douce – eau salée est observée sur plusieurs mètres (Illustration 58).

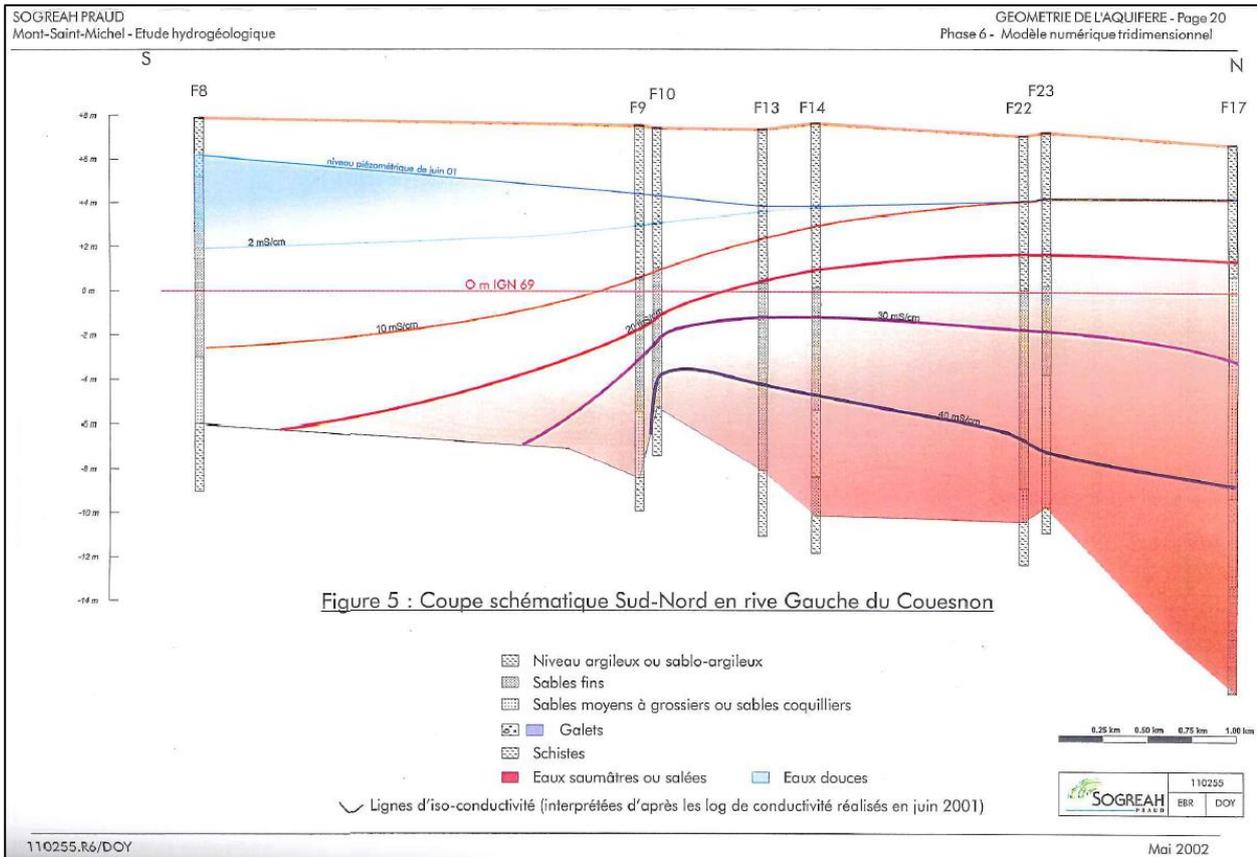


Illustration 58 : Coupe transversale à la côte en rive droite du Couesnon, source : Sogreah, 2002, rapport phase 6

Un modèle maillé hydrodynamique et hydrodispersif a été réalisé, en régime permanent et en régime transitoire au pas de temps de 15 jours. Les résultats confirment une forte inertie du système aquifère dans les alluvions fluvio-marines. D'après des analyses de tritium dans les eaux souterraines, le taux de renouvellement de la nappe en sub-surface serait très faible, et les eaux profondes très anciennes. Sogreah émet l'hypothèse que la salinité rencontrée ne résulterait pas d'un apport marin actuel, mais de sels contenus dans les sédiments du Flandrien.

Toutefois, cette hypothèse n'est pas vérifiée. En effet, quatre modèles hydrogéologiques élémentaires ont été réalisés par Sogreah pour mieux comprendre les mécanismes hydrodynamiques de migration du sel dans les sédiments : Nappe-Couesnon ; Nappe-Socle ; Nappe-Baie ; Nappe-Pluies. Une série de simulations a été effectuée. Les principales conclusions sont notées ci-après, celles-ci semblent contredire les résultats du premier modèle :

- Le Couesnon est un vecteur d'infiltration du sel dans la nappe superficielle, avec une progression latérale et verticale d'une dizaine de mètres sur la période de simulation, malgré un colmatage des berges.
- Les formations les plus perméables (sables grossiers et paléochenaux) sont des vecteurs de pénétration du sel dans la nappe superficielle, la langue de sel provenant de la baie s'y enfonce plus facilement.
- L'effet des marées (simulation de marée à des coefficients 120 pendant 3 jours) sur la pénétration du biseau salé est négligeable.
- L'écoulement de la nappe du socle vers la nappe superficielle est trop faible pour influencer la salinité.

La carte de localisation des anomalies en chlorures est présentée en Annexe 4. Sur ce secteur on distingue :

- Deux ouvrages utilisés pour l'agriculture à Aucey-la-Plaine ([02464X0014/F1](#), [Cl] = 114 mg/L en 1989) et à Servon ([02471X0009/42](#), [Cl] = 143 mg/L). Le manque d'informations empêche de conclure sur les fortes teneurs en chlorures. Les données sont issues de la BSS.
- Le champ captant situé sur la commune de Ducey, au lieu-dit le Bas-Montmorel montre de fortes teneurs en chlorures.

Les ouvrages sont situés en rive droite de la Sélune. Deux aquifères superposés sont exploités (DDAF 50, 1996) :

- Aquifère alluvionnaire, d'une épaisseur d'environ 10 m, $T = 10^{-3}$ m²/s, la nappe est libre à semi-captive en connexion hydraulique avec la Sélune.
- Aquifère de socle dans les formations de schistes du Briovérien, avec des arrivées d'eau comprises entre 15 et 50 m de profondeur ; le débit spécifique est compris entre 20 et 30 m³/h/m. La nappe est semi-captive.

L'illustration 59 représente les concentrations des ions majeurs contenus dans les eaux prélevées :

- Dans les eaux de pluie à Brest
- Dans un aquifère alluvionnaire à Ducey, dans la basse vallée de la Sélune
- Dans un aquifère de socle du Briovérien à Ducey, dans la basse vallée de la Sélune
- Dans le cours d'eau, la Sélune
- Dans un aquifère de socle situé dans le val de Saire
- Dans le cours d'eau la Saire, dans le val de Saire

Les analyses du val de Saire sont discutées au chapitre 6.4.

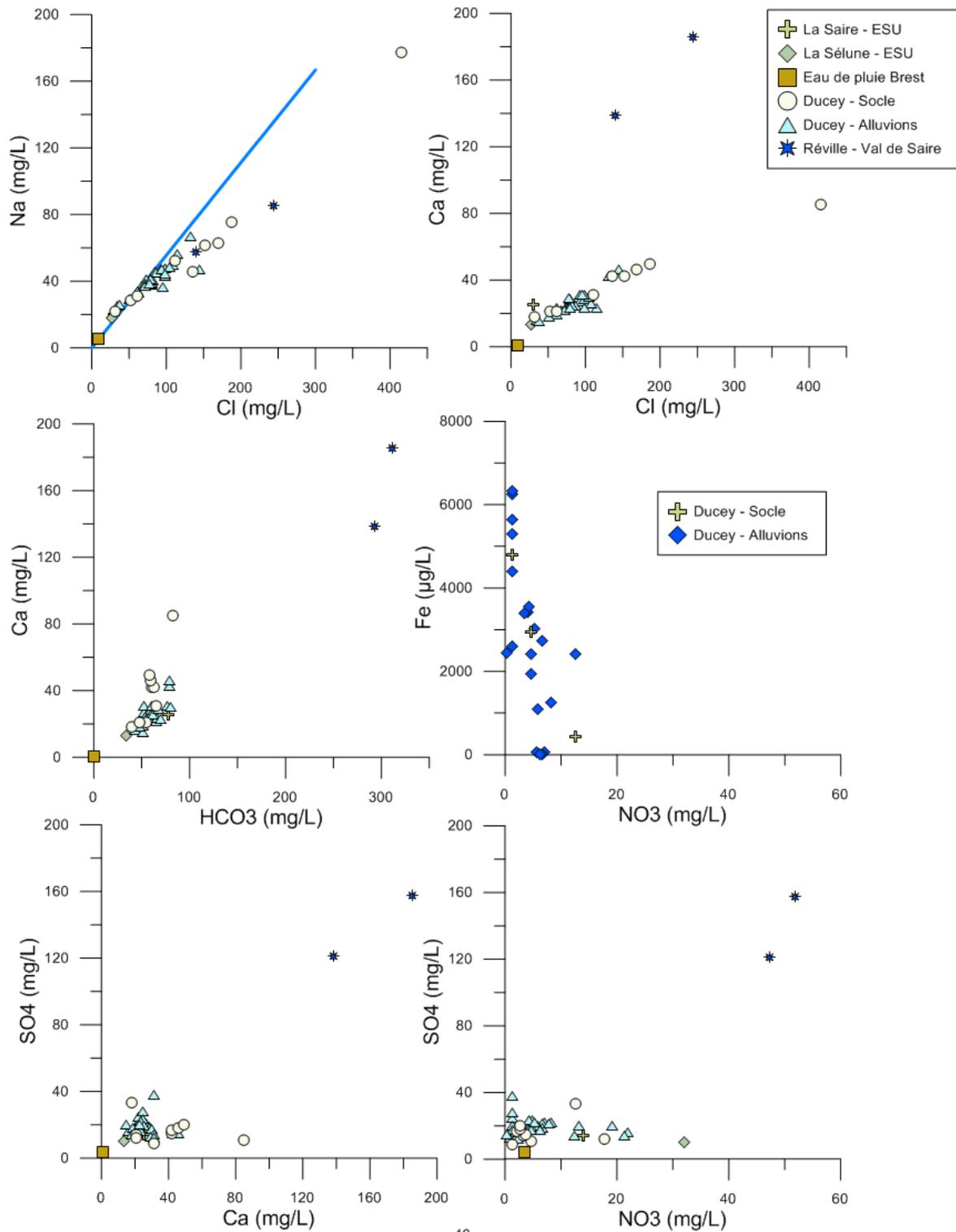


Illustration 59 : Diagrammes a) sodium versus chlorures, b) calcium versus chlorures c) sodium versus bicarbonates d) fer versus nitrates e) sulfates versus calcium f) sulfates versus nitrates pour les en contact avec les terrains Briovérien

Les teneurs en nitrates dans les eaux de surface sont plus élevées.

Le milieu souterrain est probablement dénitrifiant (diagramme f.). La dénitrification se met en place probablement par oxydation de la pyrite (teneurs en sulfates non négligeables) et/ou par oxydation de la matière organique.

Ainsi nous pouvons faire l'hypothèse que dans la vallée de la Sélune, les eaux de l'aquifère du Briovérien alimentent l'aquifère sus-jacent des alluvions. Les teneurs en oxygène dissous sont faibles, le milieu est réducteur, les teneurs en nitrates sont faibles tandis que les concentrations en fer sont élevées.

En conclusion, si on peut indiquer avec certitude qu'il existe bien un phénomène d'intrusion saline aujourd'hui sur le secteur de Ducey, les données hydrochimiques ne permettent toutefois, pas de caractériser, le phénomène et notamment d'indiquer si celui-ci est la résultante d'intrusions marines opérant aujourd'hui ou si d'autres phénomènes doivent entrer en jeu et expliquer le faciès hydrochimique des eaux souterraines. Seule une étude complémentaire ciblée, notamment en exploitant l'outil isotopique, pourra permettre de déterminer l'origine des teneurs en chlorures des eaux souterraines.

6.3. LITTORAL OUEST DE LA MANCHE

6.3.1. Contexte géologique

Des réservoirs d'eau souterraine sont contenus dans les formations dunaires du Quaternaire, qui peuvent être exploités localement pour l'irrigation de cultures maraîchères.

Les aquifères dunaires se situent sur la côte ouest de la Manche, du sud du cap de Flamanville (anse de Sciottot) à la pointe de Champeaux (massif de Carolles), avec des secteurs plus pourvus en points d'eau (d'après la BSS), tels que Surtainville, Créances, Blainville-sur-mer, Bréville-sur-mer. Les cordons dunaires s'étendent sur une bande discontinue pouvant dépasser 2 km de largeur. Ils sont généralement séparés de l'arrière-pays par une dépression occupée par un ruisseau apportant des alluvions modernes argileuses. La granulométrie des sables n'est pas constante, parfois fins, grossiers, coquilliers, voire mélangés avec des galets au contact des formations anciennes sous-jacentes (Dassibat et Pascaud, 1977).

D'après Mazenc, 2006, l'aquifère multicouche, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur au maximum, est constitué par deux horizons de sables coquilliers quaternaires séparés par un niveau de faible perméabilité de tange (argile sableuse). Une coupe géologique d'un ouvrage situé dans la flèche sableuse d'Agon-Coutainville est présentée en Annexe 3, cette coupe montre l'hétérogénéité verticale d'un aquifère dit dunaire.

Deux nappes se distinguent dans un aquifère dunaire (Mazenc, 2006) :

- un aquifère supérieur à nappe libre surmontant l'horizon de tange ;
- un aquifère inférieur à nappe captive compris entre l'horizon de tange et le substratum rocheux (généralement paléozoïque).

C'est principalement l'aquifère inférieur qui est exploité, car il arrive souvent que l'aquifère supérieur s'assèche en été (Mazenc, 2006).

Le cordon dunaire n'étant pas continu, plusieurs nappes de faible extension se distinguent. Il apparaît difficile de réaliser une carte piézométrique, car les variations de cote du toit de la nappe sont faibles par rapport à la topographie (Dassibat et Pascaud, 1977).

Les exutoires naturels de la nappe sont constitués par le ruisseau qui la draine du côté de la terre et par les sources d'estran du côté de la mer (Dassibat et Pascaud, 1977).

Dans l'étude de Dassibat et Pascaud, plus d'une centaine d'ouvrages ont été recensés captant l'aquifère dunaire sur le littoral ouest de la Manche. Un piézomètre, appartenant au réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines mis en place dans le cadre de la DCE (0300000166 – RRESOUPBRGMBNO - Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du BRGM Basse Normandie), suit le niveau d'une nappe située dans un cordon dunaire à Gouville-sur-mer ([01423X0044/F4](#)) (Illustration 60).

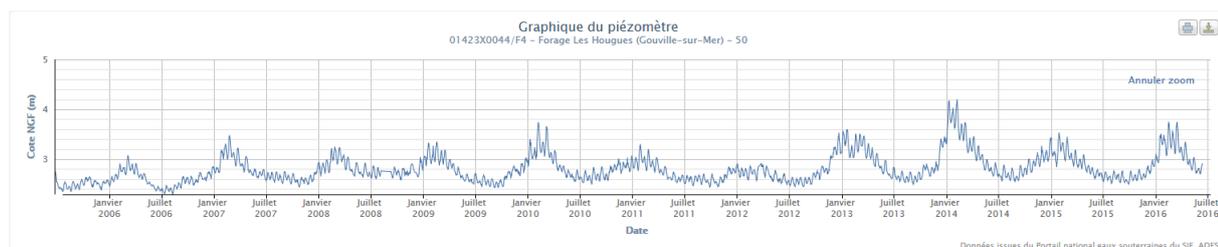


Illustration 60 : Chronique piézométrique entre juillet 2005 et juillet 2016 du piézomètre situé à Gouville-sur-mer (01423X0044/F4), source : ADES

La chronique piézométrique montre des variations saisonnières, avec des niveaux bas en période de basses-eaux (août et septembre) et des niveaux hauts en période de hautes-eaux avec un battement de la nappe annuel d'environ 1 m. La courbe révèle également une cyclicité bimensuelle avec des amplitudes piézométriques d'environ 20 cm. La chronique ne montre pas d'influence quotidienne de la marée, une analyse corrélatoire serait nécessaire.

Ce piézomètre atteint 11 m de profondeur, l'aquifère a une transmissivité de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Cet ouvrage est situé à proximité immédiate d'ouvrages exploités pour l'alimentation en eau potable jusque dans les années 90. Suite à des problématiques d'intrusions salines, leurs exploitations ont été interrompues.

Les transmissivités des formations dunaires varient entre 10^{-1} et $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, d'après les données récoltées en BSS. L'épaisseur de l'aquifère productif est d'environ 3 à 4,5 m (Freslon, 1983).

6.3.2. Caractérisation de l'intrusion saline

En 1983, la DDAF a mené une campagne de recherche d'eau salée sur le littoral du département de la Manche, en vue d'éventuels prélèvements pour un usage aquacole (Freslon, 1983). Des prospections géophysiques et des sondages mécaniques ont été réalisés, des mesures de salinité ont été effectuées dans les eaux souterraines prélevées aux forages, les résultats sont reportés sur l'illustration 61.

Sites	Salinité moy. (‰)
Havre de Blainville	27
Havre de Geffosses	21
Lingreville	20
Agon-coutainville	9
Bricqueville-sur-mer	4

Illustration 61 : Mesures de salinité dans les aquifères côtiers (Freslon, 1983)

Ces résultats montrent une intrusion d'eau de mer significative au niveau des havres de Blainville, de Geffosses et de Lingreville, puisque la salinité de l'eau de mer est d'environ 35 ‰.

Dans l'arrêté préfectoral de 2012 relatif à la définition de seuils pour la mise en œuvre de mesures en période de sécheresse, une liste de 9 piézomètres a été établie pour un suivi de la salinité dans les eaux souterraines par le SILEBAN (Société d'Investissement Légumière et maraîchère de Basse Normandie). Ces piézomètres sont représentés sur l'illustration 62.

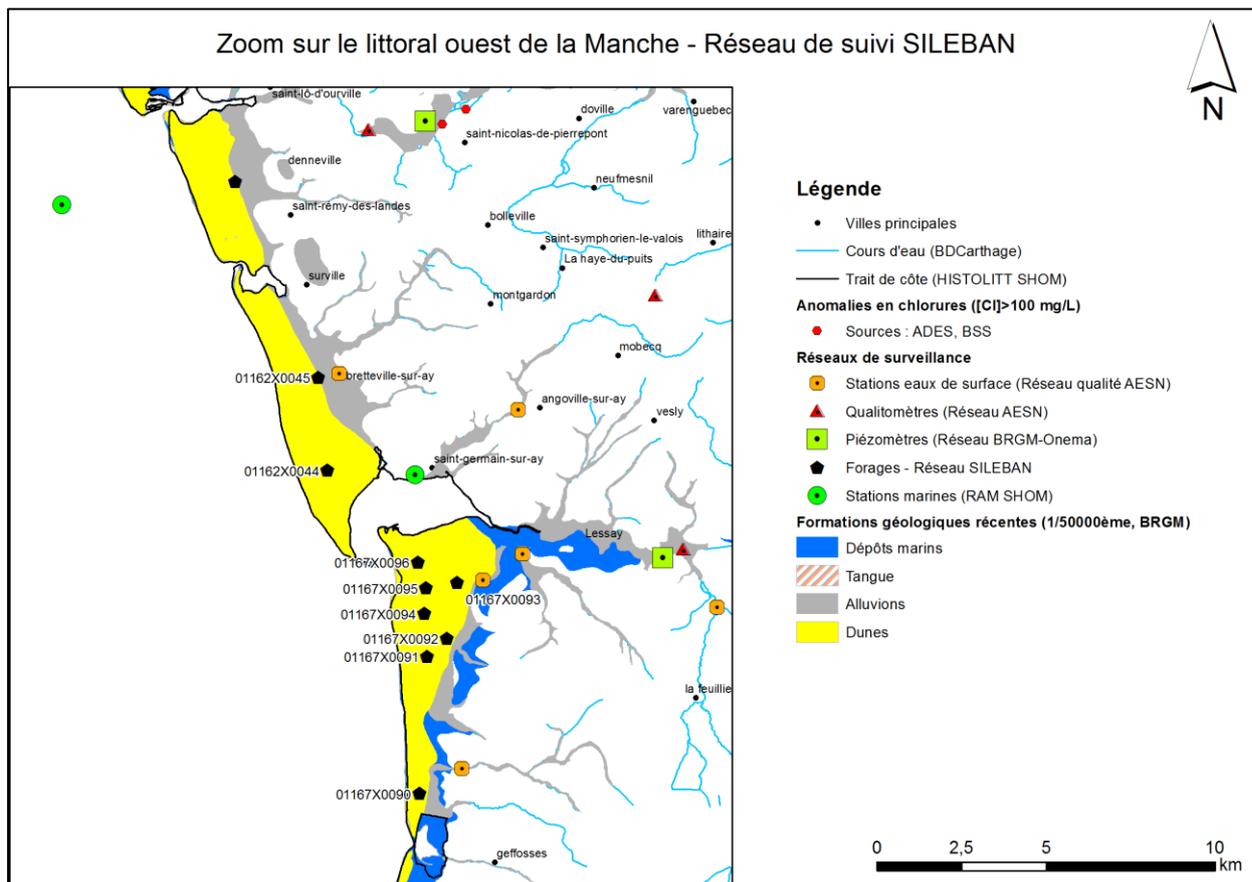


Illustration 62 : Localisation des points de surveillance des intrusions salines du réseau du SILEBAN, zoom sur le havre de Saint-Germain-sur-Ay (Lessay)

Sept piézomètres se situent dans les formations dunaires au sud du havre de Saint-Germain-sur-Ay, 2 piézomètres entre le havre de Surville et de Saint-Germain-sur-Ay et un piézomètre situé sur la commune de Denneville. Au sud du havre, l'aquifère dunaire repose sur les terrains de socle composés de schistes et grès, pouvant être altérés sur les premiers mètres.

Des mesures de conductivité dans chaque forage en fonction de la profondeur sont réalisées tous les mois. D'après les relevés de 2013, 2014 et 2015 fournis par le SILEBAN, seul le forage 01167X0090, situé le plus au sud sur la commune de Pirou révèle des intrusions salines. Les résultats sont représentés ci-dessous.

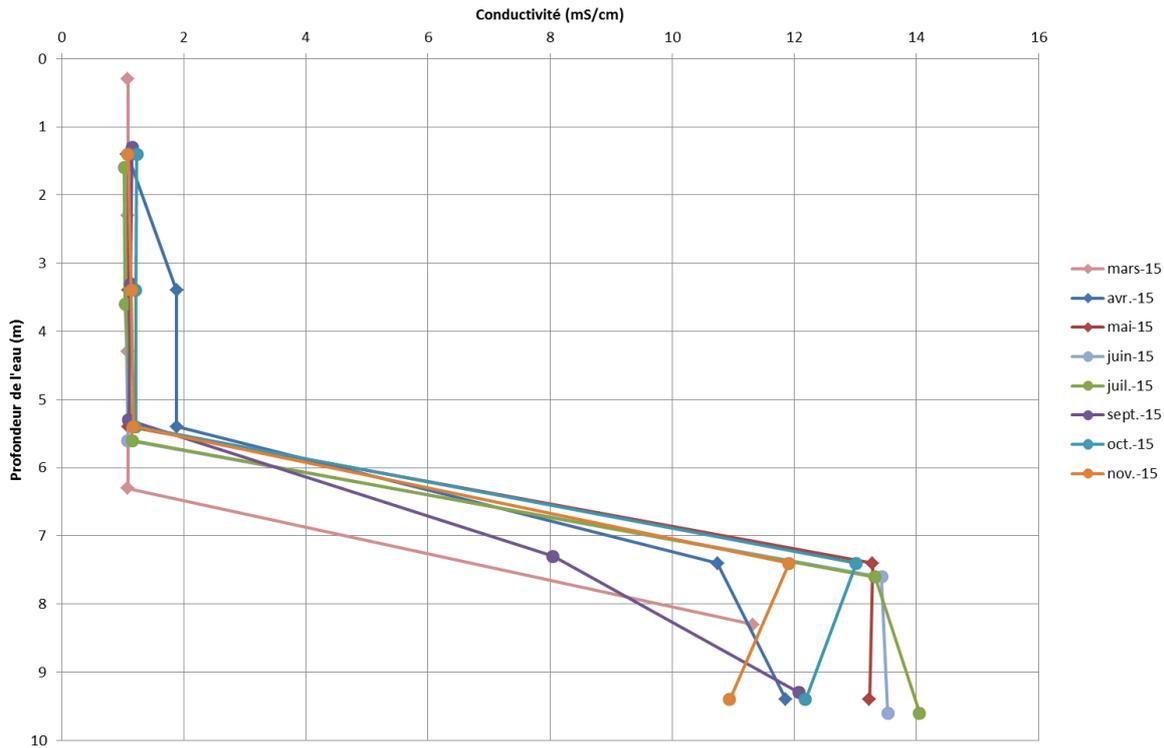


Illustration 63 : Profil de conductivité en fonction de la profondeur – Forage 01167X0090 – Année 2015, source : SILEBAN

La conductivité évolue de moins de 2 mS/cm à 14 mS/cm dans le forage, marquant l'interface eau douce – eau salée entre 5,5 m et 7,5 m de profondeur.

D'après les coupes géologiques des forages à proximité de l'ouvrage 01167X0090, les formations rencontrées sont :

- entre 0-3,5 et 0-5 m de profondeur : sables (dunes)
- entre 3,5-6 et 5-9 m de profondeur : argiles (tange)
- entre 6-13 et 9-15 m de profondeur : sable gris argileux
- entre 13-13,5 et 15-15,5 m de profondeur : argiles à graviers
- à partir de 13,5 et 15,5 m de profondeur : grès (Carbonifère)

D'après ces coupes géologiques approximatives, il semblerait que le biseau salé imprègne l'horizon aquifère captif et l'horizon de tange sous-jacents à l'aquifère libre contenu dans les sables.

Il serait intéressant d'effectuer des mesures de conductivité plus en profondeur pour observer une éventuelle évolution de la conductivité dans les formations de socle.

D'après les données de l'ARS, sur le littoral ouest de la Manche, des captages d'eau potable ont été abandonnés pour cause d'intrusions salines actuelles, à Saint-Jean-de-la-Rivière ([00935X0038/C2](#)) et à Gouville-sur-mer (ce dernier est à 7km au Sud de Pirou). Parmi les forages abandonnés, un est actuellement utilisé comme piézomètre ([01423X0044/F4](#)) (Illustration 64).

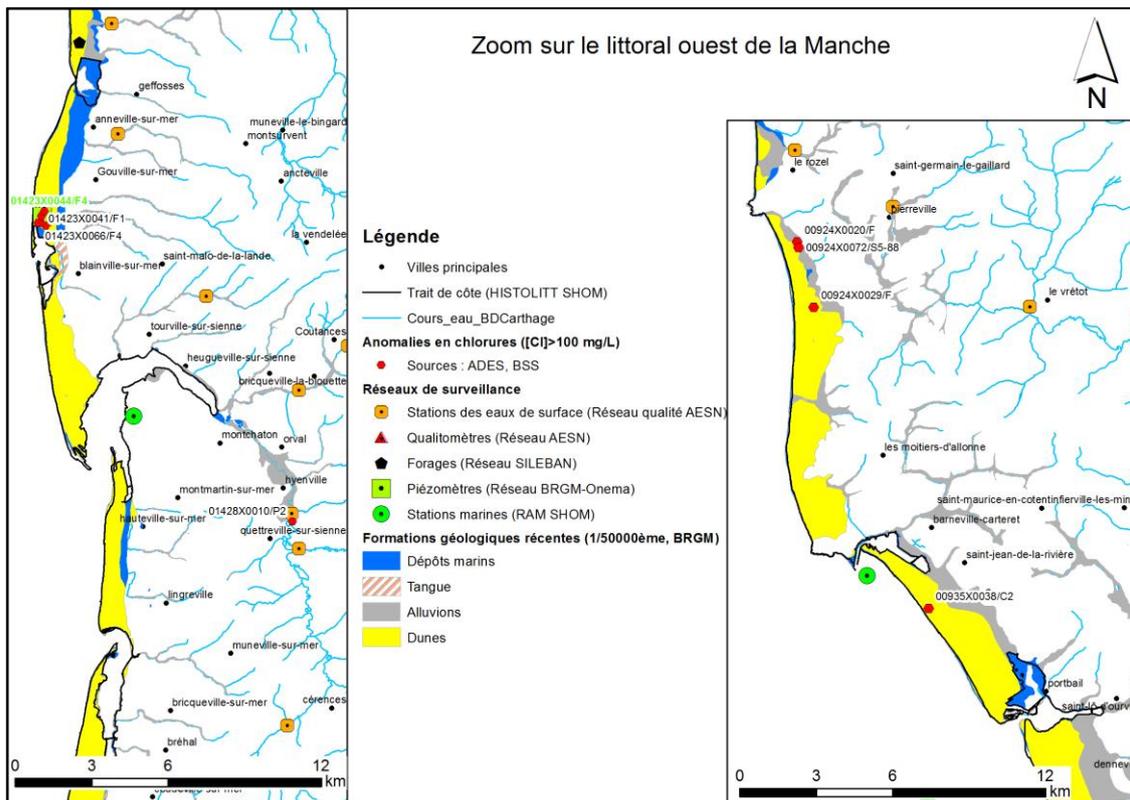


Illustration 64 : Zoom sur deux secteurs de la côte de la Manche avec une anomalie en chlorures

A Quetteville-sur-sienne, un puits ([01428X0010/P2](#)) implanté dans les **alluvions de la Sienne** indique une anomalie en chlorures ([Cl] = 187 mg/L), le prélèvement a été réalisé en 1958. Les concentrations en chlorures des eaux de surface prélevées dans la Sienne sur la période 2010-2015 sont comprises entre 18 et 28 mg/L. Cette anomalie est-elle liée aux échanges eau douce eau salée actuelle ou à une intrusion marine ancienne ? ou encore à une pollution anthropique ?

A Surtainville, trois analyses ont révélé des teneurs en chlorures élevées en 1975, 1976 et 1988, respectivement de 137, 150 et 102 mg/L. Les ouvrages (00924X0020, 00924X0029, 00924X0072) sont situés entre 9 et 12 m de profondeur dans les formations de sables.

Les informations hydrochimiques disponibles actuellement ne permettent pas de conclure quant à l’origine de ces anomalies.

En termes de perspectives, le projet Européen de recherche H2020 (AQUANES), a vocation à fournir des innovations dans le secteur de la gestion de l’eau et des procédés de traitement des eaux usées à travers l’amélioration des combinaisons de systèmes d’ingénierie à procédés multiples avec des systèmes de traitements naturels de l’eau.

Dans ce cadre, le site d’Agon-coutainville constitue un site expérimental. Le site utilise des effluents issus du traitement secondaire après passage en roselière suivi d’une filtration dunaire pour l’irrigation d’un cours de golf en zone littorale. Le site se trouve en contexte d’aquifère côtier contraint par l’intrusion saline. Le bureau d’études Imageau installera un outil de monitoring des eaux souterraines qui permet d’enregistrer et de télétransmettre la conductivité électrique de l’eau, la pression, et la température de l’aquifère autour d’un piézomètre via un grand nombre de points de mesure (jusqu’à 60), permettant ainsi de suivre en continu

l'évolution du biseau salé (cf. chapitre 2.3.2.b). Il sera intéressant d'utiliser ces résultats pour mieux comprendre le phénomène d'intrusions salines dans ce secteur.

6.4. VAL DE SAIRE

6.4.1. Contexte géologique

Les formations volcano-sédimentaires du Briovérien inférieur entaillent en grande partie le bassin versant de la Saire. Ces formations sont affectées par les orogénèses cadomienne et varisque, et sont très schistosées et fracturées. Trois familles de failles, N100-110, N30 et N150, N60 à 85 structurent les formations, liées aux orogénèses cadomienne et varisque (Coutard, 2003). Parmi les intrusions varisques introduites dans les terrains Briovériens, deux faciès de granite ressortent, du côté de Barfleur, un faciès porphyroïde à énormes cristaux de feldspaths ; du côté de Fermanville, un faciès homogène à gros grains (Doré et al., 1987).

Le socle est recouvert par les formations triasiques constituant le substrat des plateaux (Coutard, 2003).

Le littoral du Val de Saire est façonné par le granite. La côte est très découpée, souvent selon des diaclases.

- La côte orientale supporte des plages sableuses reposant sur le platier granitique ou sur des sédiments éémiens ou holocènes (Coutard, 2003). Plus particulièrement, une accumulation sableuse, sous forme de dunes, s'est développée à la pointe de Saire, reposant sur le granite fissuré et fracturé, les altérites ayant été, a priori, décapées.
- Sur la côte nord, des marais littoraux se développent à l'aval des cours d'eau, isolés de la mer par des cordons sablo-graveleux, qui s'amenuisent par l'action des courants marins.

Quatre plateformes étagées, façonnées dans le substrat granitique se distinguent dans le Val de Saire, mises à nu ou recouvertes par des dépôts marins, auxquelles s'ajoute la plate-forme actuelle.

Le réseau hydrographique s'est développé au gré des éléments structurants les formations géologiques (Coutard, 2003). L'estuaire de la Saire permet d'observer le niveau de pleine mer maximum avec la présence de part et d'autre de la porte à flots, du « slikke & schorre ». Sous les sédiments estuariens de la Saire composés de vases, sables, limons plus ou moins riches en matière organique et carbonates (Tangue), il est possible de trouver des colluvions de pente (CFz/y), composés d'altérites remaniées et loess (OE).

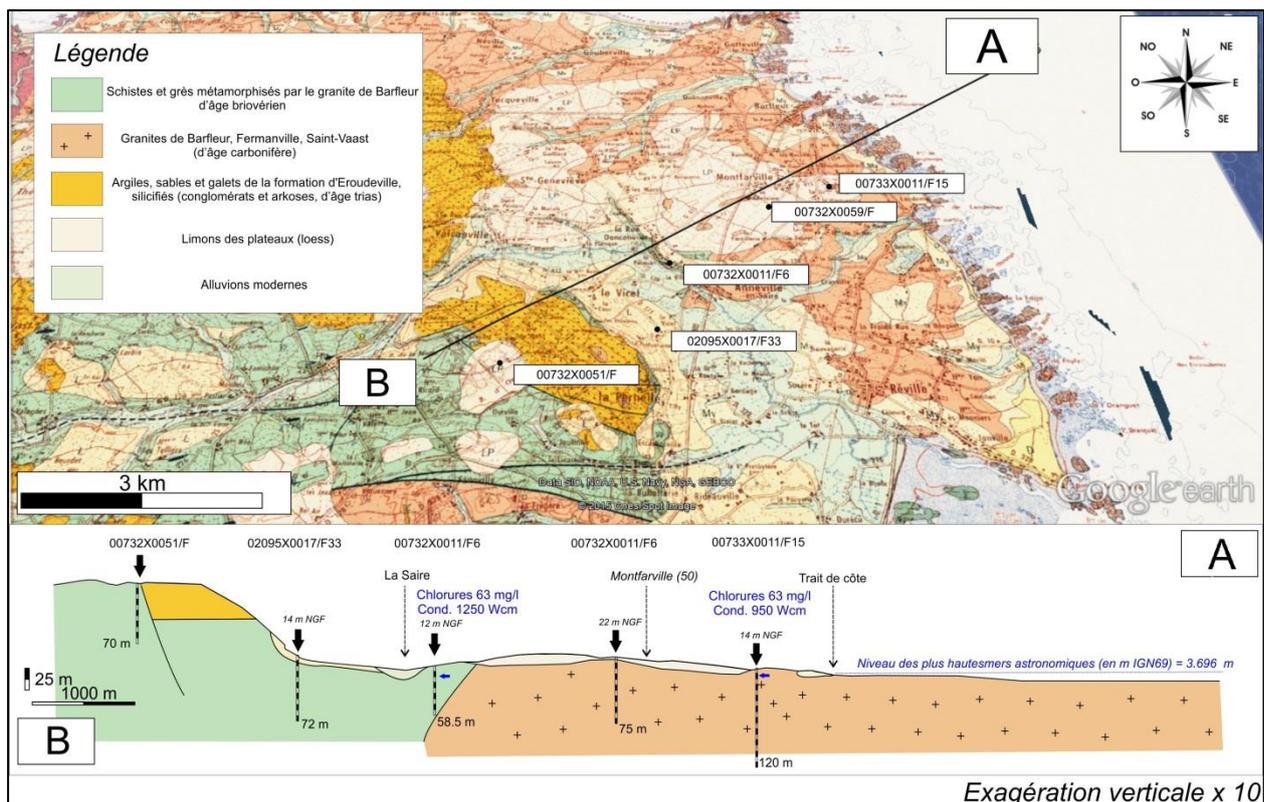


Illustration 65 : Coupe géologique n°5 dans le Val de Saire, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM

Peu d'études présentent les profils d'altérations du granite dans ce secteur, notamment la différence de l'avancée de l'altération ou d'un éventuel profil d'altérations polyphasées, générant un horizon feuilleté plus épais. La différence d'altération entre les schistes et les granites n'est pas documentée. L'altération a un rôle majeur dans l'hydrodynamique des aquifères de socle et dans l'écoulement des eaux douces et eaux salées. Très peu de forages exploitent les eaux souterraines des granites du côté de Fermanville, tandis que celles du granite de Barfleur sont plus exploitées.

L'étude réalisée par Loyant et Freslon, 1998 montre que les arrivées d'eau sont plus profondes et plus localisées dans le granite que dans les schistes. Les zones de recharge se situent sur les reliefs (plateaux de Clitourps et de la Pernelle) recouverts par le Trias. Les eaux s'écoulent vers la mer. En 1998, de fortes teneurs en nitrates étaient mesurées, révélant la vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine vis-à-vis des intrants agricoles.

6.4.2. Caractérisation de l'intrusion saline

Dans le cadre de l'étude réalisée sur les pollutions diffuses à l'échelle du bassin Seine-Normandie (Lopez et al., 2012), des mesures de datations des eaux souterraines ont été réalisées, notamment au point [00732X0014/F10](#), situé à Gatteville-phare sur le site du SILEBAN, appartenant au réseau qualité AESN depuis 2007. Les eaux souterraines prélevées, proviennent du socle granitique hercynien ; l'ouvrage est crépiné entre 35 et 60 m de profondeur. D'après les données ADES, les teneurs en chlorures maximales mesurées s'élèvent à 88,5 mg/L (01/10/2007) et en nitrates à 102 mg/L (14/04/2014). L'âge apparent de l'eau est évalué à 20 ans (campagne d'octobre 2009, interprétation selon un modèle piston).

Quatre anomalies en chlorures ont été détectées sur des ouvrages agricoles d'après les analyses issues de la BSS. La carte de localisation des anomalies en chlorures est présentée en Annexe 4.

- L'ouvrage [00732X0019/F25](#), situé à Sainte-Geneviève, recoupe le granite hercynien fracturé recouvert par 6 m d'arène granitique, le forage est crépiné entre 8 et 52 m de profondeur. Les teneurs en chlorures s'élèvent à 108 mg/L et en nitrates à 221 mg/L (14/09/1988).
- L'ouvrage [00732X0018/F24](#), situé à Gatteville-Phare, recoupe le granite hercynien fracturé, le forage est crépiné entre 21,5 et 73,5 m de profondeur. Les teneurs en chlorures s'élèvent à 116 mg/L et en nitrates à 127 mg/L (14/09/1988).
- L'ouvrage [00733X0009/F13](#), situé à Montfarville, recoupe le granite hercynien fracturé. Les teneurs en chlorures s'élèvent à 101 mg/L et en nitrates à 118 mg/L (02/08/1988).
- L'ouvrage [00733X0004/F2](#), situé à Réville, recoupe le granite hercynien fracturé recouvert par 12 m d'arène granitique, le forage est crépiné entre 8 et 52 m de profondeur. Les teneurs en chlorures s'élèvent à 114 mg/L et en nitrates à 132 mg/L (juillet 1988).

Les données disponibles ne permettent pas d'interprétations plus approfondies, notamment quant à l'origine des chlorures.

Un piézomètre mesure les niveaux d'eaux souterraines dans les altérites du granite depuis 2007. Le puits atteint une profondeur de 5,9 m. Une intervention sur le terrain en juillet 2016 a permis d'effectuer un log de conductivité dans un ouvrage situé à Réville (Illustration 66), dans lequel les arrivées d'eau sont profondes. Dans ce secteur (cf. log géologique en Annexe 3), les terrains du Briovérien s'intercalent entre deux horizons granitiques. Quelques mètres d'arènes granitiques recouvrent ces horizons.

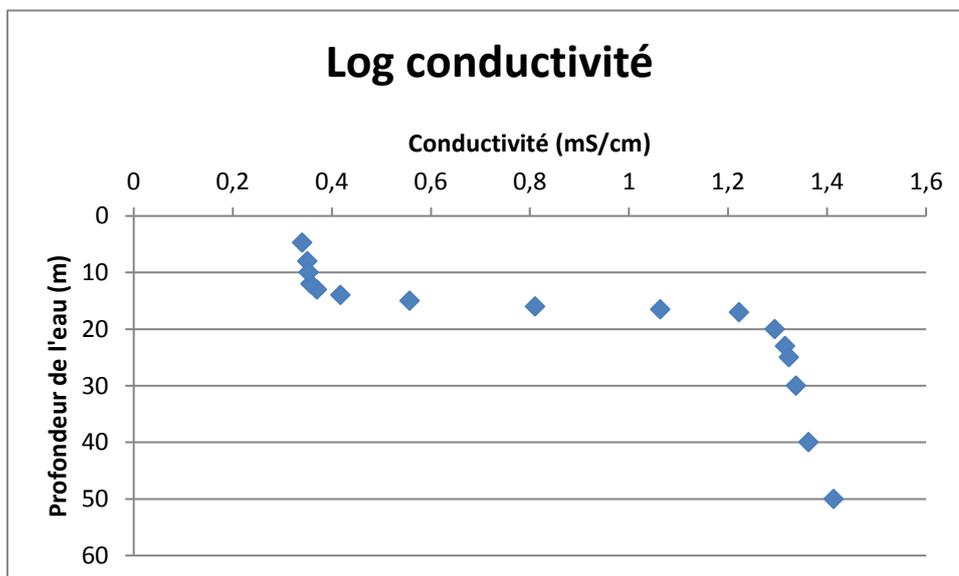


Illustration 66 : Conductivité (en mS/cm) en fonction de la profondeur dans un ouvrage situé à Réville (27/07/2016)

On distingue deux horizons (Illustration 66), un superficiel (entre 0 et 15 m de profondeur) faiblement minéralisé et un horizon plus profond (entre 20 et 50 m de profondeur) fortement minéralisé.

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur le forage investigué, les résultats sont présentés sur l'illustration 59 page 78.

Les eaux provenant du Briovérien sont fortement minéralisées, avec un appauvrissement en sodium par rapport aux chlorures, les teneurs en sulfates sont relativement élevées.

L'origine de cette minéralisation peut être multiple ; elle peut : provenir de fluides profonds circulant dans les formations briovériennes d'origine marine ou non, d'intrusion d'eau de mer actuelle à travers les fissures et fractures.

La diminution des teneurs en minéraux dans l'horizon supérieur peut également être expliquée par des infiltrations d'eau superficielle faiblement minéralisée, générant une dilution des eaux plus profonde.

Des valeurs de fortes conductivités (920 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 2005) dans les formations du Briovérien ont également été mesurées dans un forage situé à Granville ([01727X0123/S3](#)) atteignant une profondeur de 100 m, et positionné à une altitude de 34 m NGF. D'après le rapport de sondages (Lithologic, 2005), l'effet d'un biseau salé est peu probable vu la distance à la côte (environ 1 km), en revanche la nature des terrains briovériens traversés, laissant circuler des fluides minéralisés d'origine marine ou non, pourrait expliquer une forte minéralisation de l'aquifère. Cette hypothèse est également posée pour expliquer les fortes teneurs en chlorures dans les formations du Briovérien dans la vallée de la Sélune (cf. paragraphe 6.2).

D'après les travaux de recherche menés par l'université de Rennes 1 (Armandine les Landes, 2016, Aquilina et al., 2015), les transgressions marines au Mio-Pliocène du massif armoricain seraient à l'origine de la salinisation des eaux profondes par un processus de diffusion (durant 2 à 5 Ma). Après le dernier maximum glaciaire, la rupture du permafrost aurait permis des circulations rapides et brutales d'eau de mer dans les grandes zones de failles.

Pour conclure, plusieurs hypothèses sont posées pour expliquer les fortes teneurs en minéraux dans les terrains Briovérien rencontrés dans la vallée de la Sélune, dans un ouvrage à Granville et dans le val de Saire :

- Eaux profondes salées d'origine marine, liées aux transgressions du Mio-Pliocène et à la rupture du permafrost après le dernier maximum glaciaire du Würm, circulant dans la matrice rocheuse et dans les fractures (Armandine les Landes, 2016, Aquilina et al., 2015) ;
- Eaux profondes salées d'origine non marine (évaporites, filons de minéraux précipités dans les fissures et fractures) ;
- Intrusion d'eau de mer (subactuelle et/ou ancienne) par les zones de failles.

Quant aux ouvrages situés dans les formations granitiques entaillées par des petits cours d'eau côtiers dans le val de Saire, les chlorures peuvent être de plusieurs origines :

- Eaux profondes salées d'origine marine ou non marine ;
- Intrusion d'eau de mer par les zones de failles ;
- Intrusion d'eau de mer pénétrant dans les alluvions des petits cours d'eau côtiers, en contact avec le granite sous-jacent.

Des investigations complémentaires (analyses physico-chimiques et isotopiques) seraient nécessaires pour comprendre les processus en jeu dans la salinisation de l'aquifère de socle dans ce secteur en particulier.

6.5. BASSINS SEDIMENTAIRES DU CENOZOÏQUE – SEUIL DU COTENTIN

6.5.1. Contexte géologique

Dans la zone centrale de l'isthme du Cotentin, les formations sédimentaires d'âge cénozoïque ont été mises en évidence dans différents bassins s'étendant sur 50 à 100 km², avec des épaisseurs comprises entre 15 et 160 m. L'encaissant de ces bassins est constitué par des formations briovériennes et paléozoïques, et par des formations permienues, triasiques et liasiques.

Le **bassin de Sainteny-Marchésieux**, le plus vaste, est composé de deux sous-bassins séparés par la ligne de partage des eaux souterraines. Le bassin est composé de formations plio-pléistocène (faluns de Bohon et de Bléhou, complexe du Bosq d'Aubigny, grès de marchésieux, sables de st-vigor pour les principales), reposant sur les formations du Briovérien (paléovolcanique, métasédimentaire) au sud et triasiques. Les faluns constituent un aquifère local d'importance stratégique. Les marais du Cotentin sont l'exutoire de la nappe qui s'écoule en direction de la baie des Veys au Nord-Est. Le gradient hydraulique est très faible. La transmissivité varie entre 10⁻¹ et 10⁻² m²/s dans les faluns, aquifère exploité dans le sous-bassin de Sainteny.

Le **bassin de Lessay** (cf. coupe géologique Illustration 67), situé dans la basse vallée de l'Ay, ce bassin d'une surface de 18 km² est constitué d'un empilement de formations sablo-graveleuse, plus ou moins argileuses, datées du plio-pléistocène. Les valeurs de transmissivité sont comprises entre 10⁻³ et 10⁻² m²/s (Vernoux, 2000). Une mesure de datation des eaux souterraines a été réalisée au point 01168X0005 (AEP – Créances) dans le cadre de l'étude réalisée sur les pollutions diffuses à l'échelle du bassin Seine-Normandie (Lopez et al., 2012). L'âge des eaux souterraines est estimé à 1988 (eaux jeunes - campagnes 2010, interprétation selon un modèle piston).

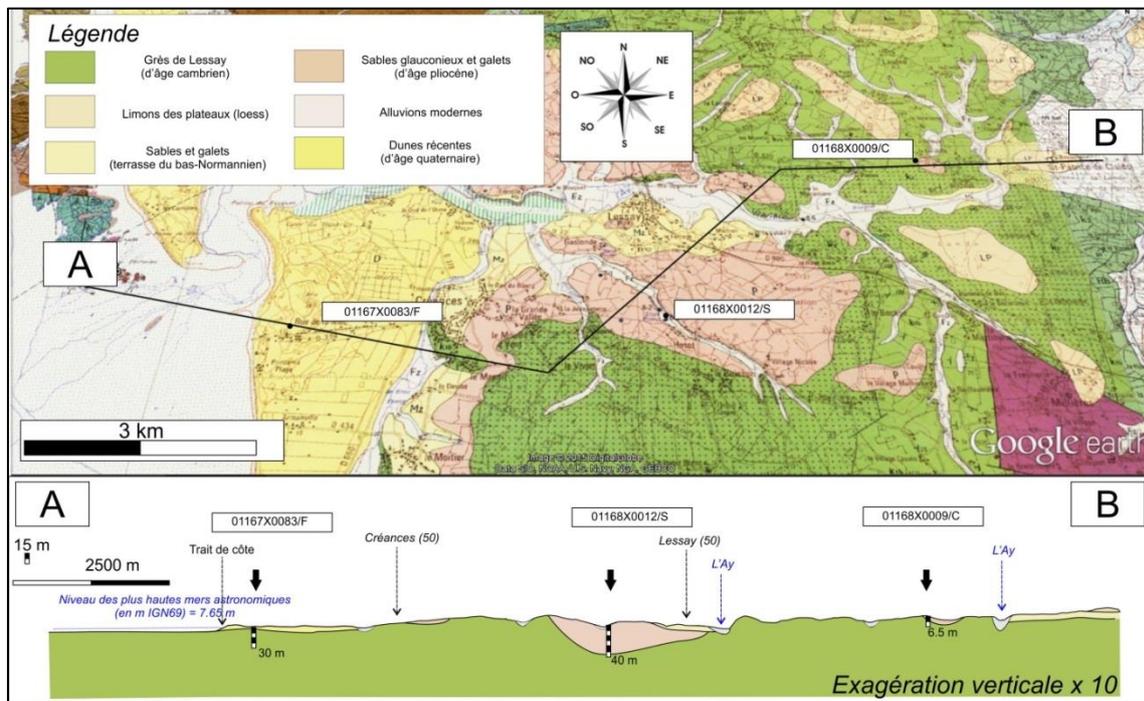


Illustration 67 : Coupe géologique n°2 – Secteur havre de Saint-Germain-sur-Ay (Lessay), sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM

Le **bassin (ou sillon) de Saint-Sauveur-le-Vicomte**, localisé dans une zone de marais (marais de la Sangsurière) à l'ouest et dans la vallée de la Douve à l'est, sa surface est de 45 km². Ce bassin est constitué d'un remplissage de sables plio-pléistocène avec de nombreuses variations latérales, dont la partie occidentale est mal connue (Illustration 68). Les valeurs de transmissivité sont comprises entre 10⁻³ et 5.10⁻² m²/s. Il semblerait qu'un axe de drainage de l'aquifère soit marqué le long des cours d'eau. Par ailleurs, il pourrait exister une continuité hydraulique entre les formations du plio-quaternaire et les formations liasiques et triasiques à l'est du bassin (Vernoux, 2000).

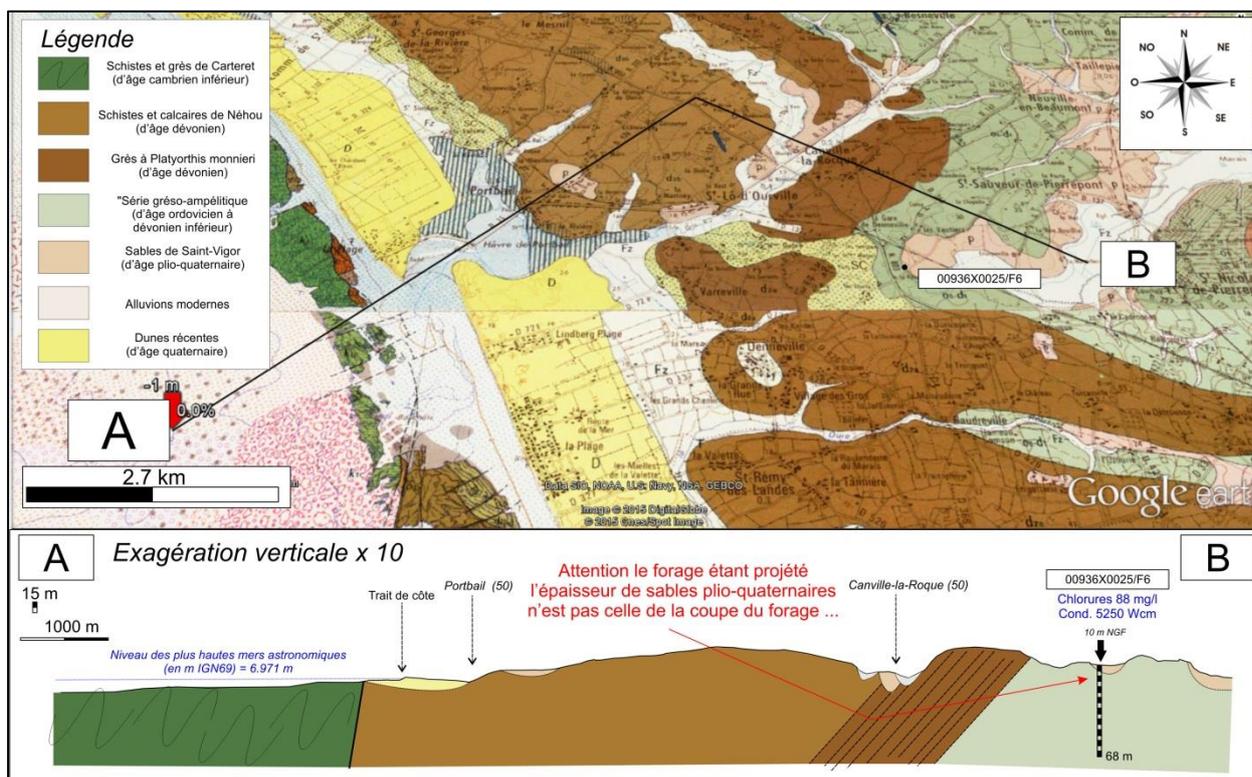


Illustration 68 : Coupe géologique n°3 dans la havre de Portbail et le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte, sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000ème, BRGM

Le **bassin du Merderet** se situe dans l'axe du bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte. Le bassin de faible étendue (12.5 km²) est situé dans la vallée du Merderet. Le remplissage est constitué de faluns miocènes et éocènes et des formations sableuses du Plio-pléistocène. L'encaissant est constitué par des schistes et grès du Paléozoïque, par le Trias (faciès variés), par des dépôts du Crétacé et du Jurassique (Calcaires du Lias). Des incertitudes demeurent quant à l'extension des faluns et ses relations avec l'aquifère du Trias. Les valeurs de transmissivité varient entre 10⁻⁴ et 10⁻² m²/s (Vernoux, 2000).

6.5.2. Caractérisation de l'intrusion saline

La carte de localisation des anomalies en chlorures est présentée en Annexe 4 et la liste des points en Annexe 2.

Des anomalies en chlorures ont été détectées dans le bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte, captant des formations de sables et de faluns du néogène et reposant sur les schistes du Dévonien. Le bassin est bordé par des plaquages des sables de Saint-Vigor, datés du Pléistocène. La nappe est captive, d'après le piézomètre situé à Saint-Sauveur-de-Pierrepont ([00937X0030/F4](#)), l'amplitude annuelle atteinte par les variations du niveau de nappe est d'environ 1 m.

L'illustration 69 présente les analyses mesurées **dans les eaux de surface** situées au droit du bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte (Le Gorget) et à proximité des ouvrages à Saint-Nicolas-de-Pierrepont. Les analyses en sodium et en chlorures issues d'ADES, pour les points situés à Saint-Nicolas-de-Pierrepont (bassin de Saint-Sauveur-le-Vicomte) se positionnent au-dessus de la droite de dilution de l'eau de mer.

Les eaux souterraines sont enrichies en sodium, le processus majeur en jeu semble être les interactions eau-roche. Les faibles teneurs en nitrates, et de fortes teneurs en fer (entre 800 et 2500 µg/L) indiquent l'existence probable d'une zone de dénitrification.

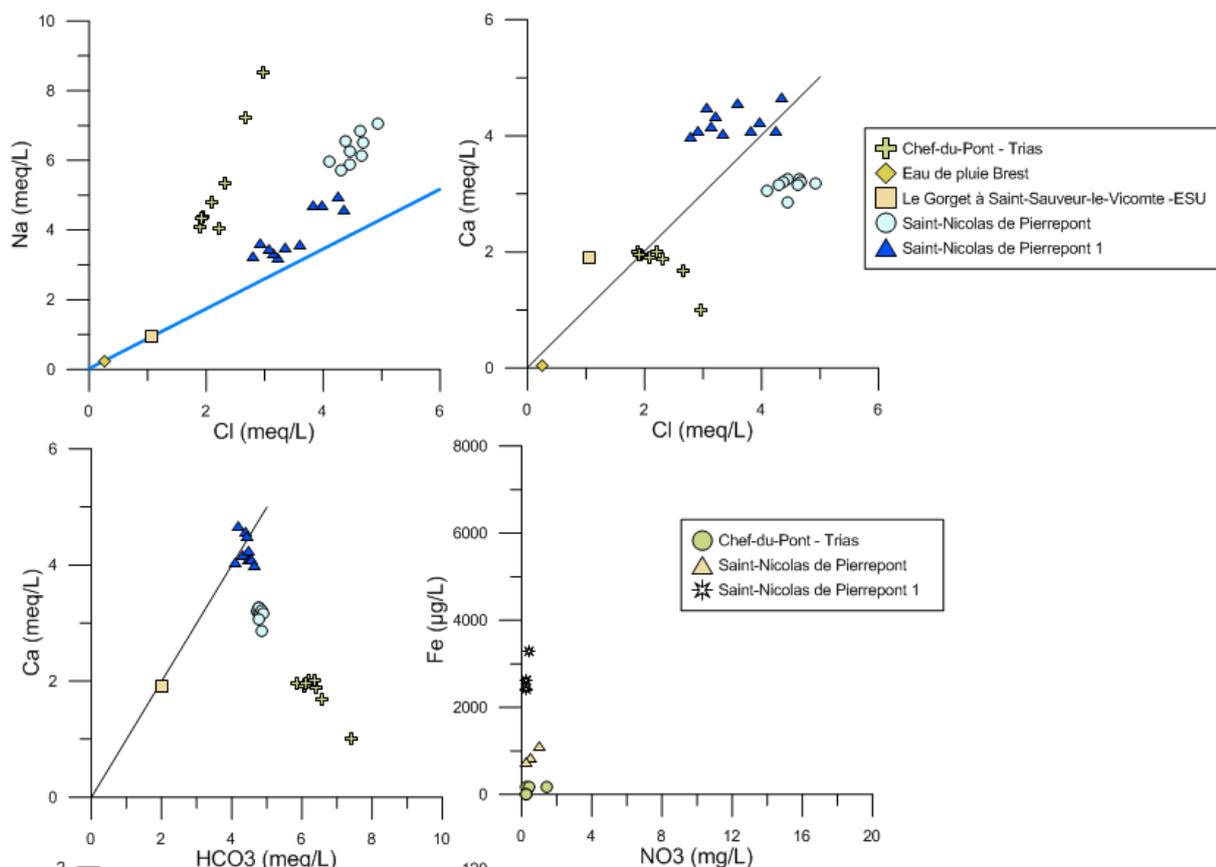


Illustration 69 : Rappports inter-éléments pour les points avec une anomalie en chlorures dans le secteur du seuil du Cotentin (en bleu : droite de dilution de l'eau de mer, en noir : droite de mélange 1 : 1)

Des anomalies en chlorures ont été mesurées dans un ouvrage souterrain (00946X0035/F3) situé à Chef-du-Pont dans la vallée du Merderet, en bordure du bassin sédimentaire. Ce forage

recoupe le Lias (Hettangien) et le Trias. Deux autres ouvrages (00946X0003/F et 00946X0005/F1), situés sur la même commune et recoupant également le Lias et le Trias ont révélé des teneurs en chlorures proches de 100 mg/L (données BSS, analyses à la création du forage). D'après l'illustration 69, les eaux souterraines dans l'ouvrage de Chef-du-Pont sont enrichies en sodium, probablement lié à une interaction eau/roche. Les teneurs en nitrates sont quasiment nulles.

Sur le bassin de Sainteny, les interactions avec les eaux superficielles et l'influence des portes à marées restent à préciser pour appréhender le processus.

Dans ces deux bassins sédimentaires, les chlorures semblent être d'origine marine, l'hypothèse faite est que l'intrusion serait probablement ancienne, ou liée à des dépôts marins du Quaternaire. Les éléments hydrochimiques actuels ne permettent pas de vérifier cette hypothèse.

6.6. LE PLAIN LITTORAL

6.6.1. Contexte géologique

Sur la côte Est du département de la Manche, le Plain littoral s'étend depuis le flanc sud du synclinal de Montebourg jusqu'à la baie des Veys. Sur une largeur d'environ 2km, se développe un système de marais arrière-littoraux installés sur quelques mètres d'épaisseur d'alluvions et de sables littoraux quaternaires.

Ces formations superficielles recouvrent la plupart du temps des formations marno-calcaires liasiques (Sinémurien – Pliensbachien) qui latéralement, arment le faible relief qui borde à l'ouest les marais du littoral du Plain (Illustration 70).

Localement, les dépôts quaternaires peuvent surmonter directement les formations paléozoïques (schistes reconnus par sondages), probablement à la faveur de paléoreliefs hérités de l'histoire post-hercynienne.

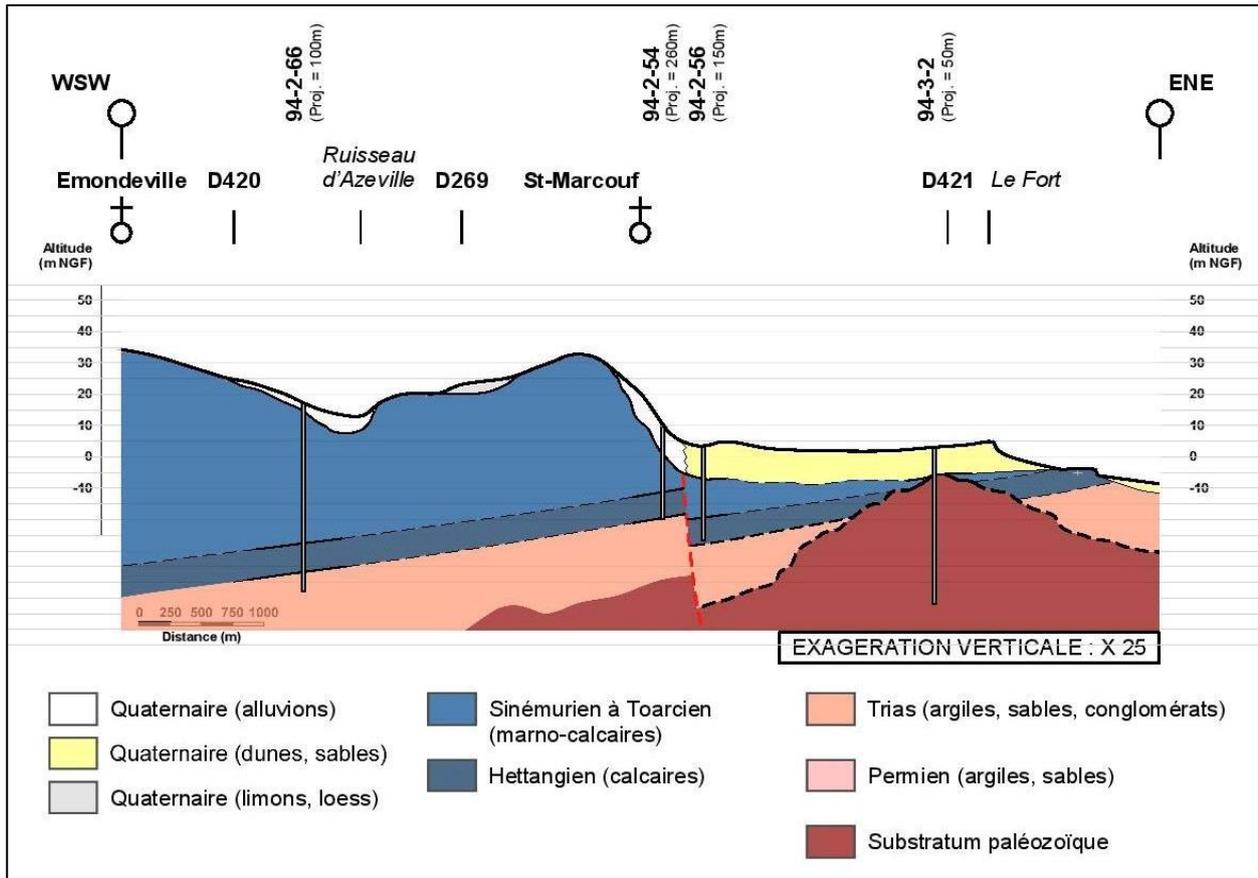


Illustration 70 : Coupe géologique n°6 du plain littoral dans l'est du département de la Manche (codes BSS raccourcis)

6.6.2. Caractérisation de l'intrusion saline

Aucune étude hydrogéologique de synthèse n'a été collectée pour ce secteur. Moins de 10 forages d'eau sont recensés en BSS au niveau du plain littoral.

Dans le secteur du Plain littoral dans l'est du Cotentin, les formations du Quaternaire, composées d'alluvions et de colluvions nappant les pentes, et de dunes et sables littoraux flamands au droit des marais actuels, sont probablement impactées par des intrusions salines actuelles. Il est également possible que ces dépôts renferment des eaux salées, datant de leurs mises en place.

Par contre, vu la coupe géologique (Illustration 70) du secteur, en particulier les relations géométriques entre le Quaternaire, le substratum liasique et la faille supposée de pied de paléofalaise, on peut considérer que la formation marno-calcaires du Sinémurien isole les aquifères sous-jacents des calcaires hettangiens et les grès conglomératiques triasiques.

Ces formations liasiques (hettangiens) et triasiques ne sont donc a priori pas impactées par une intrusion saline, qui aurait pénétré à travers les dépôts du Quaternaire.

Les formations de l'Hettangien affleurant sur l'estran (notamment au large de Saint-Florel), l'eau de mer peut pénétrer dans l'aquifère sous forme de biseau salé. Localement, il est possible que le biseau salé soit bloqué par un paléorelief, d'après la coupe géologique (Illustration 70), néanmoins ce paléorelief est une interprétation proposée à partir des

informations fournies par trois sondages. Dans l'état actuel des connaissances, ce paléorelief ne peut raisonnablement être considéré que comme un objet local, d'extension limitée et par conséquent, cette barrière au biseau salé ne concerne pas l'ensemble du littoral du Plain.

En tout état de cause nous ne disposons pas d'éléments de mesure (chimiques ou géophysiques) sur ce secteur permettant de caractériser les mécanismes en jeux et les hypothèses évoquées plus avant.

En revanche, de fortes conductivités ont été mesurées dans les eaux de surface. D'après les données du parc naturel régional des marais du Cotentin et du Bessin (PNR MCB), les valeurs maximum mesurées dans le cours d'eau By en aval et Orgueil en aval sont d'environ 56 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ces valeurs sont équivalentes à celles de l'eau de mer, on peut envisager un phénomène de rentrant salé, bien que ces cours d'eau soient équipés de clapets ou portes à flots, mais là également les données ne permettent pas de conclure quant à une éventuelle généralisation de la contamination des ruisseaux côtiers et d'un potentiel transfert vers l'aquifère sous-jacent.

6.7. BASSE VALLEE DE L'AURE

6.7.1. Contexte géologique

La **basse vallée de l'Aure**, située dans le Calvados en marge du Massif Armoricaire, est constituée de terrains quaternaires (tourbes, argiles, sables). L'encaissant est composé au nord par les calcaires du Lias et au sud par les calcaires, conglomérats et grès du Trias. Les alluvions quaternaires sont parfois très difficiles à distinguer du Trias en place, car souvent constitués de matériaux hérités du Trias. Les faciès grésos-conglomératiques triasiques ont les caractéristiques sédimentologiques de chenaux fluviaux peu épais et d'extension latérale limitée (Illustration 73 page 97).

Dans le Trias, les valeurs de transmissivités varient entre 10^{-2} et 10^{-3} m^2/s (Vernoux, 2000). Au niveau de la vallée de l'Aure, les niveaux piézométriques dans le Trias sont proches du niveau de la mer (Vernoux, 2000).

6.7.2. Caractérisation de l'intrusion saline

Dans la vallée de l'Aure, 5 points ont révélé des anomalies en chlorures ; à ceux-ci s'ajoutent deux points situés en bordure du bassin de l'Aure, dans la vallée de la Vire (Illustration 71). Tous ces points recoupent le Trias.

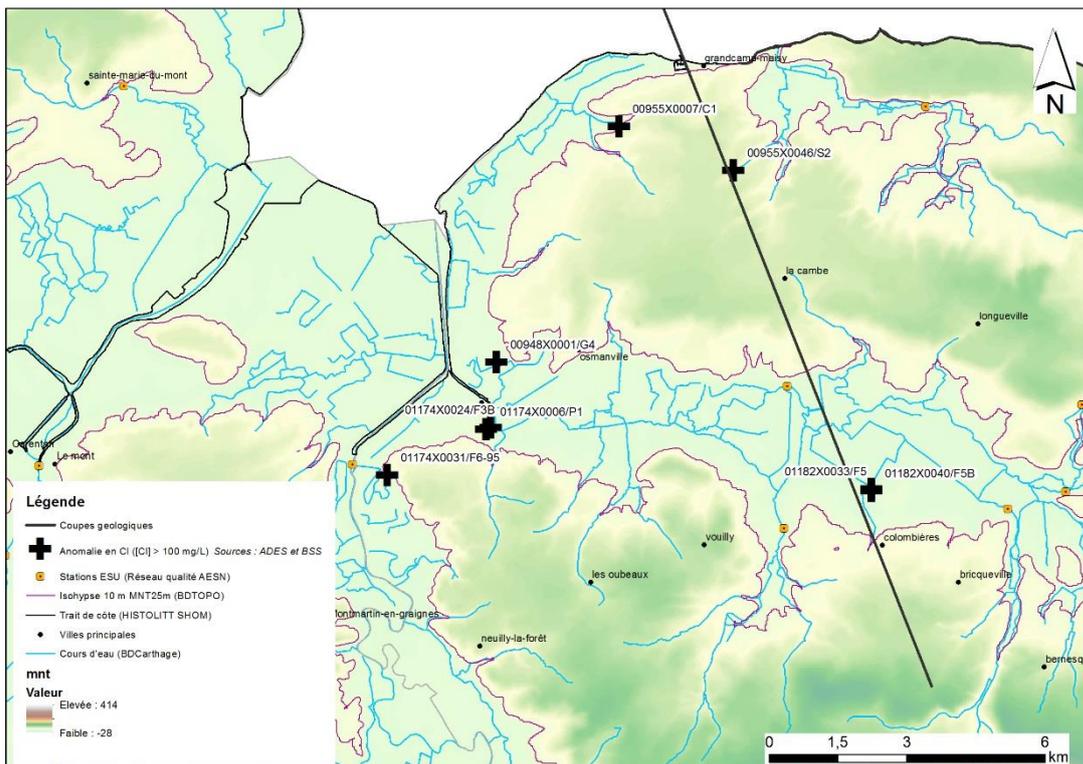


Illustration 71 : Localisation des points présentant une anomalie en chlorures dans la basse vallée de l'Aure

Dans la vallée de l'Aure, deux ouvrages situés à Colombières ([01182X0040/F5B](#) et [01182X0033/F5](#)) recoupent le Trias.

- L'ouvrage 01182X0033/F5 recoupe également le Trias entre 1 et 15 m de profondeur, dont 6 m d'argiles attribuées au Trias en subsurface.
- L'ouvrage 01182X0040/F5B, utilisé pour l'AEP, recoupe le Trias entre 1 et 26 m de profondeur, constitué de sables et galets avec quelques passes argileuses et révèle des teneurs en chlorures comprises entre 141 et 169 mg/L (données ADES suivi 1995-2013). Le forage 01182X0040/F5B présente de fortes teneurs en nitrates (environ 30 mg/L), pouvant expliquer de fortes teneurs en chlorures. D'après le diagramme Na versus Cl, sur l'illustration 72 page suivante, sur lequel les points se positionnent sur la droite de dilution de l'eau de mer, il y aurait un mélange des eaux souterraines avec l'eau de mer.

Dans la vallée de l'Aure, l'ouvrage situé à Isigny-sur-mer ([01174X0006/P1](#)) est un vieux puits maçonné et atteint 10 m de profondeur. Il était utilisé autrefois pour l'AEP. Il atteindrait les formations triasiques. D'après les données dans ADES entre 1992 et 2007, la concentration médiane en chlorures s'élève à 47,8 mg/L, néanmoins les eaux ont atteint 154 mg/L en chlorures en 1992. L'ouvrage [01174X0024/F3B](#) situé également à Isigny-sur-mer avait un usage industriel, il est abandonné. Il recoupe le Trias, constitué de calcrètes et bancs argileux entre 14 et 20 m de profondeur, les formations Triasiques sont sous-recouvrement Flandrien, 14 m de dépôts fluviomarins. Une analyse réalisée en septembre 1992 indique une teneur de 317 mg/L (source : BSS) dans les eaux de cet ouvrage.

Le forage d'eau [00948X0001/G4](#), situé à Osmanville capte le Trias entre 28 et 35 m de profondeur. Les formations Triasiques sont recouvertes par 15 m de dépôts du Quaternaire puis 10 m de sables et argiles attribués à l'Hettangien. Une analyse réalisée en février 1968 indique une teneur en chlorures de 2410 mg/L et en sodium de 1240 mg/L (source : BSS).

Dans la vallée de la Vire, à la limite d'affleurement entre le Trias et les dépôts Quaternaire, un ouvrage [01174X0031/F6-95](#), à usage industriel, situé à Isigny-sur-mer capte le Trias d'une puissance de 30 m sous recouvrement de dépôts Quaternaire. Une nappe fluviale est probablement contenue dans ces dépôts remaniant les argiles rouges du Trias. Une analyse d'eau réalisée en 1995 indique une teneur en chlorures de 139 mg/L.

L'illustration 72 page suivante représente sur un diagramme le rapport molaire Na/Cl pour différents pôles :

- Pole eau de pluie, [Cl⁻] = 9 mg/L
- Pole eau de mer, [Cl⁻] = 19353 mg/L
- Pole eau de surface - amont, [Cl⁻] médiane = 37 mg/L
- Pole eau douce – Trias aval, [Cl⁻] = 40 - 50 mg/L

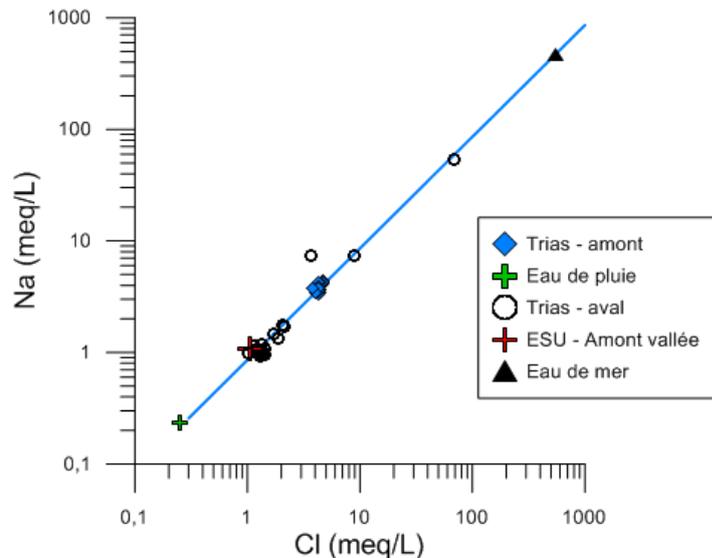


Illustration 72 : Rapport molaire Na/Cl dans les eaux du secteur de la basse vallée de l'Aure (en bleu : droite de dilution de l'eau de mer)

On observe que les points situés en amont de la basse vallée de l'Aure se rapprochent du pôle eau de mer, et ponctuellement quelques analyses du pôle eau douce en aval (points situés à Isigny-sur-mer, Osmanville) se déplacent vers le pôle eau de mer ; ceci est lié très probablement à des prélèvements mettant ainsi en évidence une intrusion d'eau de mer actuelle, contrairement à la partie amont de la basse vallée qui serait impactée par des eaux saumâtres anciennes.

Synthèse

La basse vallée de l'Aure possède une configuration favorable aux intrusions salines. En effet les points se situent dans une zone basse topographique, avec un faible gradient hydraulique. Les zones de recharge de l'aquifère du Trias semblent restreintes, associées à un faible apport d'eau douce. La charge d'eau salée est d'autant plus difficile à chasser dans ce type de configuration.

En amont de la vallée, il est probable que les formations du Quaternaire renferment une eau saumâtre ancienne, en contact localement avec l'aquifère du Trias sur la bordure du bassin de l'Aure. Les forages situés dans le Trias pourraient également faire appel aux eaux de surface contenues dans le marais, notamment lors de prélèvements.

En aval de la vallée, au niveau de la Baie des Veys, l'hypothèse proposée est celle d'un phénomène de biseau salé du fait de la proximité avec l'eau de mer, notamment lorsqu'un pompage d'eau souterraine est en cours. L'avancée du biseau salé pourrait alors être influencée par les pompages dont le rayon d'action atteint la mer ou par l'influence des portes à flots installés sur les cours d'eau.

Par contre, il apparaît difficile d'appréhender les intrusions salines dans les formations mésozoïques sous-jacentes aux dépôts quaternaires dans la baie des Veys. En effet, la géométrie des formations géologiques au droit de la vallée n'est pas assez connue.

En tout état de cause des sondages de reconnaissance couplés à une campagne géophysique et des analyses physico-chimiques seraient nécessaires pour aller plus loin dans la connaissance et la caractérisation du phénomène.

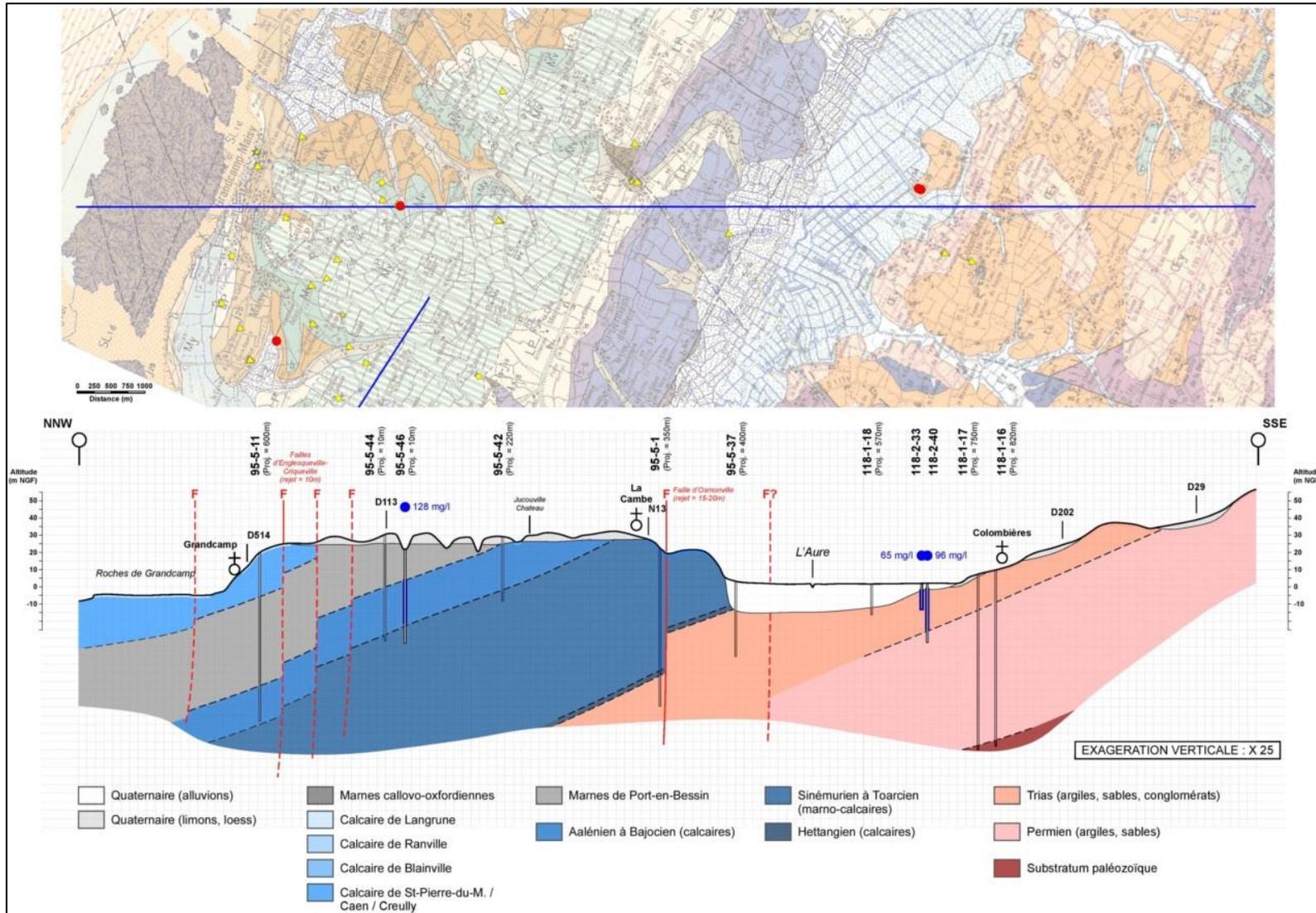


Illustration 73 : Coupe géologique n°7 à l'est de la baie des Veys

6.8. LITTORAL DU BESSIN

La côte du Bessin s'étend de la Baie des Veys jusqu'à l'embouchure de la Seulles, cours d'eau séparant le Bessin de la plaine de Caen.

La carte de localisation des anomalies en chlorures est présentée en Annexe 4. La liste des ouvrages impactés et les informations associées sont visibles en Annexe 2.

6.8.1. Secteur de Grandcamp-Maisy

Contexte géologique

Dans le secteur de Grandcamp-Maisy (Illustration 73 page précédente), les calcaires du Bathonien, surmontant les marnes de Port-en-Bessin, forment les falaises littorales reconnues à l'est et le plateau situé immédiatement en arrière. En s'avancant dans les terres en direction du sud, les calcaires bathonien laissent place à la formation marno-calcaires de Port-en-Bessin, puis aux calcaires du Bajocien. Malgré une couverture loessique bien développée sur l'ensemble du plateau situé en arrière du littoral, des formations sableuses quaternaires à galets sont reconnues localement (Maisy, Deux-Jumeaux), en contact direct avec le substratum jurassique. Ces formations superficielles (formation de Deux-Jumeaux ; Fily et al., 1989) sont interprétées comme des dépôts marins du Quaternaire ancien et auraient une extension bien plus importante que celle suggérée par les affleurements (Fily et al., 1989).

D'après Dassibat et al., 1976, les formations marines du Quaternaire ancien recouvrant les terrains jurassiques s'étendent depuis Gefosse-Fontenay et Cricqueville puis entre Deux Jumeaux jusqu'à la ferme de Montigny (00956X0055/S1). L'épaisseur de ces sables marins à graviers et galets peut atteindre 8 à 10 mètres. Une nappe, dont les caractéristiques physico-chimiques restent inconnues, serait contenue dans ces formations peu épaisses mais très perméables et alimenterait la nappe sous-jacente contenue dans les formations du Jurassique (Dassibat et al., 1976).

Cette nappe perchée localisée au sein des sables marins de la formation de Deux-Jumeaux pourrait constituer un vecteur préférentiel d'infiltration d'eau de mer ancienne, mais aussi actuelle en bordure de la côte.

Caractérisation de l'intrusion saline

A Grandcamp-Maisy, deux points ont révélé des anomalies en chlorures, l'un ([00955X0007/C1](#)) captant le Bathonien, et l'autre captant le Bajocien ([00955X0046/S2](#)). Les eaux prélevées au point 00955X0007/C1 correspondraient environ à 80 % d'eau jeune (Lopez et al., 2012). Les résultats d'analyses des ions majeurs pour le point 00955X0007/C1 ont été reportés sur un graphique inter-éléments (Illustration 74). D'après les diagrammes Na vs Cl et Ca vs Cl (Illustration 74), les eaux sont appauvries en sodium et enrichies en calcium montrant un échange cationique, avec de fortes teneurs en chlorures provenant probablement des eaux marines.

Le point situé dans le Bajocien (00955X0046/S2), présente une concentration de chlorures de 128 mg/L (prélèvement réalisé en 1988, source BSS). L'ouvrage recoupe l'aquifère du Bajocien entre 18 et 51 m de profondeur, surmonté par 7 m de marnes de Port-en-Bessin. En subsurface, les dépôts Quaternaire ont une épaisseur de 8 m, dans lesquels s'intercalent la

formation de sables des Deux-Jumeaux sur environ 1,5 m d'épaisseur. Il est probable que le système structural dans ce secteur mette en contact des eaux saumâtres circulant dans les sables de Deux-Jumeaux et l'aquifère du Bajocien, expliquant ainsi une salinisation des eaux du Bajocien. Il est aussi probable que la formation des marnes de Port-en-Bessin se biseautent et disparaissent, mettant en contact les formations du Quaternaire et l'aquifère du Bajocien.

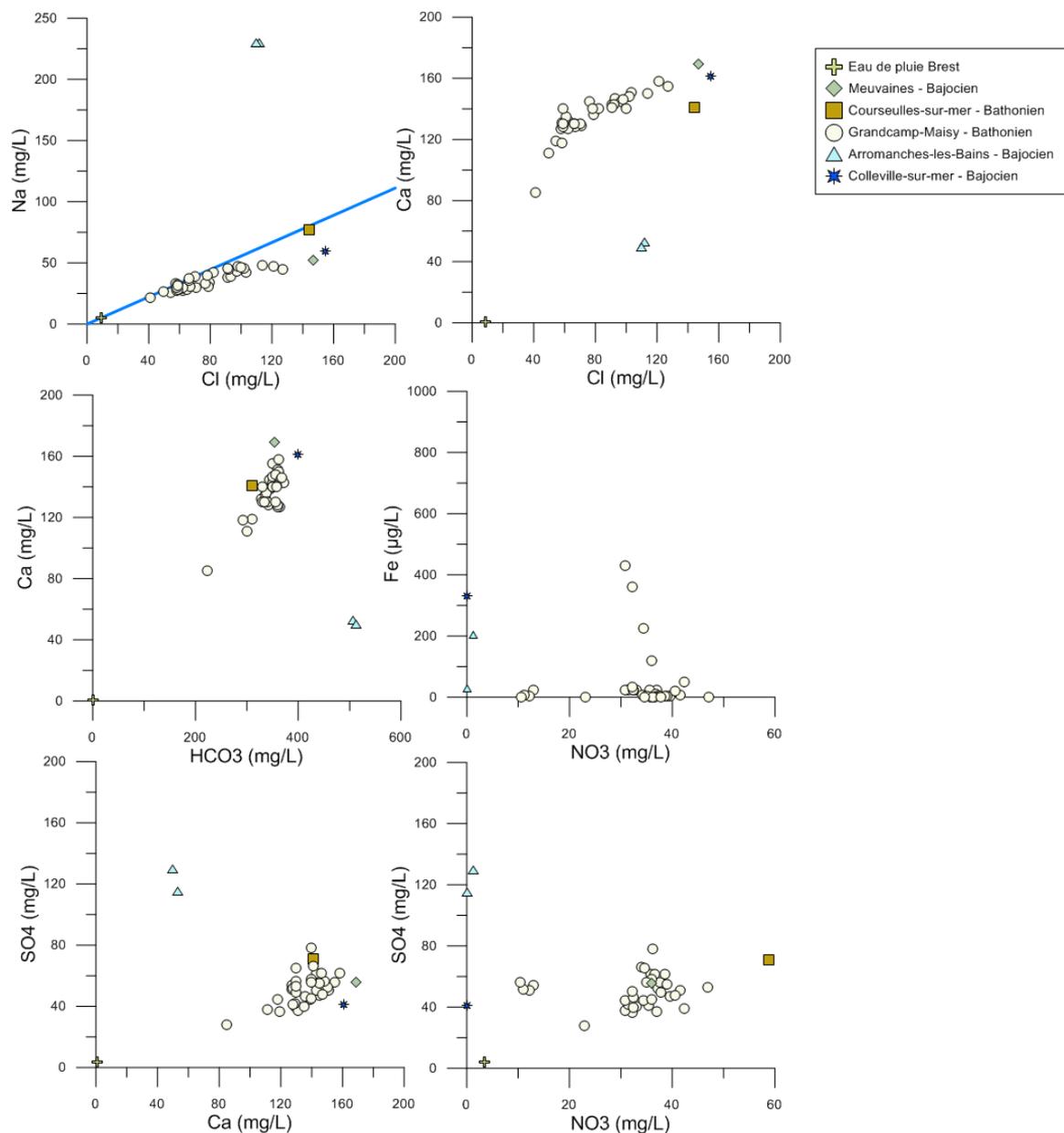


Illustration 74 : Rapports inter-éléments pour les points avec une anomalie en chlorures dans le secteur du Bessin

Des compléments seraient également nécessaires pour valider les hypothèses proposées plus avant.

6.8.2. Secteur d'Omaha Beach

Contexte géologique

Dans ce secteur, les formations du Bajocien affleurent sur l'estran (Illustration 75), le pendage des couches s'effectue vers le NNE. De plus, la zone de recharge de l'aquifère est faible, le Bajocien affleure sur une petite zone en rive droite de l'Aure. Un faible apport d'eau douce permet théoriquement une avancée plus importante de l'apport d'eau salée dans l'aquifère. Il est à noter qu'un réseau de petites failles affecte les formations. Le jeu est limité, les blocs sont affaissés vers le littoral.

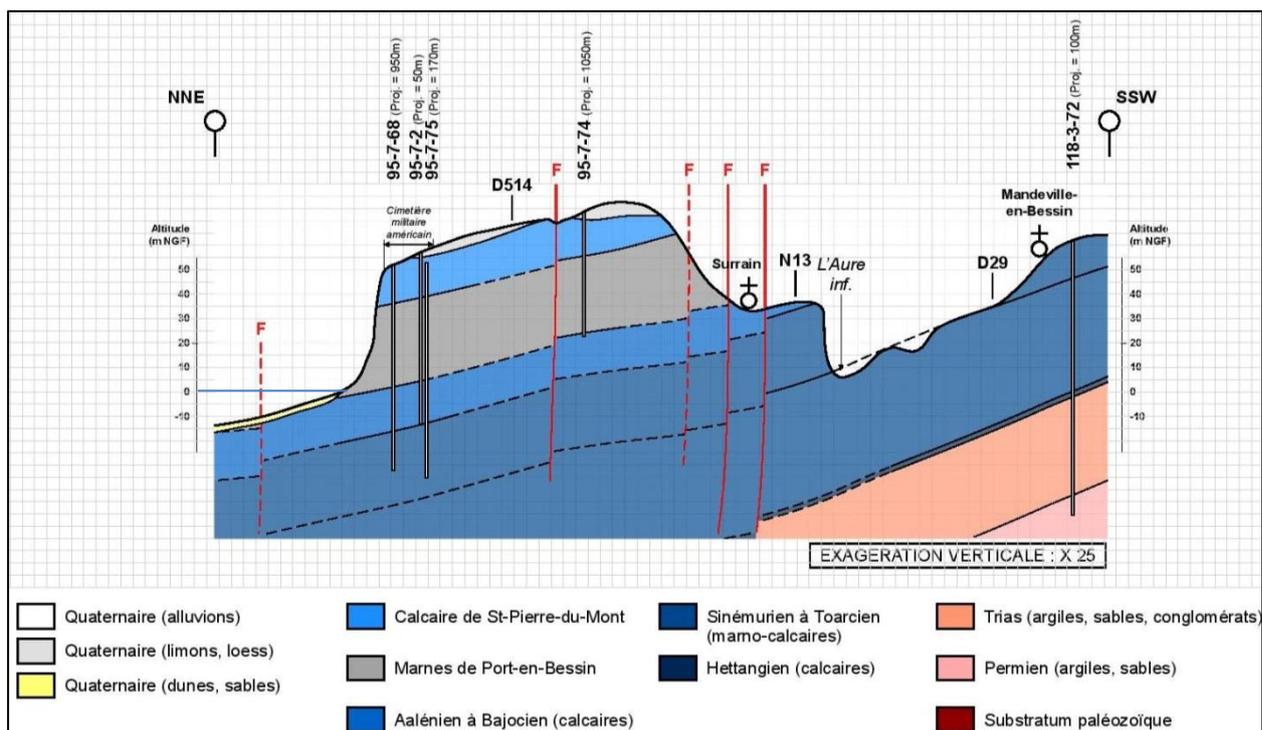


Illustration 75 : Coupe géologique dans le Bessin, secteur d'Omaha

Caractérisation de l'intrusion saline

A Colleville-sur-mer, un ouvrage (00957X0075/F3) montre de fortes teneurs en chlorures dans les eaux circulant dans le Bajocien. Une analyse réalisée en mai 1986 révèle une concentration en chlorures de 155 mg/L (Illustration 74). Il est probable qu'une intrusion d'eau de mer se fasse depuis l'estran et atteigne le captage situé à environ 500 m de la côte à une altitude de 50 m. En effet, le mur du Bajocien au droit du forage se situe sous le niveau de la mer.

D'après les informations recueillies en BSS, le forage 00958X0056/S1, situé à l'ouest de Port-en-Bessin, était utilisé pour l'AEP. Celui-ci est influencé par la marée et devient salé à marée haute, comme le point 00958X0057/F2 situé à l'est de Port-en-Bessin.

Sur le secteur de Port en Bessin, il existe un réseau karstique particulièrement développé. Le karst d'introduction est constitué de trois fosses (Tourneresse, Grippe Soulais, Soucy). Le karst de restitution se compose de plusieurs sources qui se divisent en trois groupes : le troisième bassin, la rade (port), le platier rocheux à l'est du port de Port-en-Bessin. L'équipe

spéléologique d'Hérouville-Saint-Clair a cartographié le réseau karstique exploré (Laurent et al, 2015).

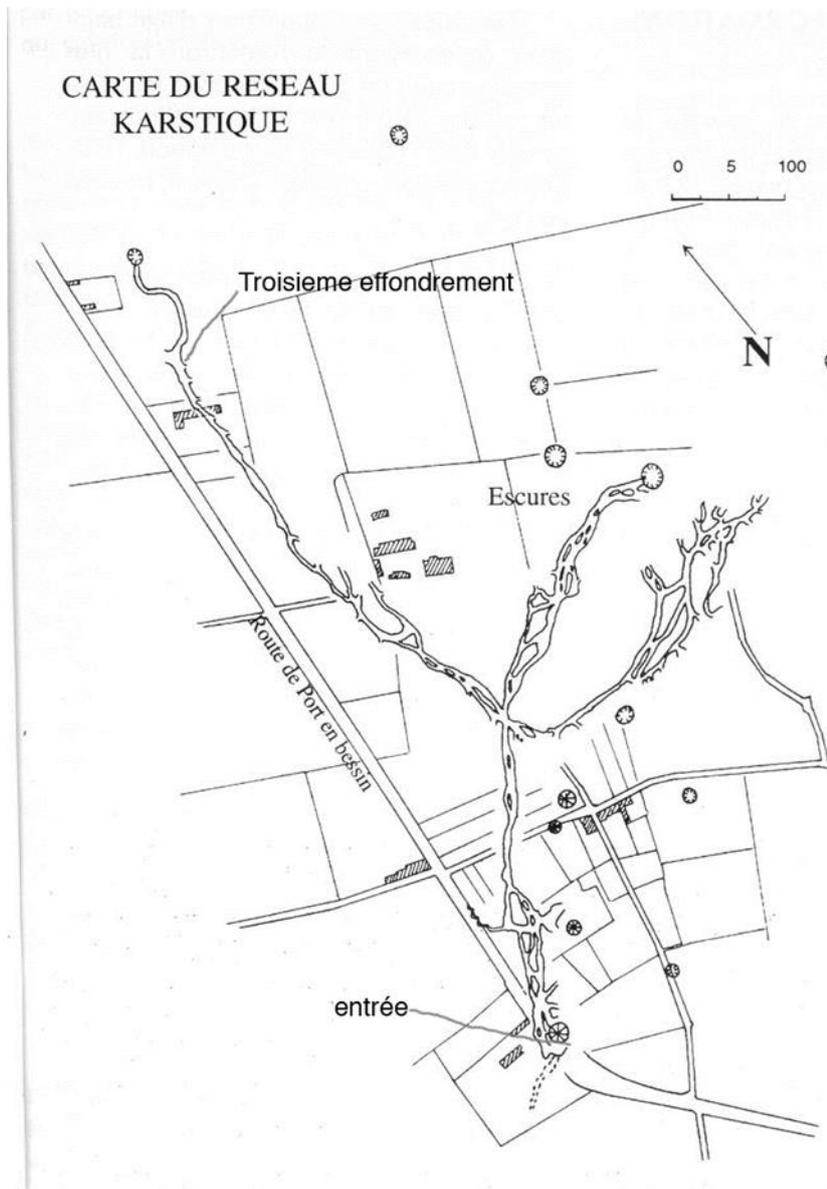


Illustration 76 : Carte du réseau karstique (Equipe spéléologique d'Hérouville-St-Clair)

L'eau douce contenue dans les conduits karstiques est en équilibre avec la charge d'eau salée, cet équilibre varie avec la marée.

6.8.3. Secteur d'Arromanches-les-Bains

Contexte géologique

L'arrière-pays d'Arromanches est affecté par un petit bombement anticlinal : la boutonnière de la Gronde. De part et d'autre de cette structure se répartit un réseau de failles qui abaissent le toit des calcaires en direction de la mer.

La boutonnière constitue une zone de recharge de l'aquifère et une limite de partage des eaux. Au Sud de celle-ci, les formations géologiques plongent vers le sud en direction de la Seulles.

L'estran repose sur les marnes de Port en Bessin.

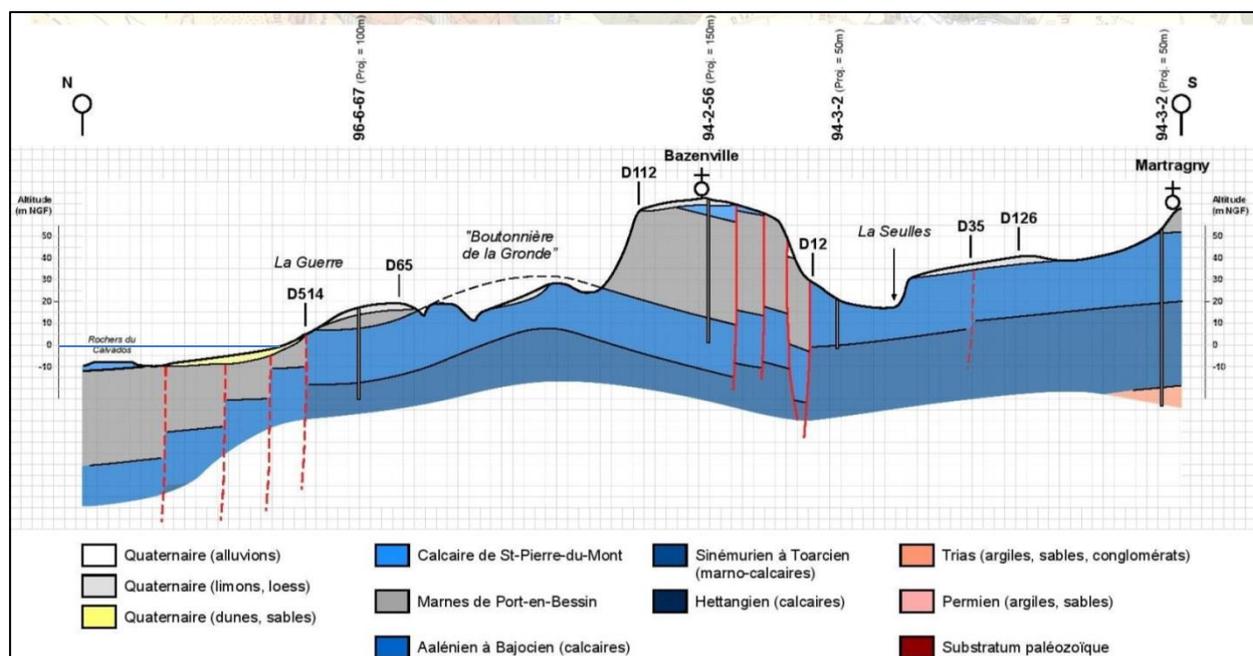


Illustration 77 : Coupe géologique n°9 dans le Bessin, secteur d'Arromanches-les-Bains

Caractérisation de l'intrusion saline

Dans le secteur d'Arromanches, deux ouvrages ont révélé de fortes teneurs en chlorures (Illustration 74) :

- un ancien captage pour l'alimentation en eau potable ([00966X0012/F2](#)), situé à Arromanches captant le Bajocien ;
- un ouvrage (00966X0059) situé dans les marais de Meuvaines, le long du littoral, captant également le Bajocien. Les calcaires du Bajocien à Meuvaines sont recouverts par 8 m de dépôts fluvio-marins du Flandrien.

A Arromanches, le forage a fait l'objet de nombreuses analyses des ions chlorures. En 1951 les teneurs en chlorures s'élèvent à 205 mg/L. Entre 1959 et 1964 les valeurs varient entre 102 et 200 mg/L, entre 1975 et 1979, les valeurs sont comprises entre 108 et 115 mg/L. Deux analyses des ions sodium, mesurées en 1978 et en 1979, s'élèvent à 230 mg/L (source des données : BSS). Deux analyses sont représentées sur l'illustration 74, datant de 1977 et 1979.

Ces analyses montrent un net enrichissement en sodium vis-à-vis des chlorures, et de fortes teneurs en sulfates. S'agit-il d'eaux anciennes, ayant une chimie marquée par l'interaction eau-roche ? La formation du Bajocien peut localement être en contact avec l'eau de mer sur l'estran par le jeu de failles. Les eaux du Bajocien, confinées, sont connues pour être fortement minéralisées.

Dans les marais de Meuvaines, plusieurs hypothèses sont formulées quant à la présence de chlorures dans les eaux souterraines :

- au lieu-dit la Guerre, grâce aux failles normales supposées à regard nord, la formation du Bajocien peut être en contact avec l'eau de mer au pied de la paléofalaise (Illustration 77).
- l'ouvrage révélant une anomalie en chlorures est situé en une zone constituant la terminaison orientale des marais de Meuvaines et Ver-sur-mer, sous lesquels les formations du Flandrien sont retrouvées. Cette formation peut renfermer une eau saumâtre en contact avec l'aquifère sous-jacent du Bajocien.
- est-ce que le cours d'eau la Gronde avec sa boutonnière, sa voussure antiforme qui fait affleurer le Bajocien peut contaminer l'aquifère ? Les données ne permettent de conclure quant à la salinité du cours d'eau.

La chimie des eaux souterraines à Meuvaines (Illustration 74) est similaire au secteur de Grandcamp-Maisy, où l'hypothèse d'une contamination par une formation géologique récente renfermant une eau saumâtre est la plus probable.

Des compléments seraient également nécessaires pour valider les hypothèses proposées plus avant. Il serait intéressant de vérifier le rôle des failles et l'existence de circulations karstiques pouvant avoir une incidence sur la qualité des eaux.

6.9. PLAINE DE CAEN ET BASSIN DE LA DIVES

6.9.1. En rive droite de la Seulles

Contexte géologique

La Seulles et la Mue sont entaillées dans les calcaires de Caen/Creully (Illustration 78). En rive droite les calcaires de Blainville affleurent d'une épaisseur de 10 m environ, ainsi que les calcaires de Ranville en, plus en aval. D'un point de vue géologique, la vallée de la Mue est positionnée au droit d'une gouttière synforme.

Plus au Nord-Est, on note l'existence d'un bombement affecté par un réseau de faille. Celui-ci marque une limite de partage des eaux. Au-delà, les écoulements contenus dans l'aquifère des calcaires de Blainville et de Caen se dirigent vers le littoral. La zone de recharge est relativement importante.

L'estran repose directement sur ces calcaires.

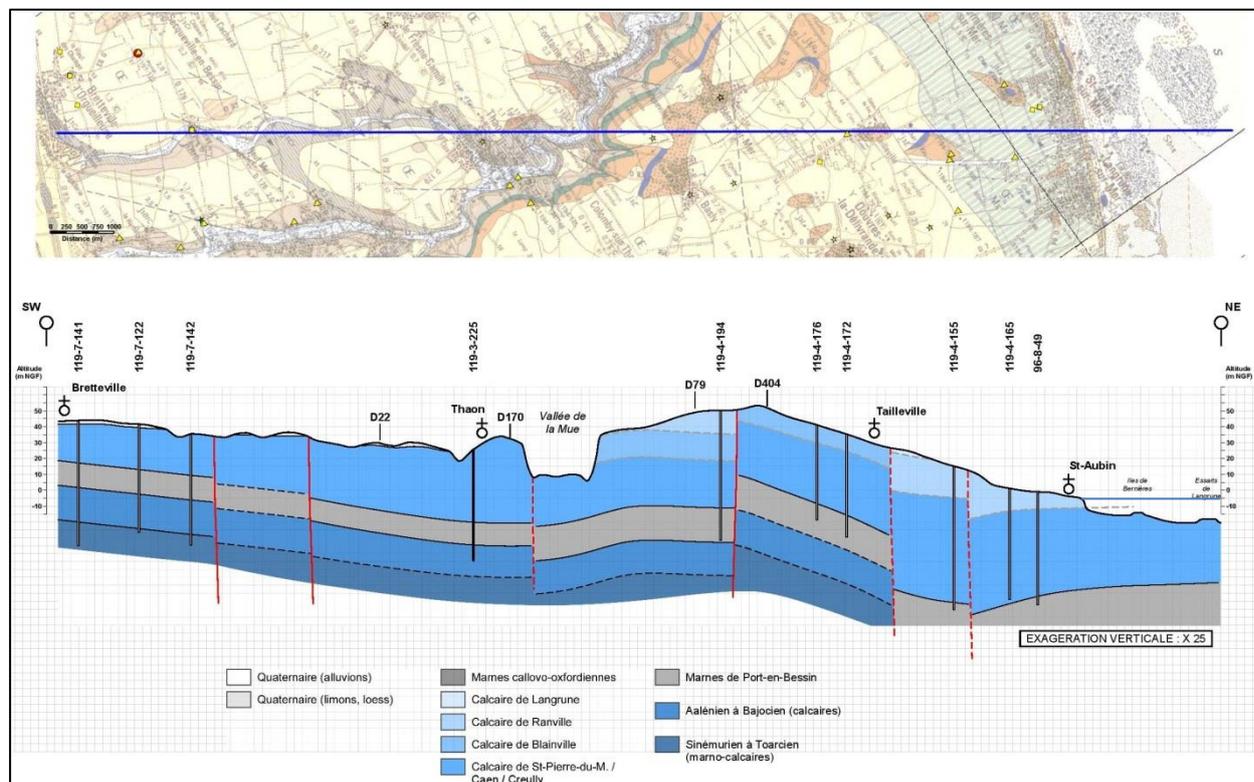


Illustration 78 : Coupe géologique n°11 dans la plaine de Caen, secteur Bretteville/Saint-Aubin

Caractérisation de l'intrusion saline

Un ouvrage, situé à Courseulles-sur-mer ([00967X0067/F3-95](#)) a révélé une anomalie en chlorures ($[Cl] = 144 \text{ mg/L}$, le 23/03/1995, source BSS). Il capte les calcaires de Creully datés du Bathonien moyen, recoupés entre 20 et 40 m de profondeur, d'une transmissivité de $4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (Pay, 1995). L'ouvrage est situé à environ 280 m de l'estuaire de la Seulles, il atteint une altitude de 25 m et l'estuaire de la Seulles est à environ 4 m d'altitude, par conséquent les dépôts fluvio-marins au niveau de l'estuaire sont à la même altitude que les calcaires de

Creully. Deux forages, utilisés pour l'alimentation en eau potable (00967X0003 et 00967X0058) situés à quelques mètres en aval, recoupent les calcaires de Blainville entre 2 et 20 m de profondeur. Ils sont situés à environ 10 m d'altitude. Ces ouvrages ne révèlent aucune anomalie en chlorures depuis 2001, d'après les données bancarisées dans ADES. En revanche, d'après l'étude De la Quèrière (1986) sur l'évolution des teneurs en chlorures, l'ouvrage 00967X0003 présenterait une intrusion d'eau de mer.

Dans le cadre de l'étude réalisée sur les pollutions diffuses à l'échelle du bassin Seine-Normandie (Lopez et al., 2012), des mesures de datations des eaux souterraines ont été réalisées, notamment au point [01194X0157/F2](#), situé à Langrune-sur-mer. Les eaux souterraines prélevées, proviennent des calcaires de Blainville, l'ouvrage est crépiné entre 15 et 35 m de profondeur. L'âge apparent de l'eau est évalué à environ 20 ans (campagnes de 2010, interprétation selon un modèle exponentiel). Globalement, les eaux du Bathonien sont jeunes dans ce secteur.

Au vu des données, il n'est pas possible de conclure quant à une éventuelle intrusion marine actuelle ou ancienne. Il pourrait s'agir d'une influence anthropique. Il est possible que les alluvions fluvio-marines déposées dans le fond de l'estuaire de la Seulles contiennent une eau saumâtre (actuelle ou ancienne) qui pourrait contaminer les calcaires de Creully. Ces hypothèses restent à vérifier.

6.9.2. Vallée de l'Orne

Contexte géologique

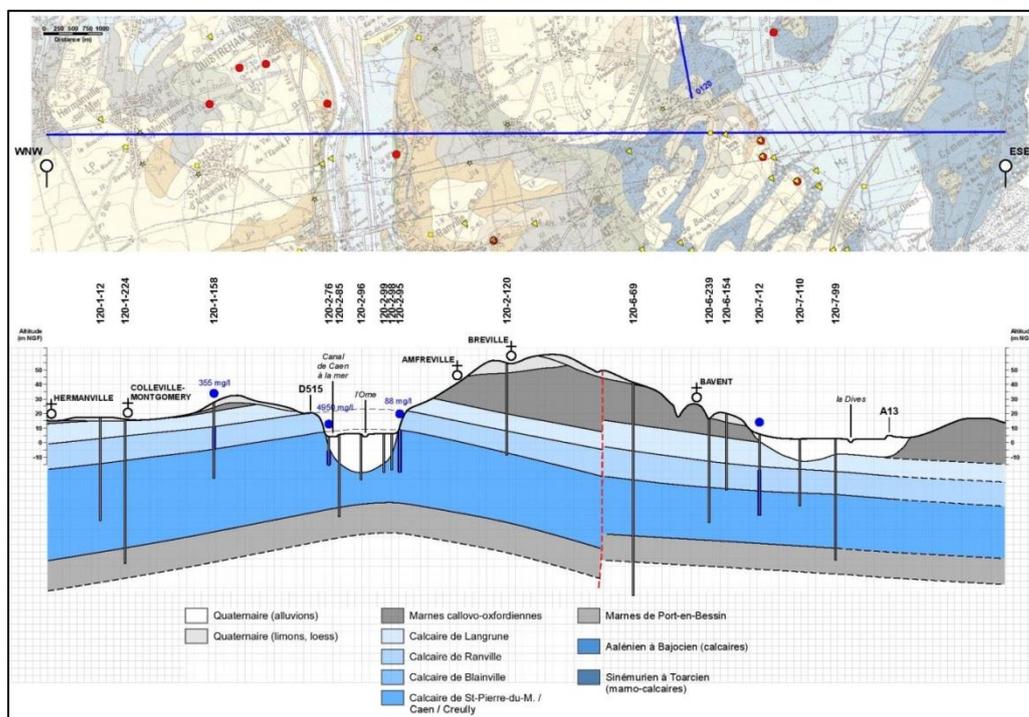


Illustration 79 : Coupe géologique n°12 dans la plaine de Caen, secteur vallée de l'Orne et bassin de la Dive

L'Orne est implantée au droit d'une structure géologique antiforme qui limite les écoulements entre l'Est et l'Ouest de la vallée. Les alluvions de l'Orne reposent sur les calcaires de Caen, datées du Bathonien moyen (Illustration 79).

La zone de recharge des aquifères est importante à l'amont (plaine de Caen et pays d'Auge).

La basse vallée de l'Orne comprend trois nappes principales (Arnaud, 2005) :

- La nappe alluviale de l'Orne circule dans un milieu poreux. Les alluvions de l'Orne surmontent l'oolithe ferrugineuse du Bajocien en amont (plaine de Caen) et les calcaires du Bathonien en aval. Il n'existe pas de niveau imperméable individualisant ces formations avec celle des alluvions.
- La nappe des calcaires du Bathonien renferme plusieurs nappes superposées séparées par des niveaux de caillasses parfois cimentées ou argileuses. L'épaisseur de l'aquifère augmente du sud vers nord et peut atteindre 100 m en bord de mer (en rive gauche comme en rive droite). La nappe s'écoule des plateaux vers les points bas suivant la topographie, la nappe alimente les cours d'eau. Un drainage important peut également être rencontré dans les vallons secs. Au nord, la nappe s'écoule vers le littoral et au droit de l'Orne, la surface de la nappe du Bathonien correspond à celle de la nappe alluviale (Arnaud, 2005).
- La nappe des calcaires du Bajocien. Son réservoir est constitué des calcaires du Toarcien, des calcaires de la Mâlière (oolithe ferrugineuse aalénienne) et les calcaires du Bajocien (oolithe ferrugineuse de Bayeux). Dans certains secteurs, la nappe est sous-jacente à celle du Bathonien, devenant captive, mais reste en équilibre hydraulique. L'aquifère est plus productif dans les vallées humides et les vallons secs. (Arnaud, 2005).

Caractérisation de l'intrusion saline – Rive gauche de l'Orne

En rive gauche de l'Orne, trois ouvrages situés à Ouistreham (01202X0003/F1, 01202X0020/F3 et 01202X0076/F1) et un ouvrage situé à Saint-Aubin-d'Arquenay (01201X0158) ont révélé des anomalies en chlorures. Ces ouvrages ont été créés dans le cadre de recherches en eau pour l'alimentation en eau potable dans les années 1960-70.

D'après plusieurs rapports de Pareyn (cités dans Aster, 2001), l'ouvrage [01202X0002/F2](#) situé à Ouistreham recoupe des galets provenant des alluvions anciennes de l'Orne entre 40 et 44 m et entre 57 et 58 m de profondeur. « Ces galets colmatent un réseau de cavités de dissolution qui communiquent avec le chenal de la basse vallée de l'Orne. » « Cette poche karstique est responsable du taux en chlorures ». Le forage n°3 (01202X0020/F3) n'a pas recoupé de cavités karstiques, mais il est possible qu'elles existent dans le rayon d'influence du pompage.

D'après les données ADES, les forages 01202X0003/F1 et 01202X0020/F3 atteignent respectivement une teneur en chlorures maximum de 324 et 365 mg/L, avec un écart-type de 44 et 66 mg/L. Les transmissivités s'élèvent à $2,4 \cdot 10^{-2}$ m²/s pour F1 et $1,4 \cdot 10^{-2}$ m²/s, les coefficients d'emmagasinement sont d'environ 10^{-3} . A Saint-Aubin-d'Arquenay, les teneurs en chlorures s'élèvent à 355 mg/L (1972, BSS) dans l'ouvrage [01201X0158/F2](#).

L'eau souterraine s'écoule vers la mer. Les ouvrages se situent dans un milieu fissuré poreux, ils recouperont les calcaires de Langrune et de Ranville. Une inspection caméra dans le forage F1 montre une fissuration importante pluricentimétrique (Juignet, 2007).

Les teneurs en chlorures sont liées à un processus d'intrusions marines par des conduits de galets plus perméables, en relation avec l'estuaire de l'Orne. De fortes variations des teneurs

en chlorures ont été observées (Aster, 2001), liées au débit d'exploitation et probablement à l'influence de la marée. En effet dans le forage F2, le suivi piézométrique enregistré lors des pompages d'essai de F1 et F3 a montré une influence de la marée. Afin de limiter l'impact du biseau salé, et ainsi de diminuer les teneurs en chlorures, des débits d'exploitation ont été fixés en conséquence (Aster, 2001).

L'ouvrage [01202X0076/F1](#), situé à Ouistreham à environ 150 m du canal, recoupe les calcaires de Langrune entre 8 et 17 m de profondeur, recouvert par 8 m de dépôts fluvio-marins de l'Holocène. Plusieurs analyses ont été réalisées entre 1969, date de réalisation de l'ouvrage et 1975 (source : BSS), les teneurs en chlorures varient entre 5645 et 4260 mg/L. Les teneurs en sodium s'élèvent à 2350 mg/L (analyse du 3/12/1975), en sulfates à 600 mg/L (analyse du 3/12/1975).

D'après Juignet, 2007, l'eau du canal, face au bassin de plaisance, montre une teneur moyenne en chlorures voisines de 4000 mg/L. L'ouvrage 01202X0076/F1 est impacté par l'eau du canal, qui s'écoulerait dans les alluvions. On rappelle que la profondeur du canal peut dépasser les 10m.

Le rôle du canal entre Caen et la mer et l'avancée du biseau salé dans l'estuaire de l'Orne sont à l'origine de la présence d'anomalies en chlorure dans les ouvrages présentés. Les liens contemporains semblent clairement établis.

Caractérisation de l'intrusion saline – rive droite de l'Orne

A Merville-Franceville, deux ouvrages ([01202X0075/FO-MF](#) et [01202X0006/F3](#)), réalisés respectivement en 1933 et 1967 ont révélé des anomalies en chlorures.

- Ouvrage 01202X0075/FO-MF, atteint 190 m de profondeur, l'ouvrage est crépiné entre 76 et 190 m de profondeur, recoupant les formations des calcaires de Caen, du Bajocien et du Lias. La coupe géologique est présentée en Annexe 3. Les eaux souterraines présentent de fortes teneurs en fer (1,25 mg/L, 04/07/1964), les teneurs en nitrates sont nulles et en sulfates sont très faibles, marquant ainsi un milieu réducteur et probablement dénitrifiant. Le 04/07/1964, les teneurs en chlorures s'élevaient à 532 mg/L et en sodium à 440 mg/L, se positionnant sur la droite de dilution de l'eau de mer.
- Ouvrage 01202X0006/F3, atteint 88 m de profondeur, il est crépiné entre 62 et 88 m de profondeur captant le calcaire de Blainville et le calcaire de Caen. Les teneurs en chlorures s'élèvent à 850 mg/L le 19/12/1967, et augmentent jusqu'à 1200 mg/L (08/01/1968) après 96 h de pompage, faisant appel à l'eau de mer.

D'autres ouvrages dans ce secteur montrent des anomalies en chlorures (01202X0074/F2-MF, 01202X0073/F1-MF) qui n'ont pas été recensées dans un premier temps, mais ayant les mêmes caractéristiques que celles présentées ci-dessus. Il semblerait que ce sont les eaux du Bathonien qui soient contaminées.

Les hypothèses formulées quant à l'origine des chlorures sont :

- La mise en contact des eaux du Bathonien avec les eaux de l'Orne saumâtres au niveau de l'estuaire de l'Orne ;
- La mise en contact des eaux du Bathonien avec l'eau de mer par un biseau salé.

Au vu des données, il n'est pas possible de conclure quant à une éventuelle intrusion marine actuelle. Ces hypothèses restent à vérifier.

A Caen, à la prairie, un ouvrage ([01198X0035/PR1-B](#)) a révélé une anomalie en chlorures à sa création en 1950, [Cl] = 100 mg/L (BSS). L'ouvrage est situé à environ 200 m de l'Orne, il capte entre 20 et 40 m de profondeur les eaux du Bajocien (oolithe ferrugineuse), surmonté par 10 m d'alluvions. Entre 2012 et 2015, dans les eaux du mélange de captages (regroupant les eaux de 3 ouvrages) les teneurs en chlorures s'élèvent à environ 46 mg/L d'après les données ADES (suivi du contrôle sanitaire).

En 1950, A. Bigot émettait l'hypothèse, d'après les archives en BSS (cf. dossier 01198X0037), que le forage B (01198X0035/PR1-B) en pompage à 25 m³/h ait appelé les eaux de l'Orne, pouvant être mélangées à de l'eau de mer en fonction de la marée. La minéralisation des eaux (fortes teneurs en chlorures) serait expliquée à cette époque, par un appel des eaux de l'Orne dans les forages alimentés par la « nappe du Galet », elle-même contenue dans une formation récente (alluvions ?), qui est sus-jacente au Bajocien.

Il est possible qu'avant la mise en place du barrage de Montalivet, les apports d'eau douce et le gradient hydraulique soient trop faibles pour évacuer les eaux salines (subactuelle ou ancienne) contenues dans les alluvions de l'Orne. La mise en place du barrage ou des changements de pratique liés aux ouvrages hydrauliques ont probablement permis de diminuer les apports d'eau saline dans les alluvions de Caen, et d'augmenter le débit des flux d'eau douce.

L'étude menée par Sogreah en 1975 (Verdet, 1975) préconisait de maintenir le plan d'eau de l'Orne au-dessus de celui du canal afin d'éviter la remontée de sel dans le lit de l'Orne provenant du canal par des portes-à-flot (aujourd'hui a priori modifiées en vannes). A cette époque, le sel pouvait remonter jusqu'à Louvigny pour un débit de l'Orne de 2 à 5 m³/s.

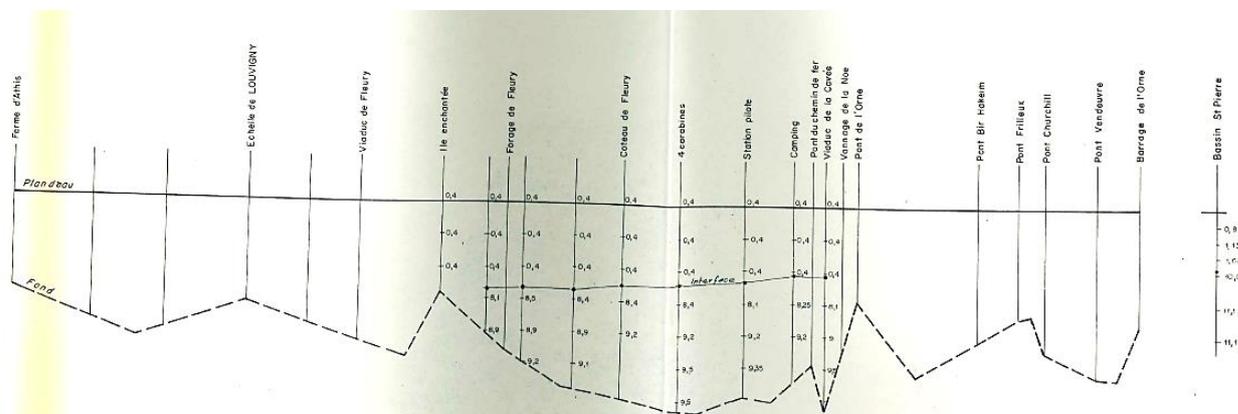


Illustration 80 : Salinité de l'Orne à l'amont du barrage (en g/L), échelle 1/20000 en longueur et 1/100 en hauteur (Etude Sogreah Verdet, 1975)

L'interface eau douce – eau salée (Illustration 80) se situe entre 2 et 2,5 m de profondeur par rapport au niveau du plan d'eau. La salinité en amont du barrage varie entre 0,4 g/L en surface et 9,5 g/L en profondeur, dans le bassin Saint-Pierre, la salinité varie entre 0,8 g/L en surface et 11,1 g/L en profondeur.

Le rôle du canal entre Caen et la mer et l'avancée du biseau salé dans l'estuaire de l'Orne sont à l'origine de la présence d'anomalies en chlorure dans les ouvrages présentés. Les liens contemporains semblent clairement établis.

A Cormelles-le-Royal, deux ouvrages ont révélé des anomalies en chlorures. L'entreprise automobile PSA exploite deux forages (01205X0007/F1 et 01205X0008/F2) et prélève environ 100 000 m³/an, répartis sur les deux points de prélèvement.

- L'ouvrage [01205X0008/F2](#) situé sur le site de PSA, atteint 95 m de profondeur. Il est crépiné entre 22 et 47 m de profondeur recoupant les calcaires de Creully et de Caen et entre 78 et 93 m recoupant l'aalénien et le toarcien, communément considéré comme l'aquifère du Bajocien (Illustration 15). D'après les données récoltées en BSS, des analyses réalisées après 27h de pompage mettent en évidence des teneurs en chlorures de 110 mg/L (30/10/1964). Les conclusions du rapport d'analyses émettent l'hypothèse d'une eau fortement minéralisée suite aux opérations de forage et d'acidification (acide chlorhydrique). Entre 1974 et 1976, les concentrations en chlorures varient entre 37 et 44 mg/L.
- Le forage d'exploitation 01205X0007/F1 atteint les marnes de Port-en-Bessin à 53 m de profondeur, et ne capte que l'aquifère du Bathonien. Il n'a pas montré de fortes teneurs en chlorures après pompage, d'après les données d'analyse en BSS.

Depuis 2003, le niveau piézométrique et la conductivité notamment sont suivis dans 9 piézomètres et dans les 2 ouvrages d'exploitation. Les piézomètres atteignent l'aquifère du Bathonien. Les valeurs de conductivité moyenne dans les piézomètres varient entre 646 µS/cm (PZ26) et 1127 µS/cm (PZ3). Il apparaît difficile d'utiliser les valeurs de conductivité pour évaluer la salinité dans l'aquifère du Bathonien sur le site de PSA au vu des fluctuations importantes au sein du même aquifère au même endroit, pouvant être liées à l'activité industrielle. Dans les forages d'exploitation, la conductivité est de 780 µS/cm. Ces valeurs correspondent aux valeurs attendues dans le Bathonien.

L'ouvrage [01205X0361/F2](#) situé également à Cormelles-le-Royal sur l'ancien site de Moulinex, est à environ 800 m des forages d'exploitation de PSA. Le forage est crépiné entre 32 et 38 m de profondeur, recoupant le calcaire de Caen et entre 50 et 85 m recoupant le calcaire de Caen, l'oolithe ferrugineuse de Bayeux daté du Bajocien supérieur et l'oolithe ferrugineuse aalénienne. En 1970, les teneurs en chlorures s'élevaient à 170 mg/L, le pH était inférieur à 7. Les conclusions du rapport d'analyse supposent des effets d'un traitement à l'acide chlorhydrique. Des analyses réalisées entre 1976 et 1977 montrent des teneurs en chlorures de 32 mg/L. En revanche, le forage 01205X0219/F1, situé sur l'ancien site de Moulinex réalisé en 1964, a subi un traitement à l'acidification en mai 1964, une analyse du 03/07/1964 indique une teneur en chlorures de 36 mg/L.

Il semblerait que le traitement à l'acidification n'explique pas totalement les teneurs en chlorures, mais il est probable que les pompages induisent des variations de concentrations en chlorures en faisant appel à des eaux salines contenues dans l'aquifère du Bajocien en contact avec les alluvions de l'Orne.

A Ranville, trois ouvrages situés sur le site de la cimenterie ont révélé de fortes teneurs en chlorures. Deux forages sont en exploitation ([01205X0255/F2](#) et [01205X0469/F3](#)), prélevant environ 8000 m³ d'eau souterraine par an. L'ouvrage [01205X0254/F1](#) n'est plus exploité. Les forages captent les calcaires de Blainville, Creully et Caen, sur épaisseur de 40 m environ. La transmissivité au forage F3 est de $4,8 \cdot 10^{-3}$ m²/s, avec un coefficient d'emménagement de $1 \cdot 10^{-3}$. La nappe est libre. Les teneurs en chlorures au forage F3 s'élevaient à 337 mg/L, le 01/10/1993 (Pascaud et Boulin, 1993).

D'après l'avis du BRGM sur l'extension de la carrière (Arnaud, 2006) et suite à une modélisation réalisée sur le secteur, la nappe du Bathonien serait alimentée par le canal de l'Orne. Les infiltrations du canal sont reprises par l'Orne, les conclusions du modèle prévoyaient une augmentation de la salinité entre l'Orne et la carrière due à un rabattement de la nappe du Bathonien (Arnaud, 2006).

Entre 1979 et 1983, et en 1988, le BRGM a effectué des suivis de niveaux piézométriques et de conductivité dans la nappe du Bathonien pour l'entreprise des Ciments Français au droit de la carrière de Ranville (cf. Rapports Matheron, 1988 et Dassibat, 1983). D'après Dassibat, 1983, les suivis établis entre 1979 et 1983 montrent que les eaux les plus chargées ont une conductivité de 830 µS/cm. Les faibles conductivités au toit de la nappe peuvent être attribuées à des venues d'eau météorique. Sur cette période, il n'y a pas d'évolution significative de la qualité des eaux, les variations de conductivité étant très faibles.

Trois captages pour l'alimentation en eau potable se situent à proximité de la carrière de Ranville, gérés par le SIVOM de la rive droite de l'Orne :

- le forage [01206X0214/F1](#), situé à Ranville, prélève environ 30 000 m³/an. Il est crépiné entre 17 et 77 m de profondeur, et capte les eaux circulant dans les calcaires de Ranville, de Creully et de Caen. Le point est à une altitude de 9 m. D'après ADES, la valeur maximum en chlorures est de 95 mg/L (07/06/2000), et la médiane s'élève à 46 mg/L ;
- le forage [01202X0086/HY](#), situé à Ranville, dénommé le captage de Longueville, prélève environ 22 000 m³/an. L'ouvrage de 4,5 m de profondeur capte une source. D'après ADES, la valeur maximum en chlorures est de 85 mg/L (01/02/2010), et la médiane s'élève à 68 mg/L ;
- le forage [01202X0095/F](#), situé à Amfreville, prélève environ 61 000 m³/an. D'après ADES, la valeur maximum en chlorures est de 158 mg/L (15/03/2001), et la médiane s'élève à 104 mg/L.

Dans tout le secteur de Ranville et d'Amfreville, plus globalement en rive droite de l'Orne, la nappe du Bathonien serait alimentée par l'Orne ou par la nappe alluviale. En effet, en bordure de l'Orne (cf. coupe géologique du forage [01202X0096/PZ1](#)), les calcaires de Blainville sont recouverts par 25 m de dépôts fluviomarins, datés du Flandrien. Les eaux de l'Orne sont saumâtres et liées à l'influence de la marée et aux infiltrations du canal dans les alluvions, impactant la nappe du Bathonien sous-jacent. Les fluctuations de concentrations en chlorures dans les ouvrages dépendent très probablement des débits de pompage, et éventuellement des marées. Les eaux saumâtres circulant dans les alluvions de l'Orne sont-elles anciennes ou récentes ? Des datations de l'eau permettraient de répondre à cette question.

A **Blainville-sur-Orne**, sur le site de Renault Trucks, deux ouvrages anciennement exploités présentent des anomalies en chlorures, ils sont situés entre le canal et l'Orne :

- L'ouvrage [01205X0384/F1EXPL](#) atteint 58 m de profondeur, l'horizon crépiné recoupe les calcaires de Caen et les marnes de Port-en-Bessin du Bathonien. L'ouvrage [01205X0441/F2EXPL](#) (Annexe 3) atteint le Cambrien à 55 m de profondeur, il capte les calcaires de Caen du Bathonien et l'aquifère du Bajocien. L'aquifère du Bathonien est recouvert par environ 15 m d'alluvions du Quaternaire.
- D'après les données de la BSS, le site de Renault Trucks était également alimenté par une prise d'eau dans la rivière le Dan ([01205X0243/HY](#)).
- Les concentrations en chlorures ont été suivies dans les années 1970. En 1976, des prélèvements ont été effectués dans les forages d'exploitation et dans la rivière. Les résultats montrent des teneurs en chlorures comprises entre 49 et 89 mg/L dans les eaux de surface, entre 214 et 240 mg/L dans le F1 et entre 152 et 186 mg/L dans le F2.

Dans les eaux de surface (le Dan), des analyses réalisées en 1972 montraient des teneurs de 244 mg/L (source : BSS).

Un suivi de la piézométrie et de la conductivité est réalisé sur le site de Renault Trucks. Les données ont été fournies par Renault Trucks et sont reportées sur l'illustration 81.

Piézomètres suivis	01205X0568/MW7	01205X0570/MW14	01205X0572/MW16	01205X0573/MW17	01205X0574/MW18	Piézomètre MW 19	01205X0575/PUITS
Profondeur (m)	3	4	4				
Période mesure	2002-2015	2002-2015	2002-2015	2006-2015	2006-2015	2014-2015	2003-2013
Nb de valeur	17	22	22	16	8	3	16
Moy Conductivité	1108	1675	1338	2547	978	2331	4948
Médiane Cond	1236	1765	1300	1729	814	2950	1027
Min Conductivité	409	1013	980	620	703	703	720
Max Conductivité	1656	2430	2180	5680	1840	3340	64000

Illustration 81 : Suivi de la conductivité (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) sur le site de Renault Trucks (données : Renault Trucks)

Trois puits situés sur le site, (01205X0442/P1, 01205X0443/P2 et 01205X0444/P3) captent les calcaires de Caen du Bathonien et sont séparés des alluvions de l'Orne par un bouchon de ciment de 4 à 5 m d'épaisseur. L'étude de Dassibat et Pascaud, 1975 a permis d'effectuer des prélèvements dans ces puits pendant un pompage d'essai réalisé au forage F2 (01205X0441/F2EXPL). Les résultats sont présentés sur l'illustration 82.

DATE	HEURE	F2	P1	P2	P3	Observations
05/11/74	12 h	188	291	266	334	
	15 h	-	-	-	-	Début pompage
	18 h	190	-	-	-	
06/11/74	18 h	250	-	655	866	
07/11/74	8 h	285	-	690	890	
	12 h	285	-	700	910	
	18 h	285	-	700	922	
08/11/74	8 h	285	-	700	922	
	15 h	-	-	-	-	Fin pompage
09/11/74	?	230	475	640	900	
10/11/74	?	-	390	595	800	
11/11/74	?	-	305	300	600	
12/11/74	?	-	297	280	500	

Illustration 82 : Teneurs en chlorures en mg/L dans les eaux souterraines sur le site de Blainville-sur-Orne pendant un pompage d'essai (Dassibat et Pascaud, 1975)

L'interprétation du pompage d'essai montre une réalimentation de la nappe par le canal, une transmissivité de 25 m²/h et un coefficient d'emmagasinement de 1,5.10⁻⁴.

Les captages AEP situés à proximité, en rive gauche de l'Orne et du Canal (01205X0001/F5 et 01205X0005/F4) recoupent les calcaires de Blainville, de Creully et de Caen (Bathonien moyen), qui ne sont pas recouverts par les alluvions de l'Orne. Les analyses dans ADES ne montrent pas d'anomalies en chlorures.

A **Colombelles et Giberville**, deux groupes de forages (station de la Mare et station de la Gronde) permettaient d'alimenter la SMN (Société Métallurgique de Normandie). D'après les données en BSS, en 1965, les forages situés à la station de la Mare, au voisinage immédiat de l'usine, fournissaient 24 000 m³/jr et la station de la Gronde 7 000 m³/jr.

Station de la Gronde, les forages sont situés à Giberville à une altitude d'environ 9-10 m :

- [01205X0141/F1](#), [Cl] = 163 mg/L (21/07/1972), recoupe les calcaires de Creully et de Caen, atteint 30 m de profondeur ;
- 01205X0142/F2 et 01205X0003/F3, 30 m de profondeur, pas de données d'analyses physico-chimiques.

Station de la Mare : les forages sont situés à Colombelles en rive droite de l'Orne, à une altitude d'environ 2 m :

- D'après le rapport géologique rédigé par Pareyn en 1962 (disponible en BSS), les forages situés à la station de la Mare captent une source, qui émergeait au pied de la falaise bordant la rive droite de l'Orne. Les griffons de cette source sont situés dans les calcaires de Creully surmontant les bancs bleus des calcaires de Caen. Le milieu fissuré karstique permet un débit exceptionnel de cette source. Les ouvrages ont été réalisés en 1932 environ et atteignent une profondeur de 7 à 8 m.
- [01205X0143/F1](#), fortes teneurs en chlorures suivi entre 1963 et 1972 comprises entre 550 et 36 mg/L.

- [01205X0148/F6](#), deux analyses réalisées le 23/10/1974 et 06/12/1977 montrent des teneurs en chlorures respectivement de 103 et 126 mg/L.
- 01205X0144/F2, 01205X0145/F3, 01205X0146/F4, 01205X0146/F5, 01205X0147/F6 : pas de données d'analyses physico-chimiques.
- 01205X0398/111111 : prise d'eau en rivière, pas de données.

Les teneurs en chlorures mesurées dans les eaux du Bathonien à la station de la Mare proviennent probablement des alluvions de l'Orne ou de l'Orne directement. En effet, l'Orne alimentait en partie les forages, lorsqu'ils étaient en exploitation (24 000 m³/jr à 1 m d'altitude à proximité immédiate de l'Orne).

L'ouvrage [01205X0387/F1](#), réalisé en janvier 1972, situé sur le site de l'usine d'incinération de Colombelles atteint une profondeur de 61 m, il recoupe les calcaires de Ranville, Blainville, de Caen et atteint les marnes de Port-en-Bessin. Le forage capte les calcaires de Blainville et de Caen. D'après les données de la BSS, les prélèvements en 1974 étaient de 106 000 m³. Le 07/02/1972, une analyse des eaux souterraines indique une teneur en chlorures de 1739 mg/L, un suivi des chlorures entre 1974 et 1978 montre des concentrations comprises entre 60 et 80 mg/L. L'analyse de 1972 était faussée par les reliquats de l'acidification lors de la réalisation du forage. L'origine des chlorures sur cet ouvrage reste donc difficile à appréhender.

A **Mondeville**, la société frigorifique de Normandie (SOFRINO) exploitait deux ouvrages ([01205X0149/F1](#) et [01205X0150/F2](#)) à hauteur de 600 m³/jr chacun (données BSS) :

- L'ouvrage 01205X0149/F1, réalisé en 1950, est crépiné entre 33 et 54 m de profondeur. Il capte l'aquifère du Bajocien, notamment un horizon d'oolithe ferrugineuse et pyriteuse, qui est surmonté par 27 m de marnes et calcaires du Bathonien inférieur, trois mètres de galets datés du Wûrm et 11 m en subsurface de vase et de remblai. D'après des données en BSS, des analyses réalisées en 1950 de la nappe superficielle (nappe de galets) indiquent une concentration de chlorures de 882 mg/L, en 1951, les eaux de mélange (puits en service) montrent une concentration 69,5 mg/L. Une analyse réalisée en 1969 révélait des teneurs en chlorures de 350 mg/L, le forage n'était a priori pas pompé.
- L'ouvrage 01205X0150/F2, réalisé en 1962, atteint une profondeur de 48 m. Des prélèvements ont été réalisés entre 1964 et 1978, les teneurs en chlorures sont comprises entre 285 mg/L en 1969 et 1172 mg/L en 1976.

Il est probable que la contamination provienne des alluvions de l'Orne, cette formation pouvant atteindre 20 m d'épaisseur dans ce secteur, le sel pourrait alors se diffuser dans les calcaires du Bathonien et l'aquifère du Bajocien sous-jacent, notamment lorsque des pompes sollicitent l'aquifère alluvial.

6.9.3. Bassin de la Dives

Contexte géologique

Les Alluvions de la Dives recourent les marnes Callovo-Oxfordiennes et s'appuient sur les calcaires de Langrune.

Caractérisation de l'intrusion saline

En bordure du bassin ouest de la Dives, six captages, situés à la limite entre Bavent et Bures-sur-Dives sont destinés à l'alimentation en eau potable. Ces ouvrages sont suivis dans le cadre du contrôle sanitaire par l'ARS. Les données d'analyses sont disponibles sur ADES, parmi les six captages, trois forages ([01207X0012/FC4](#), [01207X0061/FC5](#), [01207X0077/FC7](#)) révèlent des teneurs en chlorures supérieures à 100 mg/L (Illustration 83). Ces ouvrages atteignent 60 à 70 m de profondeur, ils captent les eaux circulant dans les calcaires de Ranville, Blainville et de Caen. Les bancs bleus du calcaire de Caen, Bathonien inférieur sont atteints entre 50 et 58 m de profondeur. Les formations du Bathonien sont recouvertes de limons, de 3 à 13 m d'épaisseur. En 2013, environ 815 000 m³ ont été prélevés aux captages de Roncheville, situés à Bavent.

Les autres ouvrages 01206X0154/FC6 et 01207X0095/F8 ne révèlent pas d'anomalies en chlorures mais les eaux restent fortement minéralisées. Le bathonien est recouvert par quelques mètres d'argiles ou marnes.

L'ouvrage 01207X0098/F9 montre des teneurs en chlorures pouvant atteindre 82 mg/L, les formations du Bathonien au droit de cet ouvrage sont recouvertes par 6 m de tourbes et d'argiles du Flandrien. D'après le rapport géologique de Pareyn, 1980, (cf. dossier BSS 01207X0012), les calcaires du Bathonien peuvent être en contact avec les alluvions de la vallée de la Dives.

L'ouvrage [01203X0041/FE1](#) (log géologique présenté en Annexe 3), situé à Varaville profond de 118 m, a été réalisé en 1981 dans le cadre de recherche en eau. D'après un rapport de Pareyn de 1980 (cf. dossier BSS 01203X0041) suite à la réalisation de huit sondages de reconnaissance sur les communes de Bavent, Varaville et Petiville, les argiles du Callovien sont en contact avec les calcaires du Bathonien. C'est pourquoi il avait été proposé de réaliser les forages de recherche en eau sur les coteaux afin d'éviter le captage des eaux provenant des alluvions. Les formations quaternaires recoupées sont constituées :

- D'une série marine d'âge Quaternaire (Flandrien), d'environ 15 m d'épaisseur composées d'argiles et calcaires argileux entrecoupées de quelques niveaux de tourbes ;
- D'alluvions fluviales grossières plus anciennes sous la forme de cailloutis calcaires, correspondant au comblement d'un chenal initial de la Dives.

D'après le rapport Dassibat et Pascaud, 1981, l'ouvrage 01203X0041 est crépiné entre 47,5 et 73,5 m de profondeur (calcaires de Langrune, Ranville et Blainville) et entre 75 et 118 m de profondeur (calcaires de Creully et de Caen). L'ouvrage recoupe l'ensemble de la formation du Bathonien. La transmissivité est comprise entre 6.10^{-4} et 9.10^{-4} m²/s, et le coefficient d'emmagasinement est de 10^{-4} à 10^{-5} . Les pompages d'essai longue durée (100h) laissent supposer que l'aquifère présente un accident (ou plusieurs accidents se relayant) de direction subméridienne. Les mesures de vitesse de circulation de l'eau dans le forage ont montré que la zone productive était limitée entre 60 et 75 m. Des analyses physico-chimiques ont montré la

présence de sodium et de chlorures ($[Cl] = 320 \text{ mg/L}$, 12/06/1981), la présence de fluor (7,1 mg/L), d'ammoniaque et d'une faible teneur en oxygène.

L'ouvrage [01203X0044/F1-94](#) situé sur la butte de Robehomme, est profond de 45 m. Il capte les calcaires de Langrune et de Ranville. La transmissivité est de $1,65 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et le coefficient d'emménagement s'élève à 10^{-3} . Une analyse physico-chimique réalisée en juin 1994 montre une concentration en chlorures de 561 mg/L. Les eaux sont riches en ammoniaque et en fluorures, même signature que le point situé à Varaville. La nappe est captive et en milieu réducteur.

L'étude de Barbecot, 1999 sur la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère captif du Bathonien dans le bassin de la Dives montre que la salinisation est ancienne liée à une transgression pendant la période Atlantique (8000 à 4700 ans B.P.). Il n'y a pas d'intrusion d'eau de mer actuelle. Le processus de paléosalinisation s'ajoute à une interaction de l'eau avec la roche encaissante, induisant une augmentation des rapports Na/Cl liée au processus d'échanges cationiques Na vs Ca, maintenant ainsi les concentrations en Ca en sous saturation vis-à-vis de la fluorine (ou fluoroapatite). Ce contrôle chimique provoque une augmentation importante des teneurs en fluor.

6.9.4. Synthèse plaine de Caen et du bassin de la Dives

Les concentrations de sodium et chlorures pour les points situés dans la plaine de Caen et le bassin de la Dives discutés ci-dessus sont représentées sur l'illustration 83. Les eaux souterraines prélevées dans le bassin de la Dives sont enrichies en sodium, marqueur d'une interaction eau-roche et d'un temps de contact entre l'eau et la roche encaissante suffisamment important. Les eaux du Bathonien, comme discuté au paragraphe 5.2, présentent un enrichissement en chlorures probablement lié à une activité anthropique.

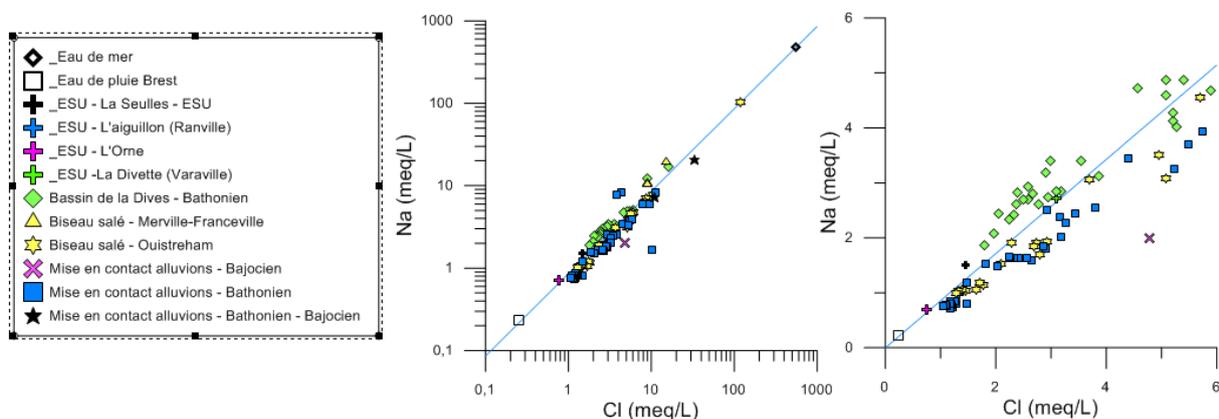


Illustration 83 : Diagrammes Na vs Cl pour les points ayant une anomalie en chlorures dans le secteur de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (en bleu : droite de l'eau de mer)

D'après Barbecot (1999), « les basses vallées de l'Orne et de la Dives sont colmatées par d'épais dépôts de remblaiements continentaux et marins du Quaternaire. Dans ces basses vallées, des dépôts fluvio-marins flandriens, sablo-limoneux à argileux, recouvrent des tourbes avec lesquelles ils s'intercalent (vallée de la Dives) ». Il est probable que ces formations récentes renferment une eau saumâtre mise en contact avec les eaux de l'aquifère du Bathonien ou du Bajocien, et contaminant ainsi ces dernières formations. On rappelle par ailleurs qu'une importante activité d'exploitation de salines a existé dans la basse vallée de la

Dives jusqu'au Moyen-âge sur le secteur de Varaville. Le rôle d'intrusions anciennes sur la qualité des eaux reste donc une hypothèse à étayer par des études complémentaires.

Entre 1973 et 1980, le BRGM a réalisé des prélèvements d'eau souterraine dans la basse vallée de l'Orne (Pascaud, 1973, Dassibat et Pascaud 1974 à 1980). Les majeurs et quelques mineurs ont été analysés, y compris les chlorures. Les analyses physico-chimiques de 1975, 1976, 1977 et 1978 sont présentées en Annexe 5 et la localisation des points de suivi en Annexe 6. Les résultats des concentrations en strontium sont présentés sur l'illustration 84.

L'illustration 84 présente les concentrations en strontium en fonction des chlorures analysées dans les eaux souterraines lors du suivi réalisé par le BRGM entre 1975 et 1979 dans cinquante-trois ouvrages localisés dans la basse vallée de l'Orne.

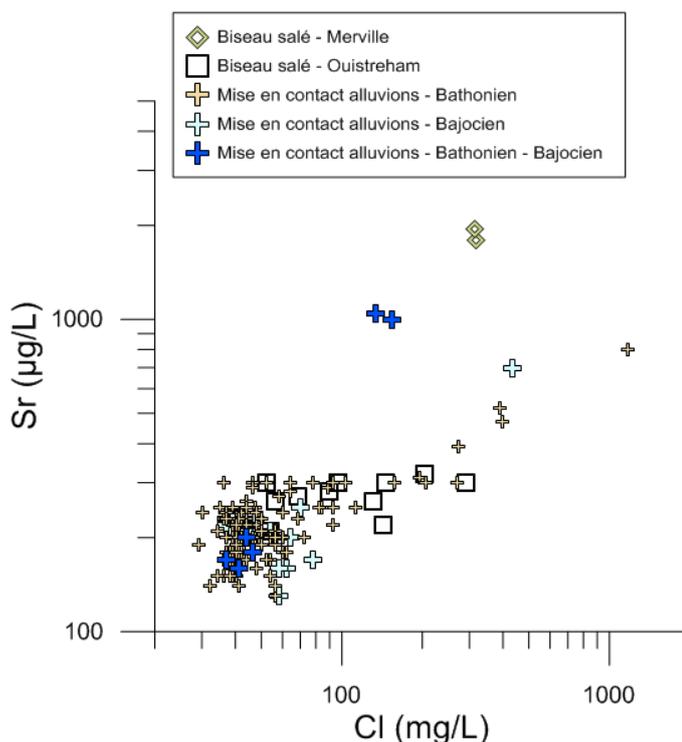


Illustration 84 : Diagramme strontium versus chlorures dans les eaux souterraines de la basse vallée de l'Orne (Dassibat et Pascaud, 1975 à 1978)

Le phénomène de biseau salé démontré dans les forages de Ouistreham ne semble pas associé à de fortes teneurs en strontium par rapport au pôle eau douce du Bathonien. Ce phénomène est relativement ponctuel, lié aux pompages et fait appel à une eau marine actuelle. Les fortes teneurs en strontium sont-elles liées à des eaux plus anciennes contenues dans les alluvions de la basse vallée de l'Orne ? Il serait intéressant de mener des investigations géochimiques complémentaires afin de valider ces hypothèses.

6.10. VALLEE DE LA TOUQUES

6.10.1. Contexte géologique

Les alluvions de la Touques reposent sur les formations géologiques du Jurassique supérieur : marnes calloviennes. L'épaisseur des alluvions peut dépasser 20 m. Celles-ci se composent d'alternances de dépôts sablo-graveleux avec des niveaux plus fins, argileux, parfois coquillers.

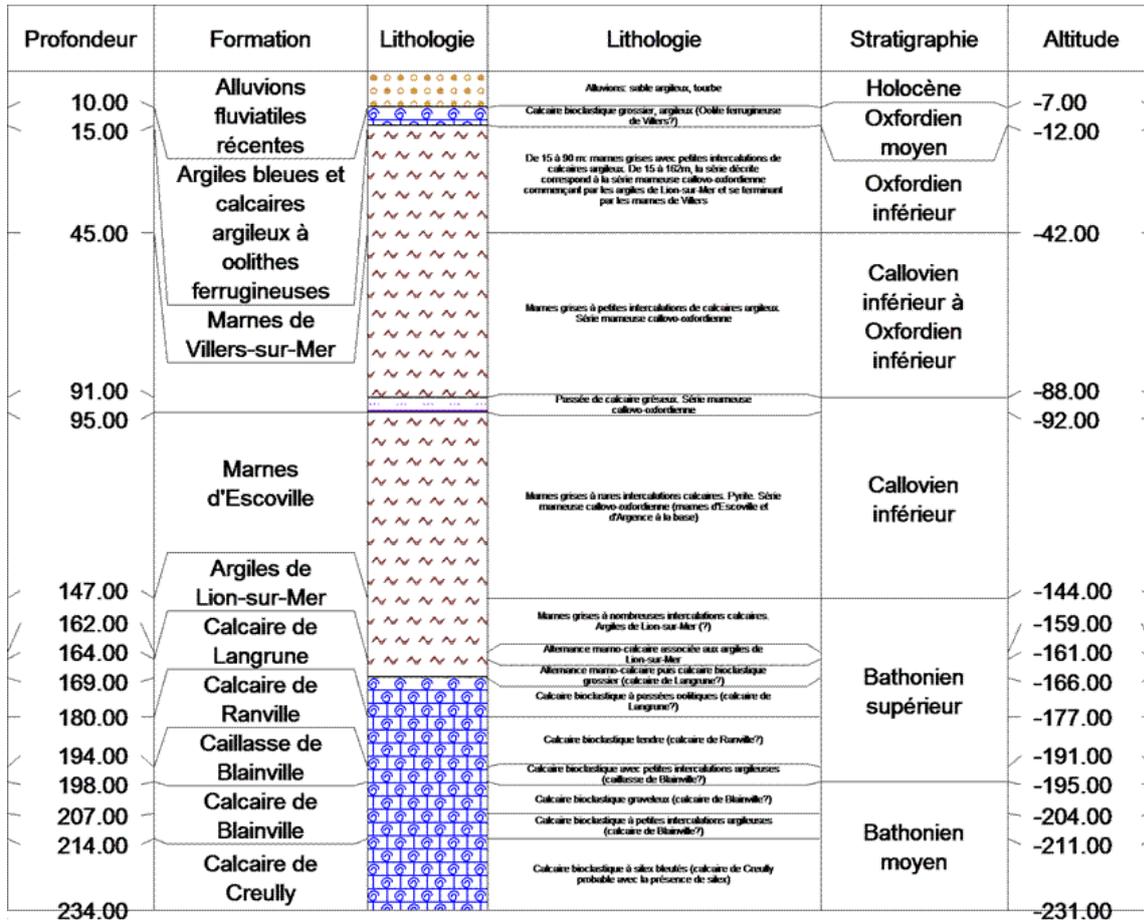


Illustration 85 : Coupe stratigraphique du forage 00975X0049/F2 à Deauville implanté dans la vallée de la Touques.

6.10.2. Caractérisation de l'intrusion saline

L'ouvrage [00976X0149/F](#), situé au voisinage de l'hippodrome de Deauville est situé en rive gauche de la Touques. Il atteint une profondeur de 20 m ; il est crépiné entre 14 et 20 m de profondeur et recoupe les alluvions de la Touques (gravier, sable et argile). Il atteint probablement le niveau argileux de l'Oxfordien. Une analyse réalisée en août 1974 montre une concentration en chlorures de 1562 mg/L. Il s'agit très probablement de l'eau d'origine marine, le processus en jeu est difficile à définir que ce soit un phénomène de biseau salé, de rentrant salé ou de paléosalinisation. En effet, une seule analyse a été collectée dans ce secteur.

L'ouvrage [01213X0228/S1](#), situé à Saint-André-d'Hebertot atteint une profondeur de 70 m et recoupe les sables de Glos de l'Oxfordien supérieur et les calcaires corallien et oolithique de l'Oxfordien moyen, il capte seulement l'Oxfordien moyen. Une analyse réalisée en octobre 1988

révèle une concentration en chlorures de 358 mg/L, le peu de données ne permet pas de conclure quant à l'origine de ces chlorures.

Des compléments seraient nécessaires pour étudier le phénomène en jeu plus avant : analyses géochimiques, géophysiques par exemple. Cette acquisition de données permettrait de proposer dans un premier temps des hypothèses sur les anomalies constatées dans les eaux souterraines.

6.11. SYNTHÈSE DES PROCESSUS D'INTRUSIONS SALINES ACTUELLEMENT EN JEU

Le phénomène d'intrusion marine impacte plusieurs aquifères côtiers en Basse-Normandie, des aquifères de socle (schistes Briovériens, granite) dans le département de la Manche, des aquifères dunaires, superficiels (alluvions, polders), des aquifères sédimentaires (cénozoïque, bathonien, bajocien, lias, trias). Les processus d'intrusions marines dans ces aquifères cibles sont multiples, et parfois au sein du même aquifère impacté.

La synthèse des connaissances présentées au chapitre 6 a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- Pour **le secteur du Mont Saint Michel et Basse Vallée de la Sélune** :
 - Les données hydrochimiques ne permettent pas de caractériser, le phénomène d'intrusion saline mis en évidence sur ce secteur. Les études actuelles ne permettent pas d'indiquer si celui-ci est la résultante d'intrusions marines actuelles ou si d'autres phénomènes doivent entrer en jeu (dissolution dépôts salins anciens, mélange avec intrusion saline ancienne, biseau salé et rentrant fluvial).
 - une étude complémentaire ciblée, notamment en exploitant l'outil isotopique, pourrait permettre de déterminer l'origine des teneurs en chlorures des eaux souterraines.
- Pour **le littoral ouest de la Manche** :
 - les résultats montrent une intrusion d'eau de mer actuelle significative au niveau des havres de Blainville, de Geffosses et de Lingreville dans les petits aquifères sableux côtiers. Il serait intéressant d'effectuer des mesures de conductivité plus en profondeur pour observer une éventuelle évolution de la conductivité dans les formations de socle.
 - Les informations hydrochimiques disponibles actuellement sur les anomalies constatées dans l'estuaire de la Sienne ne permettent pas de conclure quant à l'origine de ces anomalies (intrusion actuelle, ancienne, interaction eau/roche,...).
- Pour **le Val de Saire** :
 - plusieurs hypothèses sont posées pour expliquer les fortes teneurs en minéraux dans les terrains Briovérien rencontrés dans la vallée de la Sélune, dans un ouvrage à Granville et dans le val de Saire : Eaux profondes salées d'origine marine, Eaux profondes salées d'origine non marine (évaporites, filons de minéraux précipités dans les fissures et fractures) ; Intrusion d'eau de mer (subactuelle et/ou ancienne) par les zones de failles.
 - Quant aux ouvrages situés dans les formations granitiques entaillées par des petits cours d'eau côtiers dans le val de Saire, les chlorures peuvent être de plusieurs origines : on peut également ajouter une intrusion d'eau de mer

- pénétrant dans les alluvions des petits cours d'eau côtiers, en contact avec le granite sous-jacent.
- Des investigations complémentaires (analyses physico-chimiques et isotopiques) seraient nécessaires pour comprendre les processus en jeu dans la salinisation de l'aquifère dans ce secteur en particulier.
- Pour les **bassins sédimentaires du seuil du Cotentin** :
 - Dans les bassins sédimentaires de St Sauveur le Vicomte et du Merderet où des anomalies ont été constatées, les chlorures semblent être d'origine marine, l'hypothèse faite est que l'intrusion serait probablement ancienne, ou liée à des dépôts marins du Quaternaire. Les eaux souterraines sont enrichies en sodium, ce qui indiquerait également que les interactions eau-roche existent également. Les éléments hydrochimiques actuels ne permettent pas de vérifier cette hypothèse.
 - Pour le **Plain Littoral** :
 - Dans le secteur du Plain littoral dans l'est du Cotentin, les formations du Quaternaire, composées d'alluvions et de colluvions nappant les pentes, et de dunes et sables littoraux flandriens au droit des marais actuels, sont probablement impactés par des intrusions salines actuelles. Il est également possible que ces dépôts renferment des eaux salées, datant de leurs mises en place.
 - Nous ne disposons pas d'éléments de mesure (chimiques ou géophysiques) sur ce secteur permettant de caractériser les mécanismes en jeux.
 - Pour la **vallée de l'Aure et la baie des Veys** :
 - La basse vallée de l'Aure possède une configuration favorable aux intrusions salines. En effet les points se situent dans une zone basse topographique, avec un faible gradient hydraulique. Les zones de recharge de l'aquifère du Trias semblent restreintes, associées à un faible apport d'eau douce. La charge d'eau salée est d'autant plus difficile à chasser dans ce type de configuration.
 - En amont de la vallée, il est probable que les formations du Quaternaire renferment une eau saumâtre ancienne, en contact localement avec l'aquifère du Trias sur la bordure du bassin de l'Aure. Les forages situés dans le Trias pourraient également faire appel aux eaux de surface contenues dans le marais, notamment lors de prélèvements.
 - En aval de la vallée, au niveau de la Baie des Veys, l'hypothèse proposée est celle d'un phénomène de biseau salé du fait de la proximité avec l'eau de mer, en particulier si des prélèvements d'eau souterraine existent. L'avancée du biseau salée pourrait alors être influencée par les pompes dont le rayon d'action atteint la mer.
 - Par contre, dans la baie des Veys, il apparaît difficile d'appréhender les intrusions salines dans les formations mésozoïques sous-jacentes aux dépôts quaternaires. La géométrie de ces formations n'est pas assez connue.
 - En tout état de cause des sondages de reconnaissance couplés à une campagne géophysique et des analyses physico-chimiques seraient nécessaires pour aller plus loin dans la connaissance et la caractérisation du phénomène.
 - **Pour le littoral du Bessin** :
 - Il est probable que le système structural ou karstique dans ce secteur mette en contact des eaux saumâtres circulant dans les formations littorales et l'aquifère du Bajocien, expliquant ainsi une salinisation des eaux du Bajocien. Il est aussi probable que la formation des marnes de Port-en-Bessin se biseautent et disparaissent, mettant en contact les formations du Quaternaire et l'aquifère du Bajocien.

- La formation du Bajocien peut localement être en contact avec l'eau de mer sur l'estran par le jeu de failles. Les eaux du Bajocien, confinées, sont connues pour être fortement minéralisées. Dans ce cas il peut exister une chimie marquée par l'interaction eau-roche avec un net enrichissement en sodium vis-à-vis des chlorures, et de fortes teneurs en sulfates.
- Des compléments géochimiques semblent nécessaires pour valider les différentes hypothèses.
- Pour la **plaine de Caen et la vallée de la Dives** :
 - Les études mettent en évidence que le canal entre Caen et la mer et l'avancée du biseau salé dans l'estuaire de l'Orne sont à l'origine de la présence d'anomalies en chlorure dans les ouvrages présentés. Les liens contemporains semblent clairement établis.
 - Concernant le bassin de la Dives, les études montrent que la salinisation est ancienne liée à une transgression pendant la période Atlantique (8000 à 4700 ans B.P.). Il n'y aurait pas d'intrusion d'eau de mer actuelle. Le processus de paléosalinisation s'ajoute à une interaction de l'eau avec la roche encaissante, induisant une augmentation des rapports Na/Cl liée au processus d'échanges cationiques Na vs Ca, provoquant une augmentation importante des teneurs en fluor.
- Pour la **vallée de la Touques** :
 - Il s'agit très probablement de l'eau d'origine marine, le processus en jeu est difficile à définir que ce soit un phénomène de biseau salé, de rentrant salé ou de paléosalinisation.
 - Des compléments seraient nécessaires pour étudier le phénomène en jeu plus avant : analyses géochimiques, géophysiques par exemple. Cette acquisition de données permettrait de proposer dans un premier temps des hypothèses sur l'origine des anomalies constatées dans les eaux souterraines.

7. Présentation des principaux résultats du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères face aux intrusions salines

Pour plus d'information, le lecteur est invité à prendre connaissance du rapport RP66229-FR, *Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives* (Novembre 2016).

7.1. OUTILS ET METHODES MIS EN ŒUVRE

7.1.1. Utilisation du Modèle Maillé et du modèle analytique

Dans un premier temps, le modèle maillé est utilisé en régime transitoire pour évaluer l'impact de la modification de données d'entrée sur les flux de recharge et les flux sortant du modèle. Ensuite, le modèle maillé est utilisé en régime permanent en utilisant les valeurs de recharge moyenne déterminée lors de la première étape pour simuler l'impact de la modification de la recharge moyenne, des prélèvements et/ou du niveau marin sur les niveaux piézométriques. Ces résultats sont ensuite utilisés dans le modèle analytique pour étudier l'impact de ces changements sur l'interface eau douce - eau salée.

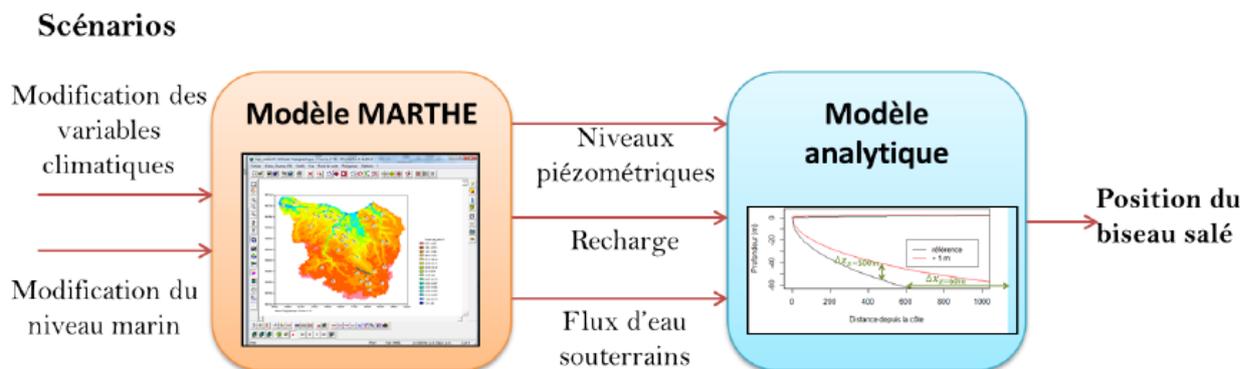


Illustration 86 : Schéma de la méthode de travail faisant intervenir un modèle maillé suivi d'un modèle analytique

Le modèle analytique utilisé considère un aquifère libre dont le substratum est horizontal et imperméable. L'aquifère est par ailleurs considéré comme homogène et isotrope et le régime d'écoulement comme permanent. A l'aval le niveau piézométrique est contrôlé par le niveau de la mer (condition de charge imposée).

7.1.2. Scénarii

Cinq scénarii ont été construits en concertation avec le Comité de Pilotage de l'étude. Ils ont permis de tester l'influence de la montée du niveau marin, du changement des conditions climatiques et de l'augmentation des prélèvements. Les quatre premiers scénarii représentent

un état moyen sur l'année, tandis que dans le dernier scénario on a différencié un état de basses eaux et un état de hautes eaux.

	Hausse du niveau marin	Modification des variables climatiques	Evolution des prélèvements	Régime testé
Scénario 1	0,5 m	inchangées	inchangés	Permanent moyen
Scénario 2	0,5 m	selon scénario RCP2.6	inchangés	Permanent moyen
Scénario 3	1 m	selon scénario RCP8.5	inchangés	Permanent moyen
Scénario 4	1 m	selon scénario RCP8.5	+ 10 %	Permanent moyen
Scénario 5	1 m	selon scénario RCP8.5	inchangés	Permanent basses eaux et hautes eaux

7.1.3. Limites

Les résultats font l'objet du rapport BRGM RP-66229-FR. Ils sont à considérer avec précaution car le modèle analytique est basé sur de nombreuses hypothèses simplificatrices (aquifère homogène, régime permanent, limite franche entre eau douce et eau salée notamment) ; les valeurs d'avancée et de remontée du biseau salé données ne sont donc que des ordres de grandeurs ; il est par contre intéressant d'adopter une approche relative et de les comparer entre elles pour les différentes zones et les différents scénarii.

7.2. PRINCIPAUX RESULTATS

La réalisation de cinq scénarii prédictifs à l'aide du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives apporte des éléments intéressants sur les évolutions des niveaux piézométriques et des flux d'eau souterraine sortant en mer que l'on peut attendre suite à une modification des variables climatiques, à une hausse du niveau marin et à une hausse des prélèvements. L'utilisation conjointe d'un modèle analytique simple a permis de traduire ces résultats en termes d'avancée du biseau salé.

Le modèle analytique a permis de montrer que la position de l'interface eau douce – eau salée est impactée par une montée du niveau de la mer de façon d'autant plus importante qu'un cours d'eau se trouve à proximité du littoral. D'autre part, pour une recharge donnée, plus la perméabilité de l'aquifère est faible, plus les gradients piézométriques sont forts et donc moins le biseau salé pénètre à l'intérieur des terres. L'influence d'une baisse de la recharge est d'autant plus forte que la perméabilité est faible. Ainsi, à une autre échelle de travail, non prise en compte dans ce modèle, le rôle des failles et des drains karstiques devrait nécessairement être pris en compte.

Les travaux de simulations réalisés ont montré que les zones les plus vulnérables au développement d'un biseau salé sont les basses vallées de l'Aure, l'Orne et la Dives. Dans ces zones les gradients piézométriques sont faibles et les cours d'eau jouent le rôle de tampon pour les évolutions de la nappe. Les simulations effectuées sur le secteur de l'Aure,

l'Orne et la Dives ont également montré que l'élévation du niveau marin ainsi que l'augmentation des températures risquent d'entraîner une diminution notable des débits sortant en mer dans ce secteur, ce qui favoriserait la pénétration du biseau salé. Dans un scénario pessimiste, l'avancée du biseau salé pourrait même atteindre plusieurs kilomètres dans ces basses vallées, tandis qu'elle ne dépasserait pas quelques centaines de mètres en dehors.

Une augmentation des prélèvements n'entraînerait a priori pas de diminution très importante des débits d'eau souterraine sortant en mer : si l'influence de certains pompages peut être localement très forte et entraîner une remontée de l'interface eau douce-eau salée, on ne s'attend pas a priori, à un effet marqué à plus grande échelle.

Par ailleurs, les effets les plus importants des modifications des variables climatiques sont à attendre en période de basses eaux, période déjà la plus critique quant à la pénétration du biseau salé.

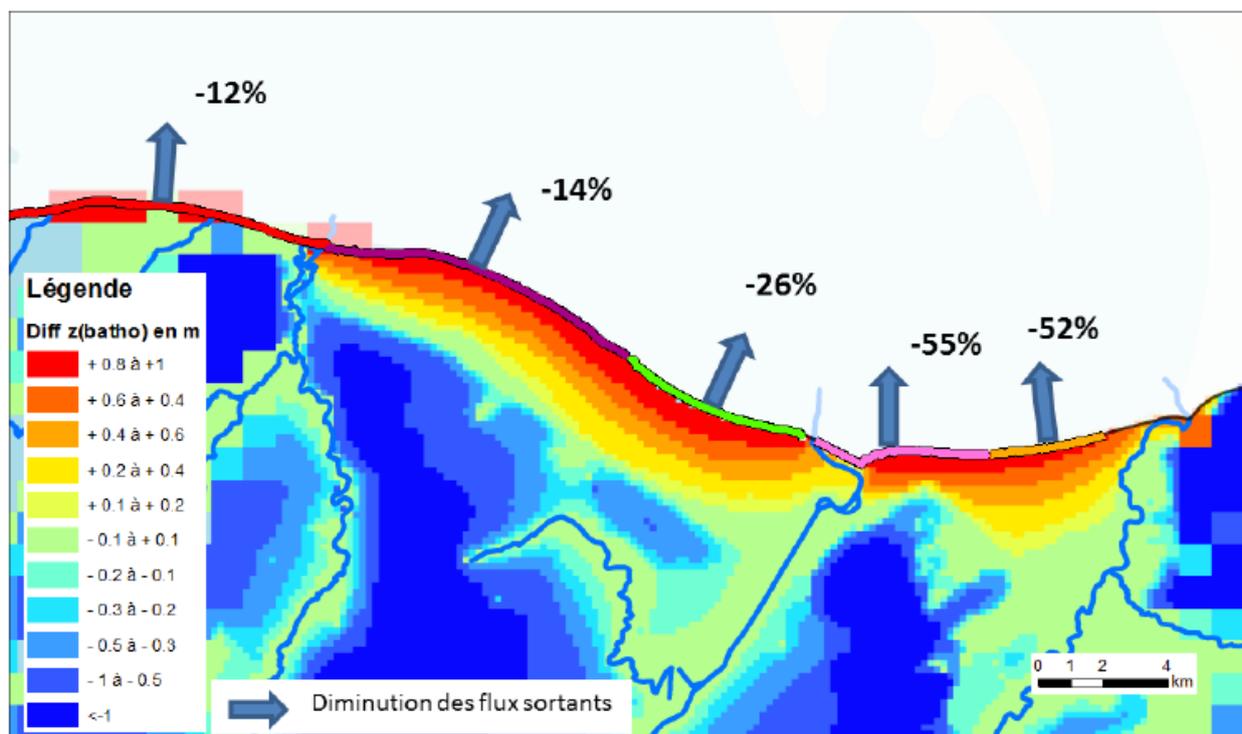


Illustration 87 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortants du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence (niveau marin +1 m avec augmentation des prélèvements de 10 %).

8. Evaluation de la vulnérabilité

8.1. PRESENTATION DE LA METHODE GALDIT

Une méthode pour apprécier la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines utilisée par le BRGM se nomme la méthode GALDIT (Chachadi et Ferreira, 2005). Celle-ci a été utilisée notamment lors de l'étude nationale (RP-60829-FR). Cette méthode utilise une classification par index reposant sur la combinaison de différents paramètres pondérés. Une note est attribuée à chacune des classes de ces paramètres. La vulnérabilité globale s'exprime de la façon suivante :

$$\text{indice_GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 p_i R_i}{\sum_{i=1}^6 p_i}$$

Où p_i est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre i

R_i est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10)

La classification est reprise dans le tableau suivant :

Paramètres	Poids	Rangs			
		Très Faible	Faible	Moyen	Elevé
		2,5	5	7,5	10
G : Type d'Aquifère	1	contraint	captif	semi-captif	libre
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	1,5 - 1	< 1
D : Distance à 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 88 : Tableau de synthèse des poids et rangs de la méthode GALDIT (Dörfliger, 2011)

Cette évaluation de la vulnérabilité des aquifères nécessite une adaptation pour prendre en compte les spécificités géologiques et hydrogéologiques locales et les données disponibles à l'échelle de travail de la Normandie Occidentale.

C'est le cas en particulier pour le paramètre « type d'aquifère (G) ». Celui-ci repose sur le caractère libre, captif ou contraint des aquifères.

Dans le cas présent, celui-ci est estimé comme constant et ne sera donc pas pris en compte pour le calcul. En effet, la zone d'exploitée des aquifères côtiers est, le plus souvent, à faible profondeur, dans les aquifères libres (leur profondeur est généralement inférieure à 150 m).

La méthode retenue dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers de Normandie occidentale est présentée ci-après.

8.2. LA VULNERABILITE ACTUELLE V_{ACT}

Pour étudier la vulnérabilité actuelle des aquifères aux intrusions salines, nous considérons l'aquifère affleurant (libre) au niveau du littoral.

Afin de déterminer des classes de vulnérabilités, nous utiliserons la formule habituelle des classifications à index. Pour cela, un poids est attribué à chaque paramètre en fonction de son influence sur la vulnérabilité totale. Dans chaque paramètre, un rang est donné aux valeurs permettant de classer leur degré de vulnérabilité. Au final l'utilisation de la formule suivante permettra d'identifier un indice de vulnérabilité afin d'identifier les zones vulnérables :

$$V_{act} = \frac{\sum(Poids * rang)}{\sum Poids}$$

Suivant les délimitations géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques réalisées préalablement à chaque point, il est possible d'identifier une valeur de vulnérabilité et ainsi créer des classes de vulnérabilités en fonction des paramètres étudiés. Afin de calculer la vulnérabilité finale, un croisement des données cartographiques sera réalisé sous SIG, respectant la formule de calcul ci-dessus. Un résumé des paramètres figurera dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Poids	Rang			
		Très faible	faible	moyen	élevé
		2,5	5	7,5	10
Conductivité hydraulique (A) et épaisseur de la zone saturée (E)	3	1	2-3	4-5	6
Epaisseur de la zone saturée au-dessus du niveau marin (L) en mètres	4	>10	5-10	2,5 - 5	0 – 2,5
Distance à la côte (D) en mètres	2	2000-5000	1000 – 2000	500 – 1000	0 – 500
Anomalie en chlorure (I)	Aucun	Facteur aggravant			

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des notes et du poids accordés à chaque paramètre

8.2.1. La Conductivité Hydraulique (A) et épaisseur de zone saturée (E)

Pour estimer le paramètre de conductivité hydraulique, il a été décidé de lier cet élément à la géologie des aquifères côtiers. En effet, suivant leurs caractéristiques intrinsèques et la fracturation, l'eau ne pourra pas circuler de la même façon. Le paramètre hydrodynamique choisi pour servir à caractériser la conductivité hydraulique des grands ensembles de roches est la transmissivité. Celle-ci correspond à la perméabilité multipliée par l'épaisseur de la zone saturée (ou épaisseur mouillée) de l'aquifère. Il permet ainsi de prendre en compte deux paramètres importants en une seule fois.

L'épaisseur de la zone saturée est donnée de façon qualitative. Les valeurs des paramètres hydrodynamiques connus par essai de pompage ponctuels dans différentes formations et renseignés au sein de la BSS ont été extrapolées afin d'attribuer une gamme de transmissivité aux différents faciès géologiques

Une note globale est attribuée, à dire d'expert, pour chaque gamme de transmissivité et d'épaisseur saturée.

La géologie est un élément primordial par rapport à l'impact des intrusions salines, les caractéristiques physiques vont influencer l'avancée des intrusions salines. Pour ces raisons, le poids accordé à la géologie sera de **3**.

Une synthèse est proposée ci-après. Celle-ci se base sur les principales informations disponibles au niveau de la banque du sous-sol (BSS) pour les ouvrages déclarés.

6 classes ont été choisies pour représenter la vulnérabilité des aquifères côtiers : de 1 le moins vulnérable à 6, le plus vulnérable. Le choix de notation proposé se fait « à dire d'expert ».

Nom de l'aquifère	Géologie	Transmissivité* (m ² /s)	Épaisseur Saturée	Notation
Alluvions	Alluvions	10 ⁻¹ et 10 ⁻³	Faible	6
Formations éoliennes/Dunes	Sables, paléosols	10 ⁻² et 10 ⁻³	Faible	5
Formations marines du Quaternaire	Sables et argiles coquillers, tangué	10 ⁻³ et 10 ⁻⁵	Faible	4
Plio-Pleistocène	Sables - lumachelles	10 ⁻²	Faible	5
Miocène	Faluns	10 ⁻¹ à 10 ⁻⁴	Moyenne	4
Crétacé	Craie et argile sableuse à la base	10 ⁻² et 10 ⁻⁵	Moyenne	3
Oxfordien-Kimmeridgien	Marnes et calcaires	10 ⁻² et 10 ⁻⁵	Moyenne	3
Callovien	Marnes et calcaires	10 ⁻⁴ et 10 ⁻⁶	Moyenne	2
Bathonien	Marnes et Calcaires	10 ⁻¹ et 10 ⁻⁴	Moyenne	4
Bajocien	Marnes et calcaires	10 ⁻¹ et 10 ⁻⁵	Moyenne	4
Lias	Alternances marno-calcaires	10 ⁻² et 10 ⁻⁶	Moyenne	3
Trias	Argiles, sables, calcaires	10 ⁻² et 10 ⁻⁴	Faible	4
Permo-Trias	Argiles, Calcaires, grès et schistes	10 ⁻² et 10 ⁻⁵	Faible	3
Formations Briovériennes	Phtanites, grès et schistes Cornéennes	10 ⁻² et 10 ⁻⁷	Importante	2
Métavolcanismes protérozoïques	Roches volcaniques diverses auréoles métamorphiques	10 ⁻³ et 10 ⁻⁶	Importante	3
Paléozoïques sédimentaires	Grès et schistes	10 ⁻³ et 10 ⁻⁷	Importante	2
Granite Hercynien	Granite alcalin	10 ⁻⁵ et 10 ⁻⁸	Importante	1
Granites Cadomiens	Granodiorite	10 ⁻⁵ et 10 ⁻⁸	Importante	1

Tableau 2 : Géologie, transmissivités et notation de la géologie bas-normande,
* extrapolation à partir de données connues sur les forages

Par ailleurs, la géologie influe nettement sur la géomorphologie du trait de côte. L'influence de ce dernier paramètre physique sur les intrusions salines n'est pas pour le moment clairement établie. C'est pourquoi nous choisissons de ne pas développer son influence sur la vulnérabilité globale des aquifères côtiers « Bas-Normands ».

Carte schématique des principales formations aquifères de la Basse-Normandie

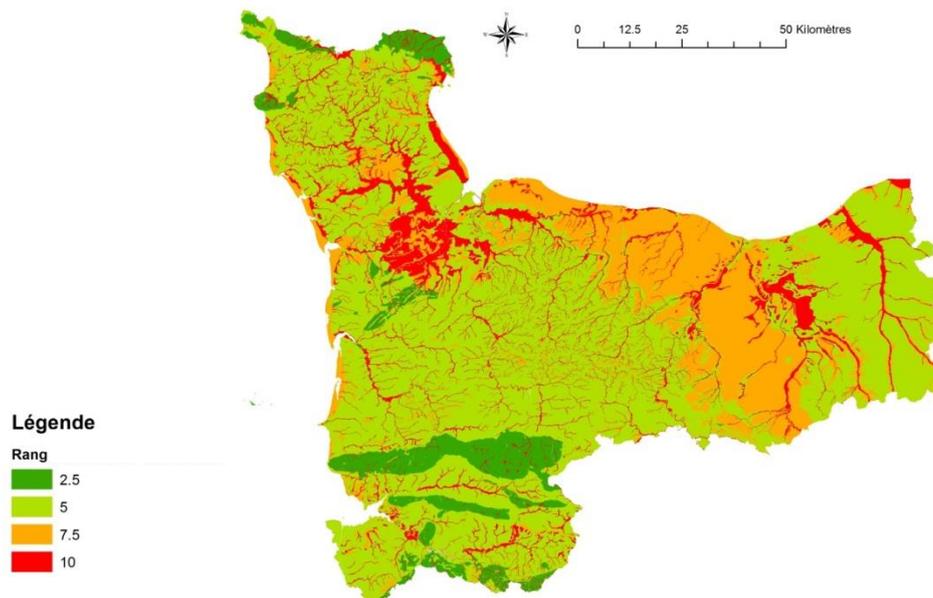
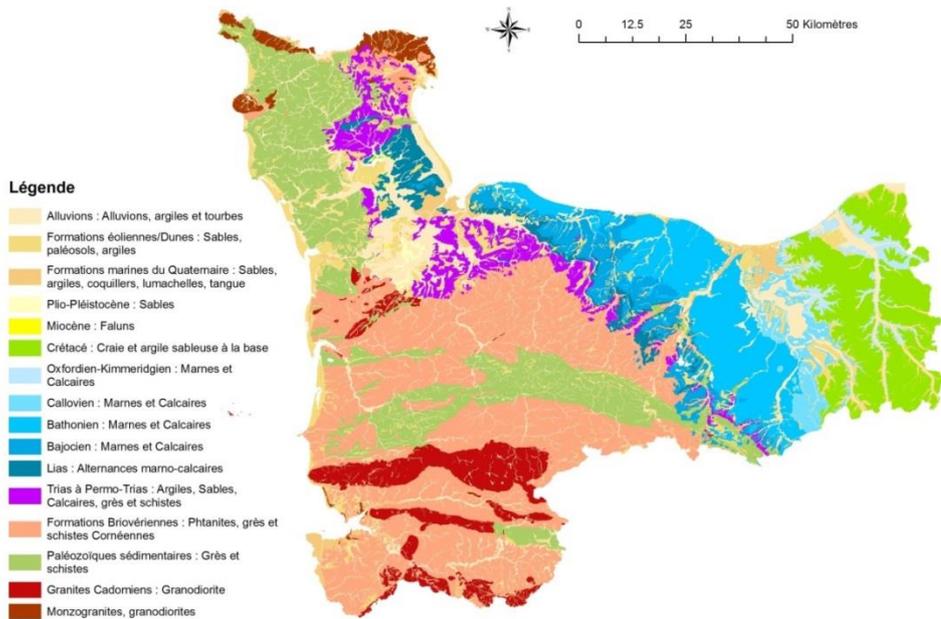


Illustration 89 : Cartes schématiques des principales formations aquifères avec leur notation agrégée pour les paramètres Conductivité hydraulique (A) et épaisseur de la zone saturée (E)

8.2.2. Altitude de la nappe/Niveau de la Mer (L)

Dörfliger (2011) résume le principe de Ghyben-Herzberg sur le biseau salé de la façon suivante : 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.

Nous proposons de retenir les notes suivantes :

- On considérera donc que lorsque le niveau piézométrique est supérieur à 10 mètres NGF l'aquifère est peu-vulnérable (rang le plus faible).
- Entre 5 et 10 mètres au-dessus du niveau de la mer cela correspondrait à situer théoriquement le biseau salé entre 200 et 500 mètres de profondeur. Le risque de contamination est faible même en cas de pompage. En effet, il est rare de voir des ouvrages descendre au-delà de 200 m de profondeur pour une exploitation des aquifères côtiers, même en domaine de socle où les rabattements sont en général plus importants que dans les zones sédimentaires. La notation sera de 1 et correspond à une sensibilité moindre.
- Entre 2,5 et 5 mètres au-dessus du niveau de la mer la sensibilité est estimée comme étant intermédiaire. La note proposée est de 3.
- Entre 0 et 2,5 mètres on estime que la sensibilité est forte, puisque le gradient hydraulique y est plus faible.

Épaisseur de la zone saturée au-dessus du niveau marin (en m)	Rang
0 - 2,5	10
2,5 - 5	7,5
5 - 10	5
>10	2,5

Tableau 3 : Rang des différentes hauteurs piézométriques situées au dessus du niveau de la mer

Ces données ont été obtenues auprès de la DREAL Basse-Normandie (Illustration 90).

Le poids accordé pour ce paramètre est de **4** en raison de son importance cruciale sur la profondeur du biseau salé.

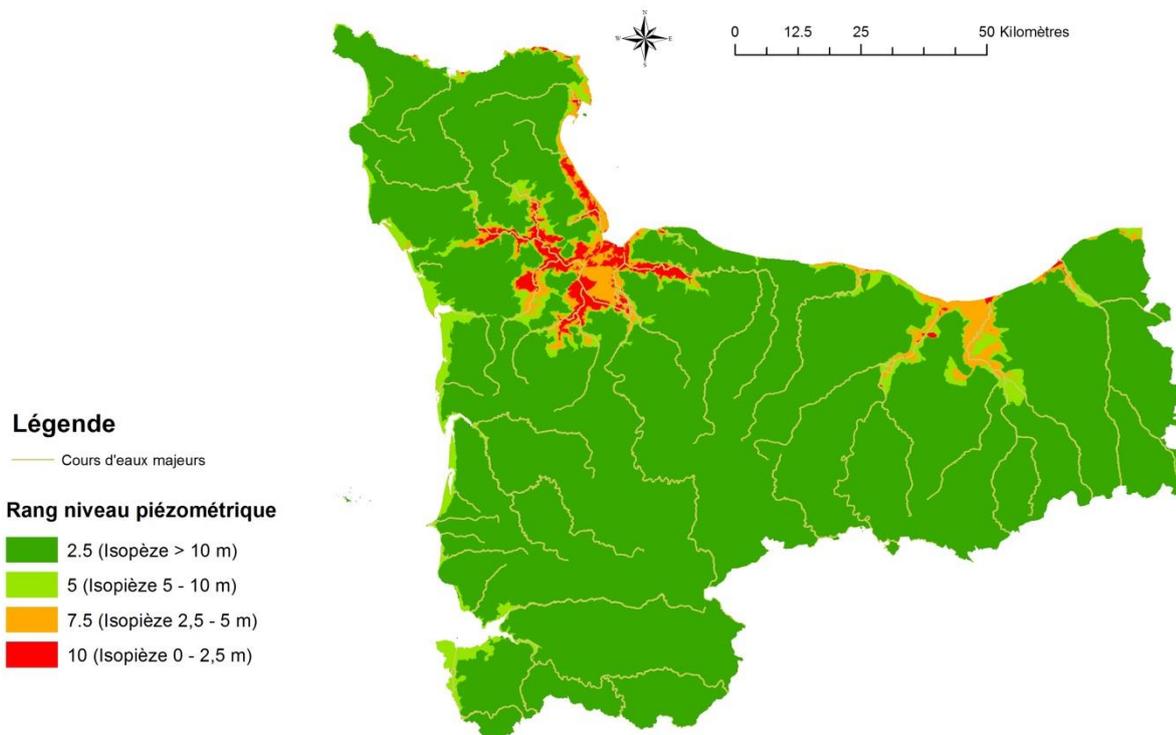


Illustration 90 : Carte des épaisseurs de la zone saturée au dessus du niveau marin (source : DREAL Normandie)

On note que cette carte se corrèle bien avec les zones les plus basses en altitude. La frange littorale de l'Est et l'Ouest du Cotentin, les marais du Bessin et du Cotentin, ainsi que les vallées de l'Orne, la Dives, et de la Touques apparaissent comme particulièrement sensibles au phénomène d'intrusion saline.

8.2.3. La distance à la côte (D)

En raison des densités de l'eau salée et de l'eau douce conjuguées au gradient entre niveau piézométrique et niveau marin, le biseau salé va s'abaisser avec la distance à la côte. En conséquence, la vulnérabilité de l'aquifère diminue fortement en s'éloignant de la côte. 5 niveaux de vulnérabilités sont proposés en fonction de cette distance :

Distance à la côte (m)	Rang
0-500	10
500 - 1000	7,5
1000 - 2000	5
2000 - 5000	2,5

Tableau 4 : Rang des classes du paramètre distance à la côte en Basse-Normandie

Le poids mis à la distance à la côte sera de 2 en raison de son influence inférieure à la piézométrie mais l'éloignement du littoral reste une caractéristique importante à prendre en compte dans le calcul. Les valeurs proposées diffèrent de celles de la méthode GALDIT afin de mieux prendre en compte les rentrants, littoraux, estuaires et vallées côtières.

La carte suivante a été réalisée à partir du trait de côte Histolitt® (SHOM) et correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptibles d'élever le niveau de la mer). On se propose d'appliquer une zone tampon pour chaque classe de distance proposée ci-dessus et d'y faire correspondre la notation proposée.

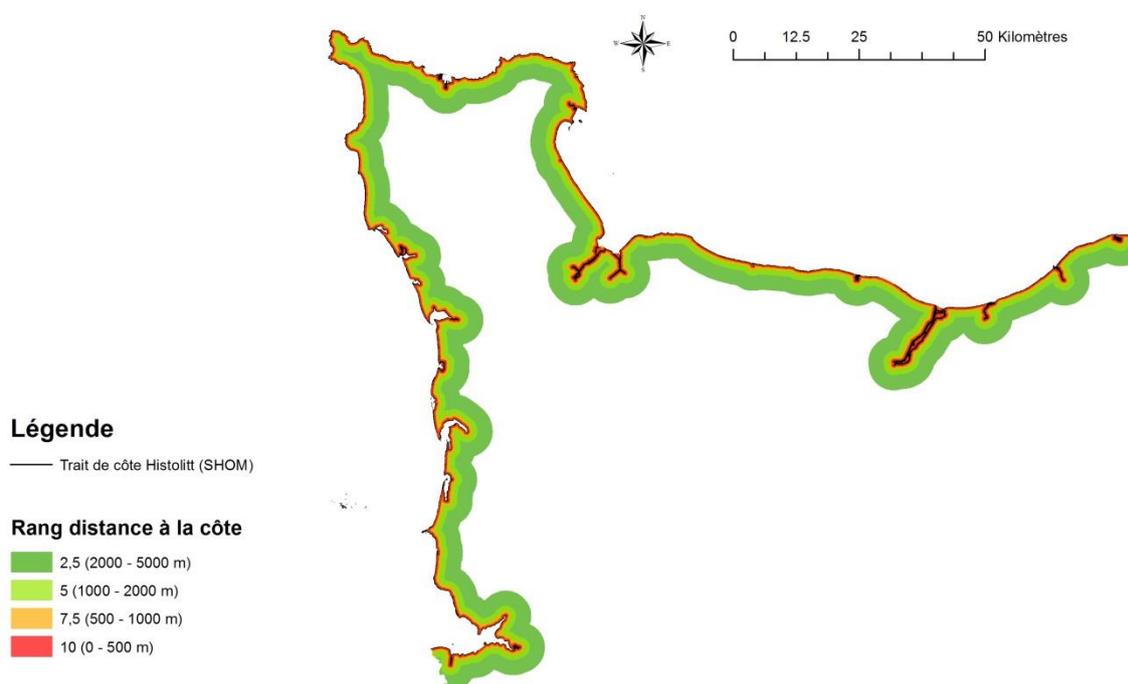


Illustration 91 : Distance à la côte, donnée trait de côte Histolitt (SHOM)

Les estuaires et vallées côtières apparaissent plus sensibles pour ce paramètre.

8.2.4. Impact actuel de l'intrusion saline (I)

La présence de points avec une concentration en chlorures anormale est un facteur aggravant (et un marqueur de vulnérabilité tout à la fois).

Nous renvoyons le lecteur au chapitre 6 traitant de l'hydrochimie, détaillant les hypothèses retenues sur les ouvrages montrant des anomalies en chlorures. Nous avons reporté sur la carte ci-dessous pour mémoire les points possédant une anomalie en chlorures.

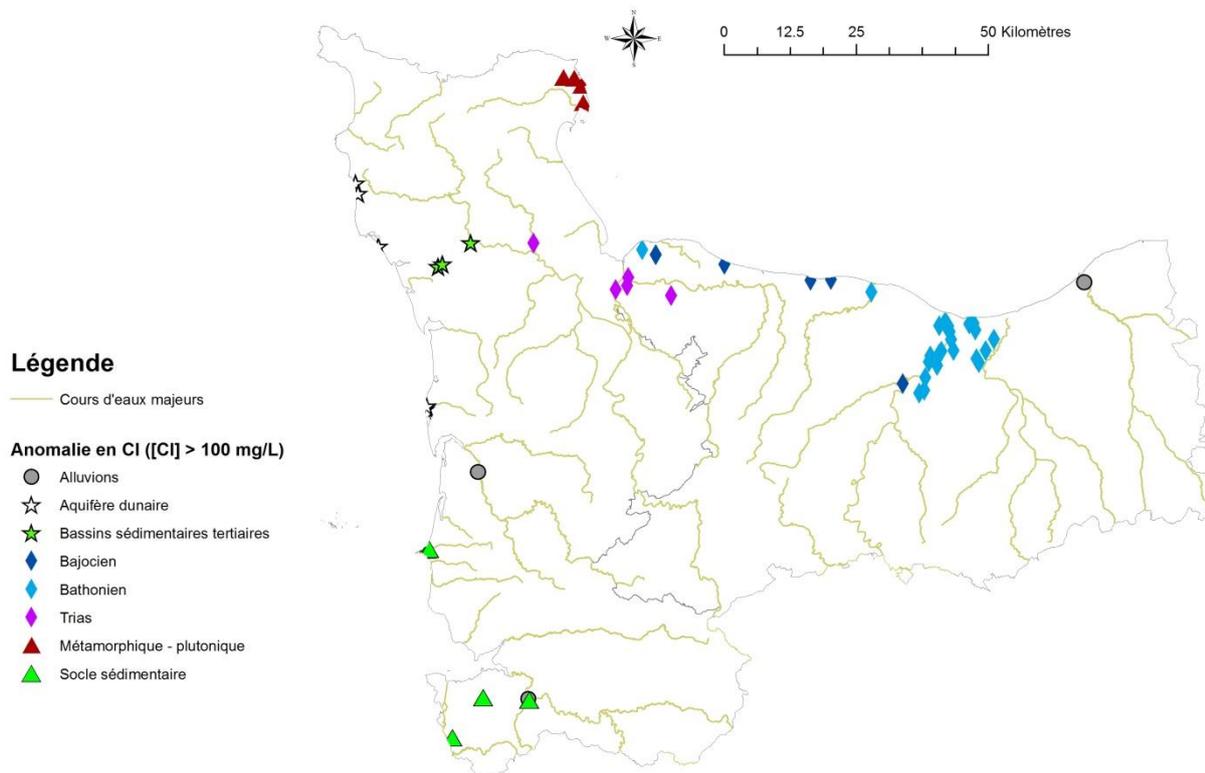


Illustration 92 : Rappel des points susceptibles d'être affectés par une intrusion saline

Les zones qui apparaissent comme sensibles en termes d'anomalies en chlorures sont :

- Avranchin,
- Région de Créances,
- Bassin de St Sauveur,
- Val de Saire,
- Marais du Cotentin,
- Vallée de l'Aure et Bessin
- Côte de Nacre et Côte Fleurie
- Vallée de l'Orne, Canal
- Cote de Grace, Dives-sur-Mer/Deauville

Toutefois, les éléments actuellement à notre disposition ne permettent pas de caractériser avec fiabilité le caractère récent ou ancien des intrusions ou si les valeurs relevées témoignent de marqueurs anthropiques. Des mesures complémentaires doivent être réalisées pour affiner les hypothèses émises (cf. chapitre suivant sur le plan d'action).

Par ailleurs, il n'existe pas à ce jour de maillage complet de qualitomètres répartis sur le territoire et d'analyses homogènes de la qualité des eaux. En conséquence, ce paramètre n'est pas retenu pour le moment pour le calcul de la vulnérabilité. Il s'agit toutefois d'un facteur aggravant.

8.2.5. Résultat

Le croisement des données a été réalisé à l'aide d'un logiciel SIG. Une note est attribuée à chaque polygone. En appliquant la formule proposée, l'indice V_{act} va donc varier de 2,5 à 10 (du moins vulnérable au plus vulnérable).

Les classes de vulnérabilités retenues sont les suivantes :

Vulnérabilité forte	$> 7,5$
Vulnérabilité moyenne	$5 - 7,5$
Vulnérabilité faible	< 5

Le résultat est présenté sur les cartes page suivante.

Les secteurs les plus vulnérables sont :

- La côte occidentale du Cotentin,
- La région de Cherbourg,
- Le val de Saire,
- Le Plain littoral,
- Le seuil du cotentin – marais – bassin sédimentaires,
- La Vallée de l'Aure,
- Les estuaires côtiers de Courseulles à Honfleur,
- La vallée de l'Orne et le canal de Caen à la mer.

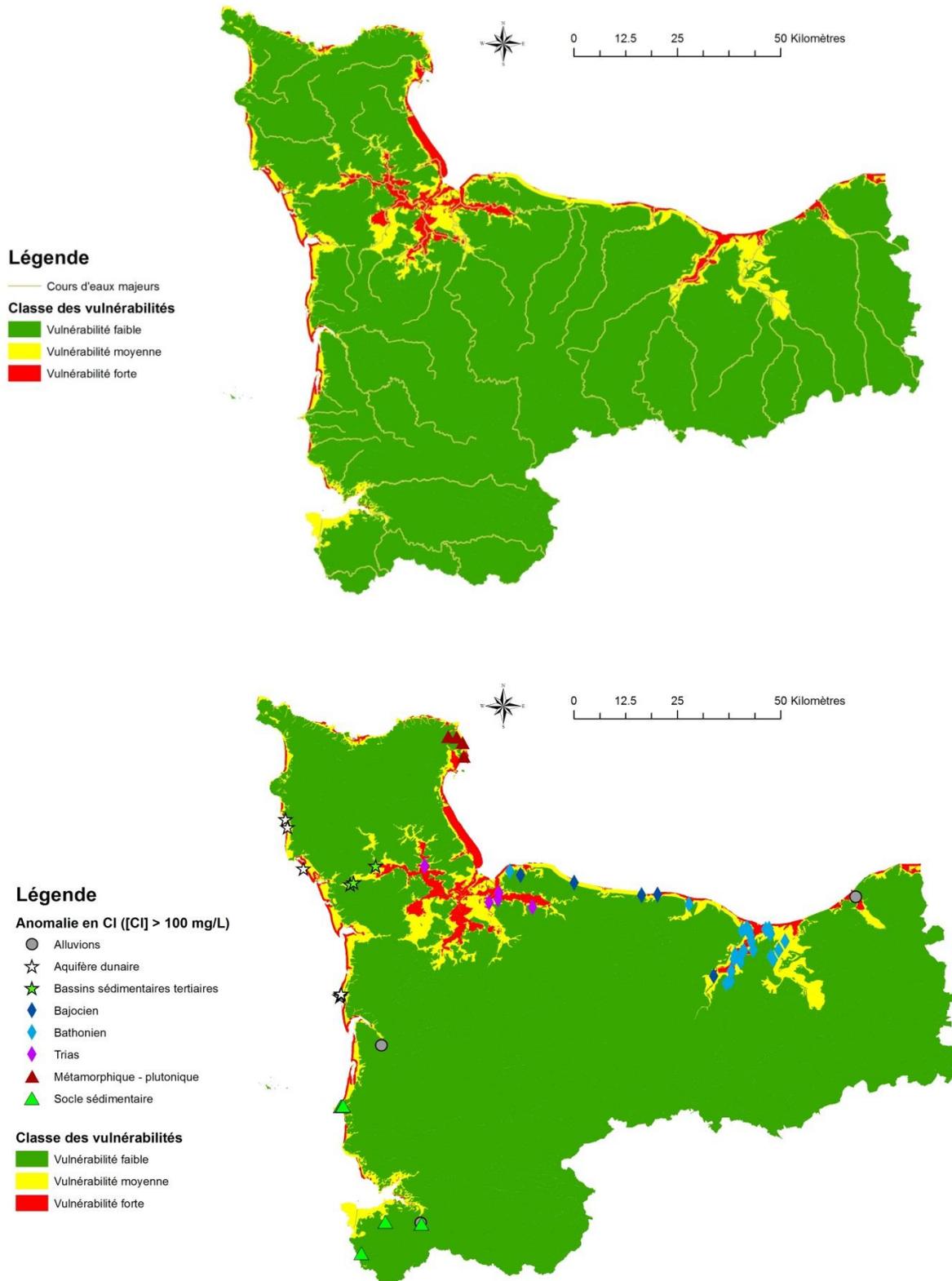


Illustration 93: Carte de vulnérabilité Vact aux intrusions salines

8.3. VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE VCC

La vulnérabilité des aquifères côtiers face au changement climatique peut être évaluée par le croisement de la sensibilité de l'avancée du biseau salé sur la zone modélisée avec les zones situées sous le niveau marin en contexte de remontée globale du niveau des mers.

Nous proposons d'appliquer la formule suivante :

$$V_{cc} = \sum Poids + V_{act}$$

- **L'avancée du biseau salé**, est évaluée en utilisant les résultats de la modélisation pour les hypothèses de remontée du niveau de la mer (scénario élévation +1m).

D'après les modélisations réalisées (RP-66229-FR), les zones les plus vulnérables au développement d'un biseau salé sont les basses vallées de l'Aure, de la Dives et de l'Orne. Dans ces zones les gradients piézométriques sont très plats et les cours d'eau jouent le rôle de condition limite à charge imposée. D'après les résultats du modèle, l'élévation du niveau marin ainsi que la baisse des niveaux piézométriques risquent d'entraîner une diminution notable des débits sortant en mer dans ce secteur, ce qui favoriserait la pénétration du biseau salé. Dans un scénario pessimiste, l'avancée du biseau salé pourrait atteindre plusieurs kilomètres dans ces secteurs, tandis qu'elle ne dépasserait pas quelques centaines de mètres en dehors.

Une augmentation des prélèvements n'entraînerait a priori pas de diminution très importante des débits d'eau souterraine sortant en mer : si l'influence de certains pompages peut être localement très forte et entraîner une remontée de l'interface eau douce-eau salée, on ne s'attend pas, d'après les résultats du modèle, à un effet marqué à plus grande échelle.

Code	Poids
Absence de modélisation*	-
0-100 Mètres	1
100 m – 1 kilomètre	2
1 – 3 kilomètres	3

**Le modèle réalisé ne concerne que le secteur de la plaine de Caen et de la Dives. Le reste du littoral de la Manche et du Calvados n'a donc pas été modélisé dans l'étude citée. L'absence de données n'est donc pas notée.*

Les résultats cartographiques, quant à l'avancée du biseau salé pour le scénario 4 sont matérialisés sur l'illustration suivante. L'Est du département du Calvados n'a pas été modélisé.

Nous ne disposons pas d'informations équivalentes sur le département de la Manche.

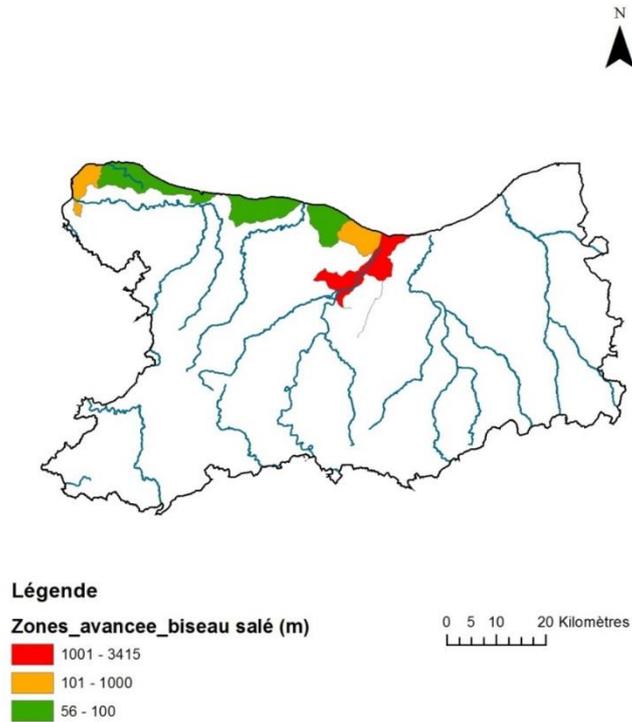


Illustration 94 : Avancée du biseau salé sur le secteur modélisé, scénario 4, RP6629-FR - BRGM

- **L'atlas des Zones situées sous le niveau marin (ZNM)** répertorie les territoires situés sous un niveau marin de référence. Le niveau marin de référence correspond au niveau marin centennal calculé par le SHOM, plus 20 cm. Ce niveau a été projeté sur un MNT (pas de 1 m sur le littoral et 10 m à l'intérieur des terres) pour obtenir les zones situées sous le niveau marin de référence (DREAL, 2014). La couche SIG disponible sur le site de la DREAL Normandie a été utilisée. Ces zones sont naturellement sensibles aux submersions marines et donc à une avancée du biseau salé.

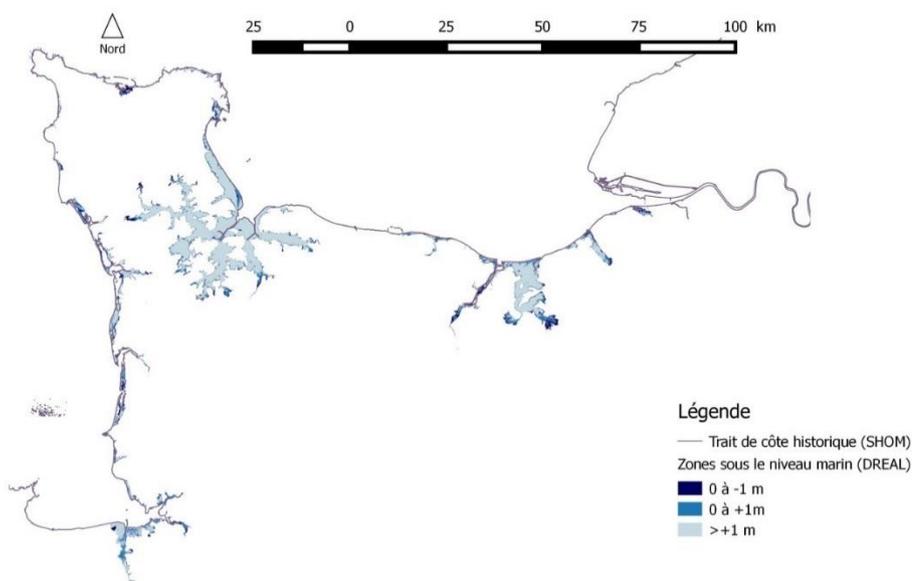


Illustration 95 : Zones sous le Niveau Marin (DREAL Normandie).

Ce paramètre (ZNM) permet la prise en compte de la hausse du niveau marin uniquement. Les autres phénomènes intensité et répartition de la pluviométrie par exemple ne sont pas pris en compte.

En cas d'élévation du niveau marin d'un mètre à l'horizon 2100 (projection haute du GIEC), le risque d'intrusion saline est accru.

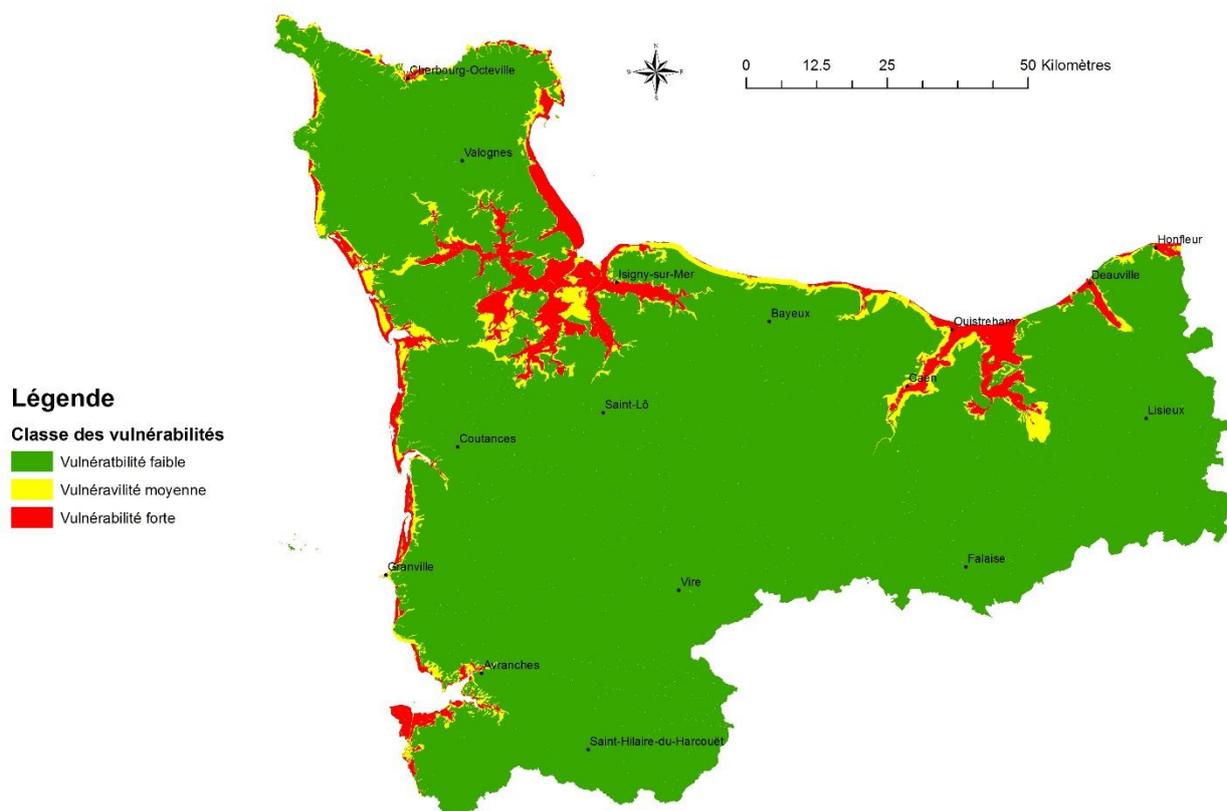


Illustration 96 : Carte de la vulnérabilité au changement climatique, Vcc

Dans l'ensemble, les vallées côtières ainsi que la Baie du Mont Saint Michel. La quasi-totalité du littoral, non rocheux de la Manche, l'Isthme du Cotentin et la vallée de l'Orne et le de Dives apparaissent tous en forte vulnérabilité.

9. Proposition d'actions

9.1. LOCALISATION DES SECTEURS A ENJEUX

Les enjeux liés à l'impact d'une intrusion saline concernent principalement l'exploitation de la ressource en eau souterraine, les principaux usages sont listés ci-dessous :

- Usage pour l'alimentation en eau potable (AEP) ;
- Usage agricole (maraichage/irrigation) ;
- Usage agricole (élevage/équidé) ;
- Usage aquacole, prélèvement d'eau salée de qualité constante ;
- Usage industriel.

L'agence de l'eau Seine-Normandie bancarise les points de prélèvements pour lesquels une redevance prélèvement est payée, ces points sont représentés en fonction de leur usage et leur volume sur l'illustration 97.

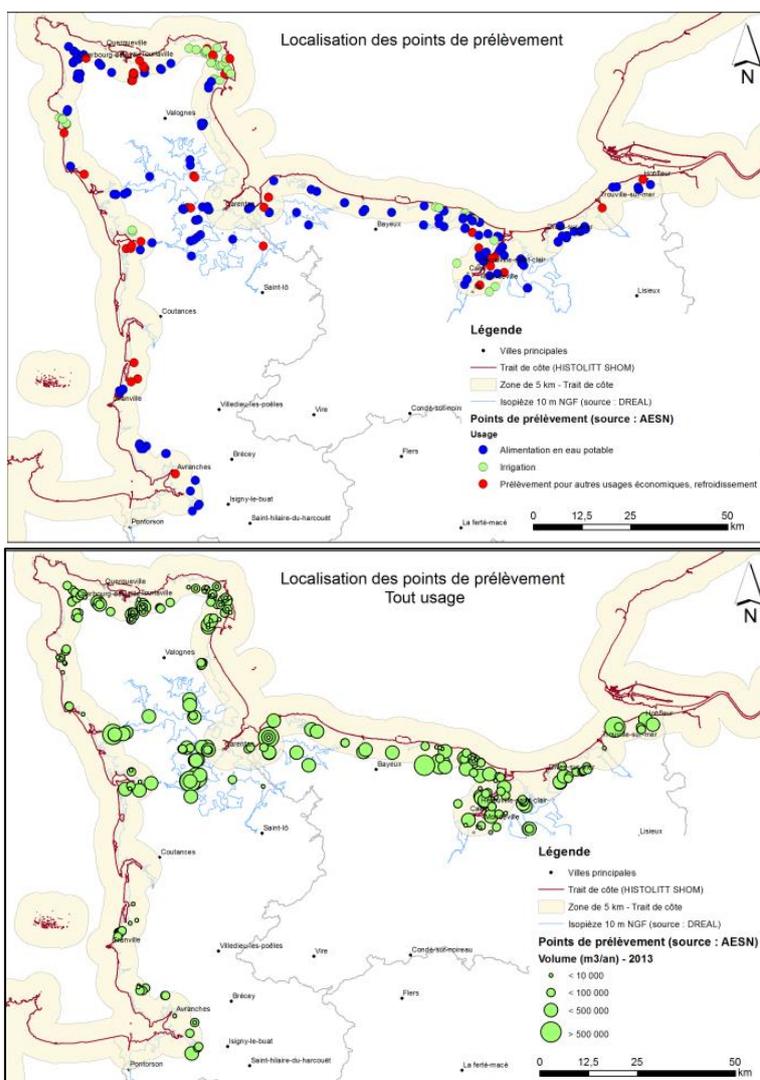


Illustration 97 : Localisation des points de prélèvements de la ressource en eau souterraine dans la zone d'étude en fonction de l'usage de l'eau souterraine (à gauche) et leurs volumes (à droite).

Les infrastructures urbaines peuvent également être impactées par les intrusions salines, notamment dans un contexte de changement climatique. L'illustration 98 présente les secteurs les plus urbanisés.

Pour la Manche, la zone côtière entre Avranches et Coutances ainsi que les zones urbaines de Cherbourg et Carentan apparaissent comme sensibles.

Pour le Calvados, le littoral entre Courseulles et Trouville ainsi que l'Estuaire de l'Orne jusqu'à Caen apparaissent également comme sensibles.

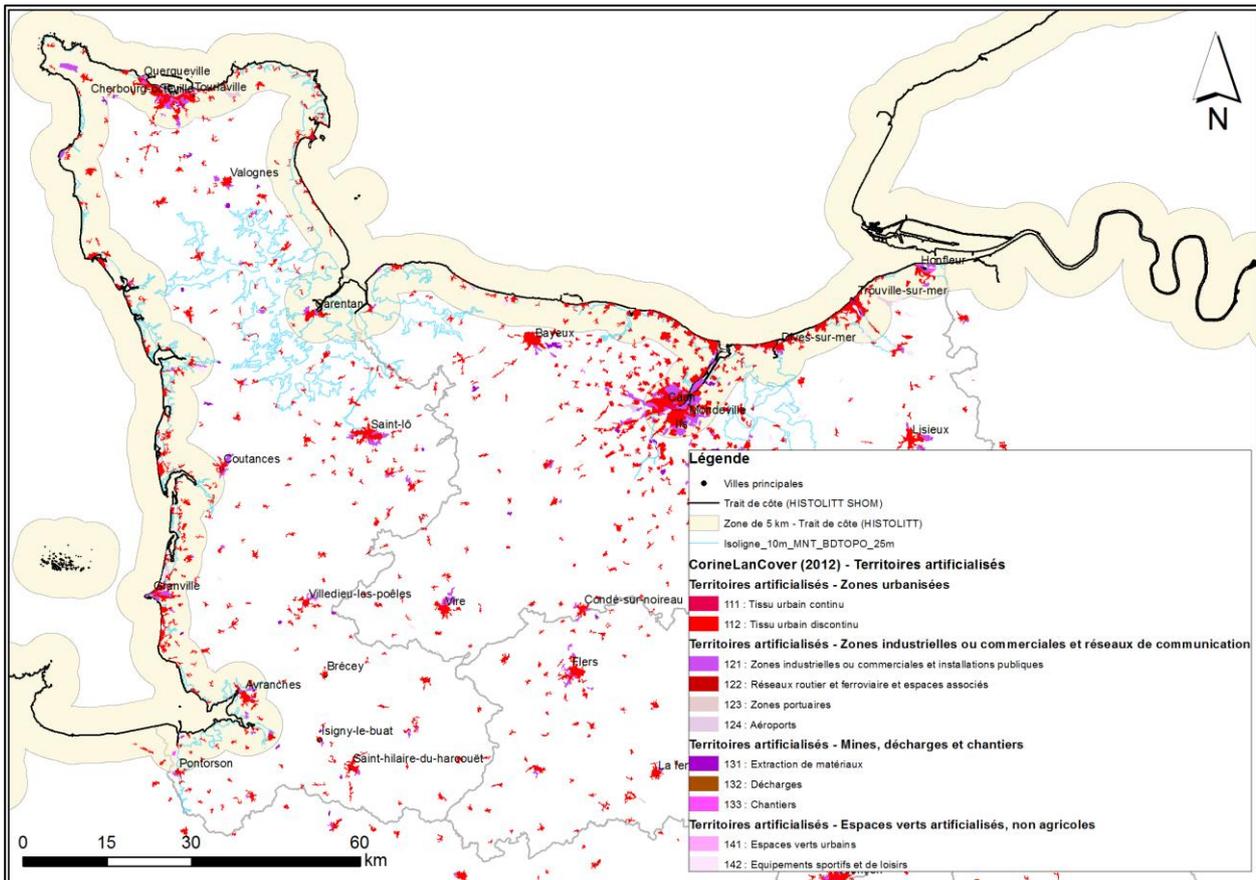


Illustration 98 : Représentation des secteurs urbanisés, source : CorineLandCover, 2012

9.2. EVALUATION DU RISQUE

Le risque est la résultante du croisement de l'Aléa, évalué par la méthode de vulnérabilité, avec les enjeux.

A partir des cartes de situation présentées plus avant, les enjeux suivants peuvent être soulignés :

Enjeux	Alimentation en eau potable	Agricole - Maraîchage/Elevage/irrigation	Zones à enjeux aval *
Secteurs géographiques	Bessin Fleuves Cotiers : Orne, Dives, Touques Bassin sédimentaires tertiaires Basse vallée de l'Aure Nord Cotentin Avranchin, région de Granville	Val de Saire Créances – Le Rozel Polders - Couesnon Bessin Plain littoral Marais Cotentin-Isigny Vallées des Fleuves Côtiers (Orne, Dives, Touques)	Côte ouest Manche, de Granville à Portbail Cherbourg Côte est Manche, de St-Vast à Grandcamp Secteur Asnelles

Illustration 99 : Tableau récapitulatif des secteurs de Basse-Normandie à enjeux vis-à-vis de l'exploitation de la ressource en eau souterraine.

** Les zones à enjeux aval sont concernées par les effets indirects du changement climatique et la salinisation.*

9.3. PROPOSITIONS D' ACTIONS

Les propositions s'axeront autour de 4 thématiques principales dont le contenu est discuté ci-après. Celles-ci s'appuient sur le contenu du travail de vulnérabilité et d'analyse hydrogéologique et hydrochimique (chapitres 6 à 8). **Les propositions sont détaillées pour chaque zone géographique et regroupées dans un tableau de synthèse (Illustration 103).**

Elles concernent : l'acquisition de connaissances, de données complémentaires pour discriminer différentes hypothèses, la création de réseau de suivi, la modélisation en vue d'une gestion sur les secteurs les plus sensibles.

9.3.1. Outils

a) Mesures hydrochimiques

Afin d'identifier et de comprendre les processus d'intrusions salines, notamment distinguer les intrusions salines anciennes de celles sub-actuelles, il est nécessaire au préalable de mener des études géochimiques (analyses des ions majeurs et traces, isotopes pour la datation de l'eau) et également de mieux comprendre les échanges nappe-rivière pour les estuaires et vallées côtières.

Le Rapport BRGM-ONEMA RP-60026-FR de Mai 2011 recense les outils géochimiques à disposition permettant de réaliser une caractérisation spatiale et temporelle des phénomènes d'intrusions salines. Il s'agit notamment des mesures :

- De la conductivité et des concentrations en chlorures ;
- De la concentration en ions majeurs : Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃ pour permettre d'identifier les faciès chimiques et les mélanges de pôles notamment avec de l'eau de mer pure, des évaporites et éventuellement de caractériser si la salinisation est en régression ou en progression ou bien encore l'interaction eau-roche ;
- L'analyse des éléments traces (Br, B, F, Sr, Rb, As, Li,...) permet d'étudier les sources et mécanismes de salinisation ;
- Des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène (¹⁸O et ²H), composants de la molécule d'eau ainsi que les isotopes stables des sulfates ou de l'azote (³⁴S et ¹³N) permettent également l'identification de la source (marine, évaporitique, eaux de surface, anthropique,...) et la discrimination quant au caractère actuel ou ancien du phénomène. D'autres isotopes peuvent encore être utilisés ;
- D'autres marqueurs chronologiques comme les CFC ou SF₆ peuvent fournir une indication relativement précise de l'âge des eaux.

b) Investigations physiques

La géophysique permet d'étudier la répartition de la résistivité/conductivité dans une dimension : mesure dans un forage (log) voire dans 3 dimensions avec la tomographie. La méthode géophysique permet d'interpoler les observations ponctuelles dans les parties de l'aquifère non-accessibles à l'observation directe.

La mesure de la résistivité à différentes profondeurs en continu (exemple : SMD ImaGeau[®]), de niveaux et de conductivité en 3D ainsi que dans le temps autour des zones impactées par une intrusion saline, permettent d'étudier la vitesse de réaction du système face aux variations piézométriques et d'étudier le temps nécessaire de la mise à l'équilibre suite à la hausse ou à la baisse du niveau marin ou encore suite à la modification des prélèvements sur des forages.

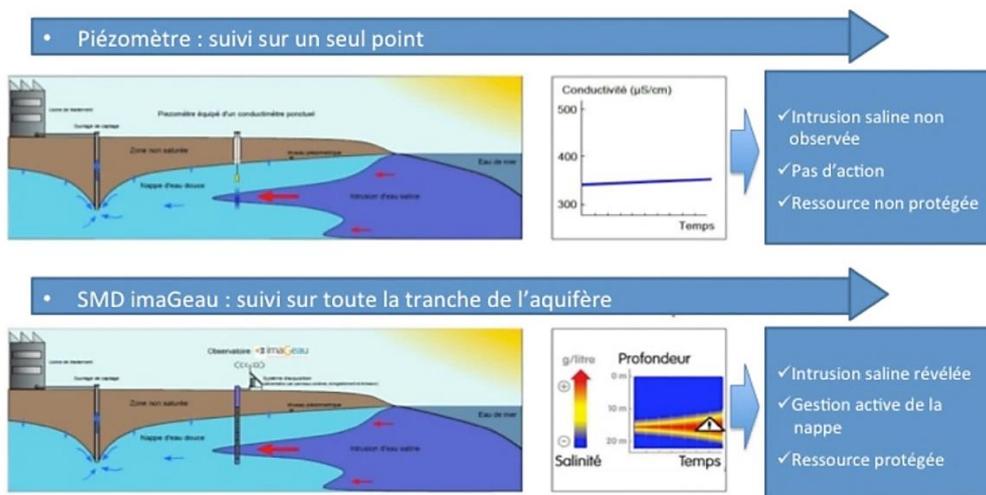


Illustration 100 : Exemple de suivi de l'intrusion saline par SMD (IMaGeau)

c) Mise en place d'un réseau de surveillance

Les objectifs de mise en place d'un réseau de suivi des intrusions salines sont :

- Contribuer à l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine (MESO) (directive fille 2006/118/CE). L'évaluation de l'état chimique des MESO prévoit le test « invasion salée » ;
- Acquérir des données pour évaluer la géométrie de l'aquifère et du phénomène d'intrusion et l'évolution dans le temps du biseau salé ;
- Diffuser l'information - alerter les acteurs du domaine de l'eau et des secteurs vulnérables aux intrusions salines.

Aussi, les réseaux de suivi peuvent être configurés en fonction des besoins :

- Nombre de points à mesurer et répartition, nécessité de réaliser de nouveaux points ;
- Mesure de la conductivité, la pression et la température en continu à une profondeur donnée dans un piézomètre ;

Exemple de suivi 3D : Le bureau d'études [ImaGeau](#) (Instrumentation innovante du sous-sol) a également développé un outil de monitoring des eaux souterraines (SMD, Subsurface Monitoring Device) qui permet d'enregistrer et de télétransmettre la conductivité électrique de l'eau, la pression et la température de l'aquifère autour d'un piézomètre via un grand nombre de points de mesure (jusqu'à 60). Un boîtier d'acquisition placé en surface du piézomètre contrôle une chaîne d'électrodes permettant de réaliser des profils de résistivité électrique autour de l'ouvrage en utilisant des méthodes géophysiques. Ce signal est ensuite converti en conductivité électrique de l'eau de l'aquifère.

Le SMD peut être installé dans des piézomètres crépinés en PVC dont les diamètres sont compris entre 40 mm et 400 mm. Le design de la chaîne d'électrode est réalisé sur mesure pour coller aux caractéristiques de l'aquifère à surveiller.

- Mesure d'autres paramètres physico-chimiques par prélèvements d'eau et analyses en laboratoires dans les ouvrages ;
- Préciser les paramètres hydrodynamiques (par pompage), l'évolution en continu des niveaux limnimétriques et piézométriques dans chaque compartiment aquifère et dans les zones d'échanges avec les eaux superficielles. Ce point est essentiel au préalable de la mise en œuvre d'un outil de modélisation.

d) Réseaux de surveillance existants

Dans le cadre de la directive cadre sur l'eau (2000/60/DCE), les données de la surveillance des milieux aquatiques sont produites par différents acteurs en fonction de la thématique et du type de milieu aquatique considéré (Illustration 97). Ces données sont rassemblées dans le système d'information sur l'eau (SIE⁶) accessible par le biais du portail Eaufrance.

Les principaux producteurs de données sur la surveillance de l'eau et des milieux aquatiques

Source : Sнде¹⁸

	Physico-chimie / Chimie	Hydrobiologie (faune et flore)	Hydromorphologie	Quantité
Cours d'eau	Agences de l'eau, Offices de l'eau	Agences de l'eau, DREAL/DRIEE, Onema ¹⁸	Agences de l'eau, Onema	DREAL/DRIEE, SN, Schapi ¹⁹ , DDT(M), Météo-France (SPC ²⁰)
Plans d'eau	Agences de l'eau, Offices de l'eau	Agences de l'eau, DREAL/DRIEE, Onema	Agences de l'eau, Onema	
Eaux côtières	Agences de l'eau, Ifremer ²¹ , DDT(M) ²² (SPEL ²³)	Agences de l'eau, Ifremer, DDT(M) (SPEL)	Agences de l'eau	
Eaux de transition	Agences de l'eau, Ifremer, DDT(M) (SPEL)	Agences de l'eau, Ifremer, DDT(M) (SPEL),	DDT(M) (SPEL)	
Eaux souterraines	Agences de l'eau, Offices de l'eau (et collectivités)			BRGM ¹⁴ , DREAL/DRIEE (et collectivités)

Nota bene : (1) Les producteurs de données cités peuvent agir aussi bien en régie qu'en sous-traitance - (2) Pour les contrôles opérationnels, la maîtrise d'ouvrage peut être plus large, associant par exemple les collectivités - (3) L'élaboration de méthodologies au niveau national impose souvent aux organismes de recherche chargés d'élaborer ces méthodes de collecter ponctuellement des données : ils ne sont pas pour autant des producteurs de données -

Illustration 101 : Producteurs des données des réseaux de surveillance DCE (source : <http://www.eaufrance.fr/donnees/>)

⁶ Eaufrance est un service public d'information sur l'eau et les milieux aquatiques ; il a pour but de faciliter l'accès à l'information publique dans le domaine de l'eau en France. Le portail Eaufrance est le point d'accès unique à toutes les informations et les données publiques relatives à l'eau et aux milieux aquatiques.

Le Système d'Information sur l'Eau (SIE) est un dispositif créé par l'État pour le partage et la mise à disposition des données sur l'eau du secteur public. Ces données concernent la ressource en eau, les milieux aquatiques, leurs usages et en particulier les services publics d'eau et d'assainissement pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer.

Les données du SIE rassemblent des millions de mesures sur les milieux aquatiques, les activités humaines ayant un lien ou un impact sur l'eau ou les milieux aquatiques, les incidences directes ou indirectes de ces activités, les réponses apportées par les politiques publiques, etc. Ces données sont tout aussi bien d'ordre quantitatif, physico-chimique, biologique, morphologique, réglementaire ... et sont stockées dans des banques de données (HYDRO, ADES, QUADRIGE...). »

Dans les départements de la Manche et du Calvados, plusieurs réseaux de surveillance existent, ceux appartenant aux réseaux « réglementaires » dans le cadre de la DCE (Directive cadre sur l'eau) ou du contrôle sanitaire sont listés ci-après :

- Réseaux de surveillance qualitatifs des eaux souterraines (codes Sandre : 0300000006, 0300000153, 0300000154, AESN), fréquence de 2 à 4 prélèvements par an ;
- Réseau de surveillance qualitatif des eaux souterraines (ARS) ;
- Réseau de surveillance qualitatif des eaux de surface (AESN) ;
- Réseau de surveillance quantitatif des eaux souterraines (0300000166, BRGM - Onema), fréquence journalier sur ADES (<http://www.ades.eaufrance.fr/>).

Les réseaux de surveillance supplémentaires aux réseaux dits « DCE » sont :

- Réseau de surveillance quantitatif des eaux souterraines (BRGM - CD14), fréquence horaire
- Réseau de suivi de la conductivité dans les eaux souterraines (profil de conductivité), (SILEBAN – AESN), fréquence mensuelle
- Réseau piézométrique de la Manche (SDeau 50)
- Réseau de suivi du niveau marin (REFMAR – SHOM), marégraphe de Cherbourg et du Havre, fréquence 10 min
- Ancien réseau de suivi de la conductivité dans la baie du Mont-Saint-Michel (Syndicat mixte de la baie du Mont-Saint-Michel)
- Ancien réseau de suivi des niveaux piézométriques à Caen (CaenLaMer – RESEAU)
- Suivi des teneurs en chlorures dans les forages utilisés pour l'irrigation dans le Val de Saire
- Suivi des ICPE industrielles (cf. réseau ADES)
- Suivi des eaux superficielles dans le Calvados (CD14 – AESN).

La liste des piézomètres appartenant au réseau BRGM-Onema ou au réseau du Conseil Départemental du Calvados en bordure du littoral est présentée dans le tableau ci-dessous Pour exemple.

Code national BSS	Aquifère	Commune	Coupes géologiques associées	Cote min (m NGF)	Cote max (m NGF)	Prof. Min p/r repère de mesure	Date début chronique	Date fin chronique	X_L93	Y_L93
01423X0044/F4	Aquifère dunaire	GOUVILLE-SUR-MER		2,29	4,2	5,69	12/05/2005		363782	6897114
01184X0021/S1	Bajocien	MAISONS	Coupe 8 - Omaha	18,16	31	2,59	28/01/1974		426183	6918976
00956X0055/S1	Bajocien	ASNIERES-EN-BESSIN	Coupe 10 - Bessin	15,82	25,23	-0,23	23/09/1976		414625	6923685
01198X0029/S8	Bajocien	LOUVIGNY		3,98	6,45	0,2	24/04/1973		453078	6901077
00958X0056/S1	Bajocien	PORT-EN-BESSIN-HUPPAIN	Coupe 8 - Omaha	-4,57	5,07	28	28/01/1974	12/01/2000	426343	6922445
00941X0034/S-2	Bassins tertiaires	FRESVILLE	Coupe 6 - Coupe du Plain	2,1	3,45	0,62	23/11/2001		382978	6934284
01168X0065/P	Bassins tertiaires	LESSAY	Coupe 2 - Lessay	6,48	8,49	2,9	25/03/2005		372445	6911024
01176X0061/F	Bassins tertiaires	SAINT-ANDRE-DE-BOHON		2,17	3,37	2,03	20/12/2001		388176	6911135
00937X0030/F4	Bassins tertiaires	SAINT-SAUVEUR-DE-PIERREPONT	Coupe 3 - Portbail	6,2	7,93	0,79	23/11/2001		365405	6924040
01194X0069/S1	Bathonien	BENY-SUR-MER	Coupe 11 - Bretteville-St-Aubin	36,21	52,82	2,83	16/12/1968		450262	6915850
01198X0002/S1	Bathonien	SAINT-CONTEST	Coupe 12 - Vallée Orne - Dives	27,88	49,29	11,02	10/01/1966		453792	6906840
00957X0005/S1	Bathonien	VIERVILLE-SUR-MER	Coupe 10 - Bessin	37,65	44,28	1,42	28/01/1974		416839	6926290
00955X0066/PZ	Lias	OSMANVILLE	Coupe 7 - Grandcamp-columbiere	0,18	2,92	25,98	01/09/2009		403750	6922579
00732X0032/P	Socle	ANNEVILLE-EN-SAIRE	Coupe 5 - Val de Saire	8,09	9,93	0,7	09/02/2007		390352	6956934
01727X0123/S3	Socle	GRANVILLE		26,26	27,54	6,74	09/12/2014		364958	6868236
00945X0052/S4	Trias	APPEVILLE		3,56	4,19	0,81	11/12/2014		384709	6923375
00945X0064/F	Trias	CRETTEVILLE		-0,87	0,45	0,72	12/01/2007		380415	6926120

Illustration 102 : Liste des piézomètres situés en bordure du littoral

Il est rappelé que certains organismes ont actuellement en charge la gestion d'un réseau de mesures dans certains secteurs concernés ou en ont déjà géré un :

- SILEBAN – réseau de suivi de la conductivité (LO6) – Secteur d'intervention : Littoral ouest de la Manche / Val de Saire ;
- Syndicat mixte de la baie du Mont-Saint-Michel – mise en place un réseau de mesure dans les polders ;

- CaenLaMer-RESEAU suivi des niveaux piézométriques dans la ville de Caen ;
- BRGM suivi des niveaux piézométriques (une sonde CTD chez OTT installée dans le Calvados 00956X0055/S1, à Asnières en Bessin).

Les ouvrages suivis pourront intégrer l'un des réseaux existants ou dans le cas d'une action spécifique régionale ou départementale, un nouveau réseau pourrait spécifiquement être créé.

e) Modélisation

Les outils de modélisation vont permettre d'étudier différents scénarii. Leur mise en œuvre pourra être proposée sur les zones où les enjeux et la vulnérabilité sont les plus importants. Les simulations pourront concerner par exemple (Dörfliger et Augéard, 2013) :

- **Evolution de la pression démographique sur les zones côtières** : L'évolution de la population entre 2007 et 2040, estimée selon les tendances observées par l'INSEE sur les départements littoraux et leurs communes, permet d'évaluer la densité attendue des communes littorales en 2040. Les prélèvements d'eau pour ces populations peuvent accentuer les risques d'intrusion saline.
- **Impact du changement climatique** sur les aquifères littoraux : Le changement climatique peut affecter les aquifères littoraux en modifiant le niveau marin ainsi que la distribution spatio-temporelle des précipitations efficaces constituant la recharge des réservoirs souterrains. Les impacts potentiels sur les ressources en eau souterraine des aquifères côtiers peuvent être :
 - une modification des intrusions salines et une migration dans des proportions variables de l'interface eau douce – eau salée due à une remontée du niveau marin ;
 - une inondation des zones basses par de l'eau de mer et infiltration des aquifères libres par de l'eau de mer ;
 - une modification de la recharge des aquifères due à une variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'évapotranspiration ainsi que du volume d'eau douce et de la répartition d'eau douce dans les aquifères ;
 - une modification des zones de décharge des aquifères pouvant impacter les écosystèmes des zones humides ;
 - Diminution du débit des cours d'eau.

9.3.2. Actions proposées

Les différentes actions proposées sont fondées sur la situation actuelle, étant entendu que la situation à l'horizon +100 ans ne pourra que confirmer leur nécessité. Celles-ci sont détaillées par zones géographiques. Pour chaque action, le détail des outils à utiliser est précisé.

L'ensemble est reporté dans le tableau suivant.

Nom Secteur	Vulnérabilité Actuelle (faible, moyenne, forte) Enjeux (faible + ; moyen ++ ; important +++)	Département	Objectif de l'Action	Mesures hydrochimiques			Mesures géophysiques	Création de points de suivi	Modélisation	Mise en place d'un réseau	Commentaire
				Conductivité chlorures	Ions majeurs	Eléments traces et Isotopes	Log ou mesures tomographiques	Forages/Pompages			
Honfleur – La Morelle	++	Calvados	Acquisition de données	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle					Mesure sur 4 ou 5 points : AEP + plaine alluviale, Morelle et canal de retour
Basse Vallée de la Touques	++	Calvados	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle	Log secteur hippodrome base de Loisir			Avec les ouvrages France Galop – Golf + Touques	L'interface cours d'eau doit être appréhendée ainsi que l'influence des pompages dans la vallée
Basse Vallée de la Dives	+++	Calvados	Modèle de gestion, impact du changement climatique	Oui Continu	Oui basses et hautes eaux	Oui basses et hautes eaux	Log pour 2 ouvrages proches du littoral ou de l'estuaire	Dans les alluvions et les calcaires en retrait du littoral	Modèle détaillé à créer	Troarn-Dozulé à la côte 6 points	LA DDTM14 a réalisé un recensement des forages d'irrigation
Basse vallée de l'Orne, Canal	+++	Calvados	Modèle de gestion, impact du changement climatique	Oui Continu	Oui basses et hautes eaux	Oui basses et hautes eaux	Log pour 2 ou 3 ouvrages proches du Canal		Modèle détaillé à créer	Déjà existant à réactiver RESeau	Créer un modèle de gestion avec impact des prélèvements et du changement climatique
Côte Fleurie – Colleville/Courselles	++	Calvados	Acquisition de données	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle						Mesure sur 4 ou 5 points
Marais de Meuvaines – Basse vallée de la Seulles	+	Calvados	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui : freq mensuelle	Oui mesure ponctuelle		Log sur ouvrages existants				Suivi sur les forages existants
Bessin – Karst de l'Aure	++	Calvados	Compléments et suivi de l'intrusion + identifier le rôle des failles et du karst	Oui Continu	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle	géophysique	Sondages intéressant si indice de vide + traçages			Suivi sur les forages existants
Baie des Veys - Basse vallée de l'Aure	+++	Calvados	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui Continu	Oui basses et hautes eaux	Oui basse et hautes eaux		Sondages intéressant pour identifier la géométrie		1 Point de suivi sur l'Aure et la Vire et 2 points dans la plaine alluviale et marais en amont d'Isigny	Points de suivi existant et Parc
Marais du Cotentin – Bassins tertiaires	+++	Manche	Modèle de gestion, impact du changement climatique	Continu sur Saintey Semestriel sur St Sauveur et Merderet	Oui basses et hautes eaux	Oui, basses et hautes eaux		1 St Sauveur le Vicomte et 1 Merderet	Modèle détaillé de gestion à créer (Sainteny Marchésieux)	1 Points Douve, Taute en amont de Carentan sur 4 points dans le bassin sédimentaire de Sainteny-Marchésieux	Réseau existant Parc ou SDE50. Forages et AEP sur St Sauveur et Merderet
Plain littoral	++	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui : freq mensuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle	Log + géophysique			2 ou 3 points + mesures sur les cours d'eau et fossés	Comprendre la salinisation des cours d'eau (rejets ?) et la géométrie du réservoir + rôle des failles
Val de Saire Pointe Saire	++	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui : freq mensuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle	Log + géophysique			2 ou 3 points	Comprendre la géométrie du réservoir
Urville - Cherbourg-Octeville Tourlaville	+	Manche	Acquisition de données	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle		Log	1 ou 2 ouvrages après recensement de l'existant		1 ou 2 points	Comprendre la géométrie du réservoir
Aquifères de socle du Cotentin	+	Manche	Acquisition de données	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle		Log				Suivi sur les forages existants. Etudier le rôle de la fracturation
Aquifères Dunaires de la pointe de la Hague jusqu'au Cap de Carteret	+	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle						Suivi sur les forages existants

Nom Secteur	Vulnérabilité Actuelle (faible, moyenne, forte) Enjeux (faible + ; moyen ++ ; important +++)	Département	Objectif de l'Action	Mesures hydrochimiques			Mesures géophysiques	Création de points de suivi	Modélisation	Mise en place d'un réseau	Commentaire
				Conductivité chlorures	Ions majeurs	Eléments traces et Isotopes	Log ou mesures tomographiques	Forages/Pompages			
Aquifères dunaires des Havres	++	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui : freq mensuelle	Oui Sienne et Havres	Oui Sienne	Log Havres en complément Agon-Coutainville	Gouville dans le socle + suivi continu CTD	Silleban déjà existant	Suivi sur les forages existants identifier rôle de la Sienne	
Aquifère socle Granville Carolles	+	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui ponctuelle	Log			Suivi sur les forages existants	
Baie du Mont St Michel Sée Sélune	+++	Manche	Compléments et suivi de l'intrusion	Oui freq : annuelle	Oui mesure ponctuelle	Oui Sée et Sélune	log ouvrages Sée et Sélune			Suivi sur les forages existants identifier rôle de la Sée et Sélune	

Illustration 103 : Propositions d'actions

9.3.3. Pistes de réflexion

Plusieurs aspects restent à définir pour finaliser le programme d'action dont :

- Quel pourrait être le maître d'ouvrage des actions à mettre en œuvre : services de l'état, région, départements, Intercommunalités, Syndicats,... ?
- Comment gérer le réseau de suivi et les données acquises ?
- Comment interpréter et valoriser les informations ?
- Comment diffuser l'information aux acteurs : collectivités, exploitants d'eau, industriels, ... ?
- Quel coût et quelle durée de mise en œuvre ?

Ces éléments seront à discuter afin d'assurer la bonne mise en œuvre des différentes mesures. Des actions préventives ou curatives pourront être prescrites localement lorsqu'un impact important sur les usages/pour les acteurs est identifié.

10. Conclusions

La revue des données disponibles sur **l'élévation contemporaine du niveau de la mer** en Normandie occidentale ne permet pas de confirmer la subsidence régionale de l'ordre de -1mm/an suggérée par l'analyse des données de nivellement. L'analyse est limitée par le fait que beaucoup de données ne sont disponibles qu'à Cherbourg, alors que la subsidence identifiée par nivellement n'affecterait peut-être pas le Cotentin. Nous concluons donc que les données disponibles sont insuffisantes pour confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une subsidence régionale suggérée par l'analyse des données de nivellement.

La **caractérisation hydrochimique** a permis par ailleurs de mettre en évidence des processus géochimiques dominants dans les grands types d'aquifères de Normandie occidentale, tel que la dissolution des carbonates dans l'aquifère de la craie dans l'est du Calvados, mais aussi dans l'aquifère des calcaires de l'Oxfordien et dans les aquifères du Bajocien et du Bathonien. Les aquifères de socle sont soumis à l'hydrolyse des silicates (principalement le socle cristallin) ; dans ces compartiments les processus d'interaction eau-roche sont dominants. L'activité anthropique joue un rôle non négligeable dans les aquifères du Bajocien et bathonien, notamment dans l'évolution des concentrations en chlorures.

Les chlorures, éléments conservatifs, sont souvent utilisés comme référentiel. Les éléments sodium et chlorures permettent d'identifier la salinisation des aquifères. Les eaux souterraines des aquifères côtiers sont plus chargées en chlorures et les valeurs de conductivité sont également plus élevées. Le ratio Na/Cl se rapproche du ratio Na/Cl pour l'eau de mer. L'intérêt de suivre ces paramètres est ainsi démontré, néanmoins il est nécessaire de mener dans certains secteurs des études géochimiques approfondies (analyse des ions majeurs et traces, analyse isotopique, datation des eaux) pour identifier les processus en jeu et mettre en évidence des intrusions salines actuelles.

Une analyse plus fine des données disponibles (hydrochimiques, hydrogéologiques) et la réalisation de coupes géologiques a montré la complexité des **processus d'intrusions salines**, qui peuvent s'établir par le biais de biseaux salés, mais aussi par débordement ou par drainance verticale d'eau salée récente ou ancienne. Dans cette dernière configuration, les formations du Quaternaire (dépôts du Flandrien par exemple) renfermeraient par exemple des eaux saumâtres, actuelles ou anciennes, et joueraient un rôle de vecteur de pénétration du sel dans des aquifères sous-jacents. Il serait nécessaire d'acquérir de nouvelles connaissances hydrogéologiques pour mieux comprendre les échanges entre les eaux saumâtres contenues dans les formations superficielles récentes (Quaternaire) et les aquifères sous-jacents (Bathonien, Bajocien, socle, Trias, Lias).

Pour la constitution de scénarii devant être pris en compte, par **le modèle hydrogéologique appliqué au Bessin et à la Plaine de Caen** : le comité de suivi a retenu les hypothèses d'une élévation du niveau marin de +0,5 m et +1 m, l'augmentation des prélèvements de 10 %, une baisse des précipitations et de la recharge (cf. rapport BRGM RP-66229-FR, Croiset et al., 2016, paragraphe 2.2). Les résultats montrent une sensibilité plus importante des estuaires des fleuves côtiers au phénomène d'intrusion saline. La période de basses eaux est également une période plus sensible qui favoriserait le phénomène. A priori, l'augmentation des prélèvements n'entraînerait pas de modification significative sur la position du biseau salé.

Afin de définir la **vulnérabilité des aquifères côtiers** aux intrusions salines, une méthode d'analyse multicritères a été développée au cours de cette étude. Cette approche multicritères, basée sur la méthode GALDIT, permet d'apprécier, à l'échelle de la Normandie occidentale, la vulnérabilité aux intrusions salines actuelles, la vulnérabilité aux intrusions salines dans un contexte de changement climatique. Les anomalies en chlorures et conductivités constatées sont considérées comme des facteurs aggravants.

Les enjeux sont appréciés par rapport aux prélèvements. Ce dernier critère permet de considérer, de façon indirecte, les risques potentiels sur la ressource en eau souterraine.

Cette méthode d'analyse multicritères a été présentée en comité de suivi.

La synthèse des éléments hydrochimiques, de la vulnérabilité, des enjeux aboutit a permis d'aboutir à **proposer plusieurs actions**, à mettre en œuvre dans la zone d'étude, soit pour améliorer la connaissance, soit pour installer un réseau de suivi des intrusions salines. Des éléments de précisions ont été présentés quant à l'enrichissement de la connaissance dans certains secteurs.

11. Bibliographie

11.1. BIBLIOGRAPHIE GENERALE

Agence de l'eau Seine-Normandie et BRGM. SIGES Seine-Normandie – Système d'information pour la gestion des eaux souterraines [en ligne]. Disponible sur <http://sigessn.brgm.fr/>. (Consulté le 26/07/2016).

BADON-GHYBEN W. (1889). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam, Tijdschrift het koninglijk, Instituut voor Ingenieurs, Den Haag, 8-22.

BANTON O. et BANGOY L.M. (1997). Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'université du Québec. Canada. p368 à 372.

CASTANY G. et MARGAT J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM. Orléans.

CHERY L. et al. (2006). Guide technique – Qualité naturelle des eaux souterraines, méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français. brgméditations : Orléans. 227p.

COMTE J-C (2008). Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers. Thèse de doctorat. Université d'Avignon / Hydriad. 195p.

COOPER H-H., KOHOUT F-A., HENRY H-R., GLOVER R-E. (1964). Sea water in coastal aquifers, US Geological Survey, Water-supply Paper 1613-C, 84p.

COPIN-MONTEGUT G. (1996). Principaux constituants de l'eau mer. Salinité. In : Chimie de l'eau de mer. Institut océanographique. p15-31.

COURBIN A. (2012). Evolution de la remontée du front des 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur le fleuve Maroni. Rapport BRGM/RP-62127-FR. 60p.

CROISET N., WUILLEUMIER A., BESSIERE H., GRESSELIN F., SEGUIN J-J., (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR, 130 p.

CROISET N., LE COZANNET G., LAURENT A. (2016). Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport final. BRGM/RP-66229-FR, 55p.

CUSTODIO E. (2002). Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In : Groundwater and human development. Ed. :Barcelona : Bocanegra, Martines, Massone (editors), pp 1905-1918.

DAUM J.R., BAKALOWICZ M., CHERY L. et al. (1996). Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rapport BRGM R 38847, 77p.

DDTM Manche. Arrêté cadre n°2012-DDTM-SE-42 relatif à la définition des seuils et des territoires hydrographiques pour la mise en œuvre des mesures de limitation des usages de l'eau en période de sécheresse.

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, 281 p.

DE WIEST, traduction par DEBUISSON J., DREYFUS A. et MONITION L. (1969). Invasion marine dans les aquifères côtiers. Rapport BRGM 69 SGL 255 HYD (inclus dans Margat et Monition, 1970).

DREAL Basse-Normandie (2014). Notice d'utilisation – Révision de l'atlas des zones sous le niveau marin (ZNM). 4p.

DORFLIGER N., FLEURY P., ASFIRANE F., BLANC M. (2011). Nouvelle approches et capteurs innovants pour la connaissance et le suivi des aquifères côtiers. Application à la surveillance des intrusions salines dans le bassin sédimentaire du Roussillon (France). Rapport d'étude Tâche 1. Projet ANR « Grain d'sel ». [en ligne]. Disponible sur : www.burgeap.fr/index.php/fr/innovations/methodologie/grain-d-sel (Consulté le 20/07/2016).

DUCREUX L., DEVENOGES Q., MATHIEU F., BARBIER R., SEUX B. (2014). Cartographie de l'interface eau douce – eau salée en Grande-Terre, Guadeloupe. Rapport final. BRGM/RP-64421-FR. 68p.

DUGUE O., FILY G., RIOULT M. (1998). Le Jurassique des Côtes du Calvados. Biostratigraphie, sédimentologie, paléocéologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle. Bulletin trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre, Tome 85, Fascicule 2, 132 p.

FRISSANT N., RENE-CORAIL C. et al. (2005). Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64p.

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval. (2013). Contexte climatique et hydro-sédimentaire, la salinité dans l'estuaire de la Seine. Fiche de synthèse, 6p.

HERZBERG A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Noordseebäder, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, München, 44, 815-819, 45, 842-844.

JOLY F. (1939). Le littoral du Cotentin – Etude de géographie physique. In : Annales de Géographie, t. 48, n°273. pp.225-234.

KHARAKA Y-K. and HANOR J-S. (2003). Deep fluids in the continents : I. Sedimentary Basins. In: Treatise on Geochemistry. Volume 5, Chap. 16. Editor : James I. Drever.. p.499-540.

KLOPPMANN W., BOURHANE A., SCHOMBURGK S. (2010). Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer. Rapport BRGM/RP-59496-FR. 145p.

KLOPPMANN W., BOURHANE A., ASFIRANE F. (2011a). Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques. Rapport BRGM/RP-60026-FR. 105p.

KLOPPMANN W., BOURHANE A., SCHOMBURGK S., ASFIRANE F. (2011b). Salinisation des masses d'eau en France : du constat au diagnostic. Rapport BRGM/RP-60186-FR. 37p.

LAURENT A., FRESLON M., GRESSELIN F. (2015). Les aquifères de socle en Basse-Normandie. Actes du colloque AIH-CFH, Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles, la Roche-sur-Yon. P1-07.

LITHOLOGIC (2005). Résultats de la prospection par sondage destructifs de reconnaissance en milieu de socle – Commune de Granville et Saint-Pair-sur-mer (Manche). Rapport. 8p.

LOPEZ B., BARAN N., BOURGINE B., BRUGERON A., GOURCY L. (2012). Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les nitrates et les produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances. Rapport final BRGM/RP-60402-FR. 303p.

MARGAT J. et MONITION L. (1970). Méthodologie de l'observation du contact eau douce – eau salée. BRGM. Compte-rendu du projet de recherche 70 SGN 071 HYD.10 rapports d'étude.

MERCIER D. et al. (2013). Géomorphologie de la France. Dunod, GFG et Brgméditations : Paris. 269p.

MILLOT R., PETELET-GIRAUD E., GUERIT C., NEGREL P. (2010). Multi-isotopic composition of rainwater in France : Origin and spatio-temporel characterization. Applied chemistry 25 (2010) 1510-1524.

Onema. Eaufrance – Le service public d'information sur l'eau [en ligne]. Disponible sur <http://www.eaufrance.fr/index.php> (Consulté le 23/11/2016).

PARLEMENT EUROPEEN et CONSEIL, Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel, L 327 du 22.12.2000, p. 1–73.

PREVIMER – Observations et prévisions côtières. Ifremer, SHOM et Météo-France. [En ligne]. Disponible sur <http://www.previmer.org/> (Consulté le 01/08/2016).

THILLAYE DU BOULLAY H. (1994). Classification du littoral normand en unités cohérentes de gestion. IFREMER. Rapport DESS Université Paris VII. 55p.

TRAVERSE S., CHASTANET J., VANDEN BERGHE D. et al. (2014). Nouvelle approches et capteurs innovants pour la connaissance et le suivi des aquifères côtiers. Application à la surveillance des intrusions salines dans le bassin sédimentaire du Roussillon (France). Rapport d'étude Tâche 4. Projet ANR « Grain d'sel ». [en ligne]. Disponible sur : www.burgeap.fr/index.php/fr/innovations/methodologie/grain-d-sel (Consulté le 20/07/2016).

WUILLEUMIER A., CROISSET N., ALLANIC C., BOURGAULT C., GRESSELIN F. (2014). Un modèle hydrogéologique pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines et superficielles du Calvados. Revue Géologue n°183. p101-105.

11.2. REFERENCES – ELEVATION CONTEMPORAINE DU NIVEAU MARIN (CHAPITRE 4)

Ablain, M., Cazenave, A., Larnicol, G., Balmaseda, M., Cipollini, P., Faugère, Y., Fernandes, M. J., Henry, O., Johannessen, J. A., Knudsen, P., Andersen, O., Legeais, J., Meyssignac, B., Picot, N., Roca, M., Rudenko, S., Scharffenberg, M. G., Stammer, D., Timms, G., and Benveniste, J.: Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–

2010) from the Climate Change Initiative project, *Ocean Sci.*, 11, 67-82, doi:10.5194/os-11-67-2015, 2015.

Bard, E., B. Hamelin, M. Arnold, L. Montaggioni, G. Cabioch, G. Faure et F. Rougerie. 1996, «Deglacial sea-level record from tahiti corals and the timing of global meltwater discharge», *Nature*, vol. 382, no 6588, p. 241–244.

Cazenave, A., H.-B. Dieng, B. Meyssignac, K. von Schuckmann, B. Decharme et E. Berthier. 2014, «The rate of sea-level rise», *Nature Climate Change*, vol. 4, no 5, p. 358–361.

Cazenave, A. et G. Le Cozannet. 2014, «Sea level rise and its coastal impacts», *Earth's Future*, vol. 2, n°2, doi :10.1002/2013EF000188, p. 15–34, ISSN 2328-4277.

Church, J. A. et N. J. White. 2006, «A 20th century acceleration in global sea-level rise», *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no 1, doi :10.1029/2005gl024826, ISSN 0094-8276.

Church, J. A. et N. J. White. 2011, «Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century», *Surveys in Geophysics*, vol. 32, no 4-5, doi :10.1007/s10712-011-9119-1, p.585–602, ISSN 0169-3298.

Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G. A. Milne, R. S. Nerem, P. D. Nunn et al.. 2013b, «Sea-level rise by 2100», *Science*, vol. 342, no 6165, p. 1445–1445.

GIEC, WG1, Ch5, 2013 : Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J. Gonzalez Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao et A. Timmermann. 2013, *Information from Paleoclimate Archives.*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 383–464, doi :10.1017/CBO9781107415324.026.

GIEC, WG1, Ch13, 2013 : Church, J., P. Clark, A. Cazenave, J. Gregory, S. Jevrejeva, M. Merrifield, G. Milne, R. Nerem, P. Nunn, A. Payne, W. Pfeffer, D. Stammer et U. A.S. 2013a, *Sea Level Change*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137–1216, doi :10.1017/CBO9781107415324.026.

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2010). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics*, 34(4), 461-472.

Hay C C, Morrow E, Kopp R E and Mitrovica J X 2015 Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise *Nat. Clim. Change* **5**17 481–4

Kemp, A. C., B. P. Horton, J. P. Donnelly, M. E. Mann, M. Vermeer et S. Rahmstorf. 2011, «Climate related sea-level variations over the past two millennia», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, no 27, doi :10.1073/pnas.1015619108, p. 11 017–11 022, ISSN 0027-8424.

Lenotre, N., P. Thierry, R. Blanchin et G. Brochard. 1999, «Current vertical movement demonstrated by comparative levelling in brittany (northwestern France)», *Tectonophysics*, vol. 301, no 3-4, doi :10.1016/s0040-1951(98)00228-5, ISSN 0040-1951.

Meyssignac, B. et A. Cazenave. 2012, «Sea level : A review of present-day and recent-past changes and variability», *Journal of Geodynamics*, vol. 58, p. 96–109, ISSN 0264-3707.

Nicholls, R. J., & Lowe, J. A. (2004). Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global environmental change*, 14(3), 229-244.

Nicholls, R. J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., Warrick, R. A., Lu, X., & Long, A. J. (2014). Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 129-150.

Planton, S. ; Le Cozannet, G. ; Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gaufrès, P., Hissel, F. ; Idier, D. ; Laborie, V. ; Petit, V. ; Sergent, P., 2015 : Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Rapports DGEC, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Mars 2015. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_5_VF_revisee_27fevrier_2015.pdf

Slangen, A., M. Carson, C. Katsman, R. van de Wal, A. Köhl, L. Vermeersen et D. Stammer. 2014, «Projecting twenty-first century regional sea-level changes», *Climatic Change*, vol. 124, no 1-2, doi :10.1007/s10584-014-1080-9, p. 317–332.

Stammer, D., A. Cazenave, R. M. Ponte et M. E. Tamisiea. 2013, «Causes for contemporary regional sea level changes», *Annual review of marine science*, vol. 5, doi : 10.1146/annurev-marine-121211-172406, p. 21–46, ISSN 1941-1405.

Stéphan, P., & Goslin, J. Evolution du niveau marin relative l'Holocène le long des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche: réactualisation des données par la méthode des "sea-level index points".

Tamisiea, M. E. 2011, «Ongoing glacial isostatic contributions to observations of sea level change», *Geophysical Journal International*, vol. 186, no 3, doi :10.1111/j.1365-246X.2011.05116.x, p. 1036–1044, ISSN 0956-540X.

Wahl, T., Haigh, I. D., Woodworth, P. L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., ... & Wöppelmann, G. (2013). Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth-Science Reviews*, 124, 51-67.

Watson, C. S., N. J. White, J. A. Church, M. A. King, R. J. Burgette et B. Legresy. 2015, «Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era», *Nature Climate Change*.

11.3. REFERENCES PAR SECTEUR D'OBSERVATION

11.3.1. Baie du Mont-Saint-Michel et vallée de la Sélune

DDAF 50, DDASS 50 et Lithologic (1996). Recherche hydrogéologique dans le secteur du Bas Montmorel – Sud de la commune de Ducey. Rapport de synthèse R/MF-YG/96.067. Syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable. 18p.

RESURGENCE (2013). Réalisation d'un forage pour la sécurisation du prélèvement d'eau brute à Ducey (02472X0127/F). SMAEP Baie Bocage. 11p.

RESURGENCE (2014). Réalisation d'un forage pour la sécurisation du prélèvement d'eau brute à Ducey (02472X0096/P). SMAEP Baie Bocage. 32p.

SOGREAH (2000-2002) – Projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel. Etude hydrogéologique. Rapports phases 1 à 9.

11.3.2. Littoral ouest de la Manche

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1977). Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 30/06/1977 sur la zone côtière occidentale du Cotentin entre Bréhal et Les Pieux (Manche). Rapport 77 SGN 555 PNO. BRGM.

FRESLON M. (1983). Campagne de recherche d'eau salée sur le littoral du département de la Manche. 2^{ème} phase. Rapport DDAF. 20p + annexes.

FRESLON M. et ADDINQUY C. (1990). Forage d'exploitation en eau de mer pour la production aquacole de la C.A.BA.NOR. Commune de Blainville-sur-mer. Rapport 90/DDAF./6/HYD. DDAF. 10p.

FRESLON M. (1985). Recherche d'eau souterraine dans la zone dunaire de Blainville. Rapport DDAF. 8p.

MAZENC B. (2006). Aquifères dunaires. Chapitre II Massif Armoricaïn. In. Aquifères & eaux souterraines. Tome 1. CFH-AIH. Brgméditations. p140-141.

11.3.3. Val de Saire

AQUILINA L. et al. (2015). Impact of climate changes during the last 5 million years on groundwater in basement aquifers. Scientific reports.

ARMANDINES LES LANDES A., AQUILINA L., DAVY P., VERGNAUD-AYRAUD V., LE CARLIER C. (2015). Timescales of regional circulation of saline fluids in continental crystalline rock aquifers (Armorican Massif, western France). Hydrology and earth system sciences, 19, 1413-1426.

COUTARD S. (2003). Formations quaternaires en bordure d'une mer épicontinentale, la Manche : tectonique, eustatisme, climat et occupations humaines. Exemple du Val de Saire (Normandie, France). Thèse de doctorat de l'université de Caen. Tome 1. 449p.

DORE F., LARSONNEUR C., PAREYN C., RIOULT M., et al. (1987). Guide géologique Normandie-Maine. Edition MASSON. 2^{ème} édition. 206p.

LOYANT D. et FRESLON M. (1998). Synthèse et cartographie des données hydrogéologiques des aquifères du Val de Saire. Rapport DDAF/98/5/HYD. DDTM 50. 14p.

LITHOLOGIC (2005). Résultats de la prospection par sondage destructifs de reconnaissance en milieu de socle – Commune de Granville et Saint-Pair-sur-mer (Manche). Rapport. 8p.

11.3.4. Bassin sédimentaire – seuil du Cotentin

VERNOUX J.F., DEROIN J.P., LEBRET P., PETIT V., SIEGEL P., 2000, Ressources en eau souterraine de l'Isthme du Cotentin – Synthèse des connaissances. Rapport BRGM RR40824, 136p.

DASSIBAT C. et MATHERON JP. (1983). Données géologiques et hydrogéologiques sur les formations liasiques de Sainte-Mère-église dans le département de la Manche. Rapport BRGM 83-SGN-736-BNO. 38p.

11.3.5. Littoral du Bessin

DASSIBAT C., PAREYN C., PASCAUD P. (1976). Renforcement de l'alimentation en eau potable du syndicat d'Omaha Beach. Rapport BRGM 76-SGN-404-PNO. Université de Caen. 19p.

FILY G. et al. (1989). Notice explicative de la feuille géologique de Grancamp-Maisy à 1/50000. Editions BRGM. Orléans. 55p.

BRGM (1997). Reconnaissance par géophysique d'un réseau karstique à Port-en-Bessin (Calvados). Rapport BRGM RP-39821-FR. 32p.

LAURENT A., LUCASSOU F., GAILLARD T., BOURGAULT C., PAY T. (2015). Livret-guide Excursion d'hydrogéologie. Arrêts 4 et 5 : Système karstique de l'Aure (DUJARDIN L., GAILLARD T., ROUX J-C.). Associations CFH et AHSP. 74p.

11.3.6. Plaine de Caen et bassin de la Dives

ARNAUD L. (2005). Implantation d'infrastructures industrielles : évaluation de la ressource en eau souterraine (Colombelles Calvados). Rapport BRGM/RP-54418-FR, 80p.

ARNAUD L. (2006). Renouveau d'exploitation de la carrière de Ranville (Calvados). Avis hydrogéologique du brgm. Rapport BRGM/RP-54464-FR. 30p.

ASTER (2001). Etude de Vulnérabilité et d'environnement. Forage F1 et F3 – Ouistreham. Rapport. 39p.

ARNAUD L. (2005). Implantation d'infrastructures industrielles : évaluation de la ressource en eau souterraine (Colombelles, Calvados). Rapport BRGM/RP-54418-FR. 80p.

BARBECOT F. (1999). Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères côtiers – Chronologies ^{14}C – ^{226}Ra . Thèse, Université Paris-Sud Orsay. 261p.

BARBECOT F., MARLIN C., GIBERT E., DEVER L. (2000). Hydrochemical and isotopic characterisation of the Bathonian and Bajocian coastal aquifer of the Caen area (northern France). Applied Geochemistry, 15(6) :791-805..

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1975). Définition des conditions d'exploitation du forage n°II de la SAVIEM à Blainville-sur-Orne (14).

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1981). Forage d'essai de Varaville. Rapport BRGM 81-SGN-782-BNO. 29p.

DASSIBAT C. (1983). Contrôle de l'évolution de la nappe phréatique 1979-1983. Société des Ciments Français. Carrière de Ranville (Calvados). Rapport BRGM 83 SGN 684 BNO. 4p.

JUIGNET (2007). Avis complémentaire sur le dossier de périmètre de protection et la présence de composés organohalogénés volatils – Forage AEP F1-F3 – Ville de Ouistreham. Avis hydrogéologue agréé. 12p.

MATHERON J-P. (1988). Contrôle de l'évolution de la nappe phréatique pendant le second semestre 1987. Société des Ciments Français. Carrière de Ranville (Calvados). Rapport BRGM 88 SGN 036 BNO. 7p.

PAREYN C. (1962). Enquête géologique concernant l'alimentation en eau potable. Société métallurgique de Normandie. Dossier BSS 01205X0143.

PASCAUD P. et BOULIN S. (1993). Société CALCIA – Réalisation d'un ouvrage F3 en remplacement du forage existant F2. Rapport BRGM - Note 93 CAE 052. 24p.

PAY T. (1995). Région de Courseulles-sur-mer. Réalisation d'un forage d'essai. Station de pompage de la Fontaine aux Malades. Compte-rendu technique. Conseil départemental du Calvados. 9p.

VERDET G. (1975). Etude de la salinité de l'Orne et des moyens de combattre les intrusions salines. Rapport R.12 114 SOGREA.H.

Suivi qualité Dogger

PASCAUD P. et TIRAT M. (1973). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne. Rapport BRGM 73-SGN-312-PNO. 31p.

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1975). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1974. Rapport BRGM 75-SGN-137-PNO. 10p.

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1976). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1975. Rapport BRGM 76-SGN-199-PNO. 13p.

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1977). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1976. Rapport BRGM 77-SGN-119-PNO. 10p.

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1978). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1977. Rapport BRGM 78-SGN-320-PNO. 12p.

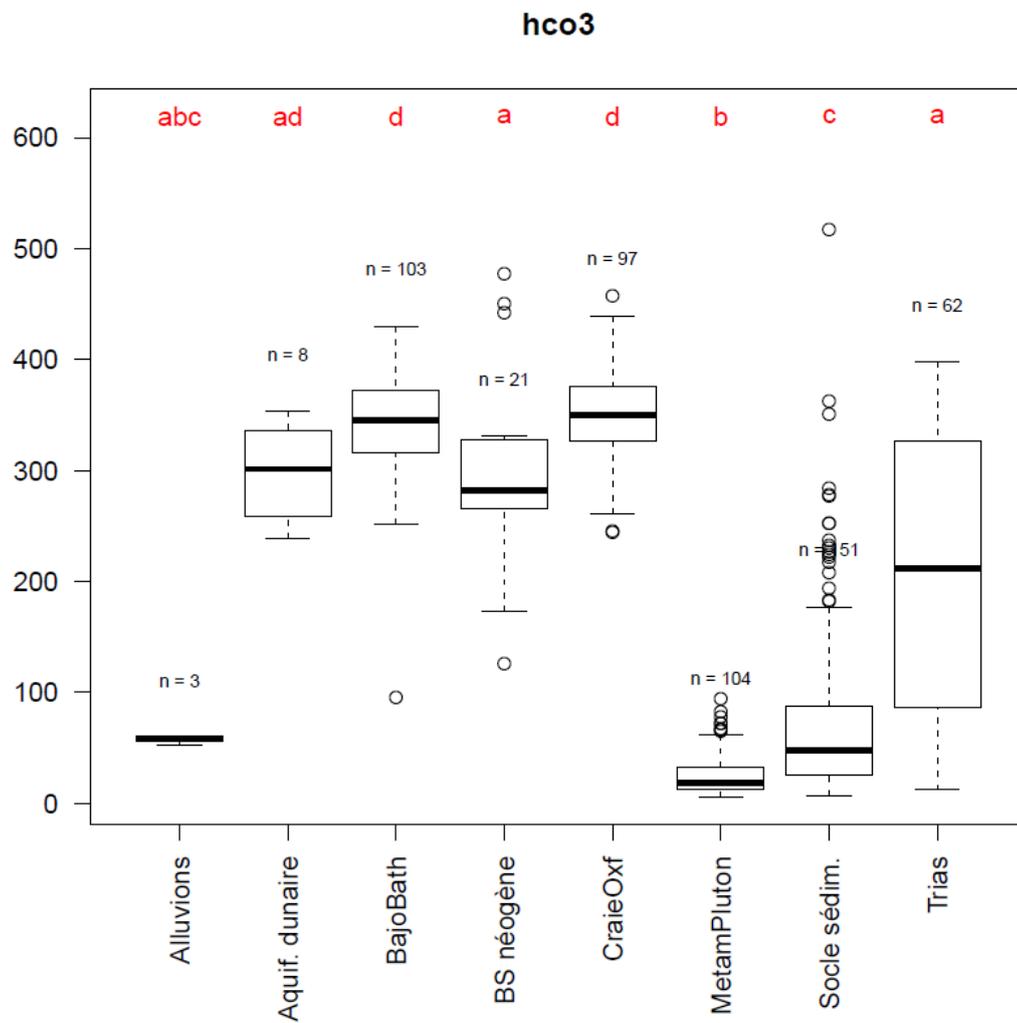
DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1979). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1978. Rapport BRGM 79-SGN-400-BNO. 11p.

DASSIBAT C. et PASCAUD P. (1980). Qualité chimique de la nappe du Dogger dans la basse vallée de l'Orne à l'étiage de 1979. Rapport BRGM 80-SGN-154-BNO. 10p.

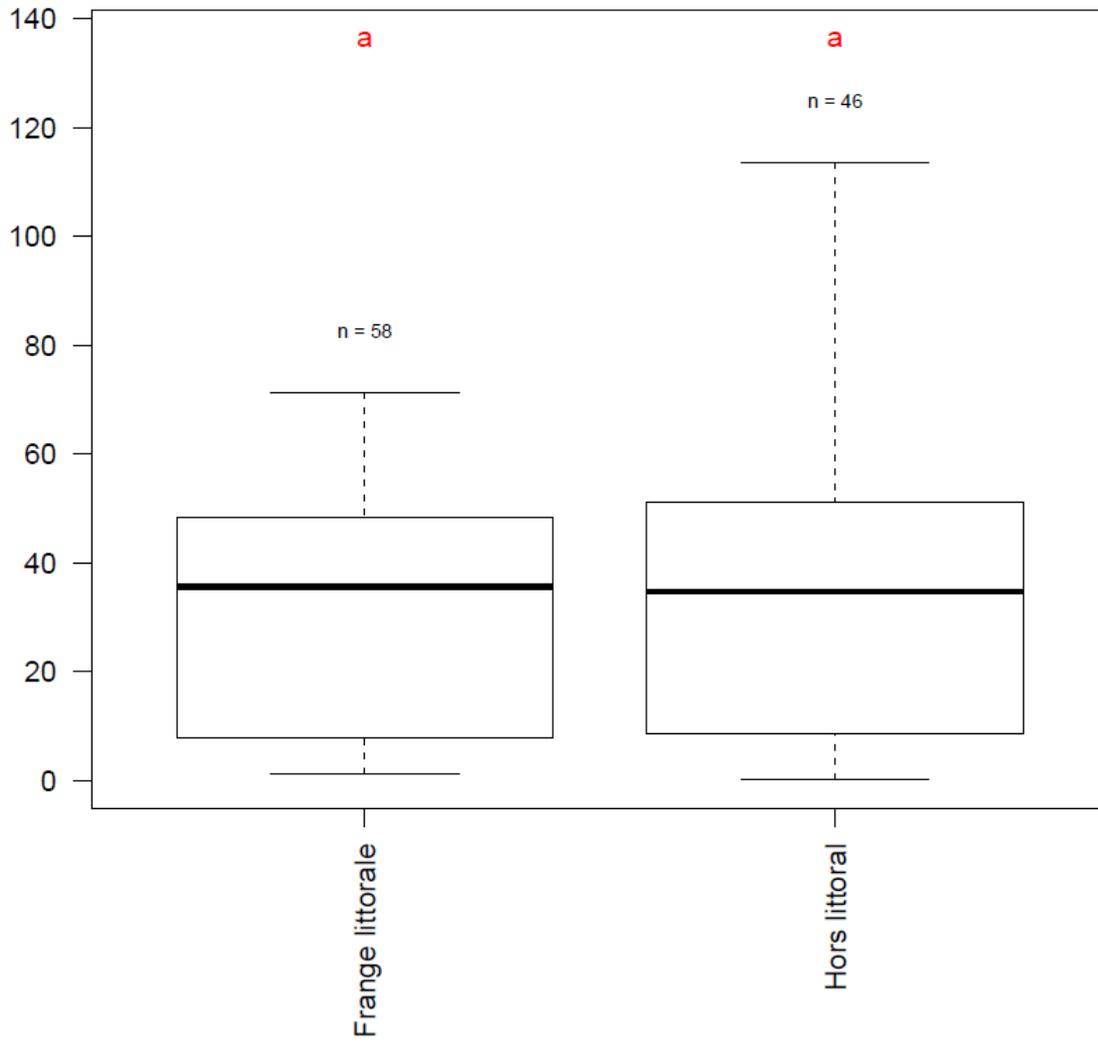
DE LA QUERIERE P., LANGEVIN C., MATHERON JP. (1986). Qualité de la nappe du Dogger dans la région de Caen – Synthèse des données. Rapport final BRGM 86-SGN-171-BNO. 19p.

Annexe 1

Boîtes à moustaches des ions majeurs (mg/L) par classe aquifère



no3 / BajoBath



Annexe 2

-

Liste des points avec une anomalie en chlorures

Code national BSS	Dept.	Usage	Etat	Commune INSEE actuelle	Prof. (m)	Coord. X L93 (m)	Coord. Y L93 (m)	Source des donnees	Classe aquifère
00732X0018/F24	50	Agricole		GATTEVILLE-LE-PHARE	73,5	391674	6960306	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Métamorphique - plutonique
00732X0019/F25	50	Agricole		SAINTE-GENEVIEVE	52,5	389695	6960709	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Métamorphique - plutonique
00733X0004/F2	50	Agricole		REVILLE	70,5	393358	6955843	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Métamorphique - plutonique
00733X0009/F13	50	Agricole		MONTFARVILLE	70,5	393097	6959056	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Métamorphique - plutonique
00924X0020/F	50	Agricole		SURTAINVILLE	9	350387	6940083	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
00924X0029/F	50	Agricole		SURTAINVILLE	10	350934	6937928	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
00924X0072/S5-88	50	Agricole		SURTAINVILLE	12	350446	6939902	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
00935X0038/C2	50	AEP	Aba	SAINT-JEAN-DE-LA-RIVIERE		354688	6928022	DDTM50	Aquifère dunaire
00937X0007/111111	50	AEP	Actif	SAINT-NICOLAS-DE-PIERREPONT	24,9	366620	6924397	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bassins sédimentaires tertiaires
00937X0026/F	50	AEP	Actif	SAINT-NICOLAS-DE-PIERREPONT	47	365922	6923946	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Bassins sédimentaires tertiaires
00938X0023/FD1	50	Pas d'usage		SAINT-SAUVEUR-LE-VICOMTE	77,3	372218	6928567	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bassins sédimentaires tertiaires
00946X0035/F3	50	Industriel		CHEF-DU-PONT	72	384140	6928530	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Trias
00948X0001/G4	14	Industriel		OSMANVILLE	36,3	402101	6922040	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Trias
00955X0007/C1	14	AEP	Aba	GRANDCAMP-MAISY		404764	6927210	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
00955X0046/S2	14	Pas d'usage		GRANDCAMP-MAISY	51	407259	6926239	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bajocien
00957X0075/F3	14	Autre		COLLEVILLE-SUR-MER	87,7	420268	6924440	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bajocien
00966X0012/F2	14	AEP	Aba	ARROMANCHES-LES-BAINS	50	436619	6921358	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bajocien
00966X0059/FE1	14	Agricole		MEUVAINES	19	440423	6921582	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bajocien
00967X0067/F3-95	14			COURSEULLES-SUR-MER	43	448110	6919169	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
00976X0149/HY	14			DEAUVILLE	20	488320	6921144	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Alluvions
01174X0006/P1	14	AEP	Aba	ISIGNY-SUR-MER	10,35	401879	6920565	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01174X0024/F3B	14	Industriel	Aba	ISIGNY-SUR-MER	20,5	401974	6920608	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01174X0030/F6-95	14	Pas d'usage		ISIGNY-SUR-MER	74	399674	6919594	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01174X0031/F6-95	14	Industriel	Actif	ISIGNY-SUR-MER	73,8	399718	6919561	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01182X0033/F5	14	Pas d'usage		COLOMBIERES	15,2	410256	6919257	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01182X0040/F5B	14	AEP	Actif	COLOMBIERES	34	410257	6919216	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Trias
01198X0035/PR1-B	14	AEP	Actif	CAEN	24,5	454152	6901899	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bajocien
01201X0158/F2	14	AEP		SAINT-AUBIN-D'ARQUENAY	40	461182	6912839	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0003/F1	14	AEP	Actif	OUISTREHAM	32	462375	6912823	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0006/F3	14	AEP	Aba	MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	88,6	467829	6912023	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0020/F3	14	AEP	Actif	OUISTREHAM	42,1	461971	6913034	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0073/F1-MF	14	AEP		MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	45,3	467346	6913057	Etude DOGGER, dassibat, 1976	Bathonien
01202X0074/F2	14	AEP		MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	43	466746	6913061	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0075/FO-MF	14	AEP	Aba	MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	190	466772	6912520	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Lias
01202X0076/F1	14	Autre		OUISTREHAM	18,4	462815	6911647	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01202X0095/F	14	AEP	Actif	AMFREVILLE	25,8	463242	6910244	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01203X0041/FE1	14	Pas d'usage		VARAVILLE	118	471277	6910099	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01203X0044/F1-94	14	Industriel		ROBEHOMME	45	469673	6908099	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0008/F2	14	Industriel	Actif	CORMELLES-LE-ROYAL	95,0	457978	6900517	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0143/F1	14	Industriel		COLOMBELLES	7	458707	6904578	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0148/F6	14	Industriel		COLOMBELLES	8,55	458692	6904575	Etude DOGGER, dassibat, 1976	Bathonien
01205X0149/F1	14	Industriel		MONDEVILLE	54	458350	6903100	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0150/F2	14	Industriel		MONDEVILLE	47,8	458285	6903075	Etude DOGGER, dassibat, 1976	Bathonien
01205X0254/F1	14	Industriel		RANVILLE	50	461338	6907806	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0255/F2	14	Industriel		RANVILLE	70,2	461237	6907647	Etude DOGGER, dassibat, 1976	Bathonien
01205X0361/F2	14	Industriel		CORMELLES-LE-ROYAL	85,5	457284	6900011	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0384/F1EXPL	14	Industriel	Aba	BLAINVILLE-SUR-ORNE	58	459311	6906900	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien

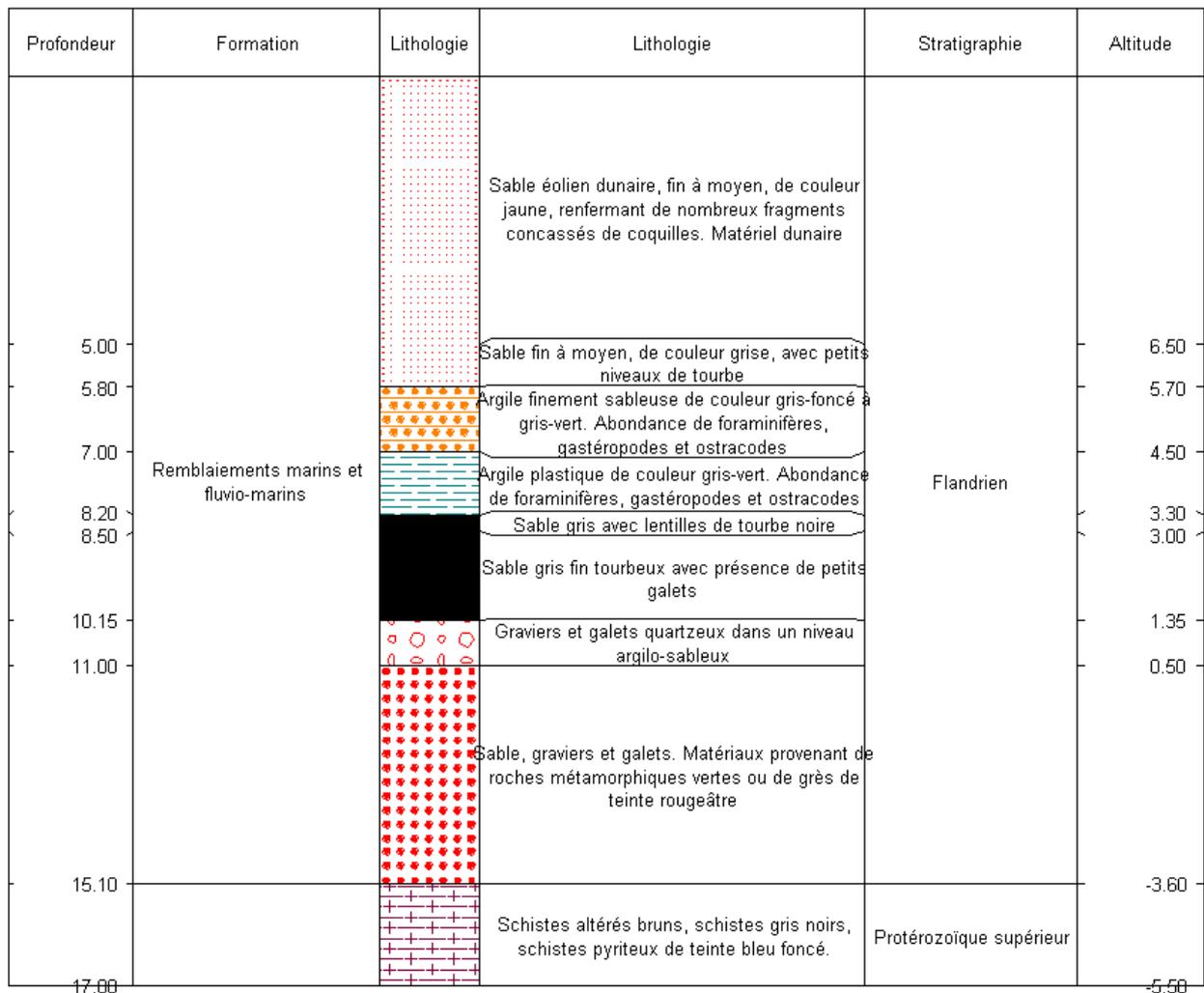
01205X0387/F1	14	Industriel		COLOMBELLES	60,85	460538	6904841	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0441/F2EXPL	14	Industriel	Aba	BLAINVILLE-SUR-ORNE	57	459084	6905831	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01205X0469/F3	14	Industriel		RANVILLE	77	461136	6907477	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01206X0214/F1	14	AEP	Actif	RANVILLE	81	463698	6908064	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01207X0012/FC4	14	AEP	Actif	BAVENT	60	468387	6906727	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01207X0061/FC5	14	AEP	Actif	BAVENT	70	468255	6906482	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01207X0077/FC7	14	AEP	Actif	BAVENT	66,6	468474	6905792	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Bathonien
01207X0100/P1	14	Industriel		ARGENCES	20	469994	6898094	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Callovien
01207X0101/P2	14	Industriel		ARGENCES	10	469449	6898113	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Callovien
01207X0102/P3	14	Industriel		ARGENCES	10	469349	6898179	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Callovien
01207X0103/P4	14	Industriel		ARGENCES	22	469923	6897975	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Callovien
01207X0113/P5	14	Industriel		ARGENCES	10	469391	6898028	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Callovien
01213X0228/S1	14			SAINT-ANDRE-D'HEBERTOT	69,5	500501	6914885	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Oxfordien
01423X0040/F1	50	AEP	Aba	BLAINVILLE-SUR-MER	10,5	363904	6896748	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
01423X0041/F1	50	AEP	Aba	GOUVILLE-SUR-MER	14	363746	6897119	DDTM50	Aquifère dunaire
01423X0047/FD2	50	AEP	Aba	GOUVILLE-SUR-MER	12,1	363857	6897318	DDTM50	Aquifère dunaire
01423X0065/F3	50	Pas d'usage		BLAINVILLE-SUR-MER	12,5	363725	6896859	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
01423X0066/F4	50	Pas d'usage		BLAINVILLE-SUR-MER	9,10	363605	6896850	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Aquifère dunaire
01428X0010/P2	50	AEP	Aba	QUETTREVILLE-SUR-SIENNE	7	373594	6885048	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Alluvions
01727X0055/SD1	50	Industriel		DONVILLE-LES-BAINS		364293	6870209	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
01727X0058/SD4	50	Industriel		DONVILLE-LES-BAINS		364118	6870265	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
01727X0059/SD5	50	Industriel		DONVILLE-LES-BAINS		363872	6870284	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
02096X0127/F	50	AEP		DUCEY	54	382974	6841997	Rapport Resurgence, 2013	Socle sédimentaire
02464X0014/F1	50	Agricole		AUCEY-LA-PLAINE	28	368797	6834334	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
02471X0009/F1	50	Agricole		SERVON	46	374632	6842036	BSS : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
02472X0064/B2	50	AEP	Actif	DUCEY	10,5	383327	6841663	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Alluvions
02472X0071/B9	50	AEP	Actif	DUCEY	70,5	383405	6841797	ADES : [Cl] > 100 mg/L	Socle sédimentaire
02472X0073/P	50	AEP	Actif	DUCEY	9,5	383179	6841518	ADES et BSS : [Cl] > 100 mg/L	Alluvions
02472X0096/P	50	AEP		DUCEY	8	383091	6841888	Rapport Resurgence, 2014	Alluvions

Annexe 3

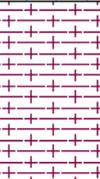
-

Coupes géologiques

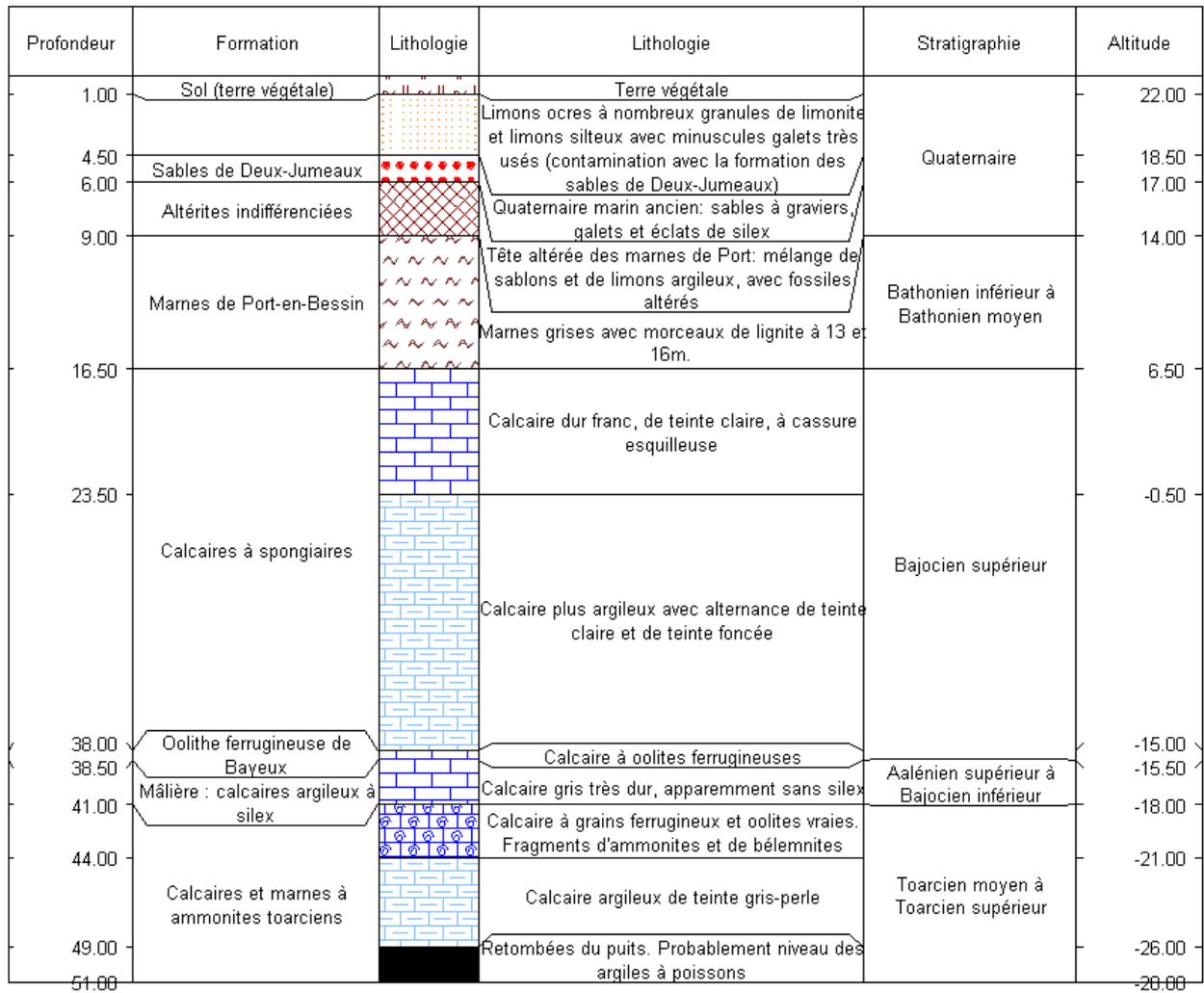
Aquifère dunaire – Ouvrage situé sur la flèche sableuse d'Agon-coutainville – [01427X0030/FD1](#)



Val de Saire – Ouvrage situé dans le bourg de Réville, à proximité de la vallée de la Saire – [00733X0008/F12](#)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.50	Limon		Terre végétale et limon argileux mélangés	Quaternaire	6.50
7.50	Altérites indifférenciées		Altérites du granite de Barleur	Paléogène à Quaternaire	0.50
10.50	Granite de Barleur		Granite gris à gros grain (granite type monzogranite calco-alcalin de Flamanville, Barleur, Fermanville, Saint-Vaast, porphyroïde riche en amphiboles, à microcline et albite, à nombreuses enclaves, tourmaline, et fréquemment écrasé. Age varisque à pré-varisque. Arrivée d'eau à 28,50m		
13.50			Granite rose à quartz abondant	Carbonifère à Permien	-5.50
31.50	Grès, siltites, argilites et phtanites de Saint-Lô		Schistes gréseux altérés gris (enclave de schistes cornéifiés du Briovérien inférieur)		
43.50	Granite de Barleur		Granite de Barleur	Carbonifère à Permien	-35.50
61.50					-53.50

Littoral du Bessin – Ouvrage situé à Grandcamp-maisy [00955X0046/S2](#)



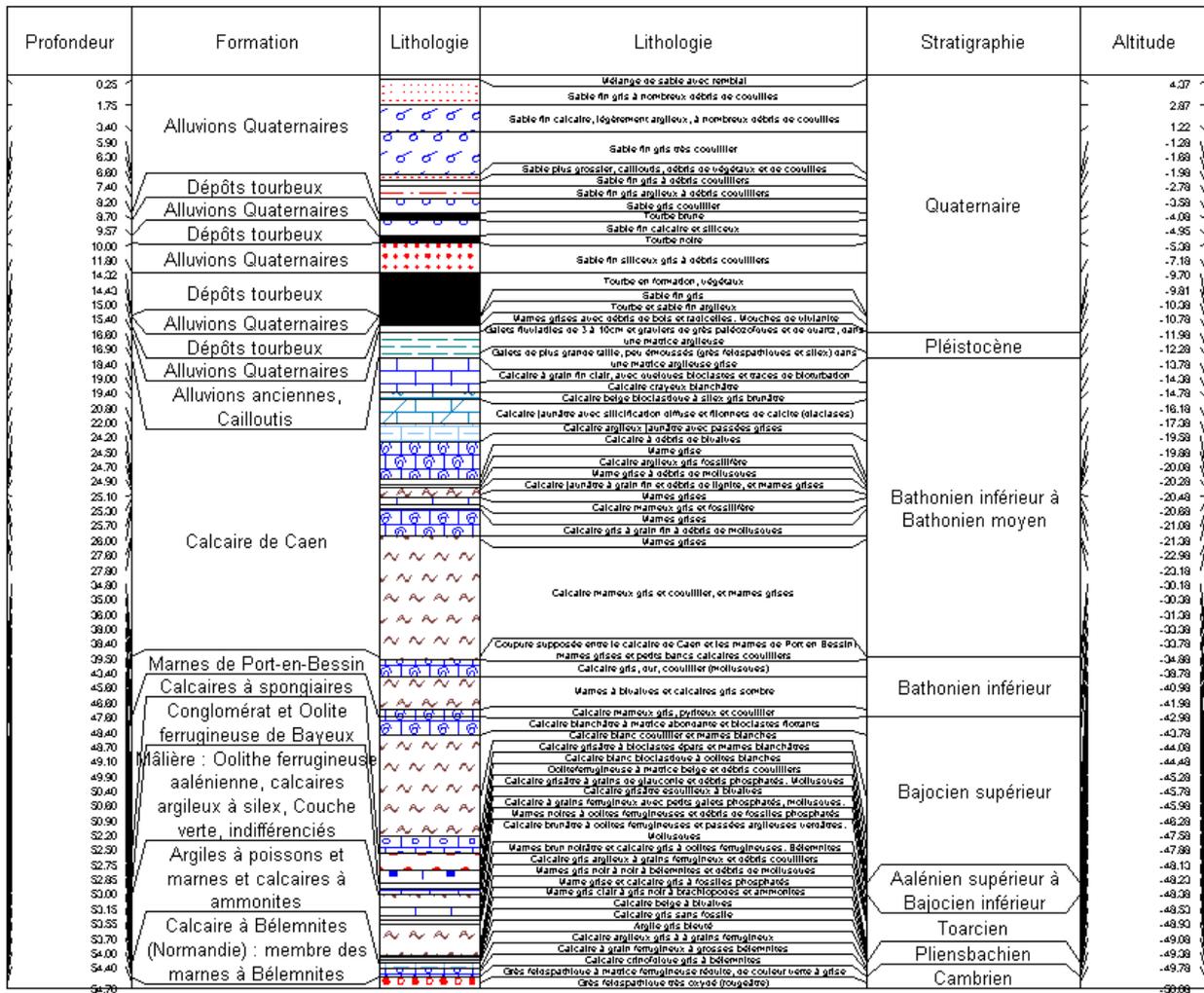
Plaine de Caen – Ouvrage situé à Ouistreham – [01202X0020/F3](#)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude	
	Alluvions Quaternaires		Alluvions	Quaternaire		
10.00	Marnes d'Escoville		Alternance d'argiles grises et de calcaires mameux	Callovien inférieur	7.92	
12.00			Argiles ocre à concrétions ferrugineuses		5.92	
12.60	Calcaire de Langrune		Calcaire bioclastique blanc tendre	Bathonien supérieur	5.32	
24.70			Caillasse de La Basse-Ecarde		Calcaire gris très fossilifère	-6.78
26.60					Calcaire roux à ciment cristallin de calcite	-8.68
31.00			Calcaire de Ranville		Calcaire blanc à bryozoaires	-13.08
34.00					Calcaire gris poreux	-16.08
35.00	Calcaire gris à ciment de calcite	-17.08				
40.60	Caillasse de Blainville		Argiles grises et calcaires argileux	-22.68		
42.10				-24.10		

Plaine de Caen – ouvrage situé à Merville-Franceville - [01202X0075/FO-MF](#)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.50	Sol (terre végétale)		Terre végétale	Actuel	10.50
0.80	Argiles à silex		Argile jaune avec silex. Altérites des formations sous-jacentes, plus ou moins colluvionnées	Quaternaire	10.20
1.20	Alluvions anciennes des plateaux		Argile grise et galets de silex, plus ou moins colluvionnées		9.80
1.40			Argile grise et galets de silex, plus ou moins colluvionnées		9.60
8.50	Altérites de craie		Argile jaune et galets de silex, plus ou moins colluvionnées	Callovien inférieur	2.50
18.00	cénomaniennes, de calcaires oxfordiens, de marnes calloviennes, ou de calcaires bathoniens		Argile jaune et bleu mélangée. Altérites des formations marnées calloviennes, plus ou moins colluvionnées		-7.00
28.00			Marnes grises, plaquettes durcies. Au sommet, les marnes d'Argences (environ 5m) puis les marnes d'Escoville (20 à 25m)		-17.00
44.00	Marnes d'Escoville		Marne grise mélangée de cailloux. Au sommet, les marnes d'Argences (environ 5m) puis les marnes d'Escoville (20 à 25m)	Bathonien supérieur	-33.00
	Calcaire de Ranville		Calcaire jaunâtre. Ensemble regroupant le calcaire de Langrune (8 à 10m), la caillasse de la Basse-Ecarde (6 à 10m), et le calcaire de Ranville situé à la base (10 à 12m) (voir une partie du niveau sous-jacent: la caillasse de Blainville).		-56.80
67.80	Calcaire de Blainville		Calcaire gris siliceux. Calcaire de Caen sens large avec le calcaire de Creully (10 à 15m) à silex dans la partie supérieure		-58.45
69.45			Calcaire gris	Bathonien moyen	
	Calcaire de Caen				
119.00	Marnes de Port-en-Bessin		Marne grise mélangée de cailloux	Bathonien inférieur	-108.00
126.00	Calcaires à spongiaires		Calcaire gris siliceux. Oolite blanche	Bajocien supérieur	-115.00
134.00	Mâlière : Oolithe ferrugineuse aalénienne, calcaires argileux à silex, Couche verte, indifférenciés		Calcaire marneux avec passages durs	Aalénien supérieur à Bajocien inférieur	-123.00
140.00			Calcaire gris. A 149m, argile jaunâtre à petites oolites ferrugineuses très altérées (Oolite aalénienne)		-129.00
149.00			Calcaire jaune	Toarcien	-138.00
	Argiles à poissons et marnes et calcaires à ammonites		Calcaire sableux très tendre. Initialement attribué au Trias. Les faciès sablo-graveleux triasiques sont ici absents. Ces calcaires sont plus logiquement attribuables au Pliensbachien.		
172.50	Calcaire à Bélemnites (Normandie)		Calcaire siliceux (calcaire plienschbachien de base??)	Pliensbachien	-161.50
178.00			Calcaire noir très dur. Initialement attribué au socle paléozoïque. Probablement du Jurassique (Sinémurien à Pliensbachien?)		-167.00
180.75	Calcaires à gryphées de Normandie			Sinémurien	-169.75
190.00					-179.00

Plaine de Caen – ouvrage situé à Blainville-sur-Orne - [01205X0441/F2EXPL](#)



Plaine de Caen – ouvrage situé à Mondeville - [01205X0149/F1](#)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
	Remblais		Remblais		
5.70				Holocène	-1.20
8.00	Fz		Vase grise		-3.50
11.10			Vase grise plus fine avec des débris de bois		-6.60
11.50	Fy		Vase grise	Würm	-7.00
14.80			Galets		-10.30
15.30			Calcaire marneux jaunâtre; ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche	Bathonien inférieur	-10.80
19.20			Calcaire jaunâtre à ostracodes; ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche		-14.70
24.60			Marne (avec des grains tombés de la couche supérieure); ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche		-20.10
26.50			Marne gris foncé; ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche		-22.00
27.70			Marne gris plus clair; ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche		-23.20
			Calcaire marneux et agile bleu; ensemble comprenant la pierre de Caen et l'oolithe blanche		
41.15	Mâlière : Oolithe ferrugineuse aalénienne		Calcaire à oolithes ferrugineuses et pyriteuses		Aalénien inférieur
42.55					-38.05
47.15			Calcaire marneux	Toarcien	-42.65
49.15			Argile jaune, bélemnite		-44.65
51.20			Marne feuilletée, argile à poissons		-46.70
54.80			Calcaire marneux gris bleu, assez dur		-49.50

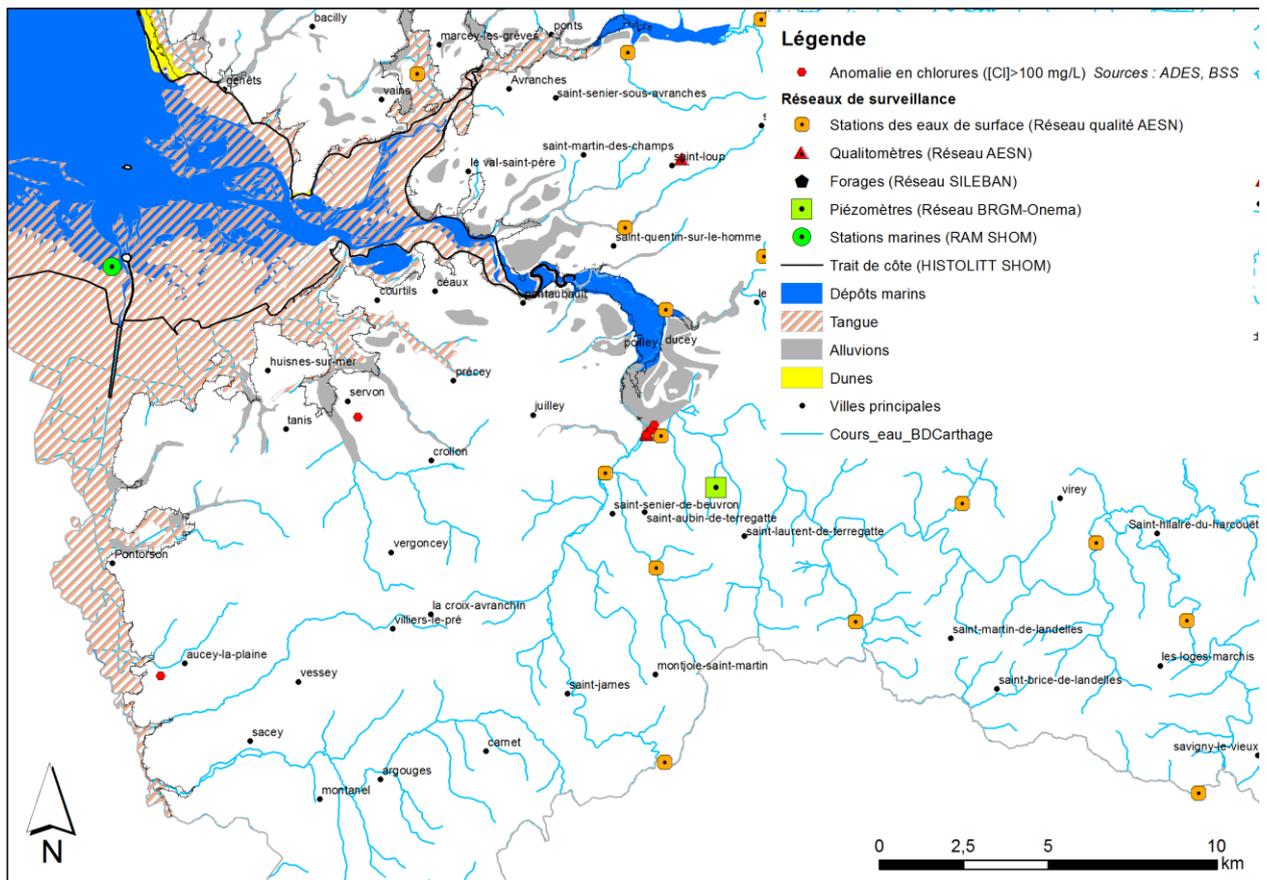
Bassin de la Dives – Ouvrage [01203X0041/FE1](#) situé à Varaville

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.20	Dépôts anthropiques		Remblais	Actuel	3.80
3.00	Alluvions Quaternaires		Argile		2.00
8.00	Remblaiements marins et fluvio-marins		Argile et dépôts tourbeux	Holocène	-3.00
14.00			Argile grise et petits lits de tourbe. Rares macro et micro-faunes. Quelques granules de calcaire argileux. Attribué au Quaternaire marin.		-9.00
23.00			Argile grise avec quelques gastéropodes et lamellibranches. Rares graviers de grès et passées de tourbe		-18.00
29.00	Marnes d'Argences		Alternance de marnes grises et de calcaires sublithographiques. Série marneuse de 23 à 45,40 indifférenciée par l'auteur et attribuée au Callovien. Attribution aux marnes d'Argences supposée	Callovien inférieur	-24.00
31.00	Marnes d'Escoville		Marnes grises à huîtres et terriers pyritisés. Passage aux marnes d'Escoville supposé		-26.00
32.00	Argiles de Lion-sur-Mer		Alternance de marnes grises et de calcaires sublithographiques. Attribution aux marnes d'Escoville supposée	Bathonien supérieur	-27.00
38.00			Marnes grises très riches en huîtres et terriers pyritisés. Alternance de marnes grises et de calcaires argileux gris. Passage supposé aux argiles de Lion-sur-Mer		-33.00
45.40	Calcaire de Langrune		Calcaire bioclastique beige à gros bioclastes dans un ciment beige de calcite. Passées récifales abondantes. Nombreux bryozoaires, encrines, pentacrines, plaques et radioles d'oursins. Petits gastéropodes et lamellibranches entiers. Attribution au calcaire de Langrune supposée.	Bathonien supérieur	-40.40
50.00	Calcaire de Ranville		Calcaire beige grenu et bioclastique à rares niveaux récifaux. Attribution au calcaire de Ranville supposée		-45.00
62.00	Calcaire de Blainville		Calcaire oolitique gris à petites oolites beiges ou grises dans un ciment de calcite. Débris de bryozoaires, petits gastéropodes et lamellibranches entiers. Grosses gravelles grises encroûtées de 66 à 69m.	Bathonien moyen	-57.00
69.00			Calcaire oolitique et graveleux passant à un calcaire gris graveleux oolitique.		-64.00
73.50	Calcaire de Creully		Apparition de silex à 73,5 m: passage au calcaire de Creully supposé. Calcaire grenu gris-clair, bioclastique, peu oolitique, à gravelles encroûtées. Rares silex oolitiques gris-clair à blancs.	Bathonien moyen	-68.50
80.00			Calcaire grenu gris-beige, peu oolitique et peu bioclastique, riche en silex oolitiques. Encrines, pentacrines, radioles et plaques d'oursins, bryozoaires, petits gastéropodes et lamellibranches entiers.		-75.00
85.00	Calcaire de Caen		Calcaire grenu gris bioclastique et graveleux. Quelques petits gastéropodes, brachiopodes et lamellibranches entiers. Encrines, pentacrines, bryozoaires. Quelques passées argileuses	Bathonien moyen	-80.00
96.00			Calcaire saccharoïde riche en accidents siliceux blancs, en silex blancs à taches noires, en silex blancs à oolites noires.		-91.00
110.00			Alternance de calcaire grenu gris et de marnes grises. Abondance de silex gris et silex oolitiques gris.		-105.00
114.00			Calcaire argileux gris		-109.00
116.00					-113.00

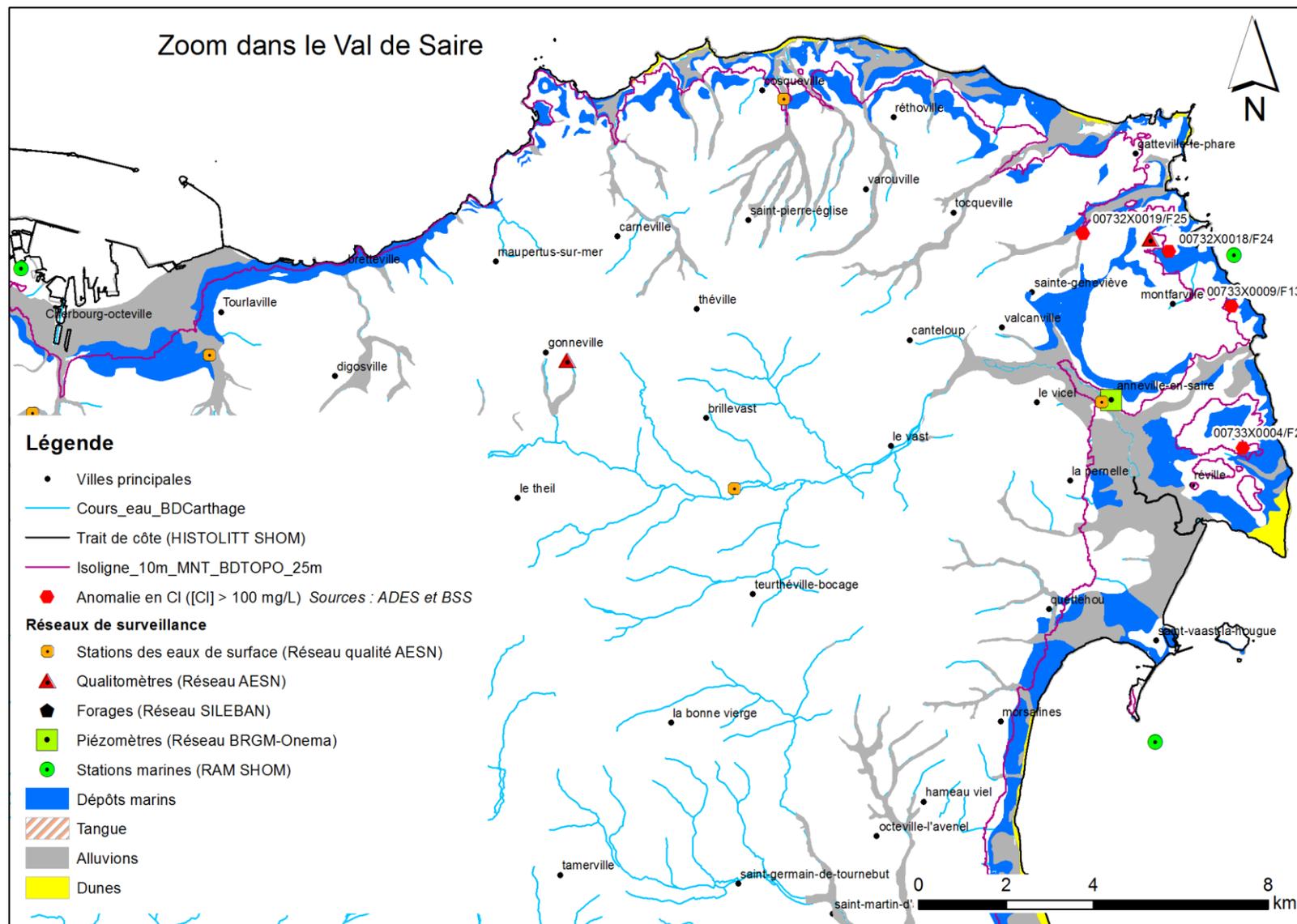
Annexe 4

Localisations des anomalies en chlorures

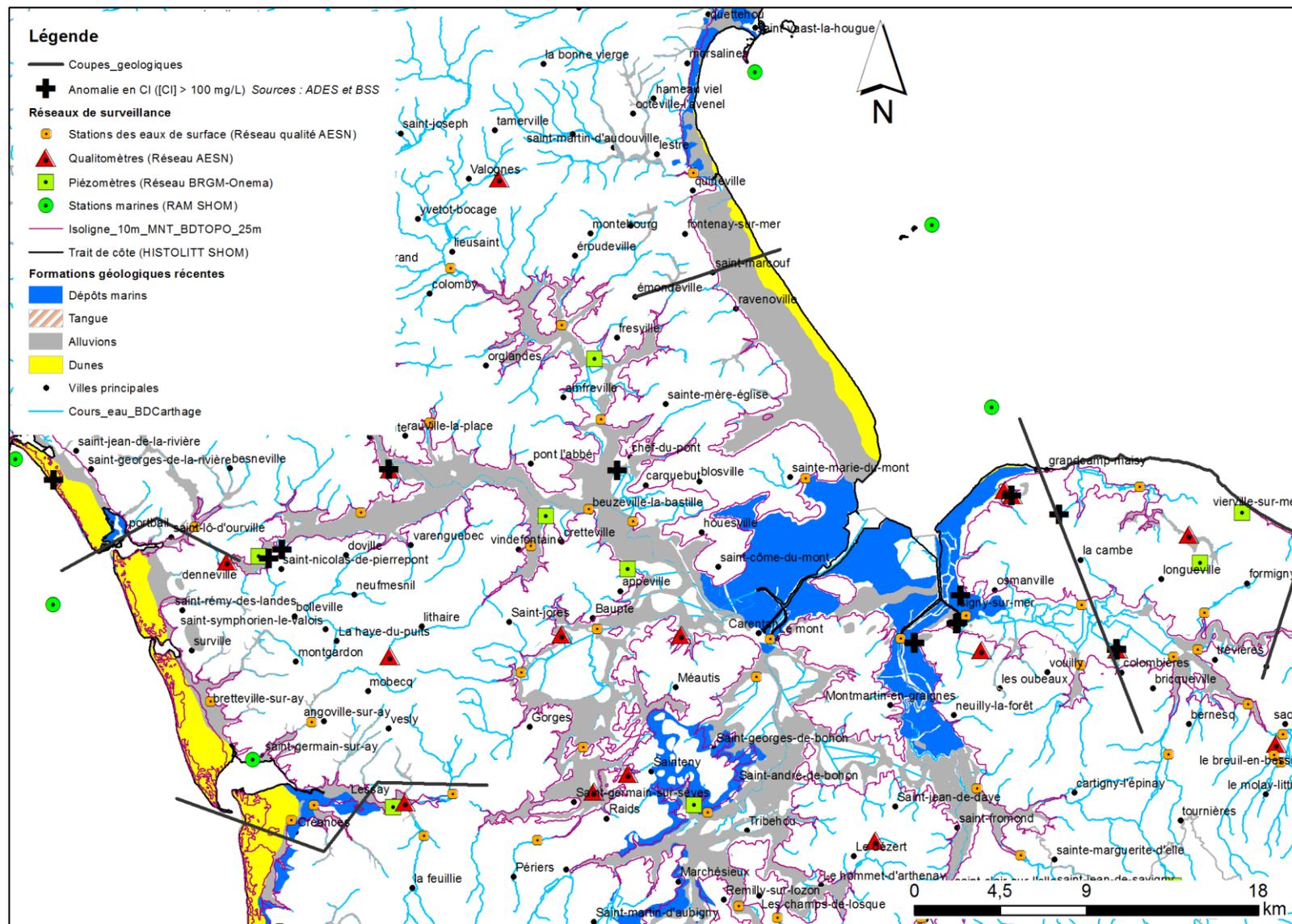
Baie du Mont-Saint-Michel et vallée de la Sélune



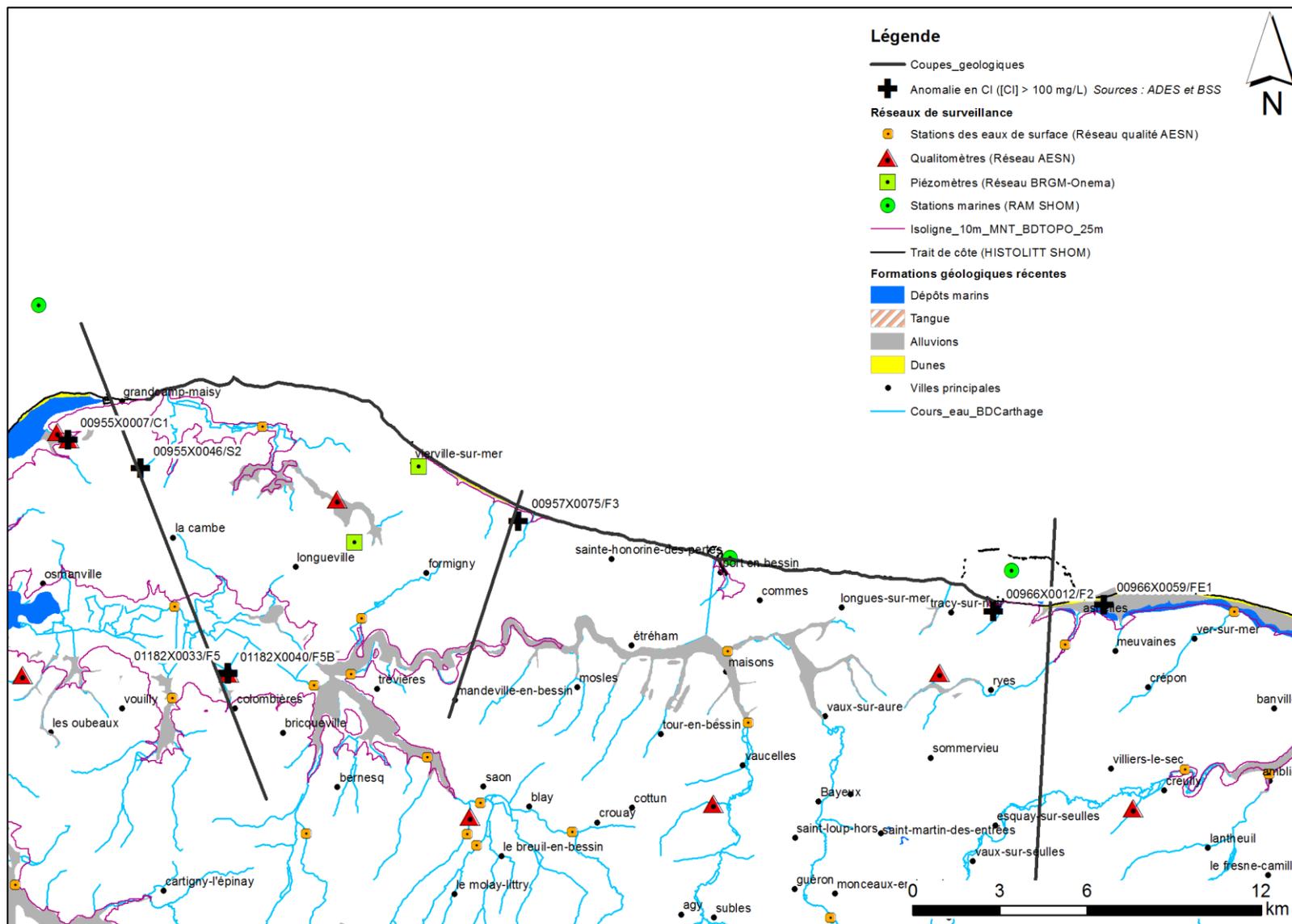
Val de Saire



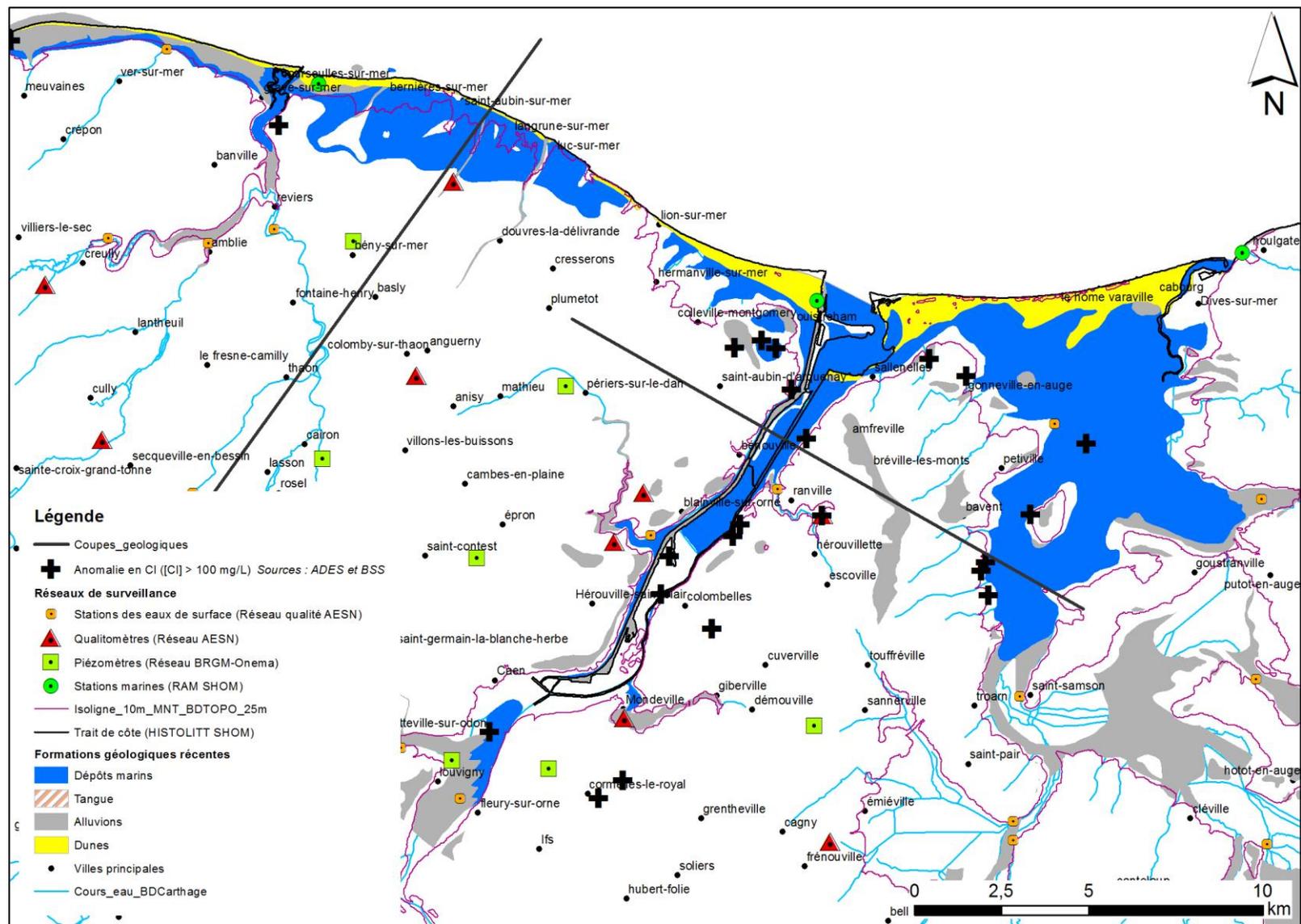
Seuil du Cotentin



Littoral du Bessin



Plaine de Caen



Annexe 5

-

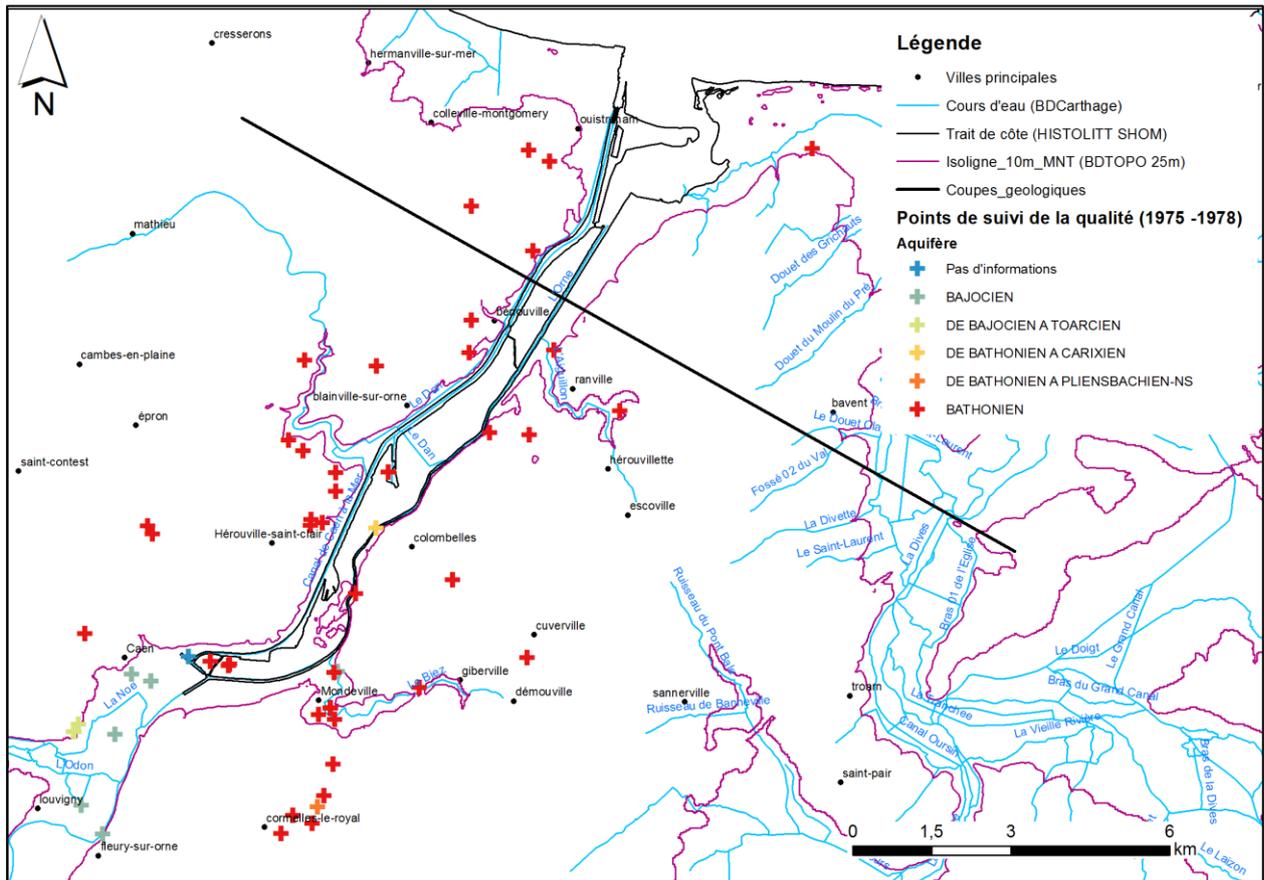
Analyses physico-chimiques de la nappe du Dogger en 1975, 1976, 1977 et 1978 (Rapports BRGM Dassibat, 1977, 1978)

Indice BSS	Commune	Prof	Date	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	Sr (µg/L)	Fe (µg/L)
01198C0066	CAEN	65	13/12/1976	128,0	9,1	21,0	6,2	378	41	22	31,0	180	
01198C0066	CAEN	65	22/11/1978	134,0	8,4	24,6	3,4	363	54	17	54,0	170	7
01198C0066	CAEN	65	dec-1975	123,8	10,0	22,6	6,2	375	44	20	31,0	230	
01198C0066	CAEN	65	dec-1977	129,2	8,6	22,2	3,3	360	56	16	50,0	200	5
01198D0154	CAEN	52	13/12/1976	138,6	7,8	21,5	5,6	354	43	46	50,0	180	
01198D0154	CAEN	52	dec-1975	137,8	8,0	22,0	4,6	357	42	40	52,0	230	
01198X0001	FLEURY-SUR-ORNE	17,32	08/12/1976	114,8	6,4	31,7	4,2	259	78	40	52,0	170	23
01198X0001	FLEURY-SUR-ORNE	17,32	01/12/1977	109,8	5,5	18,3	3,9	262	42	38	50,0	200	15
01198X0001	FLEURY-SUR-ORNE	17,32	09/10/1978	128,0	6,5	20,0	3,6	299	50	40	39,2		
01198X0001	FLEURY-SUR-ORNE	17,32	dec-1975	125,2	5,5	17,0	2,9	299	37	42	52,0	170	
01198X0037	CAEN	15,2	09/12/1976	143,0	7,7	30,3	4,5	335	70	60	40,0	250	
01198X0037	CAEN	15,2	20/11/1978	141,8	7,2	25,9	4,4	354	54	56	50,0	210	
01198X0037	CAEN	15,2	dec-1975	136,0	7,2	28,0	3,7	345	47	62	35,0	230	
01198X0037	CAEN	15,2	dec-1977	139,0	7,5	27,5	4,5	345	56	56	45,0	200	2
01198X0047	CAEN	40	09/12/1976	139,0	7,8	19,5	3,8	363	43	45	44,0	230	8
01198X0047	CAEN	40	20/11/1978	140,2	7,2	18,3	3,8	369	42	28	52,0	210	
01198X0047	CAEN	40	dec-1975	136,8	7,8	19,1	3,1	369	39	42	39,0		
01198X0047	CAEN	40	dec-1977	136,0	7,4	18,5	3,9	372	40	37	43,0	200	3
01198X0048	CAEN	24	09/12/1976	140,0	7,8	19,5	3,9	363	40	43	46,0	220	11
01198X0048	CAEN	24	20/11/1978	140,8	7,2	18,4	3,7	366	40	26	50,0	220	5
01198X0048	CAEN	24	dec-1975	136,0	7,7	21,8	3,0	360	37	41	39,0	220	
01198X0048	CAEN	24	dec-1977	133,8	7,2	18,3	3,9	366	40	36	40,0	200	4
01198X0050	CAEN	29,5	09/12/1976	139,0	7,0	19,4	3,9	360	43	42	40,0	210	15
01198X0050	CAEN	29,5	20/11/1978	139,4	6,6	18,8	3,8	366	44	32	47,0	220	
01198X0050	CAEN	29,5	dec-1975	132,8	6,8	19,3	3,0	360	39	42	39,0	230	
01198X0050	CAEN	29,5	dec-1977	135,4	6,8	18,9	4,0	366	42	39	43,0	200	3
01198X0063	CAEN	87,5	13/12/1976	128,0	9,1	21,0	6,2	378	40	22	31,0	180	
01198X0063	CAEN	87,5	22/11/1978	131,0	8,9	23,4	6,1	381	46	24	40,0	190	6
01198X0063	CAEN	87,5	dec-1975	123,8	10,0	22,6	6,2	375	36	20	31,0	230	
01198X0063	CAEN	87,5	dec-1977	129,2	9,4	23,1	6,1	378	47	19	39,0	200	15
01198X0120	LOUVIGNY	15,6	13/12/1976	141,0	7,7	24,6	6,4	353	62	45	40,0	160	
01198X0120	LOUVIGNY	15,6	23/11/1978	140,8	7,7	23,4	5,8	360	58	34	47,0	130	
01198X0120	LOUVIGNY	15,6	dec-1975	135,8	7,4	22,6	5,0	357	58	42	41,0	160	
01198X0120	LOUVIGNY	15,6	dec-1977	136,4	7,8	24,7	6,3	351	64	43	39,0	200	11
01198X0196	CAEN	29	09/12/1976	137,2	7,1	19,8	5,7	348	44	44	48,0	210	
01198X0196	CAEN	29	26/12/1978	145,0	5,5	21,0	4,4	360	41	42	44,4		160
01198X0196	CAEN	29	dec-1975	136,4	7,3	19,6	4,4	351	37	43	41,0	230	8
01198X0196	CAEN	29	dec-1977	137,4	7,2	19,6	5,0	354	47	42	49,0	200	2
01201X0002	BLAINVILLE-SUR-ORNE	61	10/12/1976	131,4	6,9	15,4	2,4	336	41	44	33,0	190	
01201X0002	BLAINVILLE-SUR-ORNE	61	20/11/1978	137,0	4,3	16,5	2,2	339	38	41	30,4		
01201X0002	BLAINVILLE-SUR-ORNE	61	dec-1975	127,2	6,8	15,9	1,9	342	39	38	27,0	220	
01201X0002	BLAINVILLE-SUR-ORNE	61	dec-1977	127,0	6,9	16,8	2,5	332	47	40	29,0	200	28
01201X0015	BIEVILLE-SUR-ORNE	50	10/12/1976	115,4	6,5	16,0	6,1	363	29	23	4,7	190	24000
01201X0015	BIEVILLE-SUR-ORNE	50	dec-1975	136,8	7,2	29,4	9,3	357	48	49	48,0	200	
01201X0080	SAINT-AUBIN-D'ARQUENAY	45,45	10/12/1976	162,4	11,4	41,2	23,8	448	84	74	23,0	250	
01201X0080	SAINT-AUBIN-D'ARQUENAY	45,45	18/05/1978	181,0	13,5	48,0	21,0	451	87	84	58,1		
01201X0080	SAINT-AUBIN-D'ARQUENAY	45,45	dec-1975	166,0	12,7	41,8	16,5	445	82	68	32,0	250	
01201X0080	SAINT-AUBIN-D'ARQUENAY	45,45	dec-1977	162,0	12,0	43,7	25,1	433	92	82	29,0	300	8
01201X0083	BENOUVILLE	30	10/12/1976	164,4	8,0	20,0	2,7	345	41	38	50,0	220	
01201X0083	BENOUVILLE	30	03/04/1978	138,0	6,8	18,0	1,7	342	42	20	46,0		
01201X0083	BENOUVILLE	30	dec-1975	132,0	8,3	18,0	1,3	345	37	34	39,0	180	
01201X0083	BENOUVILLE	30	dec-1977	129,6	7,8	19,1	2,0	348	42	38	45,0	200	4
01201X0084	BENOUVILLE	29,03	07/12/1976	140,4	7,6	22,3	1,2	372	50	36	32,0	200	35
01201X0084	BENOUVILLE	29,03	23/11/1978	138,4	7,1	20,0	1,2	363	48	30	39,0	160	
01201X0084	BENOUVILLE	29,03	dec-1975	133,4	7,1	20,4	1,1	348	40	37	32,0	190	42
01201X0084	BENOUVILLE	29,03	dec-1977	136,8	7,7	19,8	1,2	366	49	33	43,0	200	10
01202X0001	OUISTREHAM	30,45	08/12/1976	140,8	19,8	147,0	5,8	351	291	56	31,0	300	73
01202X0001	OUISTREHAM	30,45	23/11/1978	132,2	14,4	82,3	5,3	348	142	40	36,0	220	36
01202X0001	OUISTREHAM	30,45	dec-1975	128,8	14,4	70,7	4,0	342	131	44	25,0	260	23
01202X0001	OUISTREHAM	30,45	dec-1977	132,0	14,0	73,5	4,6	348	146	38	34,0	300	5
01202X0003	OUISTREHAM	32	08/12/1976	154,0	18,1	105,0	3,5	378	202	62	31,0	320	
01202X0003	OUISTREHAM	32	23/11/1978	143,4	10,2	28,5	4,0	375	68	46	32,0	270	
01202X0003	OUISTREHAM	32	dec-1975	138,0	14,0	42,7	2,2	375	96	54	24,0	300	
01202X0003	OUISTREHAM	32	dec-1977	138,0	12,5	36,0	2,5	375	96	42	18,5	300	5
01202X0020	OUISTREHAM	42,1	08/12/1976	133,2	11,2	41,0	2,4	369	89	42	13,5	280	4
01202X0020	OUISTREHAM	42,1	23/11/1978	137,8	10,0	25,5	2,1	378	54	46	16,5	210	4
01202X0020	OUISTREHAM	42,1	dec-1975	122,8	11,1	25,9	1,6	381	56	44	13,0	260	
01202X0020	OUISTREHAM	42,1	dec-1977	134,0	9,8	25,2	2,3	384	52	44	13,0	300	25
01202X0073	MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	45,3	10/12/1976	50,2	27,7	242,0	17,0	372	316	37	12,5	1800	210
01202X0073	MERVILLE-FRANCEVILLE-PLAGE	45,3	dec-1975	49,0	30,0	234,0	12,6	378	312	33	5,0	1950	93
01202X0086	RANVILLE	4,5	10/12/1976	162,0	10,1	37,5	8,0	360	88	66	38,0	290	
01202X0086	RANVILLE	4,5	11/04/1978	162,0	7,3	28,0	7,3	345	66	78	50,6		
01202X0086	RANVILLE	4,5	dec-1975	144,0	9,2	31,6	7,4	360	58	68	38,0	270	
01202X0086	RANVILLE	4,5	dec-1977	147,6	9,2	34,9	8,2	354	78	78	40,0	300	4
01205X0001	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35	07/12/1976	126,0	7,8	18,2	2,6	363	50	19	19,5	230	9
01205X0001	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35	22/11/1978	126,8	7,2	18,7	3,3	360	39	20	36,0	160	3
01205X0001	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35	dec-1975	141,2	8,1	18,1	2,4	403	37	24	26,0	240	
01205X0001	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35	dec-1977	126,6	8,3	19,0	2,8	369	40	18	29,0	200	11
01205X0002	MONDEVILLE	12	08/12/1976	120,0	5,0	39,9	5,4	305	56	50	42,0	130	8
01205X0002	MONDEVILLE	12	20/11/1978	125,0	5,0	36,3	5,5	305	56	50	54,0	140	
01205X0002	MONDEVILLE	12	dec-1975	125,6	5,2	35,5	5,0	305	54	58	46,0	150	
01205X0002	MONDEVILLE	12	dec-1977	126,4	5,3	38,8	5,9	308	72	56	47,0	200	5
01205X0005	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	43,2	07/12/1976	128,2	7,5	18,8	3,1	369	34	20	22,0	210	7
01205X0005	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	43,2	22/11/1978	132,2	8,0	18,4	2,6	369	40	21	33,0	170	2
01205X0005	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	43,2	dec-1975	140,6	7,6	17,8	2,2	397	37	21	26,0	230	12
01205X0005	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	43,2	dec-1977	128,8	8,0	19,5	3,2	369	40	20	34,0	200	11
01205X0006	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	40,2	07/12/1976	128,8	6,6	18,5	2,4	360	40	21	27,0	180	10
01205X0006	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	40,2	22/11/1978	131,8	6,1	17,9	2,1	354	39	18	39,0	150	
01205X0006	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	40,2	dec-1975	132,4	7,6	19,5	2,6	369	40	24	27,0	200	13
01205X0006	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	40,2	dec-1977	129,2	7,2	19,4	2,5	372	40	18	36,0	200	
01205X0007	MONDEVILLE	64,25	09/12/1976	120,8	6,0	21,1	1,8	305	41	44	44,0	140	
01205X0007	MONDEVILLE	64,25	20/11/1978	124,8	6,0	21,6	1,7	299	40	47	50,0	150	3
01205X0007	MONDEVILLE	64,25	dec-1975	117,0	6,3	21,7	1,3	308	39	42	35,0	170	
01205X0007	MONDEVILLE	64,25	dec-1977	122,0	6,2								

01205X0108	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35,15	dec-1975	129,6	8,0	19,9	2,6	372	42	25	26,0	200	17
01205X0108	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	35,15	dec-1977	122,8	8,8	20,3	3,2	375	39	16	29,0	200	7
01205X0109	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	50	07/12/1976	127,4	8,2	19,0	4,1	378	40	19	21,0	190	16
01205X0109	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	50	22/11/1978	129,0	8,1	18,0	3,1	371	39	17	30,0	200	3
01205X0109	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	50	dec-1975	131,8	8,2	19,0	3,0	375	40	24	25,0	180	5
01205X0109	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	50	dec-1977	130,0	8,4	19,4	3,7	375	40	18	30,0	200	10
01205X0110	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	17	07/12/1976	130,0	8,0	18,3	3,8	372	40	20	20,0	220	14
01205X0110	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	17	22/11/1978	132,0	8,3	19,5	4,4	378	44	24	33,0	170	
01205X0110	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	17	dec-1975	132,0	8,1	19,0	2,9	372	40	22	26,0	200	10
01205X0110	HEROUVILLE-SAINT-CLAIR	17	dec-1977	128,6	8,4	19,4	3,7	381	44	18	30,0	200	
01205X0112	CORMELLES-LE-ROYAL	60	08/12/1976	124,0	4,7	17,0	2,8	305	38	38	48,0	180	14
01205X0112	CORMELLES-LE-ROYAL	60	10/11/1978	77,0	5,7	36,0	4,9	207	38	54	17,6		50
01205X0112	CORMELLES-LE-ROYAL	60	dec-1975	117,6	5,0	18,3	2,6	299	34	40	46,0	150	22
01205X0112	CORMELLES-LE-ROYAL	60	dec-1977	121,6	4,8	17,8	2,8	305	39	40	45,0	200	2
01205X0116	MONDEVILLE	23	09/12/1976	122,4	5,0	20,8	4,4	302	38	45	52,0	150	
01205X0116	MONDEVILLE	23	dec-1975	134,0	5,1	21,1	3,9	314	40	50	50,0	190	57
01205X0117	MONDEVILLE	24	09/12/1976	138,4	6,0	26,2	4,9	305	62	68	54,0	180	
01205X0117	MONDEVILLE	24	dec-1975	162,0	6,2	27,2	5,2	336	50	82	52,0	190	25
01205X0135	MONDEVILLE	4,5	08/12/1976	129,2	4,9	19,6	4,3	299	38	40	62,0	170	
01205X0135	MONDEVILLE	4,5	10/11/1978	139,0	4,0	19,0	4,3	311	38	49	65,1		
01205X0135	MONDEVILLE	4,5	dec-1975	126,6	5,0	18,5	3,4	296	36	49	64,0	170	15
01205X0135	MONDEVILLE	4,5	dec-1977	127,8	4,9	19,4	4,5	299	37	49	68,0	200	6
01205X0141	GIBERVILLE	30	10/12/1976	136,0	7,2	18,3	3,8	326	44	62	28,0	220	
01205X0141	GIBERVILLE	30	21/11/1978	142,4	7,3	19,2	3,8	336	52	62	37,0	170	
01205X0141	GIBERVILLE	30	dec-1975	139,2	7,4	19,0	3,1	309	40	72	26,0	190	8
01205X0141	GIBERVILLE	30	dec-1977	136,8	7,6	19,2	4,2	329	46	64	32,0	200	3
01205X0148	COLOMBELLES	8,55	10/12/1976	160,6	8,8	55,0	4,9	317	112	120	42,0	250	42
01205X0148	COLOMBELLES	8,55	21/11/1978	146,2	9,7	48,3	5,3	320	92	88	50,0	220	8
01205X0148	COLOMBELLES	8,55	dec-1975	151,8	9,2	50,5	4,0	317	92	116	38,0	250	10
01205X0148	COLOMBELLES	8,55	dec-1977	148,4	10,9	61,7	62,2	311	103	100	52,0	300	3
01205X0149	MONDEVILLE	54	22/11/1978	83,2	5,8	29,2	4,7	229	39	42	24,0		
01205X0149	MONDEVILLE	54	dec-1977	191,6	22,9	20,6	5,4	363	433	116	11,5	700	18
01205X0150	MONDEVILLE	47,8	13/12/1976	340,0	35,6	473,0	8,3	366	1172	96	27,0	800	800
01205X0150	MONDEVILLE	47,8	dec-1975	193,2	19,6	165,0	4,7	354	390	96	5,2	520	175
01205X0153	MONDEVILLE	50,2	08/12/1976	121,0	6,3	26,5	2,1	311	48	41	39,0	160	50
01205X0153	MONDEVILLE	50,2	20/11/1978	127,2	6,7	25,1	1,7	311	54	44	45,0	160	12
01205X0153	MONDEVILLE	50,2	dec-1975	116,8	6,7	27,0	1,3	317	47	43	33,0	170	37
01205X0153	MONDEVILLE	50,2	dec-1977	128,2	5,1	20,0	4,4	299	42	48	68,0	200	2
01205X0219	CORMELLES-LE-ROYAL	80	09/12/1976	115,6	5,2	15,0	1,7	274	36	36	44,0	150	
01205X0219	CORMELLES-LE-ROYAL	80	20/11/1978	120,8	5,3	15,5	1,6	281	44	38	58,0	170	
01205X0219	CORMELLES-LE-ROYAL	80	dec-1975	123,0	5,7	15,0	1,4	282	34	36	43,0	150	
01205X0219	CORMELLES-LE-ROYAL	80	dec-1977	118,4	5,5	15,5	1,6	287	39	39	52,0	200	5
01205X0255	RANVILLE	70,2	08/12/1976	148,8	16,3	138,0	9,5	320	273	96	23,0	390	220
01205X0255	RANVILLE	70,2	21/11/1978	142,4	14,1	110,1	8,3	329	206	68	25,0	300	39
01205X0255	RANVILLE	70,2	dec-1975	154,0	23,2	186,0	7,8	329	398	88	17,5	470	97
01205X0255	RANVILLE	70,2	dec-1977	140,4	16,7	140,0	8,2	329	270	68	25,0	300	55
01205X0266	CAEN	36	13/12/1976	140,0	10,8	33,5	5,2	360	64	62	31,0	280	
01205X0266	CAEN	36	22/11/1978	140,0	10,3	30,2	4,9	366	60	56	32,0	240	
01205X0266	CAEN	36	dec-1975	138,0	8,4	25,4	3,6	366	47	50	35,0	250	
01205X0266	CAEN	36	dec-1977	137,4	10,9	31,9	5,3	366	64	56	32,0	300	4
01205X0267	CAEN	27,55	13/12/1976	140,6	8,5	22,8	5,0	357	44	58	35,0	240	22
01205X0267	CAEN	27,55	22/11/1978	142,6	8,6	22,5	5,0	360	48	56	40,0	220	6
01205X0267	CAEN	27,55	dec-1975	134,6	9,1	23,5	4,1	360	39	56	35,0	250	10
01205X0267	CAEN	27,55	dec-1977	139,0	8,8	22,7	5,0	360	46	52	40,0	300	4
01205X0274	CAEN	29,1	09/12/1976	138,6	7,4	24,8	9,2	338	46	54	58,0	200	12
01205X0274	CAEN	29,1	16/11/1978	148,0	4,5	25,0	8,3	360	45	56	49,3		
01205X0274	CAEN	29,1	dec-1975	137,4	7,4	25,8	8,7	345	40	50	49,0	230	15
01205X0274	CAEN	29,1	dec-1977	136,6	7,4	24,6	8,8	345	49	50	56,0	200	5
01205X0361	CORMELLES-LE-ROYAL	85,5	09/12/1976	120,2	4,9	14,7	3,6	308	32	29	46,0	140	
01205X0361	CORMELLES-LE-ROYAL	85,5	20/11/1978	127,0	4,7	16,0	2,2	302	40	34	64,0	150	8
01205X0361	CORMELLES-LE-ROYAL	85,5	dec-1975	123,4	5,3	16,2	3,8	323	32	31	50,0	140	
01205X0361	CORMELLES-LE-ROYAL	85,5	dec-1977	120,2	5,2	16,5	3,4	305	37	32	50,0	200	2
01205X0384	BLAINVILLE-SUR-ORNE	58	07/12/1976	151,0	13,5	85,0	5,8	396	195	42	6,8	310	710
01205X0384	BLAINVILLE-SUR-ORNE	58	dec-1975	137,8	14,0	79,2	4,5	397	156	42	9,0	300	400
01205X0387	COLOMBELLES	60,85	08/12/1976	130,0	6,1	18,8	3,9	314	56	50	27,0	190	8
01205X0387	COLOMBELLES	60,85	21/11/1978	135,4	6,0	18,3	3,9	308	60	52	36,0	180	
01205X0387	COLOMBELLES	60,85	dec-1975	134,2	6,4	17,8	2,8	311	54	52	29,0	200	
01205X0387	COLOMBELLES	60,85	dec-1977	130,4	6,1	18,9	3,8	311	60	48	33,0	200	4
01205X0395	CAEN	40	09/12/1976	149,0	7,8	25,6	7,2	335	52	70	58,0	250	
01205X0395	CAEN	40	dec-1975	143,6	7,8	25,6	5,8	342	47	70	58,0	220	
01205X0396	CAEN	30	13/12/1976	141,2	7,7	23,0	5,3	345	48	54	50,0	240	36
01205X0396	CAEN	30	22/11/1978	144,0	7,6	23,4	5,0	342	50	54	58,0	210	10
01205X0396	CAEN	30	dec-1975	130,2	7,8	23,1	4,2	336	42	54	52,0	240	
01205X0396	CAEN	30	dec-1977	142,0	7,9	23,1	5,1	342	52	50	60,0	300	10
01205X0441	BLAINVILLE-SUR-ORNE	57	07/12/1976	42,2	11,5	178,0	8,4	421	133	2	3,0	1040	60
01205X0441	BLAINVILLE-SUR-ORNE	57	dec-1975	36,8	11,1	188,0	7,3	433	153	2	3,8	1000	10
01206X0010	RANVILLE	80,8	10/12/1976	128,0	9,7	18,2	2,4	345	46	46	15,5	290	30
01206X0010	RANVILLE	80,8	dec-1975	133,2	9,7	16,5	1,8	339	44	58	17,5	250	230
01206X0012	DEMOUVILLE	107,35	10/12/1976	114,8	7,8	15,0	3,2	329	35	42	2,2	250	142
01206X0012	DEMOUVILLE	107,35	01/02/1979	119,0	6,5	21,0	2,2	308	35	76	5,3		160
01206X0012	DEMOUVILLE	107,35	dec-1975	114,2	8,5	14,8	2,7	326	30	47	1,5	240	50
01206X0012	DEMOUVILLE	107,35	dec-1977	116,8	8,2	15,7	3,3	326	36	42	2,7	300	35
01206X0173	RANVILLE	81,1	08/12/1976	129,2	6,8	18,5	1,5	351	56	29	18,5	210	20
01206X0173	RANVILLE	81,1	21/11/1978	161,4	6,2	22,6	0,5	336	68	40	62,0	230	5
01206X0173	RANVILLE	81,1	dec-1975	156,4	6,0	26,0	4,4	348	92	46	35,0	220	220
01206X0173	RANVILLE	81,1	dec-1977	131,4	7,4	18,7	1,3	342	56	34	20,0	200	16

Annexe 6

Localisation des points de suivi de la qualité de la nappe du Dogger (Dassibat et Pascaud 1975 à 1978)





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Régionale Normandie
Parc de la Vatine
14, route d'Houpeville
76130 – Mont-St-Aignan – France
Tél. : 02 35 60 12 00