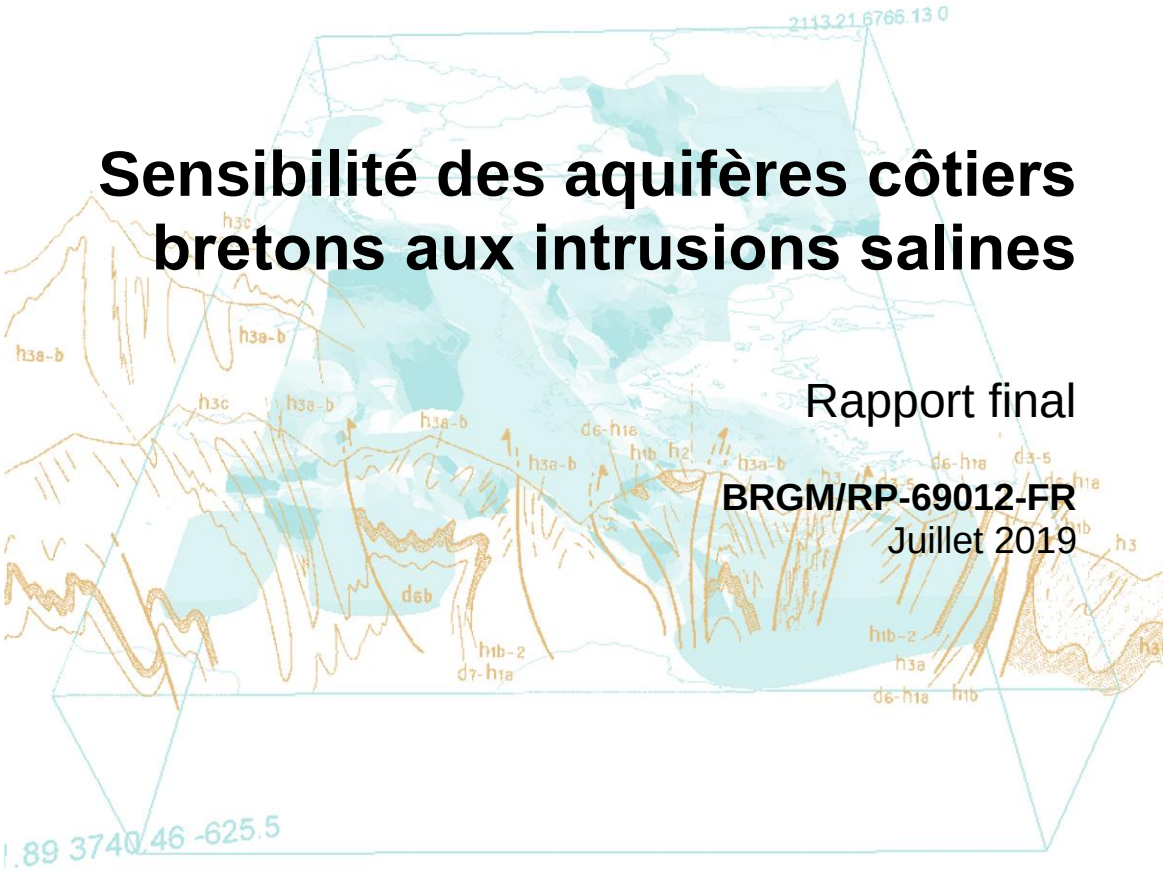
Document public

Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines



Rapport final

BRGM/RP-69012-FR
Juillet 2019

agence de l'eau Loire-Bretagne
Établissement public du ministère chargé du développement durable

Région Bretagne

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines

Rapport final

BRGM/RP-69012-FR
Juillet 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM AP16BRE050

F. Lucassou, J.-M. Schroëtter, J. Baptiste, N. Coppo,
Avec la collaboration de
F. Beaubois, F. Koch, F. Tilloloy, B. Mougin, A. Laurent, N. Croiset

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Olivier DOUEZ	Nom : Mélanie BARDEAU
Fonction : Responsable Scientifique de Programme	Fonction : Directrice du BRGM Bretagne
Date : 28/06/2019	Date : 03/07/19
Signature :	Signature :

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

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : eau souterraine, aquifères côtiers, aquifères de socle, intrusions salines, conductivité électrique, panneau électrique, Bretagne, Plougrescant

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

Lucassou F, J.-M. Schroëtter, J. Baptiste, N. Coppo, avec la collaboration de F. Beaubois, F. Koch, F. Tilloloy, B. Mougin, A. Laurent, N. Croiset (2019) – Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines. Rapport final. BRGM/RP-69012-FR, 227 p., 105 ill., 9 ann.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les aquifères littoraux constituent des ressources en eau souterraine importantes tant pour les activités humaines (alimentation en eau potable, usages agricoles, industriels, touristiques et conchylicoles) que pour l'environnement (zones humides littorales, marais et lagunes côtières situées à l'exutoire de ces nappes).

Les aquifères côtiers, qui sont en contact avec la mer ou l'océan sont sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles ou sous influence anthropique (ex. prélèvement par pompage). Les intrusions salines sont localisées au niveau du littoral, ainsi que long des cours d'eau au niveau de leur estuaire (abers ou rias), où des langues salées (ou rentrant salé) pénètrent dans le continent. La sensibilité est liée à des facteurs internes (type d'aquifère, propriétés physiques du milieu, hétérogénéité) et à des facteurs externes (volume d'eau prélevé en fonction du temps et de l'espace pour différents usages : alimentation en eau potable, tourisme, agriculture, industrie ; recharge (précipitation efficace) et niveau marin (Dörfliger *et al*., 2011)).

Les intrusions salines modifient de manière quasi-irréversible les teneurs en éléments dissous dans l'eau douce, avec notamment l'augmentation des ions chlorures et sodium, ce qui a des conséquences directes sur l'exploitation de ces aquifères côtiers pour différents usages et sur le milieu naturel.

Avec ses 2 700 km de côte très découpées, à la géologie complexe et sa fréquentation touristique estivale, la Bretagne apparait comme une région *a priori* vulnérable au phénomène d'intrusion saline.

D'autre part, le caractère hétérogène des aquifères de socle bretons complique la compréhension du fonctionnement du système aquifère de socle à l'interface avec la mer, thématique scientifique peu investiguée.

C'est pourquoi le BRGM, la Région Bretagne et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne ont lancé une étude intitulée « Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines ». Les objectifs de cette étude étaient les suivants :

- Synthèse bibliographique des études existantes et recensement des secteurs déjà identifiés comme sensibles aux intrusions salines en Bretagne, afin de réaliser un premier état des lieux,

- Identification, collecte et analyse des données hydrogéologiques et hydrochimiques disponibles dans les puits et forages situés en bordure littorale,

- Identification des captages d'alimentation en eau potable vulnérables aux intrusions salines,

- Test de caractérisation spatiale de l'invasion salée par méthodes géophysiques de surface sur un secteur précis, afin de mettre en place une procédure d'investigation adaptée et pertinente pour répondre à cette problématique d'invasion salée en contexte de socle sur d'autres secteurs géographiques à prospecter dans le cadre d'une éventuelle future étude,

- Proposition de dispositifs expérimentaux à mettre en place sur des secteurs précédemment identifiés comme présentant de forts enjeux, afin de caractériser l'interface eau douce-eau salée.

La zone d'étude a été définie à partir des critères suivants :

- Une distance au trait de côte Histolitt® (SHOM) inférieure à 5 km a été retenue pour la définition de la zone d'étude. 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 (absence de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) ;

- En complément, les zones basses topographiques ouvertes sur le littoral d'une altitude inférieure à 15 m selon le MNT 25 m (BDTOPO® IGN) ont été inclues dans la zone d'étude.

La synthèse des données disponibles a montré que peu d'études nationales et locales avaient été réalisées jusqu'alors sur les aquifères littoraux bretons mais que ces études avaient montré une certaine vulnérabilité de la Bretagne au phénomène d'intrusions salines (notamment la côte nord, la presqu'île de Quiberon et les îles morbihannaises - Dörfliger *et al.,* 2011a ; note BRGM 07.03 ; LABOCEA, 2015 ; SOGREAH, 2004).

D'après les analyses disponibles dans la base ADES, la majorité des eaux souterraines bretonnes issues des prélèvements (y compris sur le littoral) présentent des teneurs en chlorures inférieures à 60 mg/L et des conductivités inférieures à 700 µS/cm. A titre de comparaison, les références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine sont de 250 mg/L pour les chlorures et 1 100 µS/cm pour la conductivité à 25°C (arrêté du 11 janvier 2007), on n'observe donc pas de problèmes majeurs sur la plus grande partie du territoire breton. Néanmoins on rencontre sur certains secteurs des eaux avec des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et des conductivités supérieures à 700 µS/cm, qui, bien qu'inférieures aux références de qualité, paraissent donc anormalement élevées en contexte de socle. Plusieurs auteurs ont mis en évidence la présence de fluides salés dans les aquifères de socle du Massif Armoricain (Ayraud *et al.*, 2008 ; Pauwels *et al.*, 2010, Armandine Les Landes *et al.*, 2014a), liés à l'introduction d'eau de mer lors des transgressions marines et dont l'empreinte est encore visible actuellement (Aquilina and De Dreuzy, 2011 ; Armandine les Landes *et al.*, 2015), sur l'ensemble de la région et pas uniquement au niveau des aquifères côtiers. Cependant dans le cadre de cette étude, seules les intrusions salines sur le littoral ont été prises en compte.

En complément des analyses disponibles dans ADES, il existe également de nombreuses analyses réalisées sur des forages littoraux, à usage agricole notamment, qui ne sont pas rassemblées dans une base de données et dont les informations pourraient pourtant être d'un grand intérêt pour mieux identifier les secteurs touchés par les intrusions salines en Bretagne. Le recueil de ces analyses physico-chimiques s'est révélé chronophage en raison d'une méconnaissance des données disponibles et des problèmes de disponibilité des données.

La collecte de données sur un territoire restreint (35 communes de la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo) a permis de recenser des chroniques intéressantes, qui n'étaient pas disponibles dans les bases de données nationales (ADES) et de pouvoir évaluer le phénomène

de salinisation. Bien que la présence d'eaux salines fossiles en profondeur ne puisse être exclue (Armandine Les Landes *et al.*, 2015) tout comme des anomalies ponctuelles, la salinisation en cours dans ce secteur est plus vraisemblablement due à une remontée du biseau salé actuel. Ce phénomène est en augmentation et les pompages semblent être un facteur majeur de cette évolution. Les effets de cette intrusion saline semblent être visibles jusqu'à plusieurs kilomètres dans les terres indiquant un phénomène de grande ampleur. Le secteur de Plougrescant (Côtes d'Armor) est donc apparu intéressant pour mener les investigations géophysiques complémentaires, en raison de la présence de forages captant de l'eau saumâtre, des enjeux économiques importants (forte activité de culture de tomates sous serres, dépendante d'une bonne qualité de l'eau souterraine) et de l'implication des acteurs locaux.

Un des objectifs de ce projet était d'identifier de manière simple les captages souterrains (forages, puits, sources) utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) potentiellement vulnérables aux intrusions salines, compte tenu de leur localisation (proximité du littoral), de leur profondeur et de leur altitude. **101 captages AEP souterrains ont été identifiés comme étant potentiellement vulnérables aux intrusions salines,** dont 67 actuellement exploités (Etat « actif » dans le référentiel issu d'ADES), 23 en projet de mise en service et 11 abandonnés. La présence d'une intrusion saline n'est confirmée par des analyses que sur un seul forage AEP actif (forage de Kerenneur à Plourin) et les captages situés sur des îles semblent effectivement plus vulnérables à ce phénomène (Groix, Houat, Hoëdic). Afin de garantir la pérennité des captages d'eau potable vulnérables, différentes actions ont été proposées : contrôle du niveau dynamique de la nappe en pompage pour éviter un rabattement excessif, diminution du débit de pompage et augmentation du temps de pompage pour limiter les rabattements, répartition des prélèvements sur plusieurs ouvrages, suivi de la conductivité pendant l'exploitation, sensibilisation des exploitants et de la population au phénomène d'intrusion saline, mise en place d'un observatoire régional afin d'avoir une vision globale du phénomène d'intrusion saline et de son évolution.

Pour tenter d'identifier les secteurs vulnérables au phénomène d'intrusions salines à l'échelle de la Bretagne, plusieurs paramètres ont été croisés et présentés sous forme de cartes au 1/100 000 : données géologiques (failles), géomorphologiques (zones basses, nature du trait de côte et linéaments), dynamique d'érosion du trait de côte et données physico-chimiques ayant permis d'identifier certains captages concernés par les intrusions salines. La majorité des ouvrages présentant une teneur moyenne en chlorures supérieure à 60 mg/L et/ou une conductivité moyenne supérieure à 800 µS/cm sont situés à moins de 1,5 km du trait de côte et dans une configuration particulière du trait de côte (marais maritime, île et presqu'île) et plus d'un tiers se trouvent à proximité immédiate d'une faille ou d'un linéament. Ces critères ont permis de délimiter sous SIG des secteurs potentiellement vulnérables aux intrusions salines.

Des investigations géophysiques sur un secteur test (Plougrescant – anse de Gouermel) ont ensuite été menées afin de localiser et caractériser l'interface eau douce-eau salée mais également dans un objectif méthodologique, afin d'établir une procédure d'investigation adaptée et pertinente pour répondre à la problématique d'invasion salée en contexte de socle sur d'autres secteurs géographiques. Quatre panneaux électriques, centrés sur un forage ayant capté de l'eau saumâtre, situé à 1,5 km de la mer, ont été réalisés. L'absence de coupe géologique du forage, l'impossibilité de réaliser une diagraphie de conductivité et des sondages par Résonance Magnétique des Protons (RMP) permettant de discriminer les zones argileuses ont empêché un calage correct des résultats des panneaux électriques. L'étude géophysique a tout de même permis de mettre en évidence une structuration du milieu en compartiments de granite « sain » et très résistants, séparés par des zones plus conductrices. Toutefois, il est nécessaire d'acquérir des informations complémentaires (informations sur forages, diagraphies, hydrochimie de l'eau, …) pour permettre de conforter et d'asseoir les interprétations proposées

(notamment valider les hypothèses d'invasions salines évoquées). Ceci permettrait de généraliser l'application des investigations géophysiques du milieu fissuré côtier à plus grande échelle.

Des propositions d'actions et de gestion ont été formulées en conclusion de cette étude. Il convient notamment d'être particulièrement vigilant lors de la réalisation de nouveaux forages dans les secteurs potentiellement vulnérables identifiés et de prendre des précautions lors de l'exploitation des forages déjà en service afin de limiter les risques d'intrusions salines. La sensibilisation des utilisateurs des eaux souterraines dans la frange littorale semble primordiale. D'autres investigations seraient cependant nécessaires dans chaque secteur pour identifier l'origine des intrusions salines et en réaliser un suivi.

Sommaire

1. Introduction 15

2. Contexte.....19

2.1. LE PHENOMENE D'INTRUSION SALINE 19
2.1.1. Biseau salé et aquifères.....19
2.1.2. Le rentrant salé.....24
2.1.3. Autres origines possibles de la salinité des eaux souterraines.....25
2.1.4. Influence de l'exploitation des eaux souterraines sur les intrusions salines27

2.2. METHODES D'OBSERVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE27
2.2.1. L'hydrogéochimie appliquée aux intrusions salines.....28
2.2.2. La géophysique appliquée aux intrusions salines 30

2.3. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE 32
2.3.1. Contexte général 32
2.3.2. Niveaux de mer marégraphiques et altimétriques 33
2.3.3. Contexte géomorphologique et géologique.....36
2.3.4. Contexte hydrogéologique breton 41

3. Phase 1 – Synthèse et interprétation des données disponibles 43

3.1. HISTORIQUE DES PRECEDENTS TRAVAUX ET ETUDES.....43
3.1.1. Travaux nationaux 43
3.1.2. Etudes régionales sur les fluides salés 47
3.1.3. Etudes locales 50

3.2. IDENTIFICATION, COLLECTE ET ANALYSE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DISPONIBLES.....66
3.2.1. Collecte des données disponibles auprès des acteurs de l'eau bretons..67
3.2.2. Collecte des données disponibles auprès de la profession agricole sur le territoire du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo 67
3.2.3. Conclusion sur la collecte des données 71
3.2.4. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines 72

3.3. IDENTIFICATION DES CAPTAGES AEP POTENTIELLEMENT VULNERABLES AUX INTRUSIONS SALINES.....82
3.3.1. Pré-sélection des captages potentiellement vulnérables.....83
3.3.2. Recherche des analyses disponibles sur les ouvrages EDCH potentiellement vulnérables aux intrusions salines.....89
3.3.3. Exploitation des ouvrages potentiellement vulnérables 90
3.3.4. Recommandations de gestion.....91

3.4. DELIMITATION DES SECTEURS VULNERABLES.....92

4. Phase 2 - Caractérisation de l'interface eau douce – eau salée 97

4.1. SUIVI DE LA CONDUCTIVITE SUR LES PIEZOMETRES LITTORAUX 97
4.1.1. Diagraphies de conductivité 98
4.1.2. Suivi de la conductivité en continu 100
4.1.3. Pistes de réflexion 102

4.2. CARACTERISATION SPATIALE DE L'INVASION SALEE PAR METHODES GEOPHYSIQUES DE SURFACE SUR UN SECTEUR TEST 102
4.2.1. Objectifs 102
4.2.2. Programme technique envisagé initialement 103
4.2.3. Présentation des différentes méthodes 104
4.2.4. Choix du secteur test 105
4.2.5. Reconnaissance géologique du secteur 106
4.2.6. Investigations géophysiques réalisées 114

4.3. CONFRONTATION DES INVESTIGATIONS IN SITU GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES AU REGARD DE LA CONNAISSANCE REGIONALE 136

5. Phase 3 –Propositions d'actions et d'investigations complémentaires sur les secteurs vulnérables 141

5.1. COMMUNICATION ET SENSIBILISATION AU PHENOMENE DE BISEAU SALE 141

5.2. ETUDES GEOCHIMIQUES 141

5.3. CARTOGRAPHIE DE LA CONDUCTIVITE 142

5.4. RECOLTE ET ANALYSES DES DONNEES DISPONIBLES 142

5.5. REALISATION D'UN PIEZOMETRE EXPERIMENTAL DANS LE SECTEUR DE PLOUGRESCANT 142

5.6. MEILLEURE DELIMITATION DES SECTEURS VULNERABLES 143

5.7. ETUDE GEOPHYSIQUE 143

5.8. MISE EN PLACE DE RESEAUX DE SURVEILLANCE DES INTRUSIONS SALINES 143

5.9. ETUDES A PLUS LONG TERME 144

6. Conclusion 145

7. Bibliographie 149

Liste des illustrations

Illustration 1 : Zone d'étude le long du littoral breton 17

Illustration 2 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al,. 2005). 20

Illustration 3 : 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 4 : Profil de conductivité à l'interface eau douce eau salé (Garing et al., 2013)..... 22

Illustration 5 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire (Frissant et al., 2009) 22

Illustration 6 : Zone de transition ou de mélange au sein d'un aquifère multicouche (d'après Custodio, 2002 in de Montéty, 2008)..... 23

Illustration 7 : Schématisation d'un épisode de rentrant salé (zone de transition non représentée – Frissant et al., 2009) 24

Illustration 8 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines (Kloppmann et al., 2011) 25

Illustration 9 : Carte schématique des teneurs en chlorure des précipitations sur les côtes françaises (Chéry, 2006) 26

Illustration 10 - Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben-Herzberg (Frissant et al., 2009) 27

Illustration 11 : Gammes de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2003, in Kloppmann et al., 2011b)..... 29

Illustration 12 : Composition moyenne des océans (Copin-Montegut, 1996, Chimie de l'eau mer)29

Illustration 13 : Localisation des panneaux électriques et profondeur de l'interface eau douce – eau salée en Guadeloupe (Ducreux et al., 2014) 31

Illustration 14 : Carte de zones de marée sur les côtes françaises métropolitaines (SHOM, 2016) 34

Illustration 15 : Carte du marnage (en cm) pour un coefficient de marée de 120 (SHOM, 2016)34

Illustration 16 : Localisation des ports de référence, principaux et secondaires en Bretagne (SHOM, 2016)..... 35

Illustration 17 : Niveau marin moyen (en rouge) et niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA, en bleu) en m NGF (référentiel IGN 69) pour les ports de référence et secondaires bretons en fonction de leur distance à la station de la Baie du Mont Saint-Michel 36

Illustration 18 : Altimétrie (BDALTI – IGN 25 m) et bathymétrie (MNT 100 m – Atlantic –SHOM) bretonnes 37

Illustration 19 : A gauche - Falaises de migmatite entre Saint-Lunaire et Saint-Briac, depuis la pointe de la Garde Guérin, regard vers l'ouest (© 2013, BRGM/M. Prémalion) ; à droite – Falaises de diorites et gabbros altérées Saint-Quay-Portrieux ((© 2018, BRGM/J.M. Schroëtter). 37

Illustration 20 : Coupe géologique Terre-Mer, sur la partie orientale de la baie du Mont-Saint-Michel (Carte géologique au 1/50 000, Feuille Baie du Mont Saint Michel, BRGM, Laurent et al., 2016) 38

Illustration 21 : Carte géologique au millionième de la Bretagne et failles associées (Source : BRGM) 41

Illustration 22 : Synthèse des aquifères de Bretagne (Schroëtter, non publié)..... 42

Illustration 23 : Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux invasions salées (Petit, 1996 - BRGM/RP-39298-FR) 44

Illustration 24 : Schéma de la démarche de cartographie nationale de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale . 45

Illustration 25 : Carte de pression anthropique sur les aquifères côtiers bretons (Dörfliger, 2011a – BRGM/ RP-60829-FR) 46

Illustration 26 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne (Dörfliger et al., 2011a – BRGM/ RP-60829-FR) 47

Illustration 27 : Répartition des concentrations en chlorures dans les eaux souterraines sur le Massif Armoricain (Armandine les Landes, 2014) 48

Illustration 28 : Localisation des paléocôtes sur la topographie actuelle pour les transgressions marines depuis le Mio-Pliocène (Armandine les Landes, 2014) 49

Illustration 29 : Mesures de conductivité réalisées en 2005 et état des forages dans le secteur de Saint Malo (en haut) et Roz-sur-Couesnon (en bas) - note BRGM 05.149..... 51

Illustration 30 : Mesures de conductivité réalisées en 2006 dans le secteur de Quiberon (en haut) et Paimpol (en bas) - note BRGM 07.03..... 52

Illustration 31 : 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 54

Illustration 32 : Coupe transversale à la côte en rive droite du Couesnon, source : SOGREAH, 2002, rapport phase 6..... 55

Illustration 33 : Localisation des forages salés mentionnés dans le rapport BRGM SGR/BRE 87-02 57

Illustration 34 : Contexte géologique du forage de Kerenneur (ANTEA, 2009) 58

Illustration 35 : Coupe du forage de Kerenneur - 02374X0016/F1 (Banque du Sous-Sol)..... 58

Illustration 36 : Evolution des teneurs en chlorures et du débit annuel d'exploitation du forage de Kerenneur (LABOCEA, 2015)..... 59

Illustration 37 : Evolution de la conductivité du forage de Kerenneur (Source : ADES) 60

Illustration 38 : Chroniques des concentrations en chlorures (en bleu), sodium (en orange) dont les concentrations (mg/l) sont lisibles sur l'axe de gauche et ratio Cl-/Na+ (en gris ; échelle sur l'axe de droite) du forage de Kerenneur (Source : ADES)..... 60

Illustration 39 : Coupe géologique schématique de la zone Nord de l'île d'Houat (SOGREAH, 2004) 61

Illustration 40 : Carte piézométrique basses eaux de novembre 2002 (SOGREAH, 2004)..... 62

Illustration 41 : Répartition des moyennes de conductivité (en haut) et des concentrations en chlorures (en bas) mesurées en 2002-2003 (SOGREAH, 2004) 63

Illustration 42 : Diagraphies de conductivité réalisées en basses eaux dans les forages F2, F5 et F6 de l'île d'Houat (SOGREAH, 2004)..... 64

Illustration 43 : Localisation des principaux points d'eau sur Hoëdic sur fond de carte IGN (SOGREAH, 2011)..... 65

Illustration 44 : Piézométrie estimée en basses eaux sur l'île d'Hoëdic d'après les mesures du 30 octobre 2009 (SOGREAH, 2011)..... 65

Illustration 45 : Localisation du secteur concerné pour l'envoi des questionnaires 68

Illustration 46 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de 10 exploitations agricoles situées sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo (rapport BRGM/RP-68709-FR) 69

Illustration 47 : Chroniques des concentrations en chlorures (bleu), sodium (orange) dont les concentrations (mg/l) sont lisibles sur l'axe de gauche et ratio Cl^-/Na^+ (en gris ; échelle sur l'axe de droite) (rapport BRGM/RP-68709-FR)..... 70

Illustration 48: a) Positions des pompes en fonction de l'altitude et b) profondeur des pompes en fonction de la distance à la côte (rapport BRGM/RP-68709-FR) 71

Illustration 49 : Données récoltées dans le cadre du projet « Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines » 72

Illustration 50 : Statistiques descriptives sur les paramètres et conductivité (µS/cm), chlorures (mg/L), sodium (mg/L) et sulfates (mg/L)..... 73

Illustration 51 : Diagramme de la conductivité en fonction des concentrations en chlorures (mg/L) par localisation (à gauche : en Bretagne et dans la zone d'étude (frange littorale)) et par lithologie (à droite) 74

Illustration 52 : Localisation des qualitomètres ayant des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L 75

Illustration 53 : Localisation des qualitomètres ayant des valeurs de conductivité supérieures à 717 µS/cm..... 76

Illustration 54 : Qualitomètres situés dans la zone d'étude sur lesquels la conductivité et les teneurs en chlorures sont supérieures aux percentiles 90 des mesures disponibles dans ADES sur la région 76

Illustration 55 : Représentation des qualitomètres classés par lithologie dans deux diagrammes de Piper (à gauche : qualitomètres situés dans la zone d'étude ; à droite : qualitomètres situés hors de la zone d'étude)..... 77

Illustration 56 : Diagramme corrélant deux indicateurs d'apports anthropiques (nitrates versus Chlorures) [Gourcy et Petelet-Giraud (2011)]..... 78

Illustration 57 : Diagrammes fer versus nitrates(en mg/L) par lithologie En haut : dans la zone d'étude ; en bas : hors zone d'étude ; à droite : zoom..... 79

Illustration 58 : Diagramme des ions chlorures versus les ions nitrates (en meq/L) dans les principales formations géologiques de Bretagne A gauche : dans la zone d'étude ; à droite : hors zone d'étude 80

Illustration 59 : Diagramme sodium versus chlorures (meq/L) par lithologie sur l'ensemble des qualitomètres bretons (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer) 81

Illustration 60 : Diagrammes sodium versus chlorures (meq/L) par lithologie (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer) En haut : dans la zone d'étude ; en bas : hors zone d'étude ; à droite : zoom 82

Illustration 61 : Usage et état des captages AEP bretons au 12/04/2017 (source : ADES) 83

Illustration 62 : Altitude du fond de l'ouvrage des 156 captages EDCH potentiellement vulnérables 85

Illustration 63 : Usage et état des captages EDCH vulnérables 85

Illustration 64 : Captages souterrains d'Eau Destinée à la Consommation Humaine potentiellement vulnérables aux intrusions salines..... 87

Illustration 65 : Captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines avec des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et/ou des conductivités supérieures à 800 µS/cm (en rouge) – source : ADES 89

Illustration 66 : Localisation des captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines avec des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et/ou des conductivités supérieures à 800 µS/cm (analyses disponibles dans ADES) 90

Illustration 67 : Localisation approximative des secteurs sensibles aux intrusions salines (cas de forages fortement minéralisés recensés)..... 93

Illustration 68 : Localisation des secteurs potentiellement vulnérables aux intrusions salines ... 96

Illustration 69 : Chroniques piézométriques horaires des piézomètres d'Hennebont et Trégunc en septembre 2016 (coefficients de marée supérieurs à 90 du 1er au 3/09 et du 16 au 21/09) 97

Illustration 70 : Localisation des piézomètres d'Hennebont et de Trégunc..... 98

Illustration 71 : Résultats des diagraphies de conductivité et de température réalisées sur le piézomètre de Trégunc 99

Illustration 72 : Résultats des diagraphies de conductivité et de température réalisées sur le piézomètre d'Hennebont..... 100

Illustration 73 : Chronique de conductivité sur le piézomètre d'Hennebont 101

Illustration 74 : Chronique de conductivité sur le piézomètre de Trégunc 101

Illustration 75 : Plan schématique du dispositif envisagé sur la zone d'étude 104

Illustration 76 : Localisation du secteur test et du forage en cours de salinisation suspectée (en bleu) (fond IGN 1/25 000) 106

Illustration 77 : Evolution des teneurs en chlorures et de la conductivité sur le forage en cours de salinisation suspectée..... 106

Illustration 78 : Localisation des différentes zones géomorphologiques de la zone d'étude et du forage de Lézernan (en jaune) sur fond orthophotographies IGN)..... 107

Illustration 79 : Forages de la BSS sur fond de carte géologique 1/50 000 harmonisée sur le secteur d'étude 108

Illustration 80 : Extrait de la carte géologique de Perros-Guirec au 1/50 000ème (d'après Guennoc et al., 2015) 109

Illustration 81 : Localisation des affleurements visités (fond : IGN 1/25 000) 110

Illustration 82 : Cartographie des altérites de la zone d'étude et localisation des panneaux électriques (en rouge) et des forages (en jaune)..... 112

Illustration 83 : Log schématique et synthétique des formations cartographiées (les valeurs d'épaisseur des formations sont données à titre indicatif en référence aux altitude mesurées sur le terrain via GPS. Les espacements entre les plans horizontaux de l'horizon fissuré ne sont pas à l'échelle) 113

Illustration 84 : Valeurs moyennes de fracturation mesurées sur 9 affleurements et directions de fracturations principales (1 étant les plus fréquemment mesurées et 5 les moins fréquentes)..... 114

Illustration 85 : Localisation des panneaux électriques (traits rouges) réalisés sur fond de carte topographique IGN 1:25 000. Test de bruit RMP (carrés bleus) et quelques forages présents en BSS (ronds jaunes) sont également indiqués..... 116

Illustration 86 : Localisation des panneaux électriques sur la carte géologique de Perros-Guirec au 1/50 000ème (d'après Guennoc et al., 2015) avec légende simplifiée 117

Illustration 87 : Coordonnées du début et fin de chaque panneau électrique 117

Illustration 88 : Récapitulatif des paramètres d'acquisition et de filtrage des données (WS=Wenner-Schlumberger, DD=Dipôle-Dipôle, Q=erreur de mesure, U=différence de potentiel mesurée, I courant injecté, RHOapp=résistivité apparente)..... 118

Illustration 89 : Mesures de bruit réalisées dans le secteur d'étude 119

Illustration 90 : Résultat des inversions du profil GOLE_P1 122

Illustration 91 : Résultat des inversions du profil GOLE_P2 125

Illustration 92 : Résultat des inversions du profil GOLE_P3 127

Illustration 93 : Résultat des inversions du profil GOLE_P4 128

Illustration 94 : 12 couches du modèle de résistivité synthétique 3D avec localisation des profils extraits Y40 et Y460 (lignes horizontales oranges) et failles (lignes bleu). De haut en bas et de gauche à droite : coupes horizontales dans le modèle aux profondeurs Z indiquées en haut à gauche pour chaque coupe..... 130

Illustration 95 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration dipôle-dipôle. 130

Illustration 96 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration Wenner-Schlumberger.131

Illustration 97 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration Dipôle-Dipôle + Wenner-Schlumberger..... 131

Illustration 98 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration dipôle-dipôle. 131

Illustration 99 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration Wenner-Schlumberger. 132

Illustration 100 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration Dipôle-Dipôle + Wenner-Schlumberger..... 132

Illustration 101 : Localisation des panneaux électriques sur l'ancienne carte géologique (Delattre et al., 1996). Les deux ellipses jaunes marquent l'emplacement d'anomalies de résistivité électrique observées..... 134

Illustration 102 : Réinterprétation des résultats des profils électriques P1 à P4 sur fond de carte topographique 1:25 000 (SCAN-IGN)..... 137

Illustration 103 : Schéma structural de l'anse de Gouermel tiré de la cartographie géologique, des profils de géophysique et de la connaissance régionale des aquifères de socle issue du projet ANAFORE (en cours) 138

Illustration 104 : Cartes géologiques du secteur : A gauche carte ancienne au 1/80 000 ; à droite carte géologique actuelle 1:50 000 (source : BRGM)..... 139

Illustration 105 : A gauche, en haut - Coupe géologique Terre-Mer interprétée et tirée du profil électrique P3 situé dessous (à gauche, en bas) et à droite - Schéma structural avec la réprésentation schématique de l'intrusion saline en bleu ciel 140

Liste des annexes

Annexe 1 Courrier envoyé en début de projet pour recenser les données disponibles sur les intrusions salines en Bretagne 155

Annexe 2 Réponses obtenues suite à l'envoi du courrier de recensement des données 161

Annexe 3 Questionnaire utilisé pour la collecte d'informations sur les eaux souterraines sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo 167

Annexe 4 Résultat de l'identification des captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines 171

Annexe 5 Chroniques de chlorures et de conductivité issues d'ADES pour les captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines 179

Annexe 6 Cartes au 1/100 000 présentant les données analysées dans le cadre du projet (géomorphologie, géologie, données physico-chimiques) 187

Annexe 7 Principe du panneau électrique 213

Annexe 8 Principe des sondages par Résonance Magnétique des protons (RMP) 221

Annexe 9 Analyse des forages présentant des moyennes élevées de chlorures et de conductivité (en orange : critères défavorables) 225

1. Introduction

Les aquifères côtiers ou littoraux sont en contact avec la mer ou l'océan qui constitue leur limite aval ; ils sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique. Cette sensibilité est donc liée à des facteurs internes (le type d'aquifère, les propriétés hydrodynamiques, l'hétérogénéité) et à des facteurs externes : l'exploitation pour différents usages (alimentation en eau potable, tourisme, agriculture, industrie), la recharge (précipitation efficace) et le niveau marin (Dörfliger *et al*., 2011).

L'eau douce d'une densité moindre que celle de l'eau salée « flotte » au-dessus de l'eau marine souterraine. L'eau salée d'une densité moyenne de 1,025 kg/L a ainsi tendance à pénétrer vers les terres sous l'action du gradient de densité. L'intrusion d'eau salée a de manière générale et dans les cas simples la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, d'où son appellation commune de « biseau salé ». Ce contact entre ces eaux de densité différentes n'est pas statique et va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique mais également suivant l'exploitation de l'aquifère et sa recharge par les précipitations. Par ailleurs, ce contact ne constitue par une interface nette, du fait de la miscibilité des fluides de densité différente, une zone de transition va prendre place.

L'intrusion saline des aquifères par l'eau de mer a un impact sur la qualité des eaux souterraines des aquifères côtiers à l'échelle européenne (Custodio, 2010). Ce phénomène entraine des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau (l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine fixe une référence de qualité à 250 mg/L pour les chlorures et à 1 100 µS/cm pour la conductivité à 25°C) mais aussi compromettre certains autres usages de l'eau souterraine comme l'irrigation.

Le contexte particulier de la Bretagne, avec ses 2 700 km de côtes et sa fréquentation touristique estivale, la rend *a priori* particulièrement vulnérable à l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères de socle : les prélèvements excessifs d'eau souterraine par pompages dans des forages proches du littoral peuvent occasionner un déséquilibre de l'interface eau douce-eau salée et générer une intrusion saline irréversible dans les aquifères côtiers d'eau douce. A ce phénomène de biseau salé s'ajoute celui de rentrant salé lié aux marées et fonction du débit des cours d'eau, au niveau des estuaires (abers ou rias), Cette remontée du front salé peut venir contaminer les nappes libres le long du cours d'eau (infiltration dans l'aquifère).

Le caractère hétérogène des aquifères de socle bretons complique la compréhension du fonctionnement du système aquifère à l'interface avec la mer. De plus, la vulnérabilité des aquifères côtiers bretons vis-à-vis des intrusions salines pourrait être exacerbée par la remontée du niveau marin liée au changement climatique ainsi que par la pression démographique croissante sur le littoral.

La DREAL Bretagne, les services départementaux en charge de la Police de l'Eau (DDTM) et le BRGM ont réalisé en 2007 une plaquette « Forages en milieu littoral, préconisations pour la réalisation et l'exploitation » afin de sensibiliser à une gestion raisonnée des prélèvements d'eau sur le littoral. Toutefois, il est nécessaire de définir plus précisément les secteurs les plus sensibles aux intrusions salines et de permettre une gestion durable de la ressource en eau souterraine dans ces secteurs vulnérables.

C'est pourquoi le BRGM, la Région Bretagne et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne ont lancé une étude intitulée « Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines ».

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Synthèse bibliographique des études existantes et recensement des secteurs déjà identifiés comme sensibles aux intrusions salines en Bretagne, afin de réaliser un premier état des lieux (cf. chapitre 3.1),

- Identification, collecte et analyse des données hydrogéologiques et hydrochimiques disponibles (conductivité, salinité, chlorures, sodium, piézométrie, …) dans les puits et forages situés en bordure littorale (cf. chapitre 3.2),

- Identification des captages d'Alimentation en Eau Potable vulnérables aux intrusions salines (cf. chapitre 3.3),

- Test de caractérisation spatiale de l'invasion salée par méthodes géophysiques de surface (panneaux électriques, sondages de Résonance Magnétique des Protons, diagraphies de conductivité). Ce test méthodologique, réalisé sur un secteur précis, permettra de mettre en place une procédure d'investigation adaptée et pertinente pour répondre à cette problématique d'invasion salée en contexte de socle sur d'autres secteurs géographiques à prospecter (cf. chapitre 4.2),

- Proposition de dispositifs expérimentaux à mettre en place sur des secteurs précédemment identifiés comme présentant de forts enjeux, afin de caractériser l'interface eau douce-eau salée (cf. chapitre 5).

Cette étude a été réalisée en 3 phases successives, décrites dans la suite de ce rapport :

- Phase 1 : synthèse et interprétation des données disponibles,

- Phase 2 : caractérisation de l'interface eau douce-eau salée,

- Phase 3 : propositions d'investigations complémentaires sur les secteurs vulnérables.

Pour la phase 1, la zone d'étude sur la région Bretagne (Illustration 1) a été définie à partir des critères suivants :

- Une distance au trait de côte Histolitt® (SHOM) inférieure à 5 km a été retenue pour la définition de la zone d'étude. 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 susceptible d'élever le niveau de la mer) ;

- En complément, les zones basses topographiques ouvertes sur le littoral d'une altitude inférieure à +15 m NGF selon le MNT 25 m (BDTOPO® IGN) ont été inclues dans la zone d'étude.

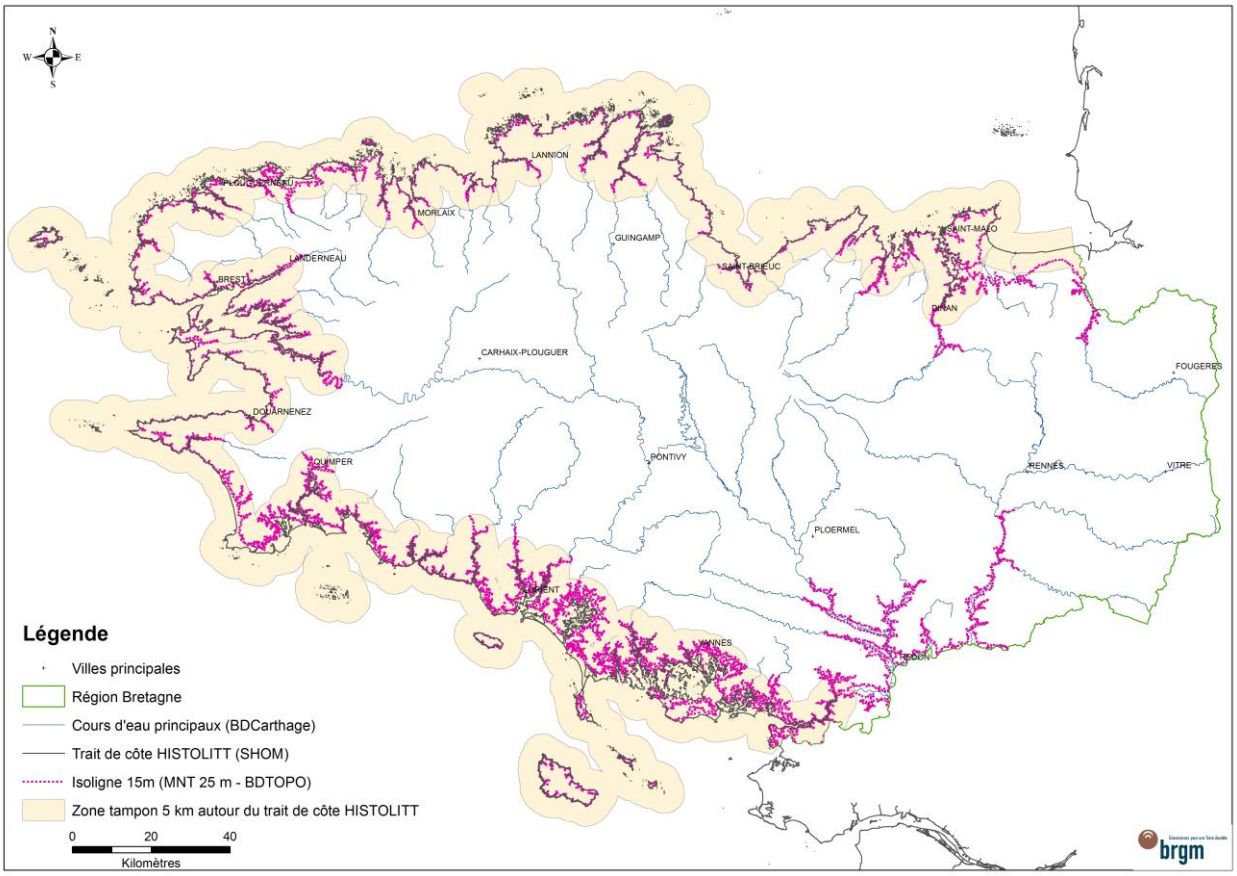


Illustration 1 : Zone d'étude le long du littoral breton

La phase 2 a été réalisée sur un secteur test (Plougrescant), défini grâce aux résultats de la phase 1.

La phase 3 concerne les secteurs vulnérables précédemment identifiés.

2. Contexte

2.1. LE PHENOMENE D'INTRUSION SALINE

L'intrusion d'eau salée, 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 envahie 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).

2.1.1. Biseau salé et aquifères

Le long du littoral, l'eau douce qui s'écoule vers la mer entre en contact avec l'eau de mer. Une zone d'interface se forme entre l'eau douce plus légère s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente dont la densité est plus importante. Du fait de la miscibilité des fluides, l'interface n'est pas nette mais correspond à une zone de transition (ou zone de mélange) ([Cooper *et al.,* 1964]; [Bear & Verruijt, 1987]; [Custodio, 2004]). L'intrusion d'eau salée a de manière générale la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, d'où son appellation commune de « biseau salé ».

En réalité, le contact de ces eaux de densité différente est régi plus précisément par les lois d'équilibre hydrodynamique et par les phénomènes de diffusion qui s'inscrivent obligatoirement dans le contexte géomorphologique, lithologique et hydrologique propre à chaque secteur.

L'exploitation des nappes littorales influe considérablement sur la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Réciproquement, l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (par augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée. Un mélange de 95% d'eau douce et de 5% d'eau de mer rend l'eau impropre à la consommation.

Géométrie du biseau salé dans les aquifères monocouches

- **L'approche hydrostatique : le principe de Ghyben-Herzberg (extrait du rapport Dorfliger *et al*., 2011)**

Des solutions analytiques ont été développées afin de représenter cette interface eau douce - eau salée. On citera en première approximation le modèle de Ghyben-Herzberg, qui permet d'examiner le cas d'un aquifère côtier libre, isotrope, soumis à une recharge en régime permanent (Illustration 2).

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

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

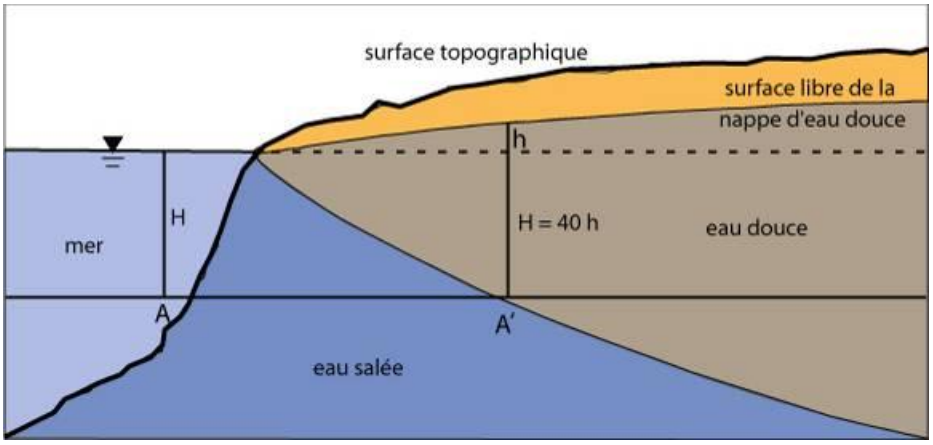


Illustration 2 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al,. 2005).

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

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

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

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

$$H \cdot (\mathrm{d_s} - 1) = h \qquad \textit{Eq. 2}$$

et

$$H = \frac{h}{d_s - 1} \qquad \textit{Eq. 3}$$

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

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

$$H = \frac{h}{0{,}025} = 40h \qquad \textit{Eq. Eq. 4}$$

Ainsi, en un point quelconque de l'aquifère, l'interface entre l'eau douce et l'eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer. La remontée verticale du biseau salée peut donc atteindre, en première approximation, 40 fois la valeur du rabattement observé dans un forage en pompage.

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

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

- **L'approche dynamique**

Les limites évoquées ci-dessus conduisent à la mise en défaut de l'approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg à proximité du bord de mer ou d'océan. D'autre part, la relation de Ghyben-Herzberg ne prend pas en compte l'effet des marées ni l'influence des pompages dans les aquifères littoraux.

La réalité est ainsi plus complexe, l'interface entre l'eau douce et l'eau de mer constitue une zone de transition ou zone de mélange. 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).

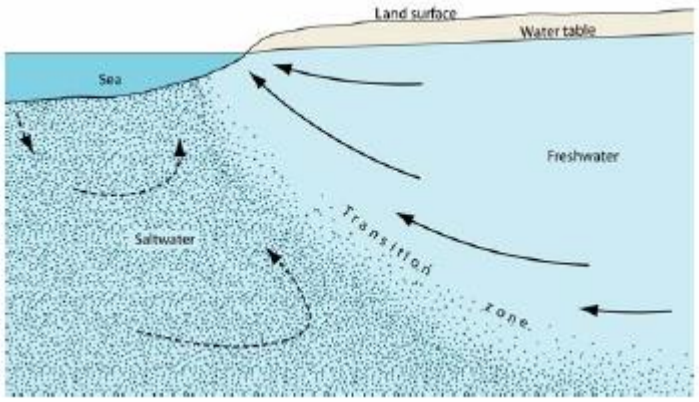


Illustration 3 : Zone de transition eau douce/eau de mer et organisation des écoulements dans un aquifère côtier homogène (d'après Cooper et al,.1964 ; dans Barlow, 2003, De Montety, 2008)

Cependant l'augmentation de salinisation n'est pas linéaire et est marquée par un palier important (Illustration 4).

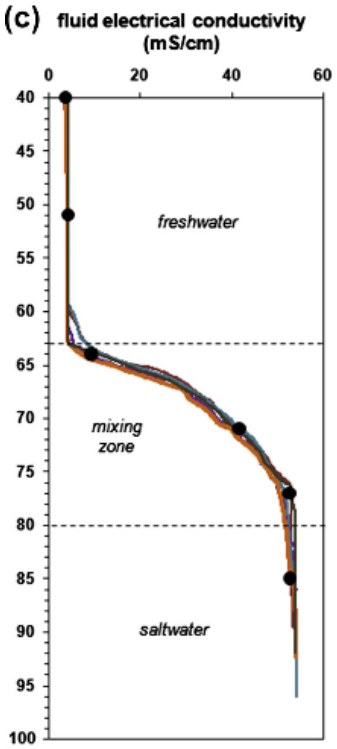


Illustration 4 : Profil de conductivité à l'interface eau douce eau salé (Garing et al., 2013)

Dans le cas d'aquifères fracturés, les déplacements du biseau salé peuvent être horizontalement plus rapides que les cas théoriques, induisant un risque localement accru et plus difficilement estimable.

Le cas des îles

Pour les îles bretonnes (ou les presqu'îles), les problèmes d'intrusions salines dépendent des conditions hydrogéologiques. Les intrusions salines peuvent être locales ou généralisées. Le cas extrême correspond à une intrusion saline partielle ou complète et continue sous l'île, l'eau douce constituant une lentille flottant sur l'eau salée (Illustration 5). Cette situation existe à Malte, sur les atolls et sur certains îlots des Caraïbes (Custodio, 2002).

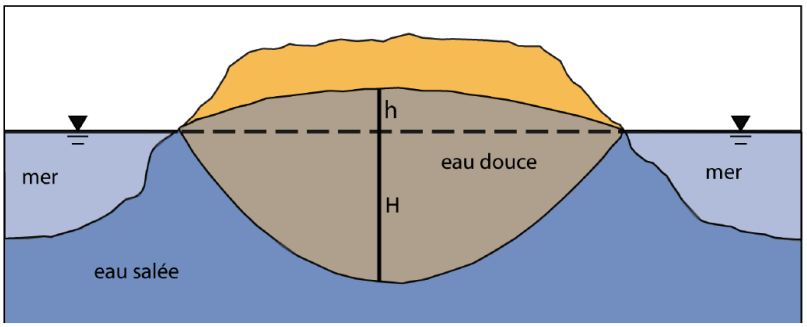


Illustration 5 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire (Frissant et al., 2009)

Le cas des aquifères multicouches

La complexité augmente pour les aquifères multicouches (Illustration 6) : 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 (Custodio, 2002).

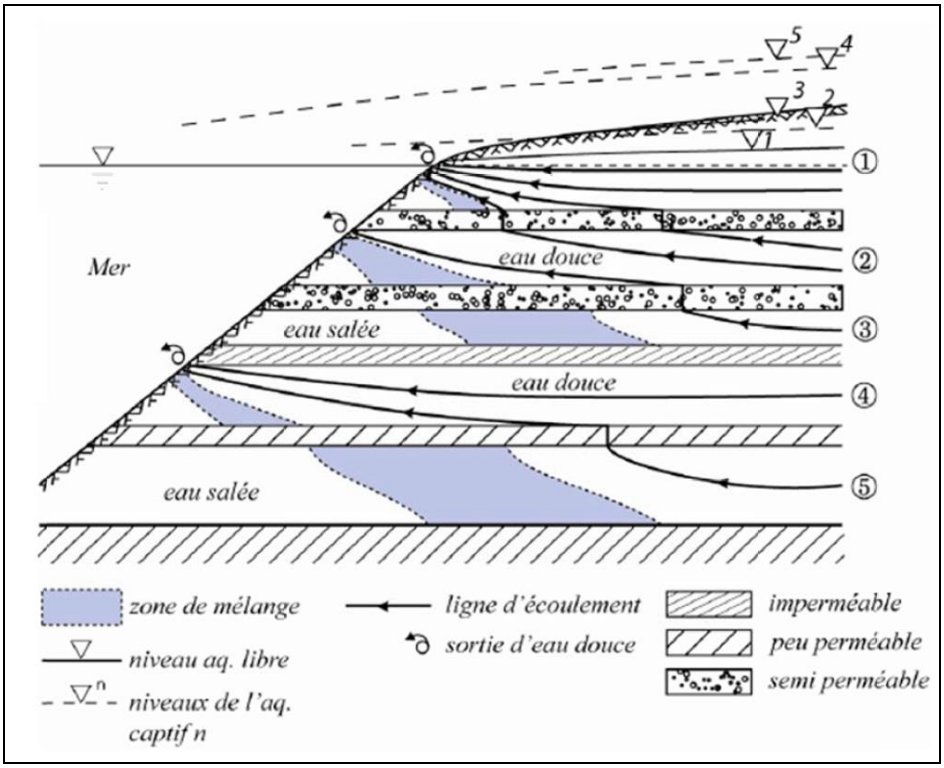


Illustration 6 : Zone de transition ou de mélange au sein d'un aquifère multicouche (d'après Custodio, 2002 in de Montéty, 2008)

Apparition du phénomène

Le phénomène naturel d'intrusion saline dans un aquifère côtier peut s'accentuer 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 baisse de la recharge de l'aquifère ;
- Une montée du niveau marin.

Durant la remontée du niveau marin depuis l'Holocène, la mer a pu envahir les aquifères côtiers. Depuis la stabilisation du niveau marin, l'intrusion marine n'a pas toujours pu être repoussée dans les aquifères à faible gradient hydraulique, laissant place à une paléosalinisation (De Montety, 2008). La zone plus profonde des aquifères envahis par l'eau de mer lors des transgressions, généralement située sous le niveau marin actuel, est protégée des boucles de circulation rapide en surface et du lessivage par les eaux météoriques (Ayraud, 2005).

Ces différentes études mettent en évidence la difficulté de caractérisation de la géométrie du biseau salé, dont la limite n'est pas nette et variable dans le temps. Les schémas théoriques présentés ci-dessus permettent d'illustrer le phénomène mais ils ne suffisent pas à cartographier le biseau salé et à permettre une bonne gestion des aquifères littoraux.

2.1.2. Le rentrant salé

A l'étiage et/ou pendant la marée montante, les eaux marines peuvent envahir partiellement et ponctuellement les embouchures, quand le débit du fleuve n'est plus suffisant pour les repousser (Illustration 7). La propagation des eaux marines en surface est limitée en amont par l'altitude 0 m NGF du lit de la rivière (ou plus exactement par l'altitude du niveau marin qui peut être supérieure, notamment en cas de surcote marine). Ce phénomène de surface, contrôlé par la modification de l'hydrodynamique dans la rivière entre les eaux douces et les eaux salées, est relativement rapide (les écoulements de surface sont plus rapides que les écoulements souterrains). Dans le cas d'une nappe d'accompagnement d'un cours d'eau se jetant dans la mer, les eaux marines peuvent contaminer la nappe superficielle, si le rentrant salé persiste suffisamment longtemps (ce temps dépend des caractéristiques hydrologiques du fleuve).

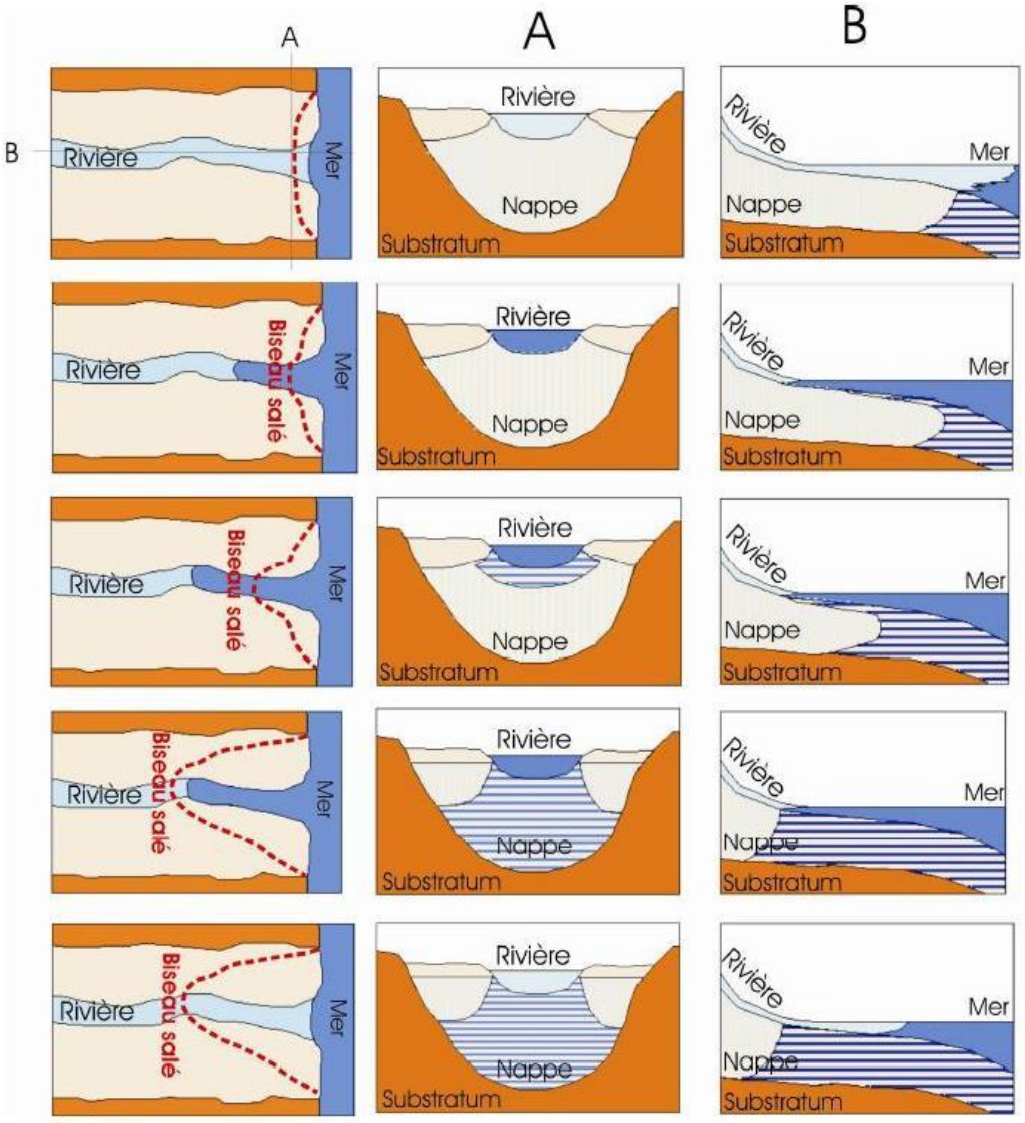


Illustration 7 : Schématisation d'un épisode de rentrant salé (zone de transition non représentée – Frissant et al., 2009)

Le front salé peut se déplacer en amont du fleuve sur plusieurs kilomètres. Par exemple en Guyane française, le front salé remonte jusqu'à 30 km en amont de l'embouchure du fleuve Maroni (Courbin, 2012). L'évolution du rentrant salé peut être suivie par des mesures de conductivité électrique de l'eau de la rivière dans l'embouchure ainsi que par des mesures de conductivité électrique de l'eau souterraine dans la nappe d'accompagnement de la rivière.

En Bretagne, les abers ou rias (vallée aval d'un fleuve envahie par la mer) peuvent présenter des zones sensibles aux intrusions salines : ces exutoires des fleuves, avec un contact eau douce - eau salée sur des longueurs importantes, peuvent présenter des surfaces importantes de sensibilité à l'intrusion saline, notamment si la pente de la surface piézométrique des eaux douces est faible.

Armandine les Landes (2014a) a étudié l'intrusion d'eau salée dans les aquifères par gravité à partir de fleuves côtiers salés. Il a établi une formule permettant de quantifier le taux de salinisation à partir de la perméabilité de l'aquifère, de la largeur de la rivière et de sa pente, de la salinité de la rivière et enfin de l'amplitude de la marée. Cette étude a montré que le rentrant salé peut jouer un rôle majeur dans la salinisation des aquifères côtiers.

2.1.3. Autres origines possibles de la salinité des eaux souterraines

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 8).

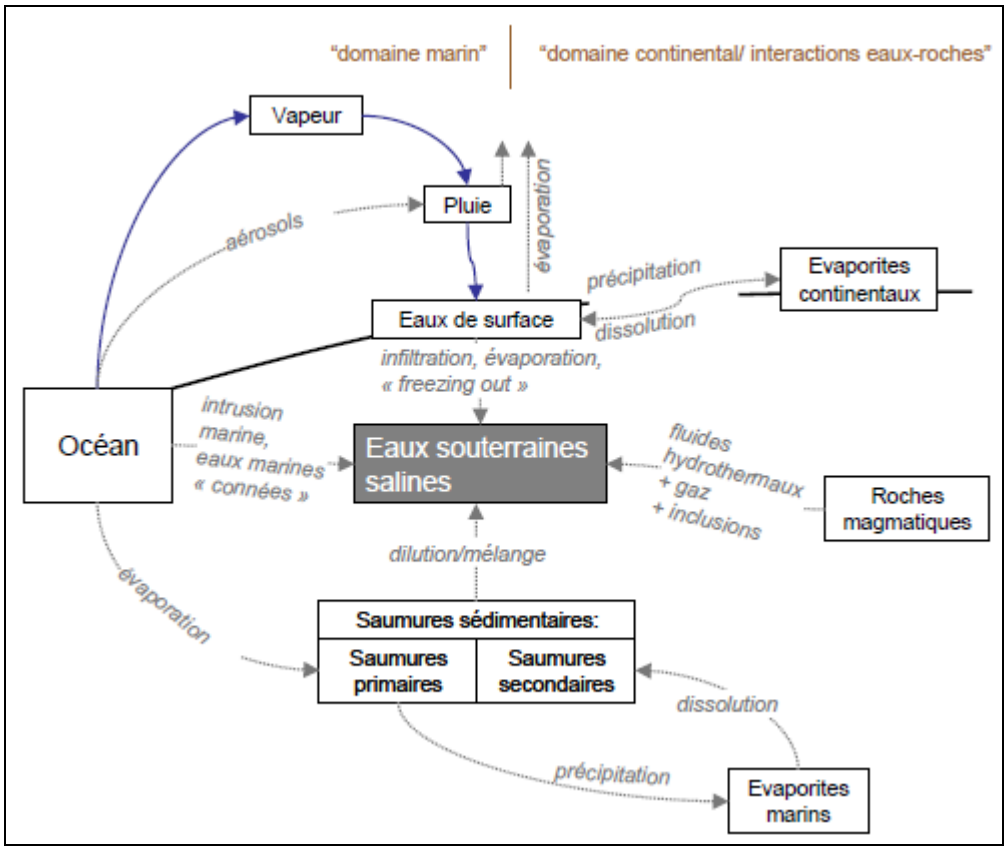


Illustration 8 : Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et souterraines (Kloppmann et al., 2011)

Plusieurs processus sont à l'origine de sels dans les eaux souterraines (Kloppmann *et al.*, 2010) :

- L'apport des eaux météoriques : la proximité de la mer influence la composition chimique des eaux de pluie, qui se chargent 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 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'Illustration 9 met en évidence l'enrichissement en chlorures des pluies sur le littoral breton.

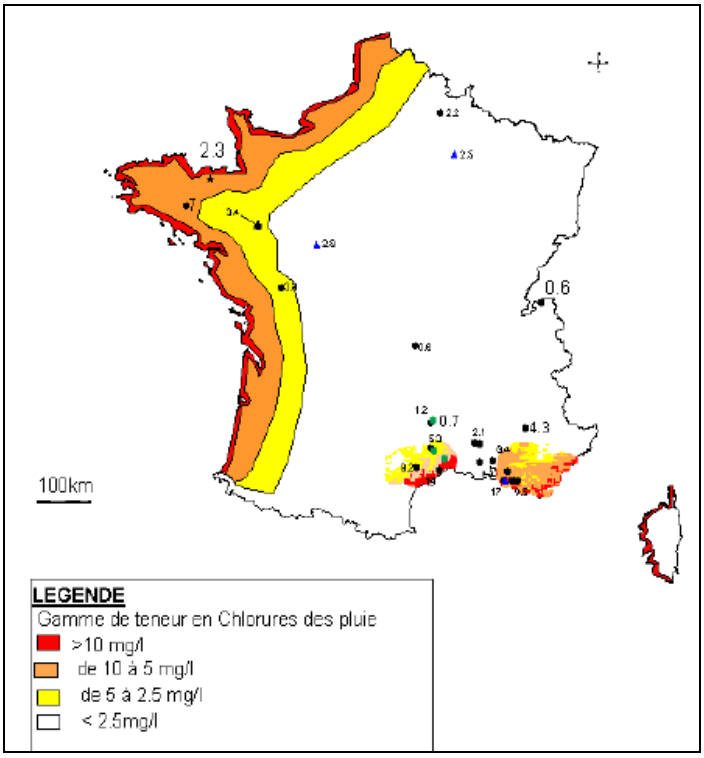


Illustration 9 : Carte schématique des teneurs en chlorure des précipitations sur les côtes françaises (Chéry, 2006)

- 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. L'infiltration des eaux à travers ces horizons salins peuvent être à l'origine de fortes teneurs en sels dans l'aquifère sous-jacent.

- Le mélange avec une eau de mer actuelle.

- La concentration par évaporation de l'eau de mer.

- Le mélange avec une solution salée ou dissolution de sels.

Différents processus entrent en jeu dans la contamination d'un aquifère :

- 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.

- La percolation à travers des dépôts évaporitiques,

- Le mélange avec des fluides salins hydrothermaux : les fluides thermominéraux d'origine marine ou non marine sont souvent caractérisés par de fortes concentrations en sels.

- Les sources anthropiques de sels : 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 artificiels et autres engrais en zone rurale.

Pour identifier les mécanismes d'acquisition de la salinité et l'origine de la salinité, une approche combinée (géologie, géophysique, hydrogéologie et géochimie) est souvent nécessaire.

2.1.4. Influence de l'exploitation des eaux souterraines sur les intrusions salines

Le schéma théorique de Ghyben-Herzberg permet de représenter en première approximation l'effet d'un pompage sur la position du biseau salé.

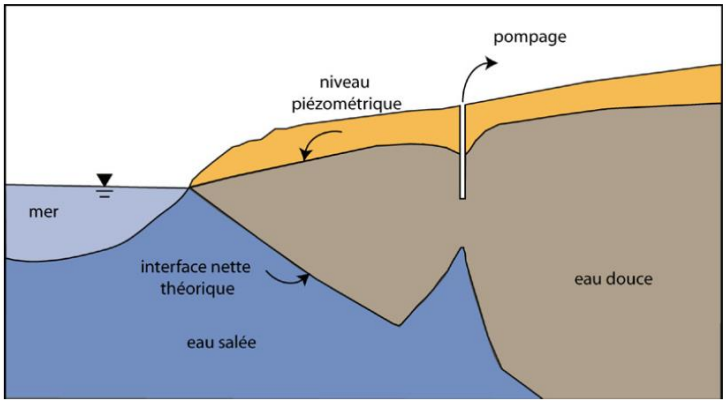


Illustration 10 - Influence d'un pompage sur le biseau salé à partir du schéma théorique de Ghyben-Herzberg (Frissant et al., 2009)

D'après la relation de Ghyben-Herzberg, un rabattement d'un mètre dans un forage en pompage peut entrainer une remontée verticale du biseau salée de 40 m, en première approximation.

Une fois ce nouvel équilibre en place, il devient extrêmement difficile de le modifier. La réduction du débit n'est pas accompagnée d'une décroissance immédiate et totale de la salinité. Le phénomène d'invasion marine au sein des aquifères côtiers est plus rapide dans le sens de la contamination que dans celui de la décontamination du milieu. De ce fait, les phénomènes d'intrusion saline sont considérés comme irréversibles.

2.2. METHODES D'OBSERVATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE

Afin d'étudier le phénomène d'intrusion saline, plusieurs approches sont possibles. Le projet de recherche menée par le BRGM en 1970 (Margat et Monition, 1970) en collaboration avec Burgeap, le C.E.A. de Saclay et le cabinet d'études P. RUBY a montré que la position du contact eau douce-eau salée pouvait 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 carottage 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 - Station automatique pour l'Observation des Interfaces dans les Forages – Hentinger, 1970).

Dans Kloppmann *et al.*, 2011a, les outils géochimiques et géophysiques sont décrits dans le but de caractériser la salinisation des aquifères. Il en effet nécessaire de mettre en place des méthodes combinées (hydrogéochimie et géophysique) pour évaluer le phénomène d'intrusion saline et préciser sa géométrie.

2.2.1. L'hydrogéochimie appliquée aux intrusions salines

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.

Les eaux souterraines acquièrent des faciès différents contrôlés par la nature lithologique 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 (eau de pluie davantage chargée en chlorures à proximité du littoral), 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.

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 (cf. chapitre 2.1.3.).

Afin d'étudier le phénomène d'intrusions salines, plusieurs paramètres peuvent permettre de caractériser le mécanisme. La **salinité** est synonyme de TDS (Total Dissolved Solids - ou CTD : charge totale dissoute), et s'exprime en g/L. La salinité peut être déterminée indirectement et approximativement à partir de la conductivité électrique (exprimée en mS/cm). Les eaux douces, les eaux saumâtres et les saumures peuvent être classées selon leur salinité (Illustration 11).

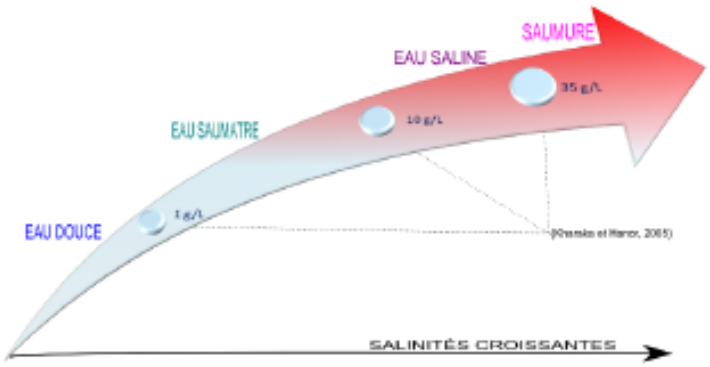


Illustration 11 : Gammes de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2003, in Kloppmann et al., 2011b)

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. La conductivité de l'eau de mer est proche de 40 000 µS/cm (ce qui correspond à une salinité d'environ 35 g/L pour l'Océan Atlantique) et la concentration en chlorures de l'ordre de 19 000 mg/L.

Par ailleurs, les teneurs en éléments majeurs (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4, HCO_3, NO_3) 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. Différents ratios molaires sont ainsi utilisés, tels que Na/Cl, Ca/Mg, HCO_3/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).

Le bore est également utilisé comme co-traceur de la salinité (Kloppmann, 2010).

Eléments majeurs	***Composition de l'eau de mer (mg/L)***
Na	10 699
K	383
Mg	1 289
Ca	418
Cl	19 237
HCO_3	139
SO4	2683
Somme	**34 850**

Illustration 12 : Composition moyenne des océans (Copin-Montegut, 1996, Chimie de l'eau mer)

A noter que pour l'Océan Atlantique, les chlorures sont proches de 20 g/L (Copin-Montegut,1996).

D'après Kloppmann *et al., 2011a, « les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ 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 ($\delta^{34}S$, $\delta^{18}O$) permettent d'identifier les sources de sulfates, de tracer de l'eau mer actuelle ou ancienne […] ».*

2.2.2. La géophysique appliquée aux intrusions salines

Les outils géophysiques permettent également d'étudier les phénomènes de salinisation, en interpolant les observations ponctuelles dans les parties de l'aquifère non accessibles à l'observation directe. On distingue deux approches :

- en forage (mesures 1 dimension) : diagraphies électriques, diagraphies de résistivité/conductivité ;

- en surface (mesures 2 voire 3 dimensions) : méthodes électriques, méthodes électromagnétiques (TDEM).

Ces deux approches sont complémentaires pour caractériser les aquifères côtiers. Les méthodes géophysiques de surface sont capables de fournir la cartographie en profondeur de l'interface eau douce-eau salée grâce à la méthode des **panneaux électriques** (aussi appelés tomographie électrique ou profils de résistivité électrique), à réaliser en période de basses eaux pour avoir l'invasion la plus importante, et la mise en évidence des drains les plus perméables par sondage de **Résonance Magnétique des Protons** (RMP – Vouillamoz *et al.*, 2007 et 2014). Les diagraphies de conductivité des formations géologiques en forage (unique méthode d'observation directe de l'interface eau douce – eau salée) accompagnent les mesures de surface pour un suivi plus détaillé en profondeur et pour calibrer ces dernières.

Afin de définir un guide d'utilisation des méthodes électriques pour appréhender la géométrie du biseau salé au niveau des estrans, une étude géophysique par méthodes électriques a été menée par le BRGM à Sables-d'Or-les-Pins (22) en 1997 (Mathieu, 1997 - rapport BRGM R 39362). 3 sondages électriques et 2 panneaux de résistivité (panneaux électriques) ont été réalisés. Les sondages ont permis de définir des paramètres utiles pour la réalisation des panneaux de résistivité et de faire une première esquisse de la géométrie des corps sédimentaires. Les panneaux électriques ont montré qu'il était possible de mettre en évidence de très faibles variations de résistivité liées à des changements de concentration en eau salée dans les formations sédimentaires (marée et transfert d'eau douce). Ces deux approches sont donc complémentaires.

En 2014, la méthode des **panneaux électriques** a été utilisée en Guadeloupe pour déterminer la profondeur de l'interface eau douce – eau salée (Ducreux *et al*., 2014).

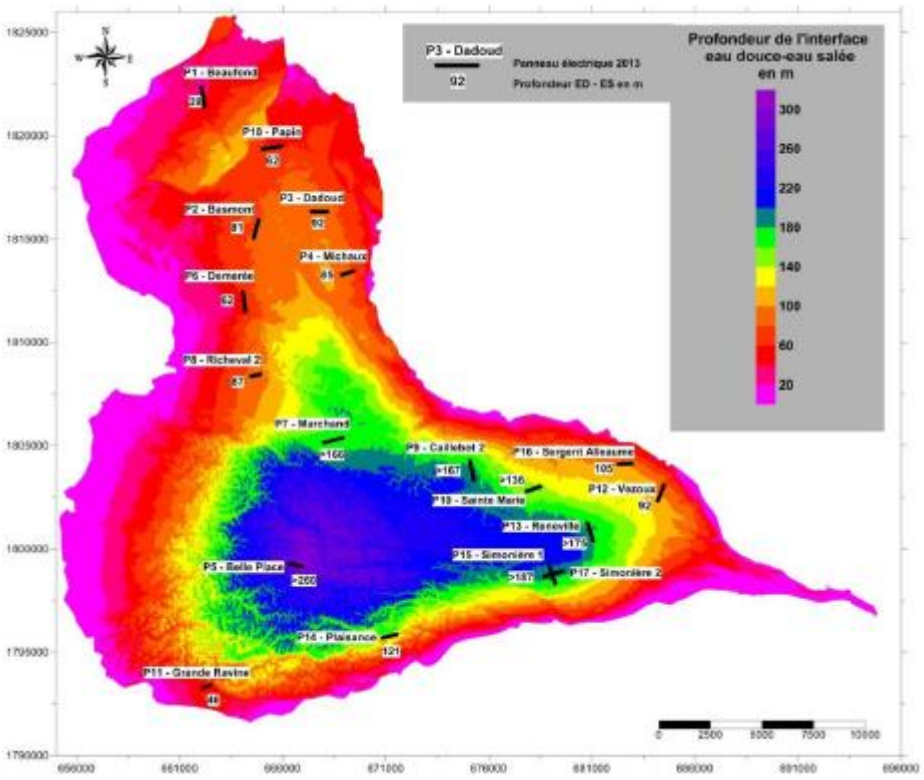


Illustration 13 : Localisation des panneaux électriques et profondeur de l'interface eau douce – eau salée en Guadeloupe (Ducreux et al., 2014)

La réalisation de cartographie à partir d'outils géophysiques de surface a nécessité des données piézométriques et une interpolation des données.

La **géophysique aéroportée (ou héliportée) de type électromagnétisme** permet de mettre en évidence à l'échelle régionale la distribution de la salinité du sol et du sous-sol et de différencier des structures en grand. Des campagnes d'électromagnétisme aéroporté ou héliporté ont ainsi été réalisées sur plusieurs îles sédimentaires et/ou volcaniques (Mayotte (GéoMayotte - 2010), La Réunion, Guadeloupe (projet GUADEM - 2013), …) afin de mettre en évidence des structures géologiques, l'organisation des écoulements souterrains et la localisation de l'interface eau douce / eau salée. En France métropolitaine, les données géophysiques aéroportées (magnétisme, radiométrie spectrale et surtout électromagnétisme) acquises en 2008 dans le cadre du programme européen EUFAR ont été exploitées pour étudier les intrusions salines dans un aquifère plio-quaternaire du littoral méditerranéen (Roussillon) – projet Grain d'sel (Dörfliger *et al*., 2011b).

Le bureau d'étude ImaGeau (Instrumentation innovante du sous-sol) a 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), à différentes profondeurs. Un boitier d'acquisition placé en surface du piézomètre contrôle une chaine 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 chaine d'électrode est réalisé sur mesure pour coller aux caractéristiques de l'aquifère à surveiller. Ces méthodes ont par exemple été testées dans le cadre du projet Grain d'sel (Dörfliger *et al.*, 2011b).

La géométrie de la salinisation peut ainsi être établie sur la base d'outils géophysiques et par des moyens simples en hydrochimie. Cependant, la connaissance précise de la géologie est nécessaire à l'interprétation des résultats obtenus par ces deux approches.

2.3. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

2.3.1. Contexte général

Les aquifères côtiers mondiaux présentent une grande diversité hydrogéologique et sont surtout décrits pour des domaines aquifères sédimentaires : aquifères côtiers libres, captifs ou semi-captifs et multicouches.

- Les aquifères côtiers libres sédimentaires se situent au niveau des plaines côtières en arrière de cordons—littoraux à galets ou sableux. Dans ces contextes géomorphologiques variés, tels que les systèmes lagunaires, les polders ou les marais maritimes, l'interface eau douce-eau salée peut présenter une géométrie complexe en raison de variations latérales comme verticales des formations géologiques qui les composent (Comte, 2008).

- Les aquifères côtiers captifs ou semi-captifs, se situent 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).

- Enfin, dans le cas d'aquifère multicouches (sédimentaires), 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).

Pour les domaines dits de « socle » (« hardrock aquifer » des anglo-saxons) comme le Massif Armoricain et donc la zone d'étude d'une manière générale, la relation entre les aquifères côtiers au sens large avec le milieu littoral, constitue une thématique scientifique peu investiguée et sont peu à très peu décrits.

Avec ses 2 700 km de côtes très découpées, où alternent plateaux rocheux plus ou moins altérés, à des altitudes variées de quelques à plusieurs dizaines de mètres, et côtes basses protégées par des cordons sableux ou à galets, à platiers rocheux ou baies sablo-limoneuses, l'interface terre-mer de la Bretagne est latéralement comme verticalement complexe. A ceci s'ajoute un régime marégraphique méga tidal où le niveau de mer varie sur plus de 13 mètres.

Avec les abers ou rias du Finistère Nord, du Morbihan, des Côtes d'Armor ou d'Ille-et-Vilaine, la mer se projette à l'intérieur des terres sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Cette géomorphologie littorale fractale est le reflet d'un contexte géologique long de deux milliards d'années où se sont succédés évènements tectoniques et climatiques majeurs.

Après le cycle orogénique cadomien (700 – 520 millions d'années), une période d'extension cambro-ordovicienne va diviser la Bretagne. L'ensemble étant repris dans la chaine

hercynienne, la Bretagne va subir à nouveau une période d'extension tardy-hercynienne, poursuivie jusqu'à l'ouverture de l'Atlantique Nord. Enfin les contrecoups des chaînes pyrénéennes et alpines vont venir compléter ce patchwork géologique par des ajustements tectoniques verticaux.

Ainsi la caractérisation des aquifères côtiers en domaine de « socle » pour un territoire tel que la Bretagne et leurs échanges avec le milieu littoral, devra prendre en considération ces contextes géomorphologiques littoraux, mais aussi les contextes géologiques au sens large qui sont le siège de l'interaction entre tectonique (failles et fractures), altération et zones basses.

2.3.2. Niveaux de mer marégraphiques et altimétriques

Pour les régions soumises à un régime de marée méga tidal, la question du niveau marin n'est pas une question triviale, et il n'est pas si facile de déterminer un niveau de mer et encore moins un niveau de mer moyen.

Pour la France, c'est le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) qui est en charge de calculer le zéro hydrographique (ZH), référence verticale qui correspond au niveau de référence commun des cartes marines et aux annuaires de marée.

Le ZH correspond au niveau des plus basses mers astronomiques (niveau théorique sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement). Ce ZH varie d'une zone de marée à l'autre (Illustration 14). Une zone de marée est définie par : ses limites géographiques, un port de référence où le zéro hydrographique est déterminé, et des ports secondaires.

La côte bretonne est couverte par 4 zones de marée d'Est vers l'Ouest : la zone correspondant au golfe normano-breton avec pour port de référence Saint-Malo, la zone nord-bretonne ou entrée de la Manche avec pour port de référence Roscoff, la zone Mer d'Iroise-Sud Bretagne, avec pour port de référence de Brest et enfin la zone Sud Bretagne-Estuaire de la Loire avec pour port de référence les Sables d'Olonne.

Sur ces zones, le niveau de mer à marée montante d'Ouest en Est correspond à une oscillation où le niveau de mer est plus élevé dans le golfe normano-breton qui bloque cette oscillation. A marée descendante, c'est le phénomène inverse qui est observé (Illustration 15).

Pour chaque port de référence et port secondaire (Illustration 16) de chaque zone de marée, le SHOM fournit les Références Altimétriques Maritimes (RAM - SHOM, 2016), qui permettent de calculer un niveau de mer et de le rattacher au système altimétrique de l'IGN (le système IGN69). Ces niveaux de mer sont : le Niveau des Plus Hautes Mers Astronomies (PHMA), le Niveau des plus Basses Mers Astronomiques (PBMA), Niveau moyen et la cote du zéro hydrographique dans le système altimétrique légal (la référence altimétrique nationale est le référentiel IGN 69).

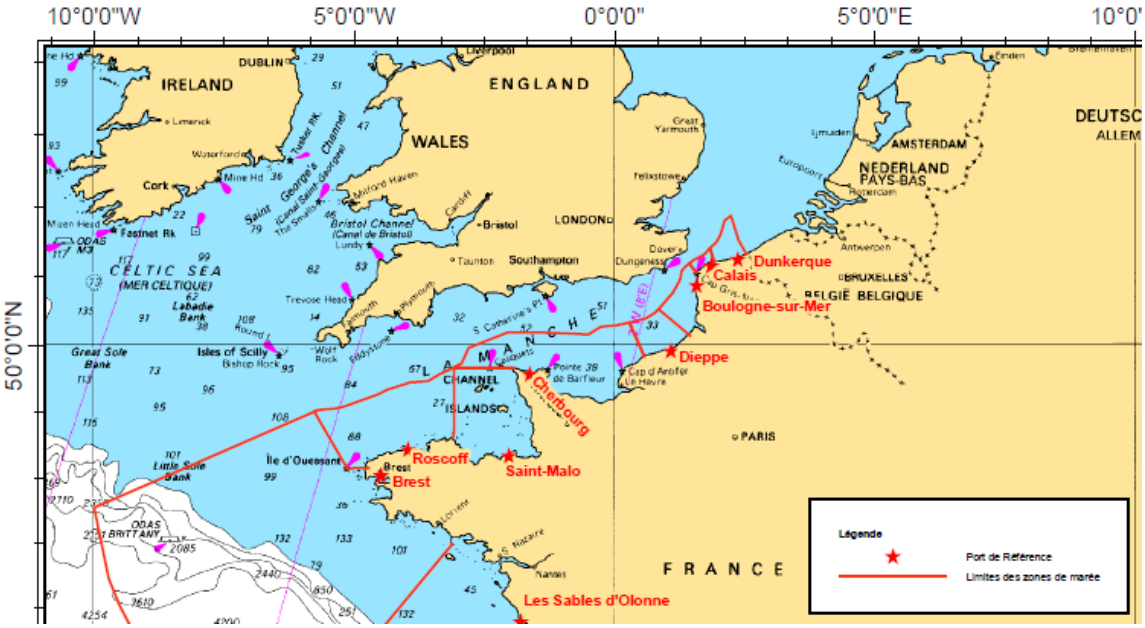


Illustration 14 : Carte de zones de marée sur les côtes françaises métropolitaines (SHOM, 2016)

Le marnage (différence de hauteur entre une basse mer et une pleine mer successives) est variable le long des côtes bretonnes (Illustration 15).

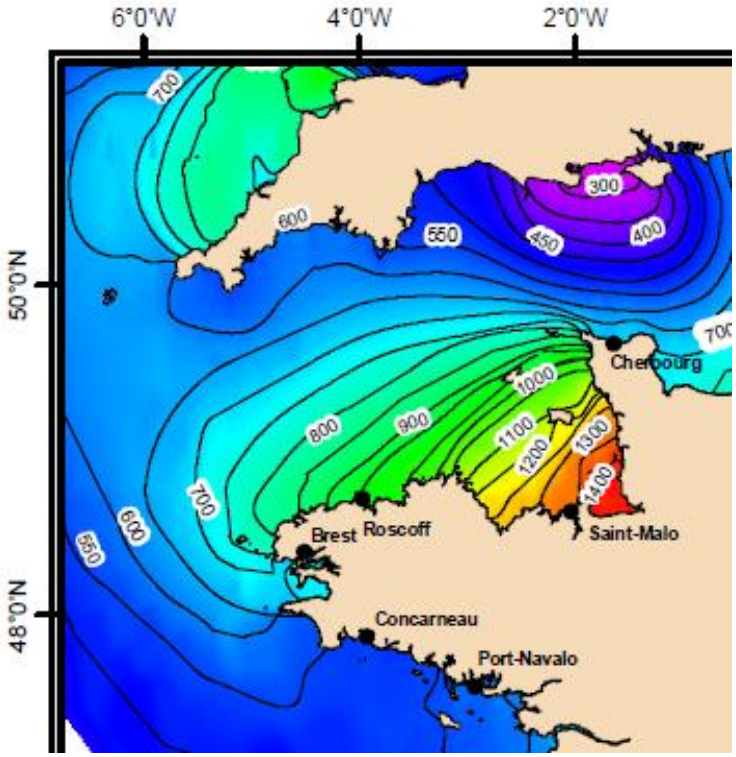


Illustration 15 : Carte du marnage (en cm) pour un coefficient de marée de 120 (SHOM, 2016)

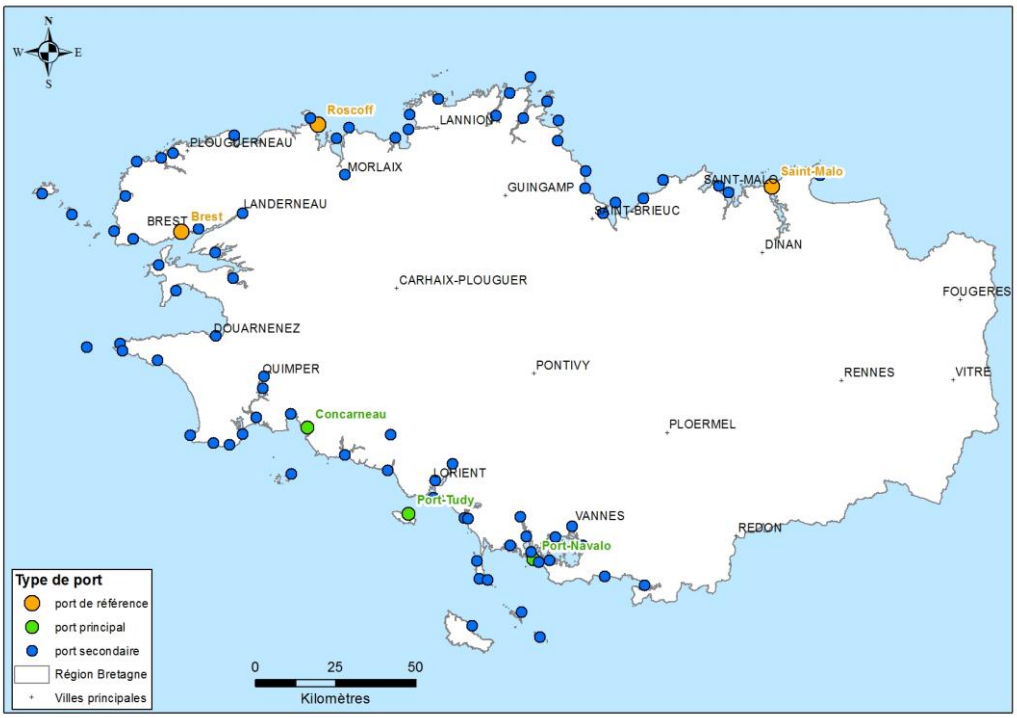


Illustration 16 : Localisation des ports de référence, principaux et secondaires en Bretagne (SHOM, 2016)

L'Illustration 17 présente le niveau marin moyen et le niveau PHMA des ports de références et des ports secondaires bretons en fonction de leur distance par rapport à la Baie du Mont Saint-Michel. Si on examine les données altimétriques et marégraphiques des stations bretonnes, on observe que le niveau des plus hautes mers astronomiques est le plus élevé au niveau de la baie du Mont Saint Michel (+ 8 m NGF) et décroit en s'éloignant de la baie Au-delà de cette oscillation générale, l'on remarque des effets de sites. Ainsi les niveaux de PHMA qui se détachent de l'allure générale (cercle rouge sur l'Illustration 17), correspondent essentiellement aux niveaux de mer du golfe du Morbihan et sont la conséquence d'un goulet trop étroit et d'une période d'étale de pleine mer trop courte pour que le niveau de mer dans le golfe atteigne le niveau de mer à l'extérieur du golfe. Des effets de sites tels que celui-ci seront à surveiller en cas de situations complexes.

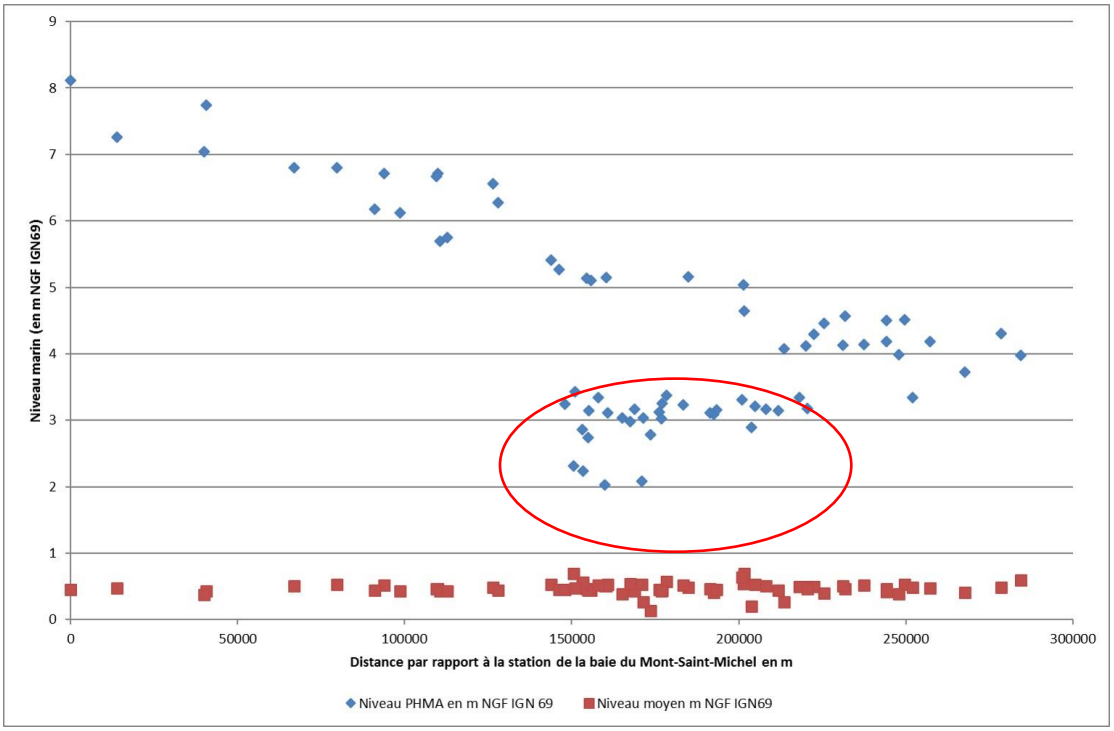


Illustration 17 : Niveau marin moyen (en rouge) et niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA, en bleu) en m NGF (référentiel IGN 69) pour les ports de référence et secondaires bretons en fonction de leur distance à la station de la Baie du Mont Saint-Michel

2.3.3. Contexte géomorphologique et géologique

Outre ce régime méga tidal et le perpétuel « va-et-vient » quotidien de la mer, l'autre particularité qui s'ajoute à la limite Terre-Mer bretonne, est sa diversité, à la fois géologique (véritable « patchwork » de roches sur 2 milliards d'années), mais aussi géomorphologique, avec des altitudes des côtes qui oscillent entre 5 et 100 m NGF, entrecoupées de vallées marines profondes (les abers ou rias) et la présence de nombreuses îles à fleur d'eau (Sein, Molène etc.) où en relief (Groix, Belle-Île-en-mer ou Ouessant) (Schroëtter et al., 2015 - Illustration 18).

La limite entre la mer et le continent, composée de falaises dures à meubles, y voit s'intercaler des cordons dunaires et de galets, qui abritent des marais maritimes, et où peuvent se développer des flèches ou des tombolos.

Sur les parties de côtes meubles, cette limite Terre-Mer peut être mobile avec des vitesses instantanées horizontales parfois très fortes (recul ou avancée de plusieurs mètres) et des vitesses séculaires à semi-séculaires difficiles à évaluer, mais aussi des limites verticales variables lors de la conjoncture de niveaux de mer élevés actuels ou anciens (Holocène).

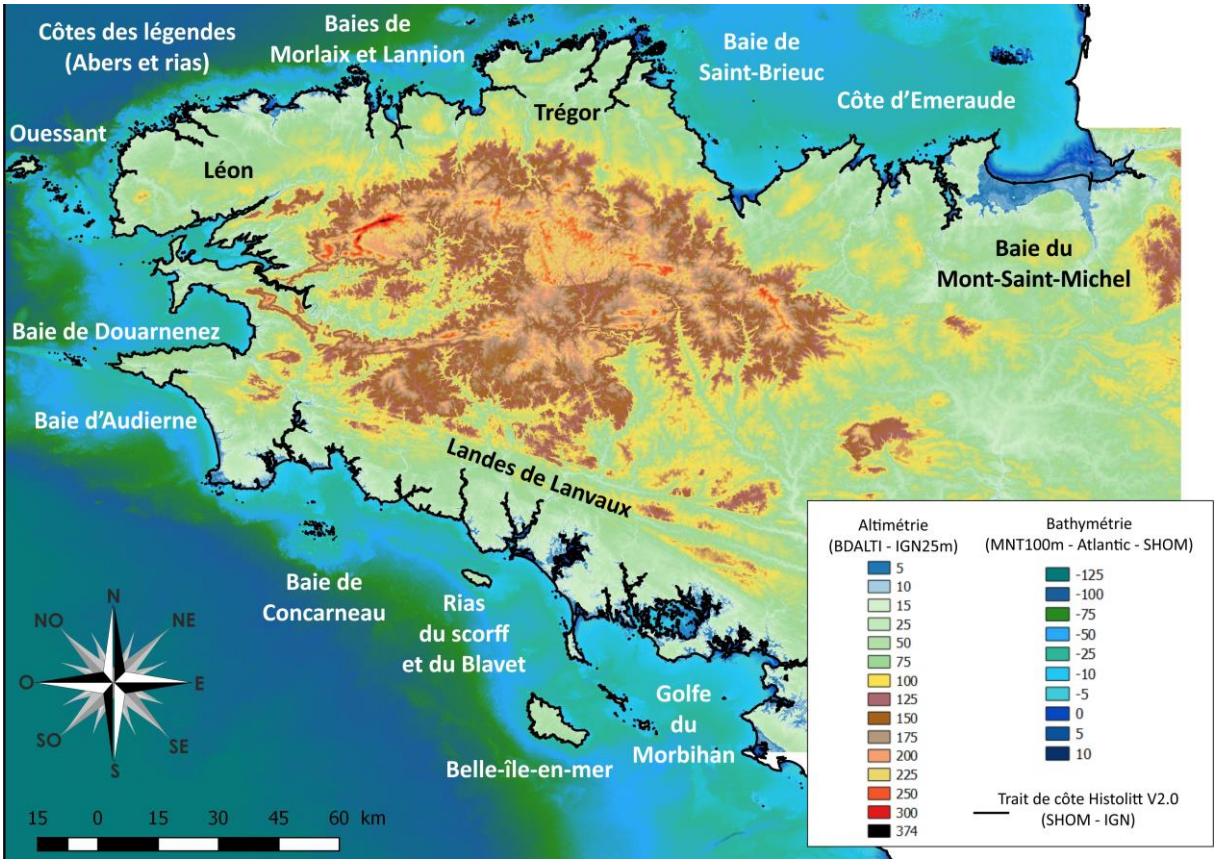


Illustration 18 : Altimétrie (BDALTI – IGN 25 m) et bathymétrie (MNT 100 m – Atlantic –SHOM) bretonnes

Ainsi d'Est en Ouest (Illustration 18) :

Depuis la Baie du Mont-Saint-Michel en Ille-et-Vilaine, jusqu'aux falaises meubles d'allotérites de Pénestin dans le Morbihan, vont s'enchainer des baies et des zones basses plus ou moins ouvertes et plus ou moins profondes, et des falaises plus ou moins fracturées et altérées (Illustration 19).

Illustration 19 : A gauche - Falaises de migmatite entre Saint-Lunaire et Saint-Briac, depuis la pointe de la Garde Guérin, regard vers l'ouest (© 2013, BRGM/M. Prémalion) ; à droite – Falaises de diorites et gabbros altérées Saint-Quay-Portrieux ((© 2018, BRGM/J.M. Schroëtter).

L'échancrure ouverte sur la Manche de la ***baie du Mont-Saint-Michel*** s'ouvre dans les schistes du Briovérien sur environ 20 km entre les pointes du Grouin (35) et de Champeaux (50) et 30 km depuis sa bordure terrestre occidentale au niveau de Saint-Guinoux (35) à la rive orientale du Couesnon. Elle remonte à l'intérieur des terres sur environ 7 à 10 km au

niveau de Dol-de-Bretagne (35) et 15 km le long de la vallée du Couesnon, sur la commune de Sougéal (35).

Cette ouverture au cœur du Massif Armoricain est la conséquence de la présence sur la partie orientale de la baie, de trois fleuves côtiers à faible débit que sont la Sée, la Sélune et le Couesnon, dont la partie orientale correspond à une zone basse estuarienne.

De part et d'autre de ces niveaux bas, la baie est encadrée de falaises de schistes du Briovérien puis de roches de plus haut-grade métamorphique : les migmatites. Localement, la côte rocheuse est découpée de petites criques à sédimentation sableuse.

Dans cette configuration géomorphologique, une étude sur la même thématique mais pour la Normandie, a recensé ***un cas de forage avec des teneurs en chlorure de 143 mg/L.*** L'Illustration 20 correspondant à une coupe géologique Terre-Mer, montre la configuration du sous-sol dans ce secteur (Laurent et al., 2016 – Illustration 20).

Ce forage avec de fortes teneurs en chlorures est situé sur l'interfluve du Couesnon et une rivière côtière parallèle à la Sélune, à une altitude de 40 m NGF dans un secteur où le niveau de PHMA peut atteindre les 8,5 m NGF.

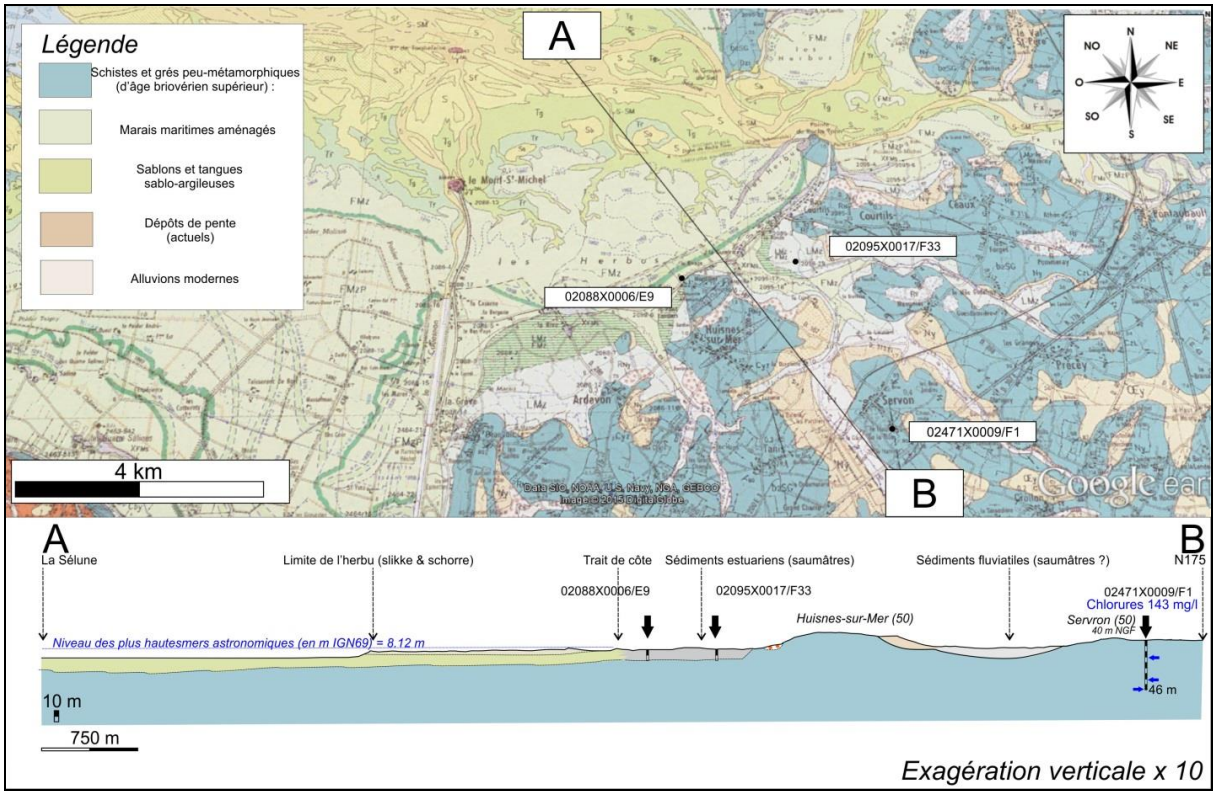


Illustration 20 : Coupe géologique Terre-Mer, sur la partie orientale de la baie du Mont-Saint-Michel (Carte géologique au 1/50 000, Feuille Baie du Mont Saint Michel, BRGM, Laurent et al., 2016)

Il souligne la ***relation complexe*** qui peut exister entre ***ces forages*** avec des analyses élevées ***en chlorure ou/et conductivité électrique de leurs eaux, les formations géologiques dites de « socle » et les formations superficielles autochtones*** (les altérites au sens large) ***et allochtones*** (formations colluvionnées, alluvionnées et/ou maritimes quaternaires).

Au-delà, on est enclin à se poser la question de la relation entre ces forages, les formations géologiques au sens large et les réseaux de fracturation hérités de l'histoire tectonique de la péninsule bretonne.

Cette géomorphologie de falaises, entrecoupées de vallées encaissées et de zones basses abritées au fond de baie, est organisée de façon fractale sur tout le pourtour breton.

C'est notamment le cas pour la ***côte d'Emeraude***, depuis la Pointe du Grouin jusqu'au cap Fréhel où les falaises composées respectivement de roches métamorphiques de haut-grade (migmatites, paragneiss et micaschistes), de gabbros, tonalites et diorites à des séries sédimentaires comme les grès roses à rouges, sont interrompues par des anses et petites baies dont les fonds sont des zones basses qui ont vu la mer, au moins à l'Holocène, remonter sur plusieurs kilomètres (baies de Beaussais, de la Heussaye etc.).

Cette alternance entre côtes d'orientation N070 et côtes d'orientation N150 est la conséquence d'évènements tectoniques et des contrastes lithologiques.

La ***baie de Saint-Brieuc*** est le reflet à l'échelle régionale de ces deux directions tectoniques principales (failles) qui lui dictent son ouverture maritime et de ces configurations des petites baies plus locales. Ainsi, l'orientation N070 de la bordure orientale, correspond aux accidents (failles) majeurs d'âge cadomien alors que la bordure occidentale avec son orientation générale N150, correspond à la direction tardi-hercynienne à éo-oligocène du faisceau de failles de Quessoy-Nort-sur-Erdre. Cette dernière est d'ailleurs jalonnée de petits bassins sédimentaires extensifs éo-oligocènes.

De ***ces directions N150 qui recoupent les orientations tectoniques anciennes (cadomiennes comme hercyniennes)***, l'analyse des lithologies et de la morphologie du trait de côte en fonction des discontinuités tectoniques, a montré les parts respectives des dimensions fractales de celui-ci et ***montré que ces zones basses correspondaient à des bassins tectoniques cénozoïques***, ***sièges d'épisodes de submersions marines ou d'inondations marines récurrentes (Schroëtter et al., 2016)***. Même si ces évènements sont des évènements actuels temporellement très ponctuels, ils correspondent en règle générale à des marais maritimes plus anciens avec des sédiments fluvio-marins quaternaires.

Ainsi, avec plus ou moins d'altitude, sur le littoral du ***Trégor et du Léon***, majoritairement rocheux et en arrière d'un platier rocheux, ces configurations de côtes vont se poursuivre avec trois types de formations géologiques meubles présentes :

- Les formations littorales classiques telles que des cordons dunaires et de galets adossés à la côte rocheuse ou sous forme de flèches à pointe libre (Sillons du Linkin et de Talbert) ;

- Les altérites meubles où la base va correspondre au platier rocheux d'avant trait de côte, décapées par l'activité des agents météo-marins ;

- Et enfin les formations géologiques de versant ou « head des anglo-saxons », issues de l'érosion durant les interglaciaires quaternaires, composées d'éléments de toutes tailles (du bloc jusqu'au galet et gravier) et baignant dans une matrice plus ou moins limono-argileuses (issue des loess et/ou des altérites sus-jacents).

Dans les secteurs où un plateau littoral est plus élevé, les rivières côtières l'entaillent en la faveur de vallées profondes comme les abers ou rias : de la Rance, du Trieux, du Jaudy, ou de la Penzé et de la rivière de Morlaix aussi du Douron ou encore du Wrac'h ou du Benoit. Assez souvent, les cours de ces fleuves sont parallèles ou guidés par des accidents tectoniques Nord/Sud, Nord-Ouest/Sud-Est ou encore Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest par

exemple. De part et d'autres de ces fleuves et rivières côtiers, leurs estuaires individualisent des presqu'îles comme celles de Locquirec ou de l'Armorique.

Ainsi, pour la Bretagne Nord, des configurations de type « zones basses, avec marais maritimes, contrôlées par des structures tectoniques » pourraient constituer des secteurs vulnérables aux intrusions salines, auxquelles pourraient s'ajouter des zones plus ou moins basses situées le long des vallées encaissées comme les abers ou rias.

Les facteurs aggravants pourraient être (1) les structures tectoniques avec un jeu extensif c'est-à-dire apportant une certaine porosité (plutôt de fracture) pour mettre en connexion les aquifères Terre-Mer et (2) l'altération associée à ces structures pour les mêmes raisons.

Plus à l'Ouest, la pointe du Finistère par son découpage extrême, offre une limite Terre-Mer des plus intimes. Pour la ***rade de Brest*** et la ***baie de Douarnenez***, les mêmes configurations peuvent être évoquées dont les configurations géologico-morphologiques pourraient être plus complexes (Illustration 21) .

Le ***Sud Bretagne*** a, quant à lui, une altitude plus basse que Bretagne Nord où depuis la pointe de Penmarc'h jusqu'à Pénestin à l'embouchure de la Vilaine, les falaises n'excèdent pas la vingtaine de mètres NGF, hormis sur les îles de Belle-Ile-en-mer, Groix et Houat et quelques endroits du littoral comme la côte sauvage de la presqu'île de Quiberon ou de Rhuys.

Comme pour la Bretagne Nord, la Bretagne Sud expose une certaine dualité pour son littoral entre deux directions tectoniques : la direction N150 bordant les bassins éocènes bien développés de ***Concarneau***, ***Lorient*** et Noirmoutier et la direction N110 hercynienne qui dicte l'allure générale de la côte sud Bretagne et des reliefs de l'arrière-pays (Landes de Lanvaux) (Illustration 21).

La différence majeure avec la Bretagne Nord est la présence avérée de zones d'effondrement tectonique (bassins éocènes) qui décrivent des zones basses assez larges comme l***e pays fouesnantais*** ou ***la petite mer de Gâvres*** et des zones plates de marais ou ennoyée par la mer comme l'emblématique ***golfe du Morbihan***.

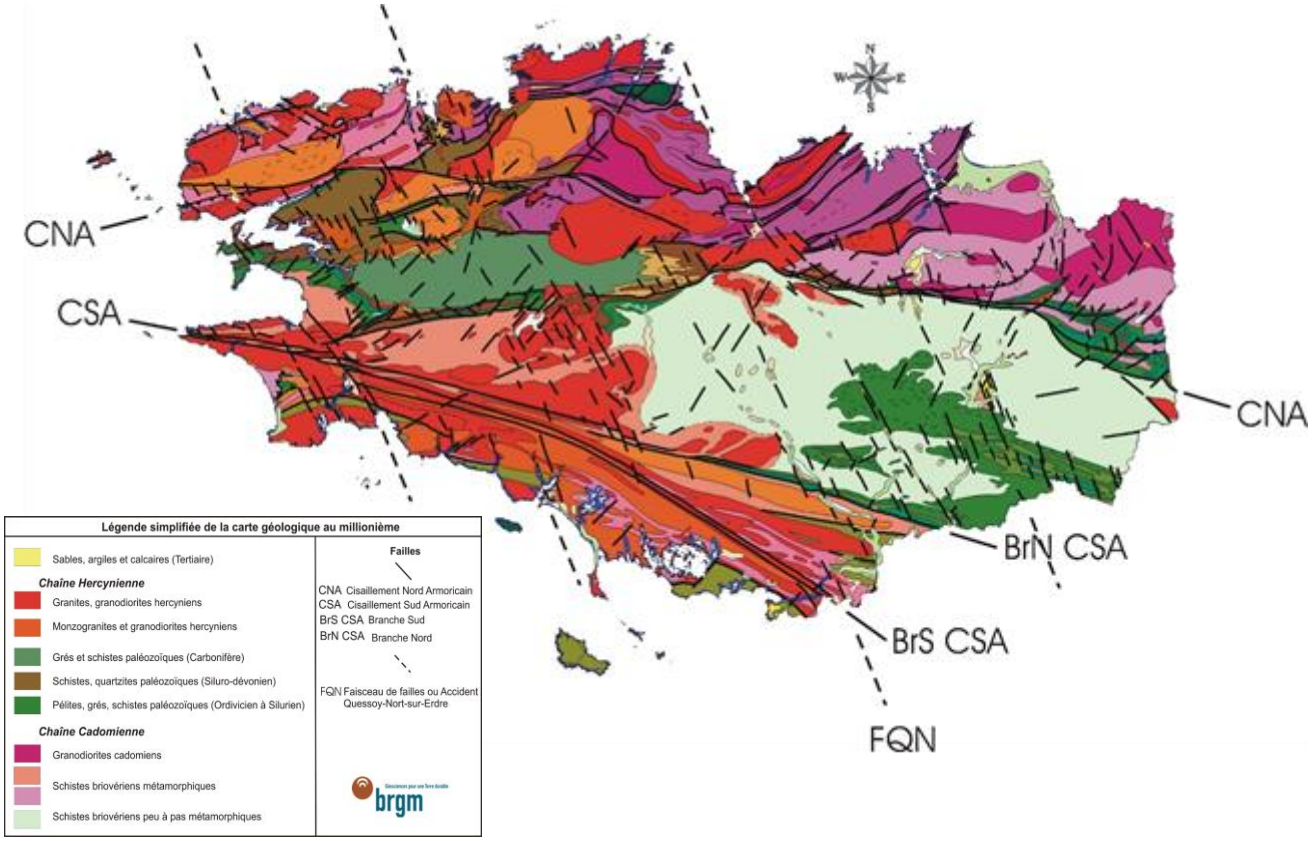


Illustration 21 : Carte géologique au millionième de la Bretagne et failles associées (Source : BRGM)

2.3.4. Contexte hydrogéologique breton

Les ***aquifères de Bretagne*** pour l'essentiel correspondent à des ***aquifères dits « de socle »*** et le modèle conceptuel actuel est celui de Wyns *et al*., 2004. Ce type d'aquifère est contenu dans le profil d'altération des roches du Massif Armoricain (Illustration 22).

Le profil d'altération est composé de la base au sommet par la superposition de trois horizons principaux : la zone fissurée, les isaltérites et les allotérites.

L'horizon fissuré est composé de la roche saine, parcourue de fractures tapissées d'oxydes et d'hydroxydes de fer et manganèse (liés aux réactions physico-chimiques qui résultent de l'altération).

Les altérites meubles sont constituées à la base par les isaltérites, roches altérées où l'ensemble des structures géologiques (schistosités, filons, etc.) sont reconnaissables et mesurables. Les isaltérites sont surmontées par les allotérites, constituées d'argiles ou limons d'altération et où la roche originelle est totalement transformée.

Enfin, le profil d'altération est coiffé par une cuirasse métallique plus ou moins préservée.

Cette transformation *in situ* de la roche entraine une augmentation de son volume, phénomène fondamental qui confère à cet ensemble une nouvelle porosité.

Si ce modèle est reproductible à l'ensemble des aquifères cristallins, la lithologie et notamment sa composition minéralogique plus au moins altérable, va définir le degré d'altération, dans des conditions climatiques identiques (Illustration 22).

Des études menées dans le Finistère (statistiques relevées pour trois ans d'infiltration moyenne d'eau de pluie), ont montré que la réserve en eau souterraine serait contenue à 80% dans les horizons fissurés et à 20% dans les altérites meubles (Wyns *et al*., 2004).

La capacité à stocker l'eau (emmagasinement) et à la transmettre (transmissivité) du milieu fissuré, dépend essentiellement de la distribution et de la connectivité des fractures (Maréchal *et al*., 2004) mais aussi de la densité de fractures (Dewandel *et al*., 2006).

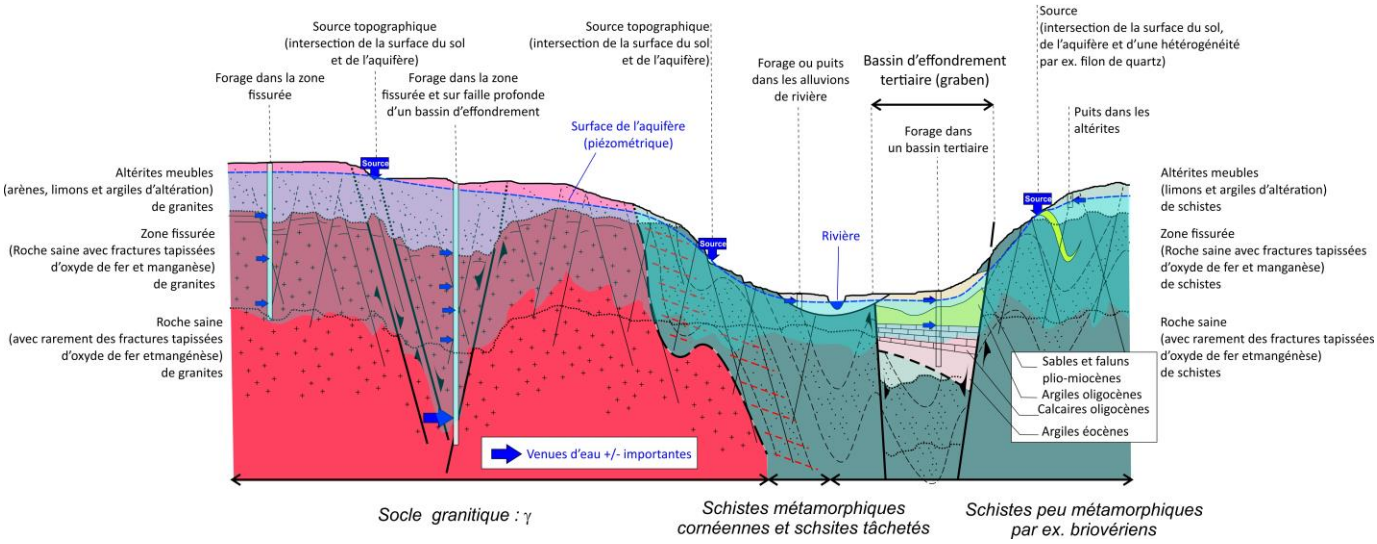


Illustration 22 : Synthèse des aquifères de Bretagne (Schroëtter, non publié)

Ces résultats soulèvent des questions sur les aquifères dits « de socle », avec deux modèles principaux qui s'opposent pour leur caractérisation : le rôle de la tectonique versus celui de l'altération. Ainsi des études menées montrent que les failles induisent une anisotropie de la perméabilité, ayant selon les cas une fonction conductrice ou de barrière hydraulique (Bense *et al*., 2013).

D'autres aquifères sont aussi présents sur le territoire breton. Ils correspondent à des aquifères de type ***« alluvionnaire »*** et des aquifères de type ***« bassin tertiaire ».***

Ces deux types d'aquifères mêmes s'ils sont plus réduits en superficie et en nombre, sont des aquifères très productifs.

Les ***premiers*** sont typiquement liés aux alluvions fluviatiles récentes et basses terrasses des rivières principales (notamment l'Oust et la Vilaine) et leurs étendus correspondent « peu ou prou » aux lits majeurs des cours d'eau actuels bretons.

Les ***seconds*** sont typiquement associés à des bassins d'effondrement ou grabens d'âge tertiaire (anté-Eocène moyen à Oligocène) et dans lesquels sont piégées des formations géologiques plus récentes d'âge mio-pliocène (Illustration 22). Ils correspondent à un empilement d'aquifères ***stratiformes*** dont certains peuvent être ***libres*** (ceux mio-pliocènes) à ***captifs*** (ceux oligocènes).

Pour revenir à cette étude, il est raisonnable d'envisager que la sollicitation des ***aquifères dits « de socle »*** sur « altérites », sur « failles » ou sur les deux à la fois, ***en bordure de littoral de Bretagne***, peut entrainer localement des intrusions salines. Ce constat peut aussi être fait pour des aquifères de type ***« bassin tertiaire »*** d''autant qu'il en existe en ***domaine circa littoral (dans le pays Fouesnantais ou en petite mer de Gâvres).***

3. Phase 1 – Synthèse et interprétation des données disponibles

Cette étude a commencé par une analyse bibliographique (études nationales et plus locales, collecte des données hydrogéologiques disponibles) et une identification des captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP) vulnérables aux intrusions salines.

Pour la phase 1, la zone d'étude sur la région Bretagne a été définie à partir des critères suivants (Illustration 1) :

- Une distance au trait de côte Histolitt® (SHOM) inférieure à 5 km a été retenue pour la définition de la zone d'étude. 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 susceptible d'élever le niveau de la mer) ;

- En complément, les zones basses topographiques ouvertes sur le littoral d'une altitude inférieure à 15 m selon le MNT 25 m (BDTOPO® IGN) ont été inclues dans la zone d'étude.

3.1. HISTORIQUE DES PRECEDENTS TRAVAUX ET ETUDES

3.1.1. Travaux nationaux

Etude sur les aquifères littoraux de France métropolitaine (Petit, 1996 - rapport BRGM/RR-39298-FR)

Cette étude menée par le BRGM en 1996 rappelle tout d'abord que la salinité des eaux dans les aquifères côtiers peut être naturelle (zones de faible altitude, eaux fossiles) ou anthropique (liée à la surexploitation). Elle souligne qu'en Bretagne, dans certaines conditions (presqu'île par exemple), le cumul des effets individuels des forages peut entrainer un impact global. D'autre part, l'anisotropie des roches de socle peut représenter un facteur aggravant le phénomène de biseau salé.

Cette étude a également mis en évidence que la proximité du littoral peut avoir un rôle significatif sur la salinité des eaux rechargeant les nappes, selon l'exposition des versants par rapport aux pluies susceptibles d'être chargées d'embruns.

D'autre part, le rapport mentionne une douzaine de forages dans le Finistère nord qui ont rencontré des eaux saumâtres, interprétées comme des résidus fossiles, peut-être d'origine pléistocène (aucune analyse isotopique n'était disponible pour le confirmer). Il s'agit par exemple des forages de Loc Maria à Plabennec, Creac'h Losquet à Plouguerneau (non bancarisés dans la Banque de données du Sous-Sol - BSS), Raden à Plouvien. En 2017, ces forages ne sont pas recensés dans le référentiel des captages d'alimentation en eau potable actifs (source : ADES). En revanche, le captage de Kerangoff à Plabennec réalisé en décembre 1992 (02383X0036/S3) a en effet rencontré de l'eau saumâtre à partir d'une profondeur de 70 m (teneur en chlorures de 1400 mg/L à 79 m et conductivité de 3 700 µS/cm à 103 m). Ces forages se situent à l'intérieur des terres, hors de la zone d'étude et ne sont donc pas pris en compte pour la présente étude.

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

Cette cartographie part du principe que la sensibilité intrinsèque est liée à la plus ou moins grande facilité de circulation de l'eau dans le sous-sol (et donc aux caractéristiques des formations géologiques). La côte nord de la Bretagne a été identifiée comme plus perméable et donc plus sensible au phénomène d'invasion salée que la côte sud (Illustration 23 – carte de gauche).

La cartographie de la vulnérabilité anthropique, résultant de l'exploitation des eaux souterraines connue à la date de l'étude, fait apparaitre deux secteurs en vulnérabilité très forte, particulièrement menacés (Illustration 23 – carte de droite) :

- La presqu'île de Quiberon : l'étroitesse du territoire laisse craindre une surexploitation locale compte-tenu du grand nombre de forages (essentiellement à usage domestique ou d'agrément, ce qui limiterait l'impact socio-économique). Cependant la sensibilité intrinsèque de ce secteur est limitée.

- La région de Saint-Malo – Cancale, avec une configuration de presqu'île : les nombreux forages situés sur ce secteur sont essentiellement exploités pour l'irrigation des cultures maraichères, c'est-à-dire une utilisation concentrée sur une courte période, ce qui augmente les risques de provoquer une invasion salée dont l'impact économique serait grave. D'autre part, la sensibilité intrinsèque de ce secteur est élevée, ce qui est un facteur aggravant.

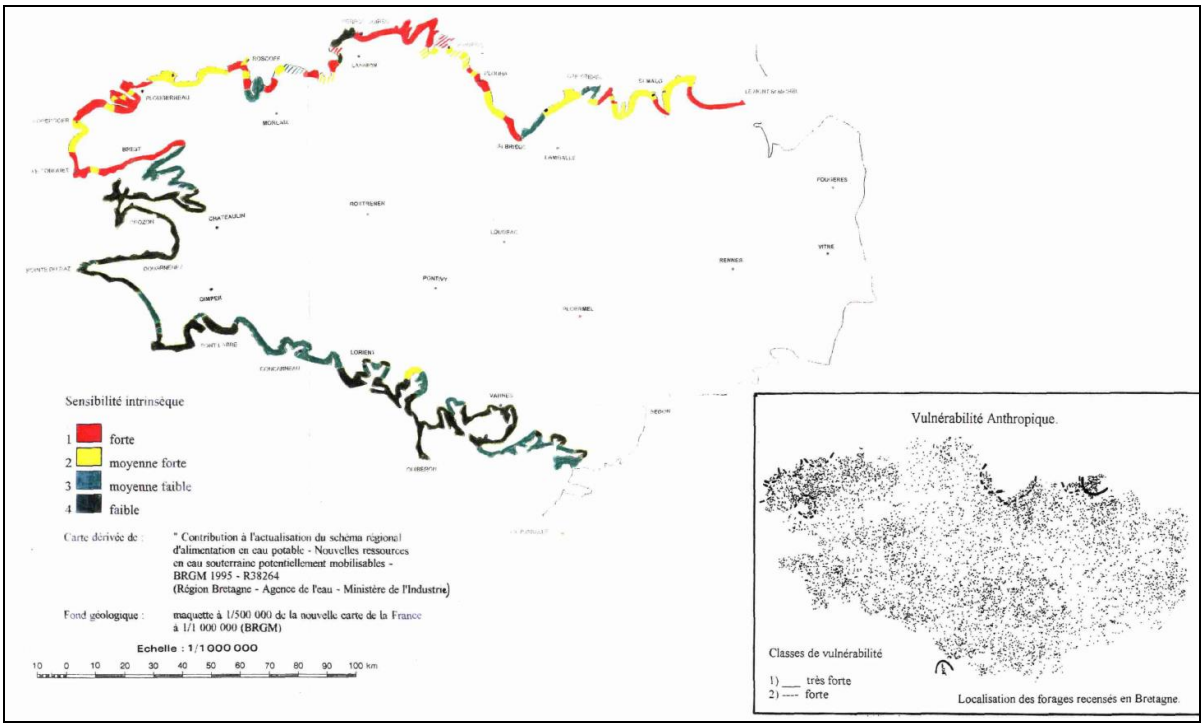


Illustration 23 : Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux invasions salées (Petit, 1996 - BRGM/RP-39298-FR)

Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquence sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en métropole (Dörfliger et al., 2011a - rapports BRGM/RP-59456-FR et RP-60829-FR)

Une cartographie nationale de la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines, basée sur la méthode GALDIT dédiée aux aquifères côtiers, a été réalisée en 2011. GALDIT est une approche de « cartographie à index » simple d'utilisation, nécessitant peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle :

- Le type d'aquifère : libre, captif et semi-captif (**G**roundwater occurrence) ;
- La conductivité hydraulique de l'aquifère (**A**quifer hydraulic conductivity) ;
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (**D**epth to groundwater **L**evel above sea) ;
- La distance par rapport à la côte (**D**istance from the shore) ;
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area) ;
- L'épaisseur de l'aquifère (**T**hickness of the aquifer).

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

5 classes de vulnérabilité ont été définies (faible, faible à moyenne, moyenne, variable-karstique, forte-avérée).

La démarche nationale peut être schématisée comme suit :

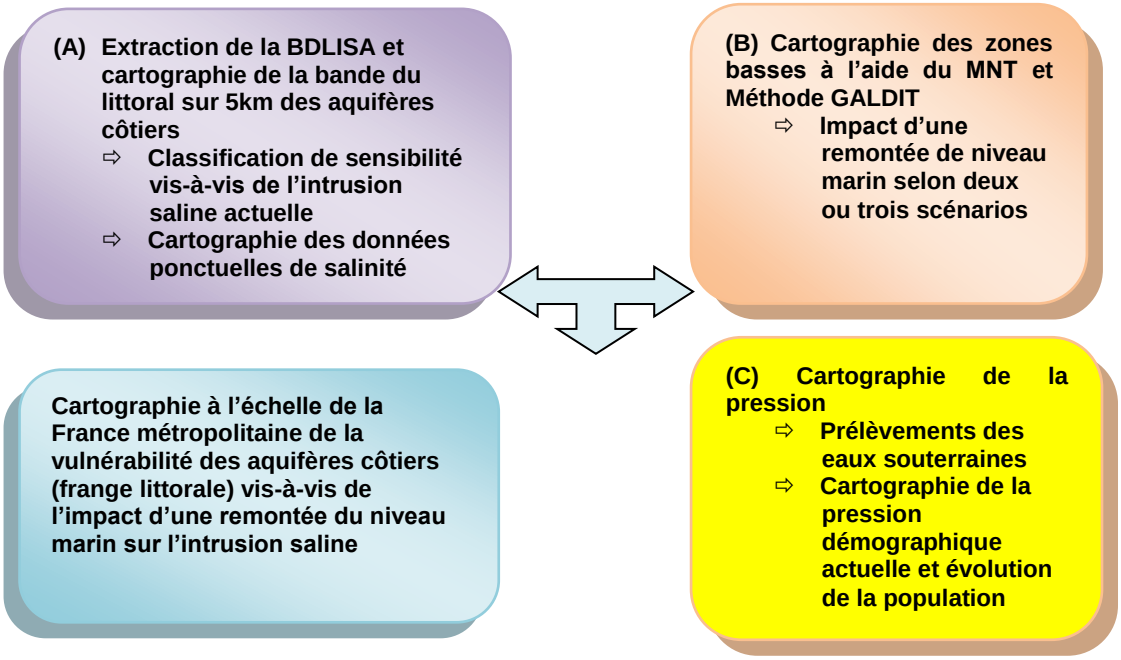


Illustration 24 : Schéma de la démarche de cartographie nationale de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale

Pour la Bretagne, la cartographie de la pression est la suivante (Illustration 25) :

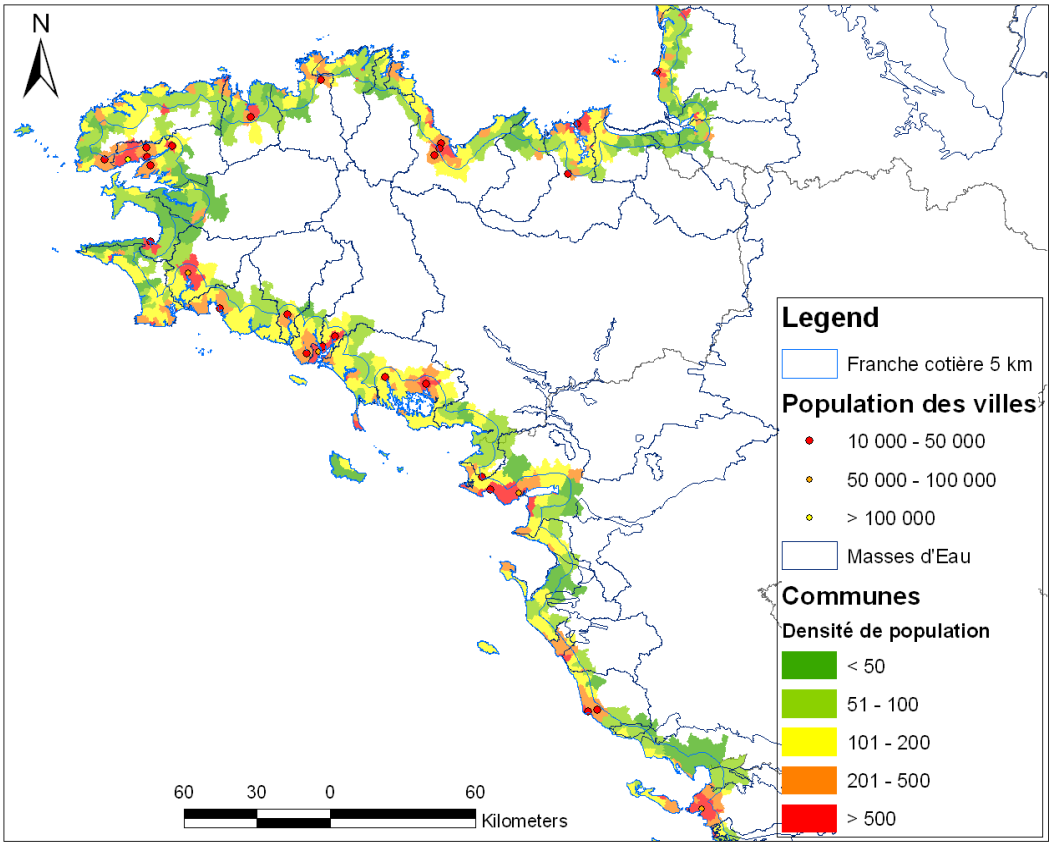


Illustration 25 : Carte de pression anthropique sur les aquifères côtiers bretons (Dörfliger, 2011a – BRGM/ RP-60829-FR)

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

Cette cartographie fait apparaitre la côte nord-est de la Bretagne comme la zone la plus vulnérable de la région (Illustration 26).

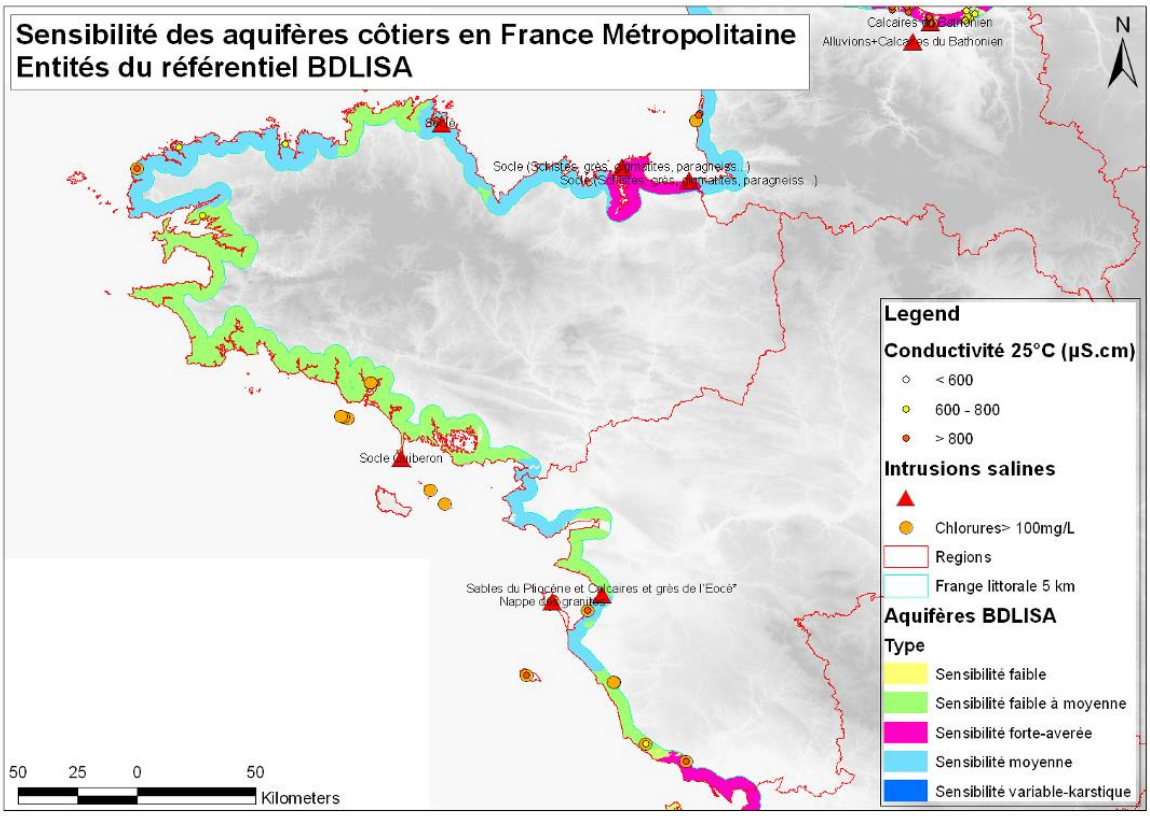


Illustration 26 : Carte de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en Bretagne (Dörfliger et al., 2011a – BRGM/ RP-60829-FR)

3.1.2. Etudes régionales sur les fluides salés

Plusieurs auteurs ont mis en évidence la présence de fluides salés dans les aquifères de socle du Massif Armoricain (Ayraud *et al.*, 2008 ; Pauwels *et al.*, 2010, Armandine Les Landes *et al.*, 2014a).

L'origine des fluides salés dans les aquifères de socle a été attribuée à de l'eau de mer ancienne qui se serait introduite dans les aquifères de socle lors de transgressions marines (Aquilina and De Dreuzy, 2011 ; Armandine les Landes *et al.*, 2015). L'empreinte de ces fluides salés peut persister pendant plusieurs millions d'années (Illustrations 27 et 28).

La distribution des paléocôtes relatives aux transgressions marines met en évidence la bonne corrélation entre les fortes concentrations en chlorures et les zones immergées lors des transgressions (Armandine les Landes, 2014). Lors des transgressions marines, la mer s'est introduite à grande profondeur (effet densitaire) et à l'intérieur des terres. Après la transgression, l'empreinte marine est progressivement lessivée sous l'effet de l'écoulement des eaux souterraines alimentées par les eaux météoriques. Les processus de paléo-intrusions d'eau de mer (eaux fossiles) ne sont donc pas restreints aux aquifères côtiers et se distinguent des phénomènes d'intrusions salines actuels.

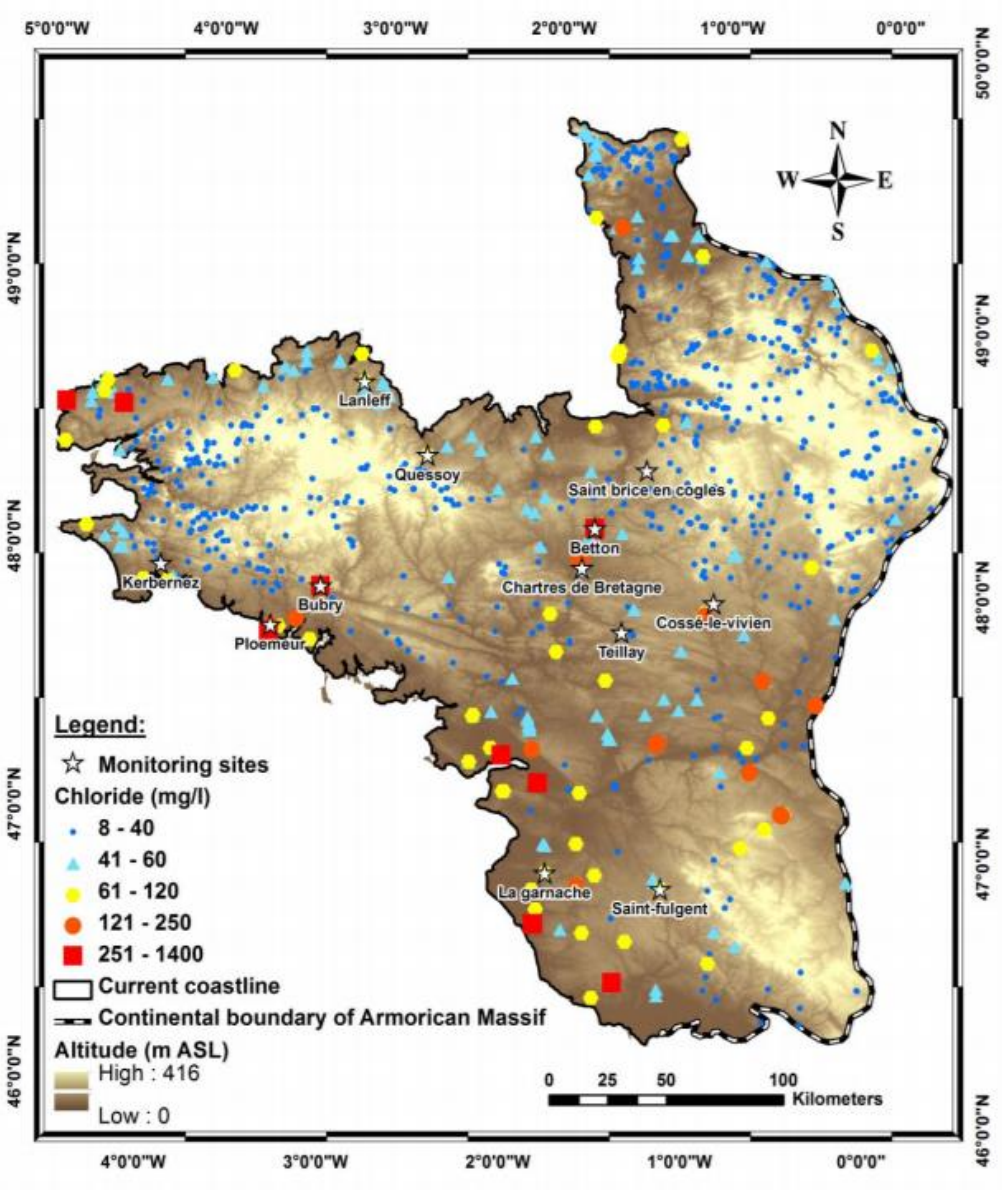


Illustration 27 : Répartition des concentrations en chlorures dans les eaux souterraines sur le Massif Armoricain (Armandine les Landes, 2014)

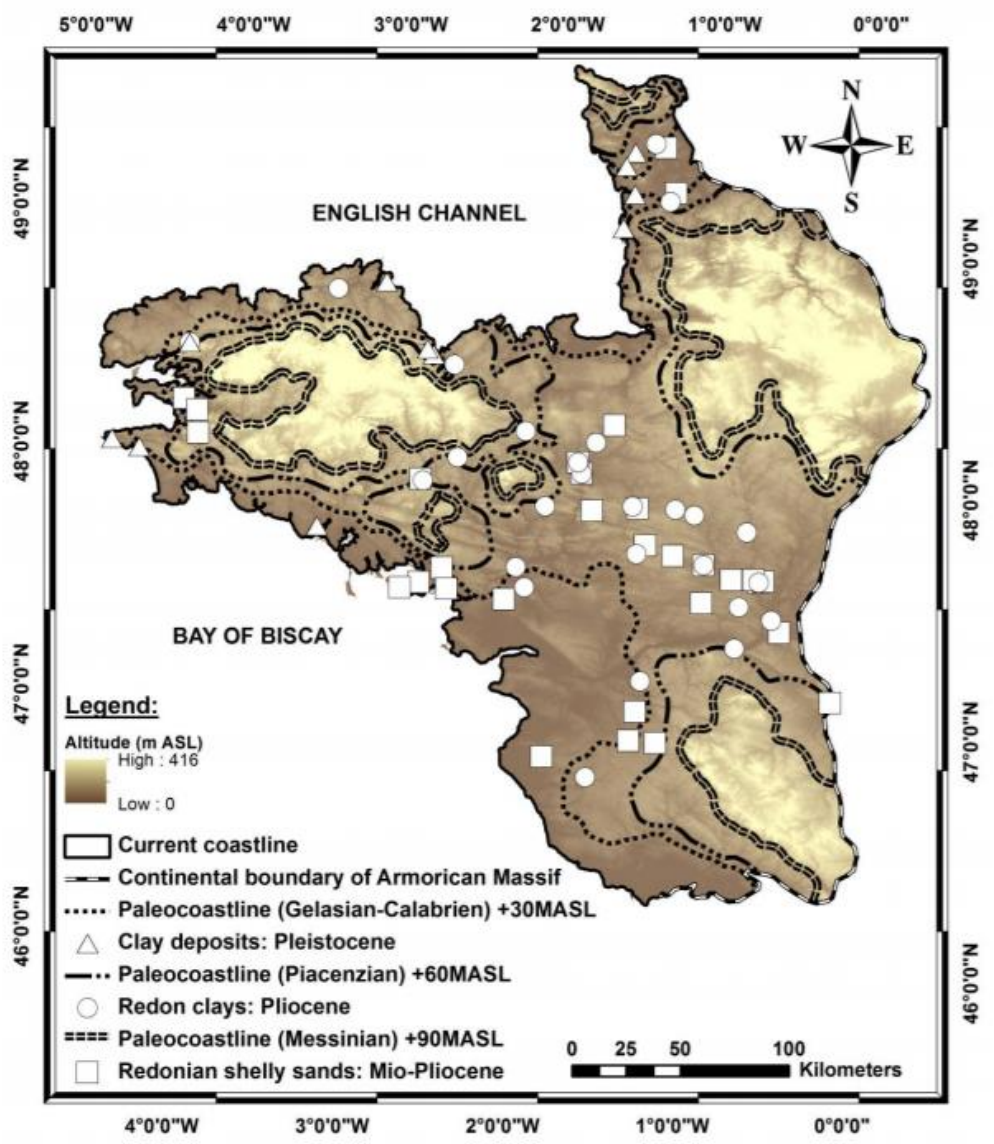


Illustration 28 : Localisation des paléocôtes sur la topographie actuelle pour les transgressions marines depuis le Mio-Pliocène (Armandine les Landes, 2014)

La thèse d'Armandine Les Landes (2014) a mis en évidence la nécessité de prendre en compte les systèmes de surface (rivières) dans les processus de salinisation des aquifères. Armandine Les Landes s'est intéressé aux mécanismes de salinisation des aquifères par les fleuves côtiers et propose une quantification de cette salinisation à partir de 3 paramètres (largeur de la rivière, proportion d'eau de mer dans la rivière et perméabilité de l'aquifère sous-jacent). Cette quantification a été appliquée à la Bretagne : il apparait que les petits fleuves côtiers participent davantage à la salinisation que les grands (du fait de leur plus grand nombre) mais l'incursion d'eau de mer vers l'intérieur des terres est plus limitée sur ces petites rivières à cause de leurs pentes fortes. Cette simulation a montré l'importance de prendre en compte le réseau fluviatile dans les processus de salinisation des aquifères, d'autant plus qu'avec le changement climatique, le niveau de la mer devrait augmenter et le front de salinité devrait donc progresser dans les fleuves côtiers.

Cependant dans le cadre de cette étude, seules les intrusions salines sur le littoral sont prises en compte.

3.1.3. Etudes locales

En Bretagne, quelques études locales ont été menées sur les aquifères littoraux et le biseau salé.

Mesures ponctuelles de conductivité

- **Mesures de conductivité dans le secteur de Saint-Malo – Roz-sur-Couesnon (note BRGM 05.149)**

Les services de la Police de l'Eau ont demandé au BRGM en 2005 de réaliser des investigations sur le littoral de l'Ille-et-Vilaine, entre Saint Malo et Roz-sur-Couesnon, où une densité forte de forages était recensée, pouvant entraîner une remontée du biseau salé

Dans ce secteur, les aquifères sont exploités pour l'alimentation en eau potable des communes riveraines et par les exploitants agricoles (500 forages recensés à fin 2005). Compte tenu de leur densité et de leur profondeur, (nombreux ouvrages profonds - entre 100 et 202 m) se posait l'éventualité d'une invasion marine par rabattement excessif des niveaux piézométriques. Les mesures de conductivité de l'eau des forages de ce secteur réalisées en 2005 (Illustration 29) ont montré des valeurs supérieures à ce qui est observé habituellement dans les eaux du socle du Massif Armoricain (de 408 à 40 908 µS/cm au lieu de 200 à 400 µS/cm)[1].

[1] A noter que la référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (arrêté du 11 janvier 2007) autorise une conductivité à 25 °C maximale de 1 100 µS/cm).

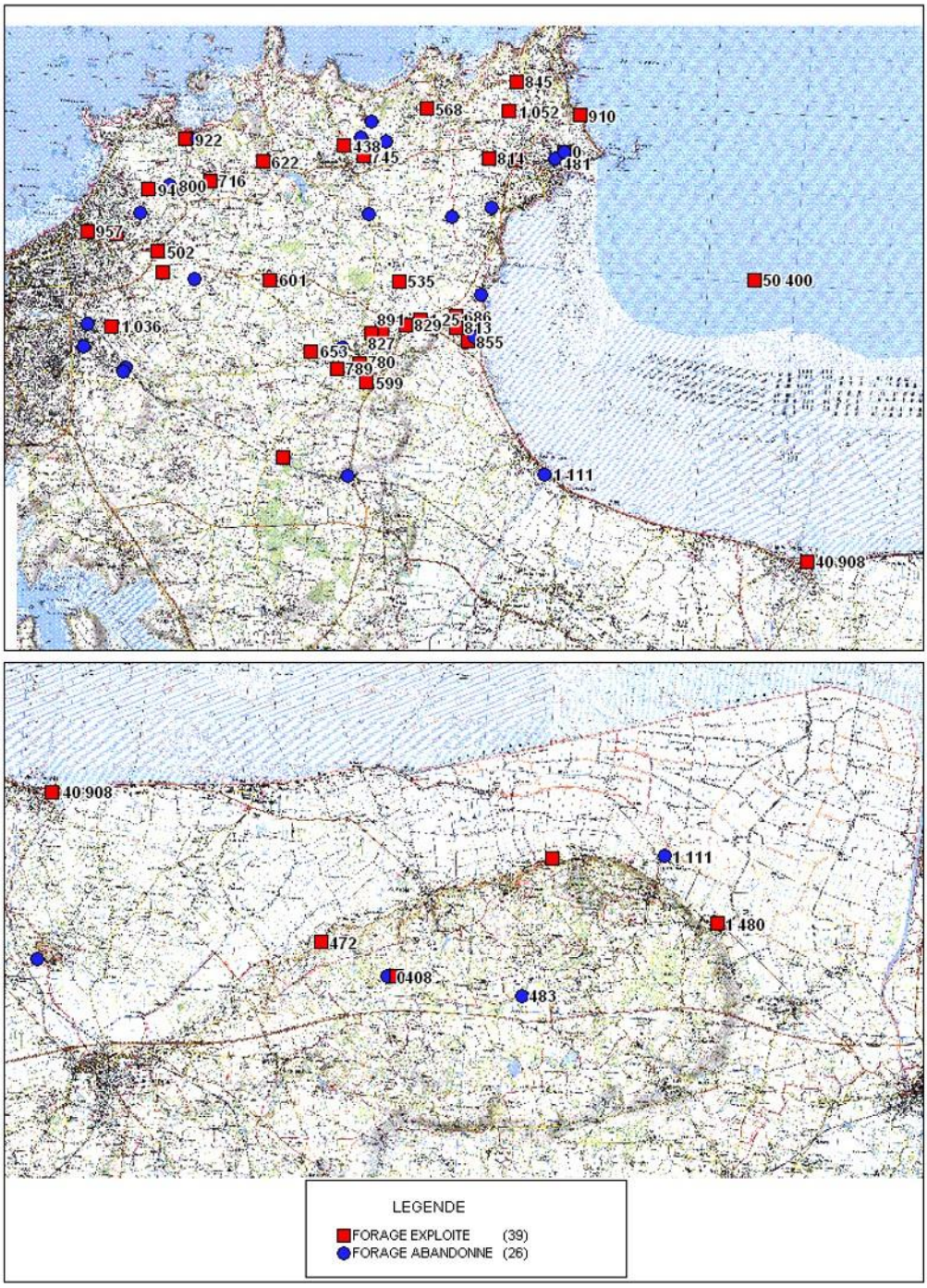


Illustration 29 : Mesures de conductivité réalisées en 2005 et état des forages dans le secteur de Saint Malo (en haut) et Roz-sur-Couesnon (en bas) - note BRGM 05.149

- **Mesures de conductivité dans les secteurs de Quiberon et Paimpol (note BRGM 07.03)**

Suite à l'étude dans le secteur de Saint-Malo, les services de la Police de l'eau ont demandé au BRGM de réaliser des mesures de conductivité en 2006 dans le secteur de la presqu'île de Quiberon et de Paimpol (Illustration 30).

Des eaux présentant une conductivité supérieure à 800 µS/cm ont été constatée dans 75% des forages investigués sur la presqu'île de Quiberon, à la fois en bord de mer et dans l'intérieur des terres. Dans le secteur de Paimpol, les conductivités supérieures à 800 µS/cm

(20% des forages investigués) correspondent à des forages éloignés de la côte mais profonds et très sollicités au point de vue débit.

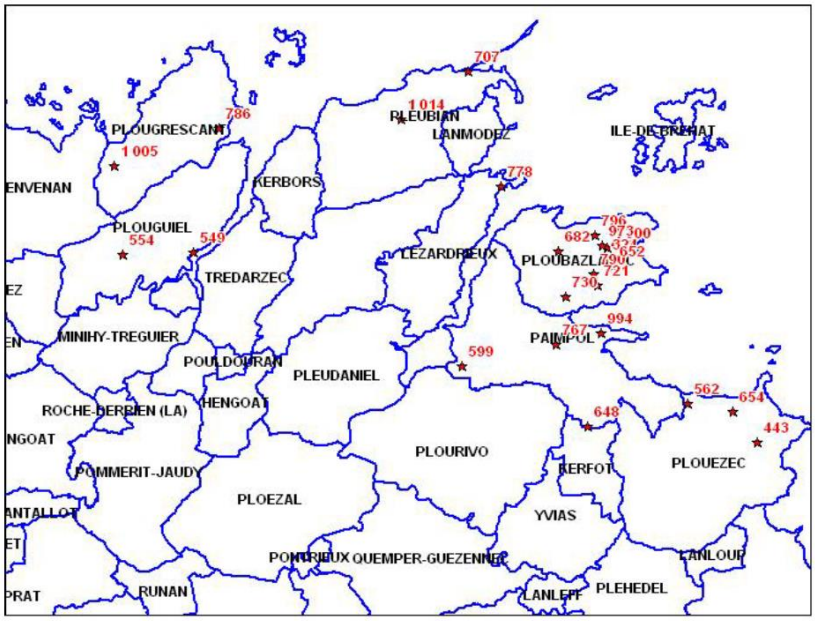


Illustration 30 : Mesures de conductivité réalisées en 2006 dans le secteur de Quiberon (en haut) et Paimpol (en bas) - note BRGM 07.03

Il s'agit de zones d'intrusions salines reconnues, où certains forages, soit mal réalisés, soit mal exploités, produisent de l'eau présentant des conductivités élevées.

- **Mesure de conductivité dans un forage à Pleubian (22)**

En 2013, la DDTM des Côtes d'Armor a sollicité le BRGM Bretagne pour contrôler un forage (01715X0026/F) situé à proximité du littoral sur la commune de Pleubian (note BRGM Bretagne EP/FL - 13.30). Ce forage capte de l'eau souterraine destinée à l'irrigation de serres de tomates. Situé à une altitude de 17 m NGF, le forage a une profondeur de 50 m. Il se trouve à moins de 150 m du littoral, en bordure de zone humide. Etant donnée sa forte minéralisation pour le secteur (conductivité supérieure à 900 µS/cm), le propriétaire dilue l'eau du forage avec de l'eau de pluie récupérée sur les toitures des serres. Les teneurs en chlorures sont voisines des 100 mg/L.

Ce forage capte de l'eau dans la zone de transition entre eau douce et eau salée, comme plusieurs forages du secteur (cf. note BRGM 07.03 décrite ci-dessus). Le BRGM a préconisé de surveiller le rabattement pour maintenir le niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer (par exemple en pompant à un débit plus faible pendant une durée plus longue) et la conductivité, afin d'arrêter le pompage en cas d'augmentation de la conductivité.

Aucun lien direct entre les valeurs de conductivité et la distance à la côte n'a été mis en évidence par ces études ponctuelles.

Projet de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel

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 fluvio-marines, composés de tangue, 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 paléochenaux de la Sélune au nord de la zone d'étude parcourent l'aquifère superficiel, apportant des sédiments fluviatiles 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 31). Des valeurs très 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.

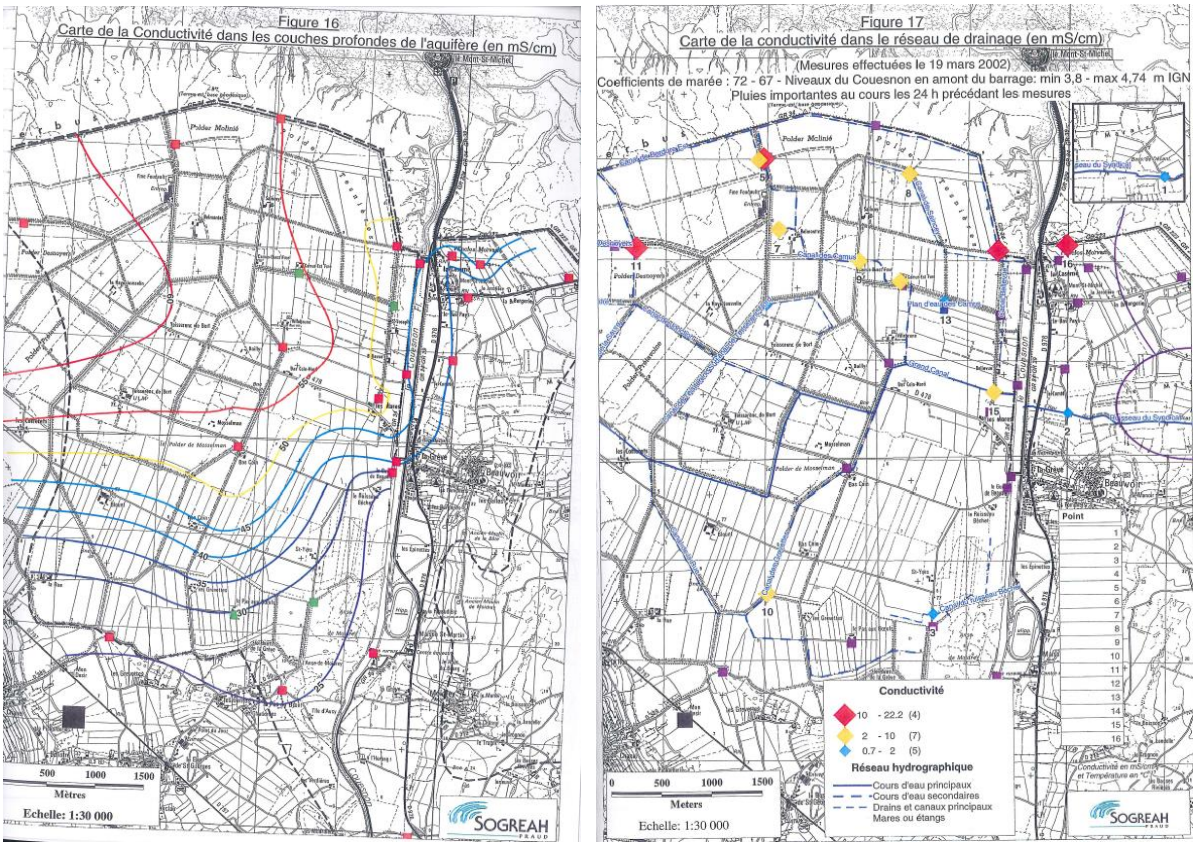


Illustration 31 : Cartes de conductivité (en mS/cm) dans les couches profondes de l'aquifère (à gauche) et dans le réseau de drainage (à droite), source : SOGREAH, 2002, rapport phase 6

D'après SOGREAH, 2002, une zone de transition eau douce – eau salée est observée sur plusieurs mètres (Illustration 32).

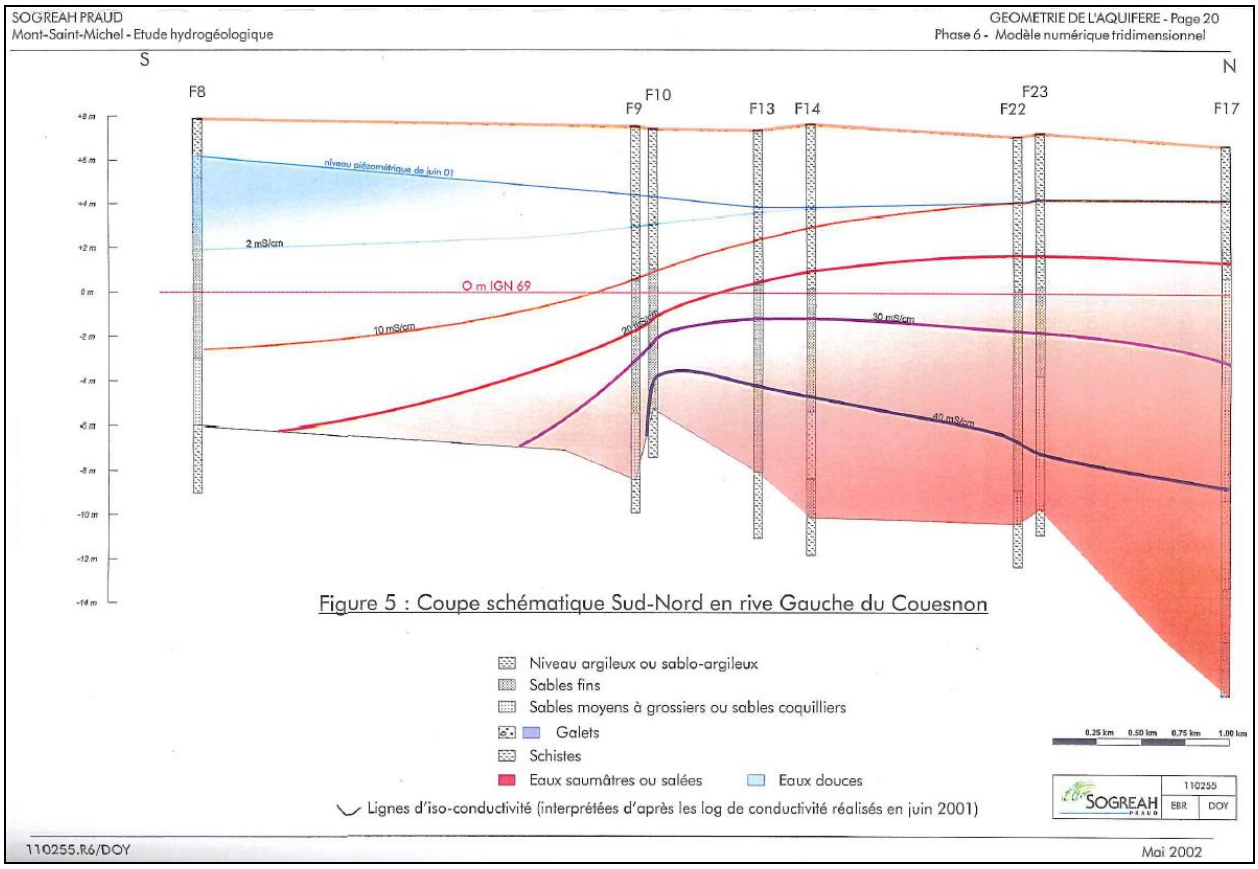


Illustration 32 : Coupe transversale à la côte en rive droite du Couesnon, source : SOGREAH, 2002, rapport phase 6

Un modèle maillé hydrodynamique et hydrodispersif a été réalisé, en régime permanent et en régime transitoire sur une période 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, les apports d'eau douce étant trop faibles pour chasser l'eau salée de la nappe. Des datations pourraient permettre de confirmer cette hypothèse.

Quatre modèles 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 et une série de simulations effectuées. Les principales conclusions sont notées ci-après :

- Le Couesnon est un vecteur d'infiltration du sel dans la nappe superficielle, contenue dans les alluvions fluvio-marines, avec une progression latérale et verticale d'une dizaine de mètres, 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.

Certains forages présentent de fortes teneurs en chlorures côté normand (champ captant de Ducey en rive droite de la Sélune. D'après les données hydrochimiques, le seul phénomène d'intrusions marines actuelles n'explique pas les teneurs en ions majeurs. D'autres phénomènes peuvent expliquer le faciès hydrochimique, comme des fluides profonds minéralisés ou la percolation à travers des dépôts évaporitiques. Une étude supplémentaire et l'analyse d'isotopes seraient nécessaires pour déterminer l'origine des eaux souterraines et des teneurs en chlorures.

Cas de forages salés

- **Finistère nord (Léon)**

Le rapport BRGM SGR/BRE 87-02 (1987) mentionne 5 sondages réalisés en 1984-1985 ayant rencontré de très fortes teneurs en chlorures (parfois supérieures à 1 g/L) augmentant avec la profondeur, bien que ces sondages soient situés relativement loin de la mer. Ces sondages se trouvent à proximité des vallées des Abers. En effet, d'anciennes plages pléistocènes sont connues jusqu'à une altitude d'une vingtaine de mètres sur le littoral du Finistère (la mer envahissait les vallées encaissées des Abers et remontait probablement jusqu'à la cote actuelle de + 30 à 35 m NGF).

- Le Drennec (sondage S16 dans la vallée - 02384X0047/F) : teneur en chlorures de 400 mg/L à 76 m de profondeur (hors de la zone d'étude du projet)

- Kernilis (S11 dans la vallée - 02383X0013/F) : teneur en chlorures supérieure à 1 g/L à 52 m de profondeur

- Kernilis (S10 à flanc de vallée - 02383X0011/F) : teneur en chlorures de 310 mg/L à 103 m

- Lannilis (S6 à flanc de vallée - 02383X0010/F) : teneur en chlorures de 1 175 mg/L à 70 m

- Lannilis (S13 - 02382X0023/F) : 180 mg/L à 70 m (teneur en chlorures inférieure à la référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine de 250 mg/L)

- Plouvien (Raden) : 3 g/L [NB : ce forage n'a pas été retrouvé dans la BSS en 2017. Seule la teneur en chlorures est indiquée dans le rapport SGR/BRE 87-02. Faute de données suffisantes, il n'a pas été intégré à la base de données des forages salés connus]

Ces forages présentant de fortes teneurs en chlorures ont été interprétés comme des résidus d'eau salée d'origine marine, non évacuée par les circulations d'eau douce récentes, en raison de la lenteur des écoulements souterrains, notamment dans le secteur du Léon où les pentes sont faibles. Les traces les plus amont de ces résidus semblent se trouver au niveau de la laiterie de Ploudaniel (teneur en chlorures de l'ordre de 150 mg/L dans certains forages).

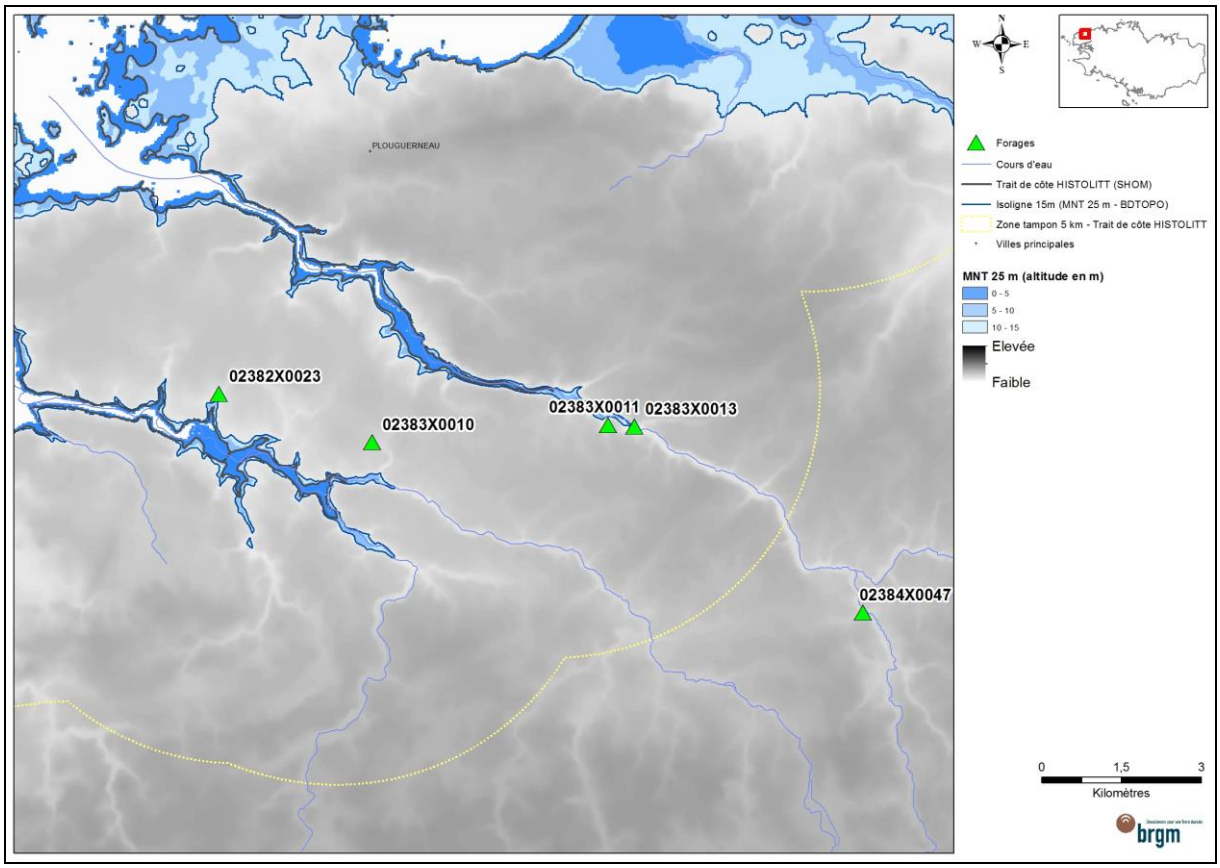


Illustration 33 : Localisation des forages salés mentionnés dans le rapport BRGM SGR/BRE 87-02

Toujours sur le secteur du Léon, le forage de Kerenneur (02374X0016/F1), situé sur la commune de Plourin et exploité pour l'eau potable par la Société Publique Locale (SPL) Eau du Ponant capte de l'eau fortement minéralisée. Il s'agit d'un forage de 97 m de profondeur situé à 17 m d'altitude, réalisé en 1988 (recherche en eau BRGM) à environ 850 m de la mer. Le forage capte le leucogranite de Ploudalmézeau, à proximité de la faille de Porspoder (Illustration 34). Le forage est cimenté sur 15 m et crépiné à partir de 30 m de profondeur (Illustration 35). La première arrivée d'eau se trouve à 60 m de profondeur (1 m^3/h), puis le débit augmente fortement à partir de 82 m pour atteindre au moins 70 m^3/h au soufflage à 97 m. Le niveau statique en fin de foration se trouvait à 1,5 m de profondeur. En cours de foration, les teneurs en chlorures étaient élevées (90-95 mg/L) par rapport au contexte géologique local mais compatible avec l'exploitation de l'eau pour la consommation humaine.

A l'heure actuelle, ce forage présente des teneurs en chlorures et une conductivité élevées (en moyenne : 311 mg/L pour les chlorures et 1 384 µS/cm - Illustration 36 et Illustration 37). Les teneurs en chlorures ont augmenté depuis la mise en service du forage en 1992. Actuellement, pour respecter les références de qualité (250 mg/L en chlorures et 1 100 µS/cm pour la conductivité), la production d'eau potable est assurée par le mélange de deux ressources : l'eau du forage de Kerenneur et celle du forage du Traon à Landunvez, avec des teneurs en chlorures plus faibles mais des teneurs en nitrates dépassant la limite de qualité de 50 mg/L.

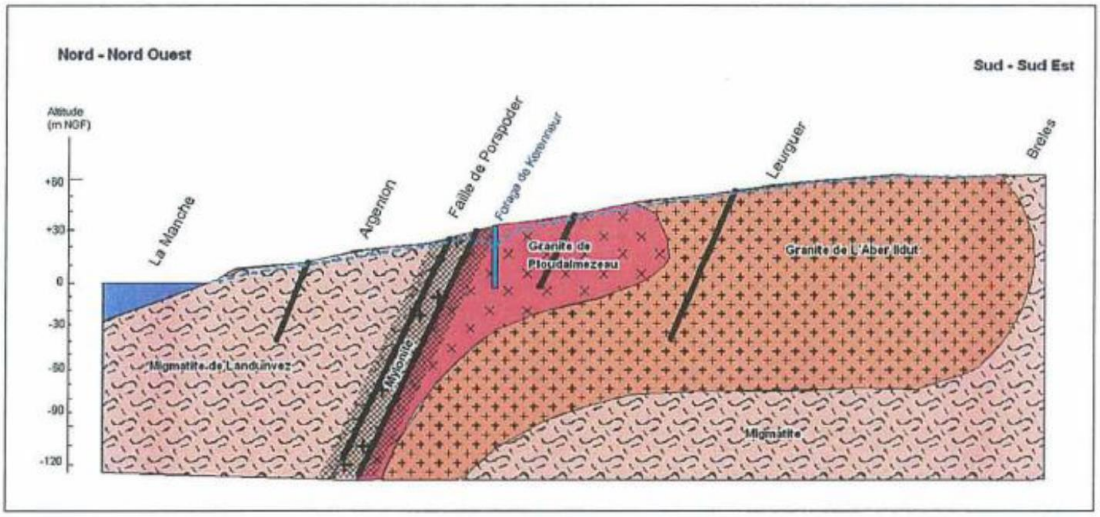


Illustration 34 : Contexte géologique du forage de Kerenneur (ANTEA, 2009)

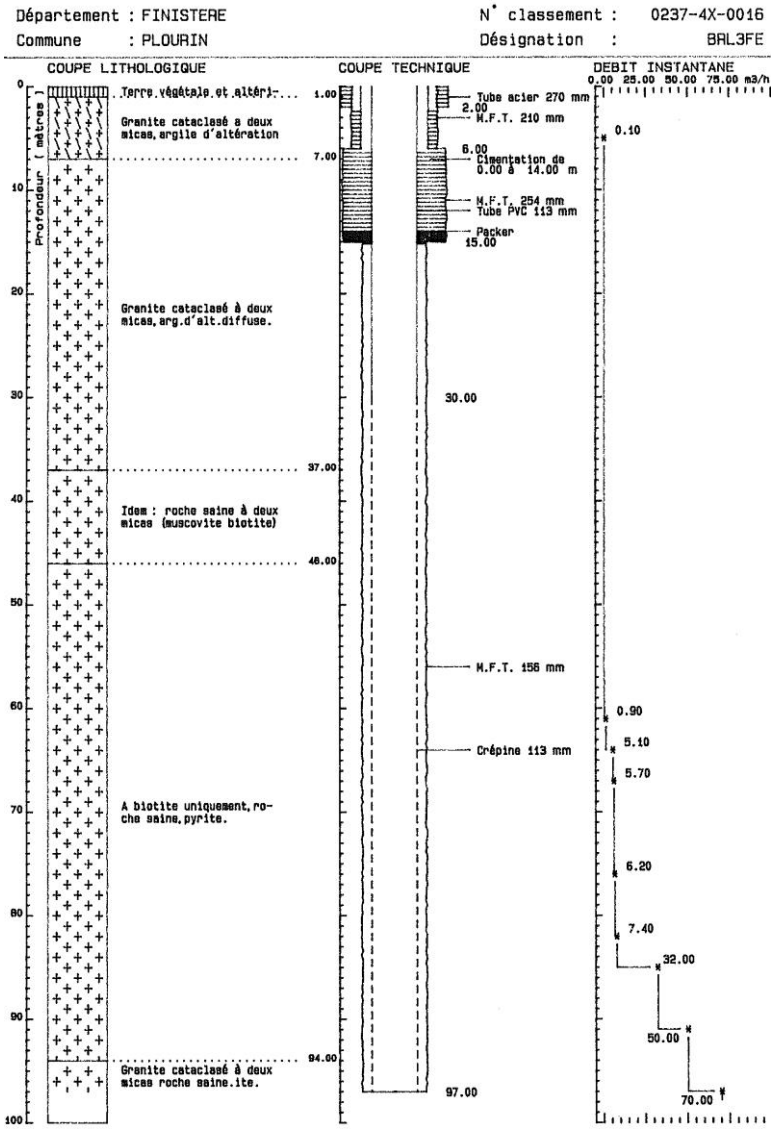


Illustration 35 : Coupe du forage de Kerenneur - 02374X0016/F1 (Banque du Sous-Sol)

En 1999, face à l'augmentation des teneurs en chlorures, le BRGM avait été sollicité par le Syndicat Intercommunal du Chenal du Four pour donner un avis sur les causes de ce phénomène (note BRGM BRE n°98.13). Les teneurs en chlorures n'ont pas été suivies entre 1992 et 1995. En 1995, ces teneurs atteignaient 200 mg/L Dans l'étude de 1999, la conductivité a été mise en parallèle avec le débit d'exploitation du forage : l'augmentation de la minéralisation semble liée l'augmentation des prélèvements. L'augmentation de la minéralisation est due principalement aux chlorures mais aussi de manière significative au magnésium, calcium, sodium et aux sulfates. Cependant, l'augmentation des teneurs en chlorures ne semble pas liée à une arrivée directe d'eau de mer si on prend en compte l'augmentation plus forte des autres éléments (sodium, sulfates, magnésium, calcium) qui ne peut pas être simplement expliquée par une origine marine. L'étude de 1999 conclut donc que la salinité du forage de Kerenneur provient très probablement du mélange d'eau douce avec une eau plus profonde et plus minéralisée, correspondant à la zone de transition entre l'eau douce et l'eau d'origine marine du biseau salé ou d'un stock d'eau fossile.

Le bureau d'étude LABOCEA a été sollicité par la SPL Eau du Ponant en 2015 pour examiner différents scénarios permettant d'assurer la pérennité de l'alimentation en eau potable du point de vue qualitatif et quantitatif. Les teneurs en chlorures ont fortement augmenté depuis la mise en exploitation du forage mais semblent se stabiliser autour de 350 mg/L (Illustration 36). Les calculs de mélange réalisés par LABOCEA entre une eau de mer et une eau de nappe granitique ne permettent pas de rendre compte de la composition chimique de l'eau du forage de Kerenneur (LABOCEA, 2015).

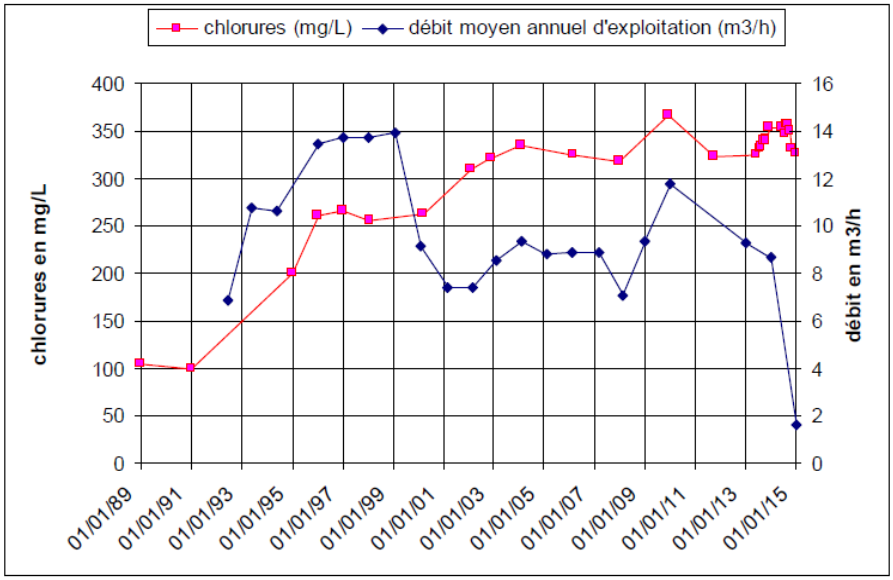


Illustration 36 : Evolution des teneurs en chlorures et du débit annuel d'exploitation du forage de Kerenneur (LABOCEA, 2015)

La conductivité semble stabilisée depuis 2004 à une valeur d'environ 1 400 µS/cm, supérieure à la référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine. L'évolution des teneurs en chlorures et en sodium ne sont pas identiques (Illustration 38) et le ratio Cl/Na est très supérieur au ratio théorique de l'eau de mer (1,79).

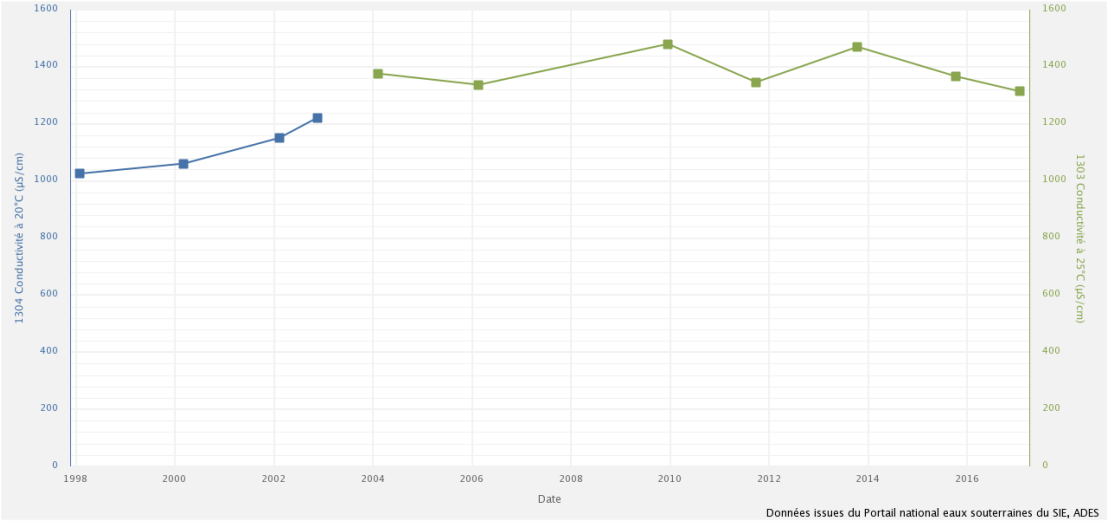


Illustration 37 : Evolution de la conductivité du forage de Kerenneur (Source : ADES)

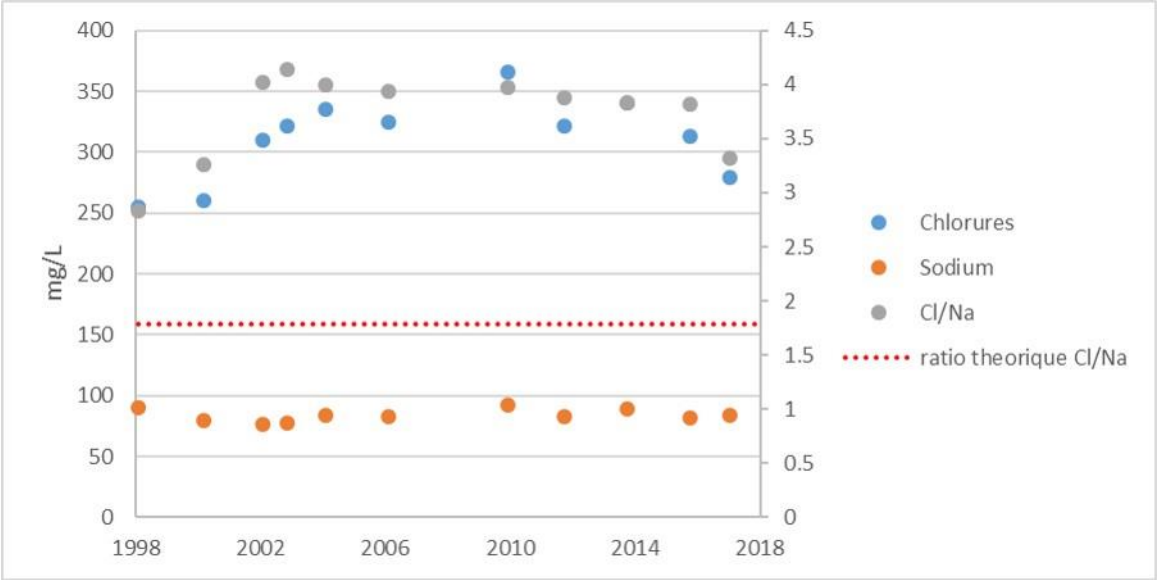


Illustration 38 : Chroniques des concentrations en chlorures (en bleu), sodium (en orange) dont les concentrations (mg/l) sont lisibles sur l'axe de gauche et ratio Cl-/Na+ (en gris ; échelle sur l'axe de droite) du forage de Kerenneur (Source : ADES)

Seules des analyses isotopiques de l'eau et des datations (CFC) permettraient de déterminer l'origine de la forte minéralisation observée sur le forage de Kerenneur à Plourin.

- **Morbihan - Iles de Houat et Hoëdic**

Les îles de Houat et Hoëdic sont situées dans le prolongement de la presqu'île de Quiberon.

Plusieurs captages d'eau potable sont exploités par Eau du Morbihan sur les îles d'Houat (5 forages et 1 puits) et d'Hoëdic (3 forages). Le contexte insulaire et l'augmentation des besoins en eaux estivaux rend ces deux îles particulièrement vulnérables aux intrusions salines.

Plusieurs études hydrogéologiques ont été menées sur ces îles, dont des modélisations (en 2004 pour Houat et en 2011 pour Hoëdic). Elles ont conduit à améliorer les consignes de gestion en fonction de la saison notamment et à réaliser sur chacune des îles un forage supplémentaire afin de pérenniser l'exploitation des eaux souterraines.

Houat

L'île d'Houat, d'une superficie de 288 ha, est une île qui culmine à 42 m d'altitude au niveau de l'ancien fort mais qui se présente sous la forme d'un plateau dont l'altitude est voisine de 25 m d'altitude.

Il s'agit d'une île essentiellement granitique (Illustration 39), avec quelques roches métamorphiques (micaschistes au nord du bourg) et des sables et cordons dunaires. On n'y recense aucun cours d'eau pérenne mais seulement quelques zones humides.

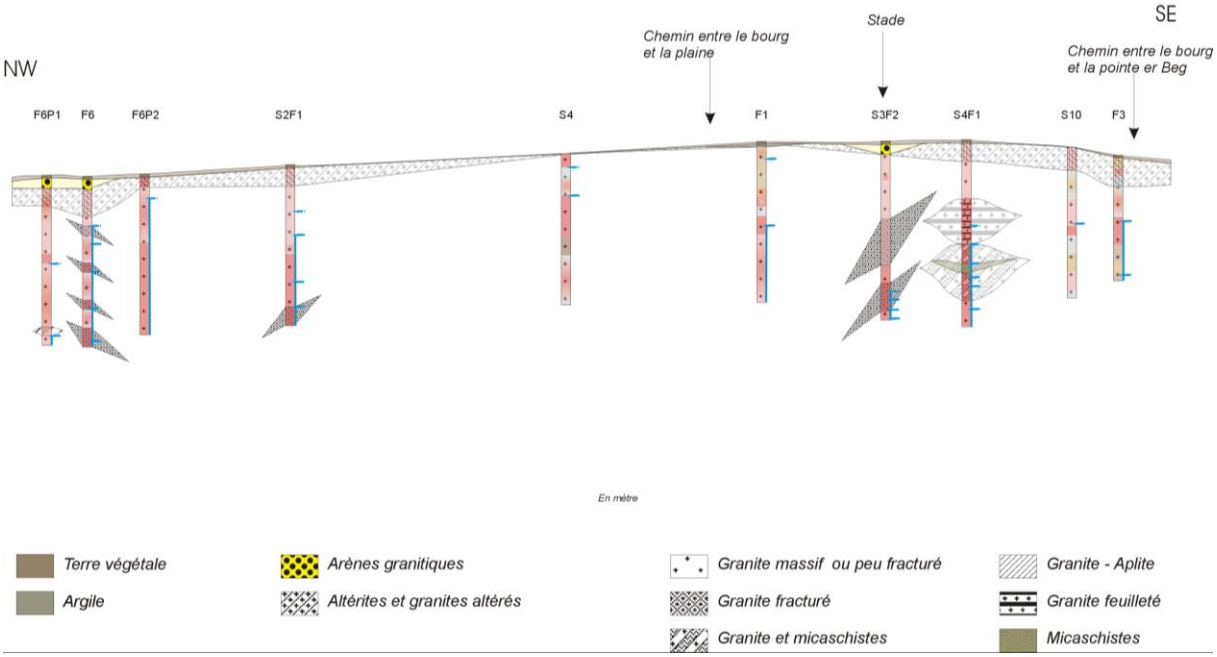


Illustration 39 : Coupe géologique schématique de la zone Nord de l'île d'Houat (SOGREAH, 2004)

L'alimentation en eau potable de l'île était assurée à partir d'un puits, d'une usine de dessalement et de captages superficiels dans les années 1980, puis à partir 1989 l'alimentation en eau potable est uniquement assurée par des forages.

Trois campagnes piézométriques ont été réalisées par SOGREAH : fin de basses eaux en novembre 2002 (Illustration 40), hautes eaux en février 2003 et début de basses eaux en juillet 2003. Les cartes piézométriques interpolées montrent des niveaux hétérogènes, avec un écoulement gobal des eaux souterraines des points hauts au centre de l'île vers le littoral, et avec un battement annuel de 1 à 3 m selon les secteurs. En hautes eaux, certains forages sont artésiens (F1 et F2). D'autres campagnes piézométiques ont été réalisées en novembre 2009 et mars 2010 (SOGREAH, 2011).

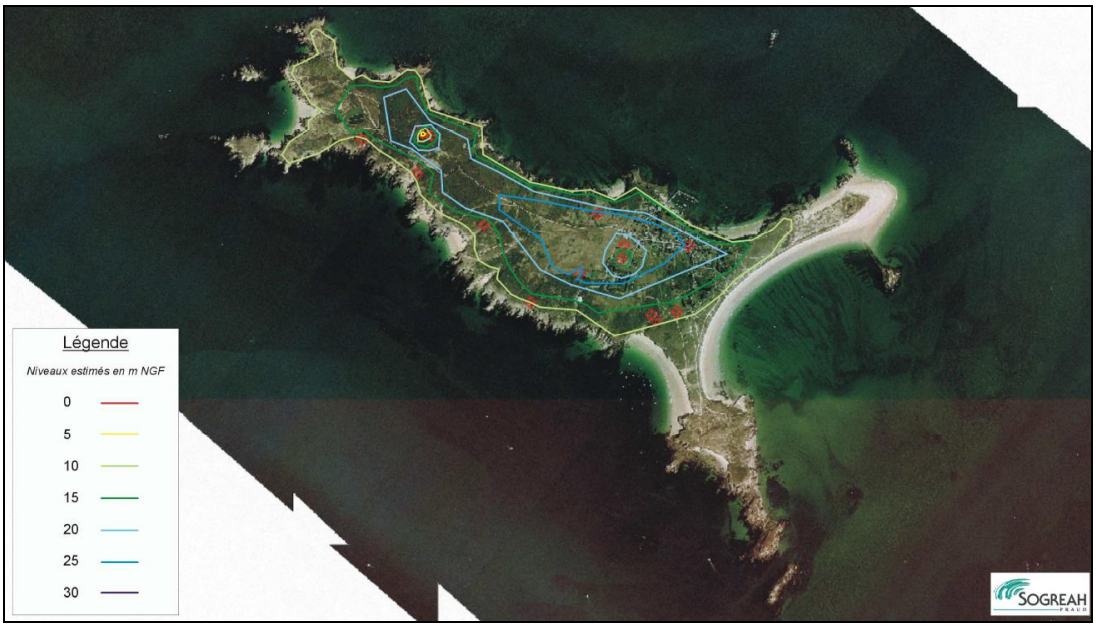


Illustration 40 : Carte piézométrique basses eaux de novembre 2002 (SOGREAH, 2004)

Des campagnes de mesures physico-chimiques *in situ* (température et conductivité) et de prélèvements à plusieurs profondeurs ont été menées en basses eaux (novembre 2002) puis en hautes eaux (février 2003). Elles ont montré des teneurs élevées en chlorures dans les eaux souterraines (Illustration 41) (supérieures à 60 mg/L et parfois supérieures à 200 mg/L) et des conductivités également élevées (supérieures à 700 µS/cm et pouvant atteindre 3 000 µS/cm) dans ce type de contexte aquifère. Certains forages présentent également des teneurs excessives en fer et en manganèse. Les forages les plus salés ne sont pas forcément les plus proches du littoral : l'exploitation par pompage a pu entrainer la remontée du biseau salé sur des forages situés à l'intérieur de l'île (exemple : forage F5P1). On note cependant un gradient eau douce / eau saumâtre de l'intérieur de l'île vers le littoral, avec un gradient plus fort sur la côte nord que sur la côte sud, lié à la charge piézométrique.

Les concentrations moyennes en chlorures et les conductivités sont plus faibles dans les eaux superficielles mais sont nettement supérieures à la concentration de référence en chlorures pour les eaux pluviales (3 mg/L), car elles sont sous l'influence des embruns océaniques.

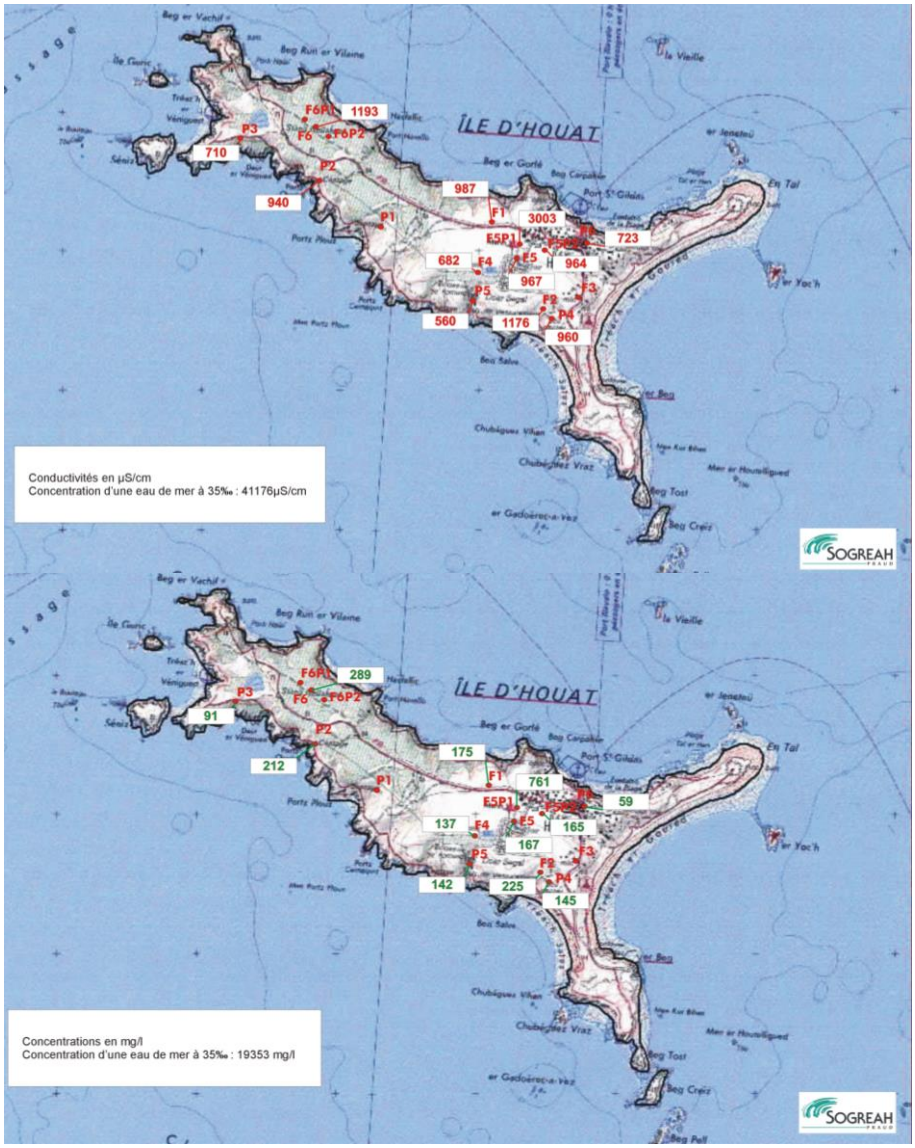


Illustration 41 : Répartition des moyennes de conductivité (en haut) et des concentrations en chlorures (en bas) mesurées en 2002-2003 (SOGREAH, 2004)

Des diagraphies de conductivité (Illustration 42Illustration 42 : Diagraphies de conductivité réalisées en basses eaux dans les forages F2, F5 et F6 de l'île d'Houat (SOGREAH, 2004)) ont été réalisées dans 3 forages exploités pour l'eau potable (F2, F5 et F6) en novembre 2002 (fin de basses eaux) et en février 2003 (hautes eaux) : elles ont montré une forte conductivité pour les 3 ouvrages (supérieure à 800 µS/cm) par rapport au contexte local, et une augmentation de la conductivité en profondeur (conductivité supérieure à 1 000 µS/cm), à des altitudes variables selon les forages (de 2,85 m NGF pour F2 à -24 m NGF pour F6) et uniquement en basses eaux pour F2. Les prélèvements réalisés dans les forages à différentes profondeurs ont également montré une augmentation de la concentration en chlorures, en sulfates et de la conductivité avec la profondeur. On constate donc une stratification des eaux souterraines sous l'île d'Houat, avec des eaux douces à légèrement saumâtre à faible profondeur et des eaux saumâtres à plus grande profondeur.

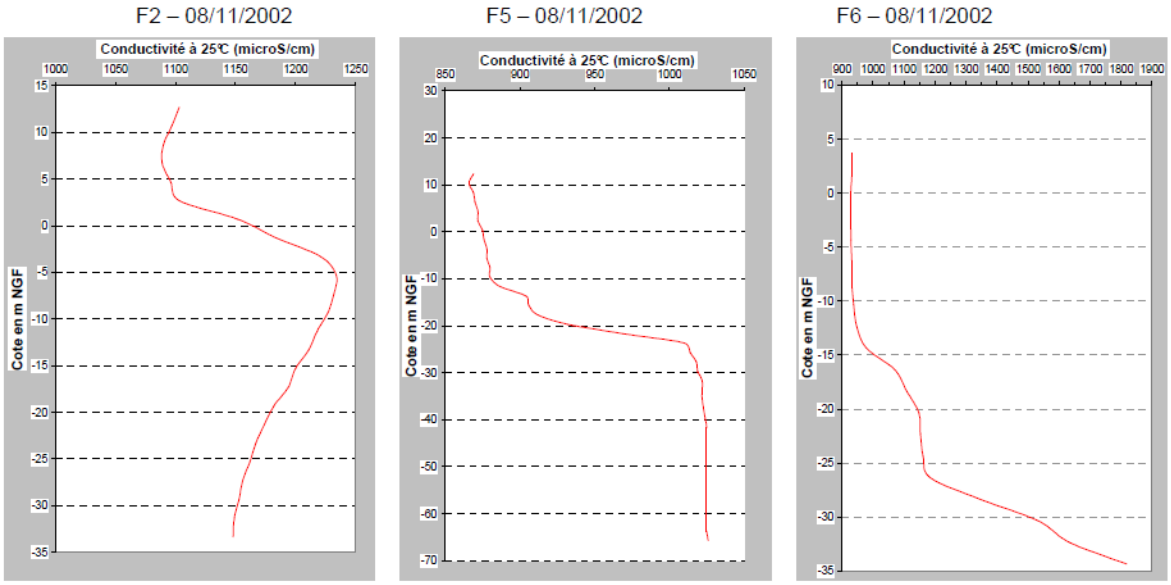


Illustration 42 : Diagraphies de conductivité réalisées en basses eaux dans les forages F2, F5 et F6 de l'île d'Houat (SOGREAH, 2004)

Les arrivées d'eau situées entre 5 et -5 m NGF ont une salinité qui varie fortement dans le temps. SOGREAH indique qu'il ne s'agit pas forcément de variations saisonnières mais qu'elles sont peut-être liées à des cycles plus courts comme les marées (l'installation d'une sonde de mesure en continu de la conductivité et du niveau piézométrique permettrait de le confirmer). Les arrivées d'eau situées aux alentours des cotes -20 à -25 m NGF ont une faible salinité en hautes eaux qui augmente légèrement en basses eaux. En dessous de -30 m NGF les arrivées d'eau sont franchement saumâtres (salinité supérieure à 1 g/L) mais la salinité est plus faible en hautes eaux qu'en basses eaux, l'eau douce repoussant l'eau salée.

Un modèle hydrogéologique 3D a été construit par SOGREAH (2004), avec 4 couches (roches de socle, altérites, niveaux fracturés, eaux marines) dont la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques sont connues partiellement (en certains points où des essais de pompage ont été réalisés) ou estimées, afin d'étudier des scénarios d'exploitation de la nappe (optimisation de l'exploitation des ouvrages existants, mise en exploitation d'un ou deux forages supplémentaires).

Afin de pérenniser l'exploitation, SOGREAH (2004) a conseillé de limiter les débits d'exploitation des différents forages (voire même l'arrêt des forages les plus sensibles aux intrusions salines en basses eaux), d'augmenter les capacités de stockage et de réaliser une nouvelle campagne de recherche en eau. Il a également été préconisé de suivre en continu le niveau piézométrique dans les ouvrages et de mesurer la conductivité une fois par mois.

Hoëdic

L'île d'Hoëdic, d'une superficie de 208 ha, est une île relativement plate, à la topographie peu élevée (point culminant à 22 m d'altitude), contrairement à Houat.

Il s'agit d'une île essentiellement granitique avec quelques enclaves de micaschistes et de gneiss, recouverte presque entièrement par des sables dunaires, ne comportant pas de cours d'eau pérenne. Une zone humide est présente au sud-ouest de l'île.

L'alimentation en eau potable de l'île était assurée par des puits jusqu'à 1989 puis par 2 forages (F2 et F5 - Illustration 43).

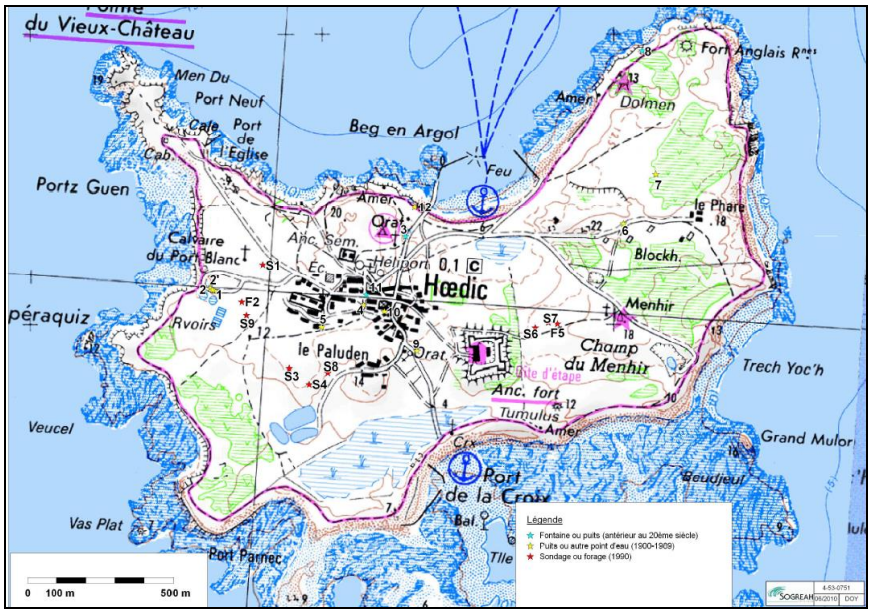


Illustration 43 : Localisation des principaux points d'eau sur Hoëdic sur fond de carte IGN (SOGREAH, 2011)

Des campagnes de diagraphies (conductivité, température et potentiel rédox), prélèvements d'eau ont été réalisées sur l'île d'Hoëdic par SOGREAH en octobre 2009 et février 2010, ainsi que des essais de pompages longue durée fin 2009.

La piézométrie (Illustration 44) suit globalement la topographie et la nappe est proche de la surface du sol. Le niveau de la nappe atteint le niveau marin au nord-ouest de l'île, probablement sous l'influence des pompages sur F2.

Illustration 44 : Piézométrie estimée en basses eaux sur l'île d'Hoëdic d'après les mesures du 30 octobre 2009 (SOGREAH, 2011)

L'eau des forages F2 et F5 présente une minéralisation moyenne (F2 – 630 µS/cm) à forte (F5 – conductivité supérieure à 1 100 µS/cm), avec de fortes teneurs en chlorures (supérieures à 200 mg/L), notamment sur F5. L'eau des 2 captages est mélangée dans des bâches, ce qui permet d'obtenir une qualité d'eau conforme à la réglementation. L'exploitation du forage F5 a été limitée depuis 2009 afin de limiter les intrusions salines. La conductivité tend à augmenter avec la profondeur.

Le secteur du forage F2 semble moins sensible aux intrusions salines que F5, bien que le niveau piézométrique soit plus proche du niveau de la mer dans le secteur de F2. Le forage F5 capte des eaux plus profondes et plus salées.

Un modèle hydrogéologique 3D a été construit par ARTELIA (2012), avec le logiciel FEFLOW, avec 3 couches (altérites, granite et niveaux fracturés), afin d'étudier des scénarios d'exploitation de la nappe.

L'essentiel de la consommation d'eau ayant lieu entre mai et août sur les îles d'Houat et Hoëdic, il est effectivement nécessaire de pouvoir stocker l'eau afin de répartir les prélèvements au cours de l'année et maintenir les niveaux d'eau au-dessus de la cote 0 m NGF. Il faut pouvoir optimiser les capacités de production pour répondre aux besoins tout en maintenant la qualité de l'eau (en évitant d'attirer le biseau salé). C'est pourquoi un forage supplémentaire a été réalisé sur chacune des îles afin de pérenniser l'exploitation des eaux souterraines.

Eau du Morbihan a également installé une sonde de mesure en continu de la piézométrie et de la conductivité sur chacun des forages exploités sur les 2 îles. Le niveau piézométrique des forages d'Hoëdic est nettement influencé par les marées (oscillations journalières dépendantes des coefficients de marée).

3.2. IDENTIFICATION, COLLECTE ET ANALYSE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DISPONIBLES

L'objectif est de créer une base des données des cas recensés de forages ayant recoupé de l'eau salée dans la zone d'étude.

En Bretagne, les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines varient le plus souvent entre 20 et 40 mg/L. Sur le littoral, ces teneurs sont généralement plus élevées. La conductivité est généralement comprise entre 100 et 400 µS/cm. On considère que sur le littoral breton, la valeur d'alerte pour la conductivité est de 500 µS/cm (cf. Plaquette « Forages en milieu littoral », février 2012) et qu'il faut arrêter la foration à partir de 800 µS/cm. A noter que la conductivité reflète la minéralisation totale de l'eau et qu'elle n'est pas seulement liée à la salinité.

Hors évaporites, l'ion chlorure n'est pas affecté par les interactions eau-roche et sa concentration dans les eaux souterraines n'est modifiée que par des phénomènes de mélange.

Afin d'évaluer un possible phénomène de salinisation des eaux la valeur seule d'une concentration en chlorure ou d'une conductivité n'est pas suffisante. Il est nécessaire de disposer d'une chronique et/ou de pouvoir repositionner le point de prélèvement dans un contexte géochimique.

De nombreuses analyses physico-chimiques des eaux souterraines sont disponibles dans la d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines ADES (http://www.ades.eaufrance.fr/) sur

les qualitomètres bretons. Il s'agit essentiellement de forages destinés à l'alimentation en eau potable, dont une partie est située dans la zone d'étude. Or de nombreux autres ouvrages captent de l'eau souterraine sur la frange littorale, pour des usages agricoles notamment, mais les analyses physico-chimiques réalisées sur ces ouvrages ne sont pas collectées et facilement disponibles. L'étude de ces données ponctuelles ou des chroniques de chlorures et de conductivité sur ces ouvrages permettraient de mieux identifier les secteurs touchés par les intrusions salines en Bretagne. Un des objectifs du projet a donc été de collecter ces données auprès de différents organismes.

3.2.1. Collecte des données disponibles auprès des acteurs de l'eau bretons

Un courrier présentant le projet et le recensement des données (Annexe 1), accompagné d'un tableau permettant de renseigner les données disponibles, a été envoyé par mail à 140 destinataires le 12/01/2017 (services de l'Etat, collectivités, syndicats d'eau, animateurs de SAGE et de bassins versants, foreurs, bureaux d'études, laboratoires d'analyses, …), avec une relance par mail le 12/05/2017.

Une actualité a également été publiée le 19/12/2016 sur le site internet SIGES Bretagne afin de présenter l'étude et d'inciter les organismes possédant des données intéressantes à transmettre ces informations au BRGM.

Les laboratoires d'analyses n'étant pas propriétaires des résultats, ils n'ont pas pu transmettre de données dans le cadre de cette étude.

22 réponses ont été reçues (Annexe 2), dont seulement 13 avec des données disponibles (chroniques de conductivité et/ou de chlorures, autres analyses physico-chimiques, rapports, couches SIG). Les données collectées ont permis d'initier la constitution d'une base de données des cas de contamination aux intrusions salines avérés ou suspectés.

Quelques cas de forages sensibles aux intrusions salines ont pu être mis en évidence grâce aux données collectées :

- forage de Kerenneur à Plourin (29) – cf. 3.1.3 ;
- 3 forages sur l'île Molène (29), avec une conductivité à 25°C de 1030 µS/cm sur le mélange des 3 forages et une teneur en chlorures de 161 mg/L lors des analyses réalisées en 2006 (données ponctuelles, pas de chronique disponible sur ADES) ;
- forages des îles de Houat et Hoëdic (56) - cf. 3.1.3 ;
- forage du golf de Saint Briac sur Mer (35), avec une conductivité en augmentation, atteignant 1 200 µS/cm en 2017 (données ponctuelles).

Par ailleurs, l'Etablissement Public de gestion et d'Aménagement de la Baie de Douarnenez (EPAB) a transmis les analyses réalisées sur son réseau de suivi de la qualité des eaux très développé (33 qualitomètres suivis : 1 forage, 22 résurgences et 10 ruisseaux). Les conductivités mesurées lors des deux campagnes de 2016 sont inférieures à 600 µS/cm sur l'ensemble des points de suivis. La Baie de Douarnenez semble donc épargnée par les intrusions salines.

3.2.2. Collecte des données disponibles auprès de la profession agricole sur le territoire du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo

Un questionnaire produit conjointement par le SYNTEC, Guingamp-Paimpol Agglomération, le BRGM, le SAGE Argoat-Trégor-Goëlo, le Syndicat Mixte Jaudy-Guindy-Bizien (SMJGB) et

le Syndicat mixte Environnemental du Goëlo et de l'Argoat (SMEGA), présenté en Annexe 3, a été envoyé par l'Union des Coopératives de Paimpol et Tréguier (UCPT) auprès des 500 exploitants agricoles exerçant sur une des 35 communes de la zone littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo (questionnaire établi également pour le projet ADRESSAGE[2] mené par le BRGM en parallèle de cette présente étude - Illustration 45). Un article a été publié dans la presse locale et deux réunions d'information ont été conduites les 1er et 8 juin 2017 à Camlez et Paimpol.

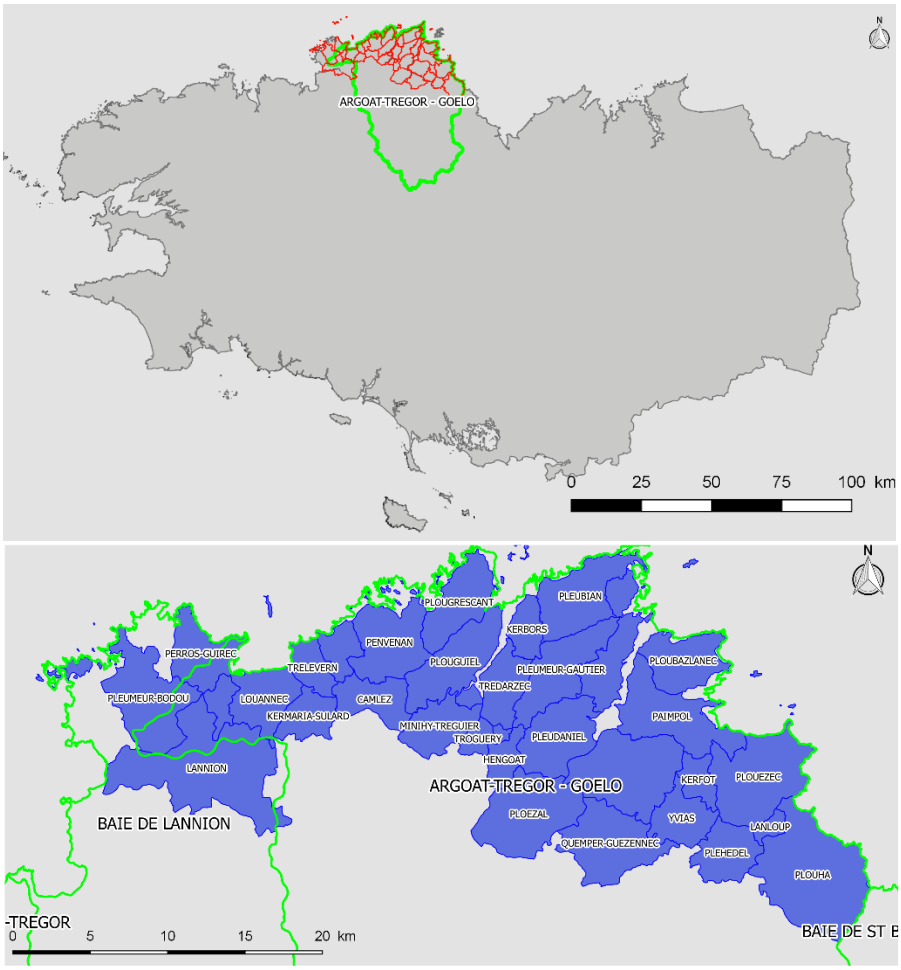


Illustration 45 : Localisation du secteur concerné pour l'envoi des questionnaires

La démarche participative de collecte d'informations par questionnaires a donné lieu à des réponses de 27 exploitations concernant 37 forages. Le taux de remplissage des questionnaires est assez hétérogène et rend donc une partie des réponses difficiles à exploiter. Toutefois, le nombre de réponses montre un intérêt d'une partie de la profession à obtenir une meilleure compréhension et gestion de la ressource en eau souterraine disponible. On note aussi pour une majorité des exploitants des réponses positives pour mettre à disposition les données disponibles, notamment chimiques, dans le cadre du projet. Les données fournies doivent contractuellement rester anonymes.

[2] ADRESSAGE : récolte et Analyse des Données Relatives aux prélèvements d'Eau Souterraine (quantité et qualité) des Serristes/irrigants travaillant sur la zone littorale du SAGE Argoat Trégor Goëlo. Conseils et préconisations pour une Gestion durable de la ressource en Eau souterraine. Rapport BRGM/RP-68709-FR.

En raison de l'anonymisation des données, le positionnement exact des points de prélèvement n'est pas connu pour la réalisation de cette étude. L'UCPT se réserve le droit de communiquer les informations liées aux exploitations. Des informations provenant de 10 exploitations ont été communiquées. Le laboratoire réalisant les analyses pour le compte des exploitants n'a accepté de fournir les données que sous demande directe des exploitants. De ce fait, l'ensemble des données n'a pas pu être collecté au cours de cette étude.

Ces questionnaires ont été dépouillés dans le cadre du projet ADRESSAGE. Les données fournies permettent d'observer l'évolution de la qualité des eaux souterraines pour certaines exploitations. L'Illustration 46 présente l'évolution de la conductivité électrique de l'eau au cours du temps pour les 10 exploitations sur lesquelles les données disponibles.

On observe sur ces chroniques une tendance générale à la hausse, sauf au niveau des exploitations G et S, où les concentrations initiales sont les plus faibles. Sur l'exploitation Q, la dernière valeur de conductivité (> 3 000 µS/cm) n'a pas été prise en compte. Ce comportement est un indicateur fort d'une salinisation des aquifères, la conductivité électrique étant généralement contrôlée par la présence de chlorures dans le contexte hydrogéologique breton.

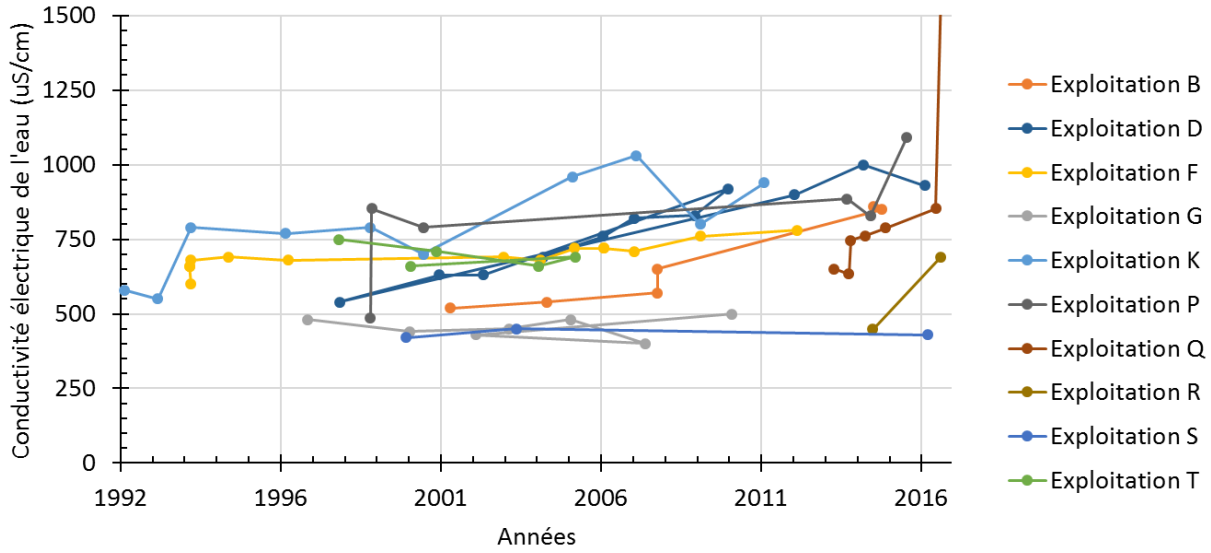


Illustration 46 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau de 10 exploitations agricoles situées sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo (rapport BRGM/RP-68709-FR)

Afin de préciser ces comportements, les évolutions des concentrations en chlorures et sodium ont été analysées ainsi que le rapport Cl^-/Na^+ pour chacune des exploitations. Les graphiques suivants présentent les évolutions des concentrations en chlorures (Cl^-) et sodium (Na^+) ainsi que l'évolution du rapport Cl^-/Na^+. Une augmentation concomitante des concentrations en Cl et Na dont le rapport Cl^-/Na^+ tend vers 1.79 (rapport massique théorique de l'eau de mer) indique une salinisation des eaux probablement due à une augmentation de l'intrusion saline.

L'Illustration 47 présente 4 exemples de chroniques :

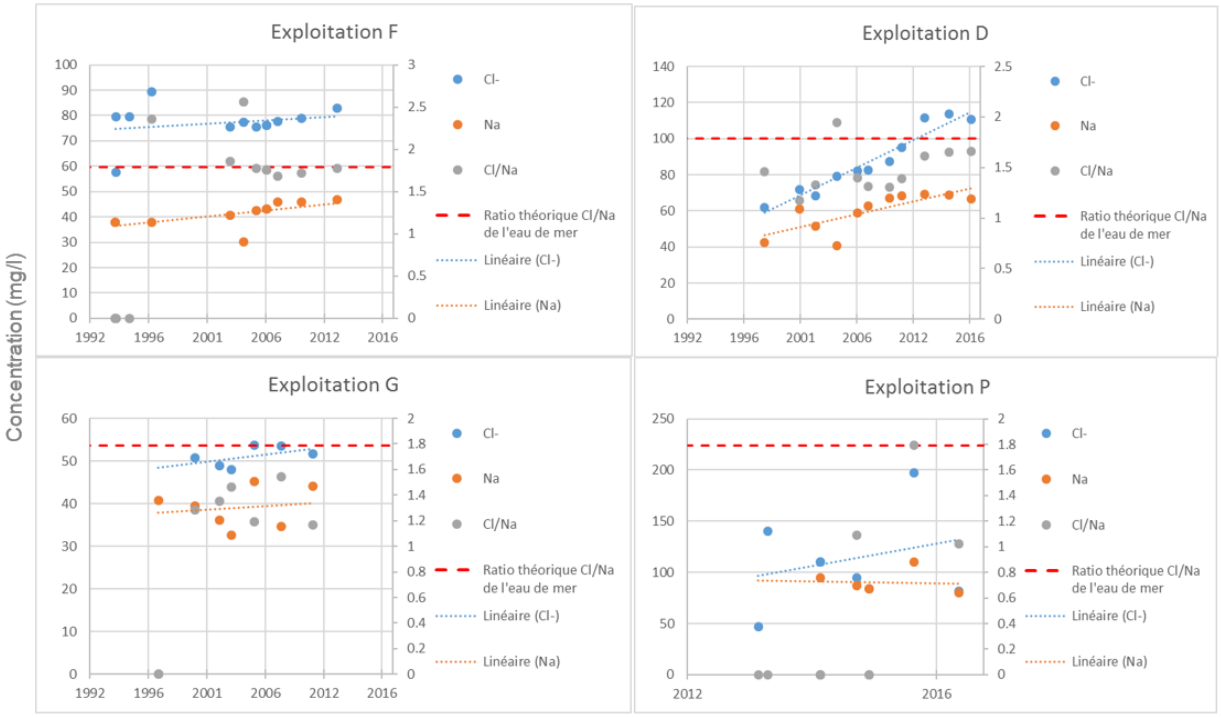


Illustration 47 : Chroniques des concentrations en chlorures (bleu), sodium (orange) dont les concentrations (mg/l) sont lisibles sur l'axe de gauche et ratio Cl^-/Na^+ (en gris ; échelle sur l'axe de droite) (rapport BRGM/RP-68709-FR)

Sur ces exemples, la chronique de l'exploitation F montre clairement une salinisation lente des eaux souterraines par de l'eau de mer, avec une augmentation dans les mêmes proportions de chlorures et sodium suivant un ratio de 1.8. Pour l'exploitation D, les augmentations identiques de chlorures et sodium à des concentrations relativement importantes montrent une salinisation. Le fait que le ratio ne soit pas exactement de 1.8 ne permet pas d'affirmer qu'il s'agit de l'eau de mer bien que cela soit probable. Pour l'exploitation G, les faibles concentrations, leurs tendances peu marquées et un ratio très inférieur à 1.8 n'indique pas de salinisation. La dernière exploitation P possède des concentrations élevées mais les ratios ainsi que les dynamiques n'indiquent pas une augmentation de la salinisation. Cette chronique est toutefois particulièrement courte.

Sur les 10 chroniques analysées, 5 présentent des évidences de salinisation des eaux souterraines. Pour les autres, les chroniques de concentrations ne sont souvent pas assez complètes pour mettre en évidence ce phénomène.

La comparaison des profondeurs de pompes en fonction de l'altitude de l'ouvrage (Illustration 48a) montre que plus de la moitié des pompes sont situées sous ou juste au-dessus du niveau de la mer. Cette position induit de fait un risque de générer une remontée du biseau salé. De plus, comme le montre l'Illustration 48b les pompes situées sous le niveau de la mer sont principalement localisées à proximité du trait de côte, la côte piézométrique devant être assez basse, ce qui amplifie ce risque d'intrusion.

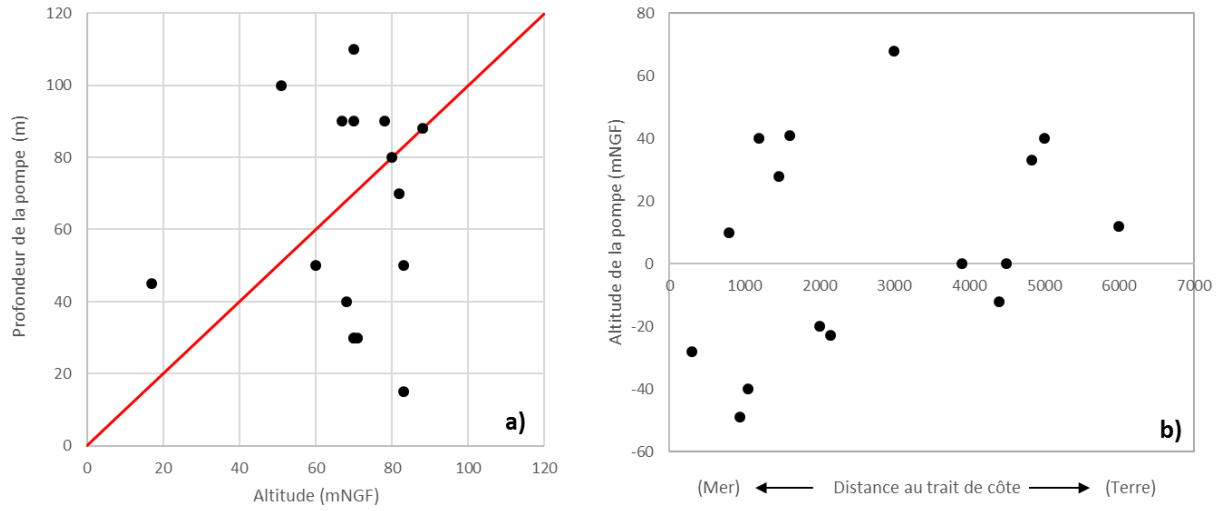


Illustration 48: a) Positions des pompes en fonction de l'altitude et b) profondeur des pompes en fonction de la distance à la côte (rapport BRGM/RP-68709-FR)

Bien que la présence d'eaux salines fossiles en profondeur ne puisse être exclue (Armandine Les Landes *et al.*, 2015) tout comme des anomalies ponctuelles, la salinisation en cours est plus vraisemblablement due à une remontée du biseau salé actuel (Boisson, 2019). Ce phénomène est en augmentation et les pompages liés aux serres semblent être un facteur majeur de cette évolution. Les effets de cette intrusion saline semblent être visibles jusqu'à plusieurs kilomètres dans les terres indiquant un phénomène de grande ampleur. Les données actuelles sont cependant insuffisantes pour pouvoir quantifier (remontées locales ou biseau salé généralisé) et prévoir l'évolution du phénomène.

Cette collecte de données sur un territoire restreint (35 communes) a permis de recenser des chroniques intéressantes, qui n'étaient pas disponibles dans les bases de données nationales (ADES) et de pouvoir évaluer le phénomène de salinisation. Cependant, il s'agit d'une tâche chronophage ne pouvant pas être étendue à l'ensemble de la région.

3.2.3. Conclusion sur la collecte des données

Les données récoltées dans le cadre de ce projet et du projet ADRESSAGE sont synthétisées sur l'Illustration 49.

Certains secteurs apparaissent comme étant sensibles au phénomène d'intrusions salines :

- îles (Molène, Houat, Hoëdic, Groix),
- baie du Mont Saint Michel,
- secteur de Saint-Malo – Cancale,
- Trégor-Goëlo (secteur de Paimpol à Plougrescant pouvant être ciblé comme secteur test pour la phase 2 de cette présente étude),
- côte nord du Finistère,

- presqu'île de Quiberon.

A l'inverse, les suivis effectués par l'Etablissement Public de Gestion et d'Aménagement de la baie de Douarnenez (EPAB) ne font pas apparaitre de valeurs de chlorures ou de conductivité élevées.

Enfin, certains secteurs ne peuvent être caractérisés faute de données disponibles (golfe du Morbihan, côte sud du Finistère).

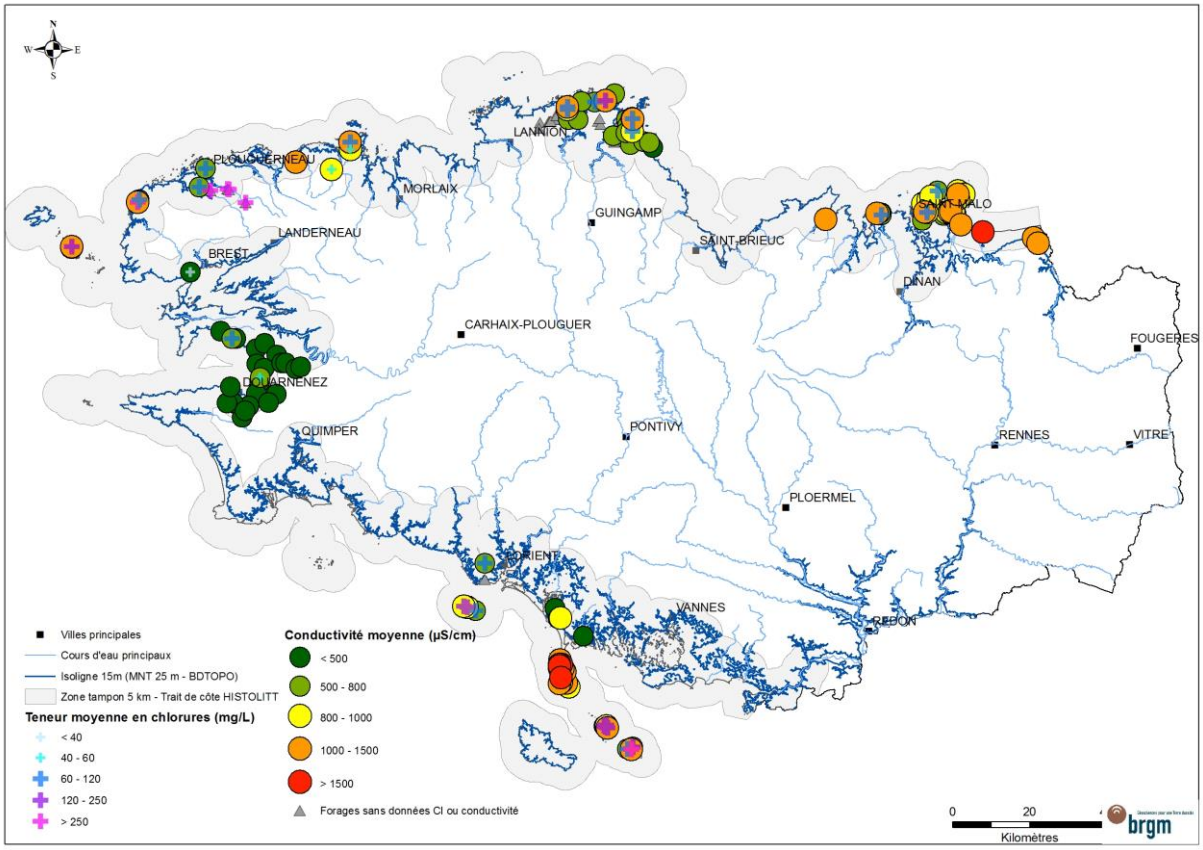


Illustration 49 : Données récoltées dans le cadre du projet « Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines »

3.2.4. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines

Extraction des analyses sur les qualitomètres dans ADES

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 en janvier 2016 sur l'ensemble de la Bretagne pour 19 paramètres (pH, conductivité, O_2, Eh, ions majeurs, Fe, Mn, F, B, SiO_2 dissous), ce qui représente 106 658 analyses collectées, réparties sur 751 qualitomètres.

Les données de 114 qualitomètres ayant pour seul producteur de données la DRIRE Bretagne ont été supprimées car ces 1 911 analyses correspondent au suivi d'installations classées et ne reflètent pas la qualité naturelle des eaux souterraines.

Pour les analyses retenues, les producteurs de données sont l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'ARS (base de données SISE-Eaux).

La base des données a fait l'objet d'un nettoyage (suppression des analyses avec qualification incorrectes (code qualification = 2), suppression des doublons, homogénéisation

des unités, correction des résultats nuls (résultat corrigé par la limite de quantification ou de détection si renseignées, sinon analyse supprimée), suppressions des données aberrantes, ex : pH > 10). La balance ionique a été calculée quand les données le permettaient (4 707 analyses). Seules les analyses dont la balance ionique est comprise dans l'intervalle [-10% ; 10%] ont été conservées (soit 4 632 analyses, sur 470 qualitomètres). Parmi ces 470 qualitomètres, 107 sont situés dans la zone d'étude.

Comparaison des données régionales et sur la zone d'étude

Afin d'exploiter cette base de données, des statistiques descriptives (concentrations minimales, maximales, moyennes, médianes, percentile 10 et percentile 90) ont été calculées pour les paramètres conductivité, chlorures, sodium et sulfates sur l'ensemble de la région et à l'échelle de la zone d'étude (Illustration 50).

Un croisement avec la carte géologique harmonisée au 1/50 000 a ensuite été réalisé afin d'attribuer une lithologie aux qualitomètres. Les lithologies retenues sont :

- Alluvions
- Schistes et grès paléozoïques
- Grès et quartzites paléozoïques
- Briovérien sédimentaire
- Plutonique
- Métamorphique (sens large : micaschistes, migmatites)
- Amphibolites
- Volcanique
- Bassins sédimentaires récents
- Dunes
- Absence d'informations (lorsque le qualitomètre est localisé sur des formations superficielles telles que des colluvions, des loess, …)

Il s'agit d'un croisement géographique (réalisé sur SIG), les coupes des qualitomètres n'ont pas été vérifiées. L'attribution de la nature « Bassins sédimentaires récents » a été effectuée à partir du rattachement existant des qualitomètres aux entités BD LISA sédimentaires.

	Zone d'étude	Percentile 10	Percentile 90	Mediane	Moyenne	Minimum	Maximum
Conductivité (µS/cm)	Bretagne	119	717	245	604	22	51 600
	Frange littorale	196	1 251	403	1 478	50	51 600
Chlorures (mg/L)	Bretagne	18	61	31.9	40.9	3	914
	Frange littorale	25	100	42	57.3	9.2	914
Sodium (mg/L)	Bretagne	11	37.1	19.1	22.3	3.2	133
	Frange littorale	5.35	72.8	28.75	126.8	0.25	72 600
Sulfates (mg/L)	Bretagne	3.4	65.8	16.5		29.3	1 600
	Frange littorale	7.3	71	25.1	32.8	1	191

Illustration 50 : Statistiques descriptives sur les paramètres et conductivité (µS/cm), chlorures (mg/L), sodium (mg/L) et sulfates (mg/L)

Le percentile 90 des teneurs en chlorures est de 61 mg/L sur l'ensemble de la région. Pour la conductivité, il est de 717 µS/cm. Il s'agit de valeurs conformes aux références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine de 250 mg/L pour les chlorures et de

1 100 µS/cm pour la conductivité à 25°C (arrêté du 11 janvier 2007), on n'observe donc pas de problèmes majeurs sur la plus grande partie du territoire breton.

On constate néanmoins que les valeurs de chlorures et de conductivité sont plus élevées sur la frange littorale sur le reste de la région (Illustration 51). C'est également le cas pour le sodium et les sulfates. L'augmentation des chlorures sur la zone d'étude est probablement liée en grande partie aux apports météoriques plus riches en chlorures (embruns), mais aussi aux mélanges avec l'eau de mer ancienne ou actuelle.

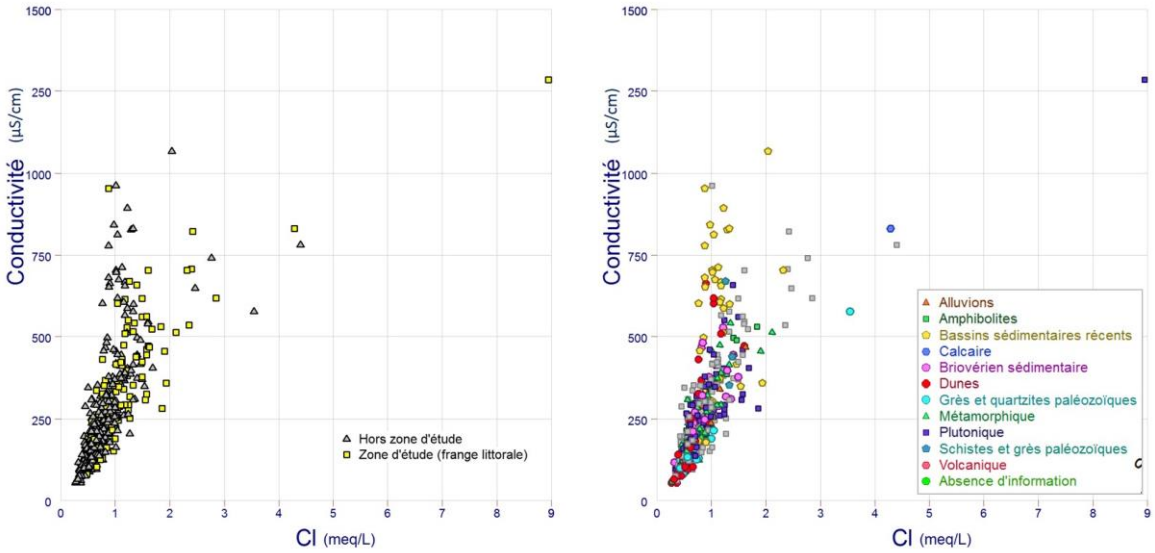


Illustration 51 : Diagramme de la conductivité en fonction des concentrations en chlorures (mg/L) par localisation (à gauche : en Bretagne et dans la zone d'étude (frange littorale)) et par lithologie (à droite)

249 analyses de chlorures sont supérieures à 60 mg/L (percentile 90 des mesures disponibles dans ADES sur la région) et concernent 31 qualitomètres, dont 21 sont situés dans la zone d'étude (Illustration 52).

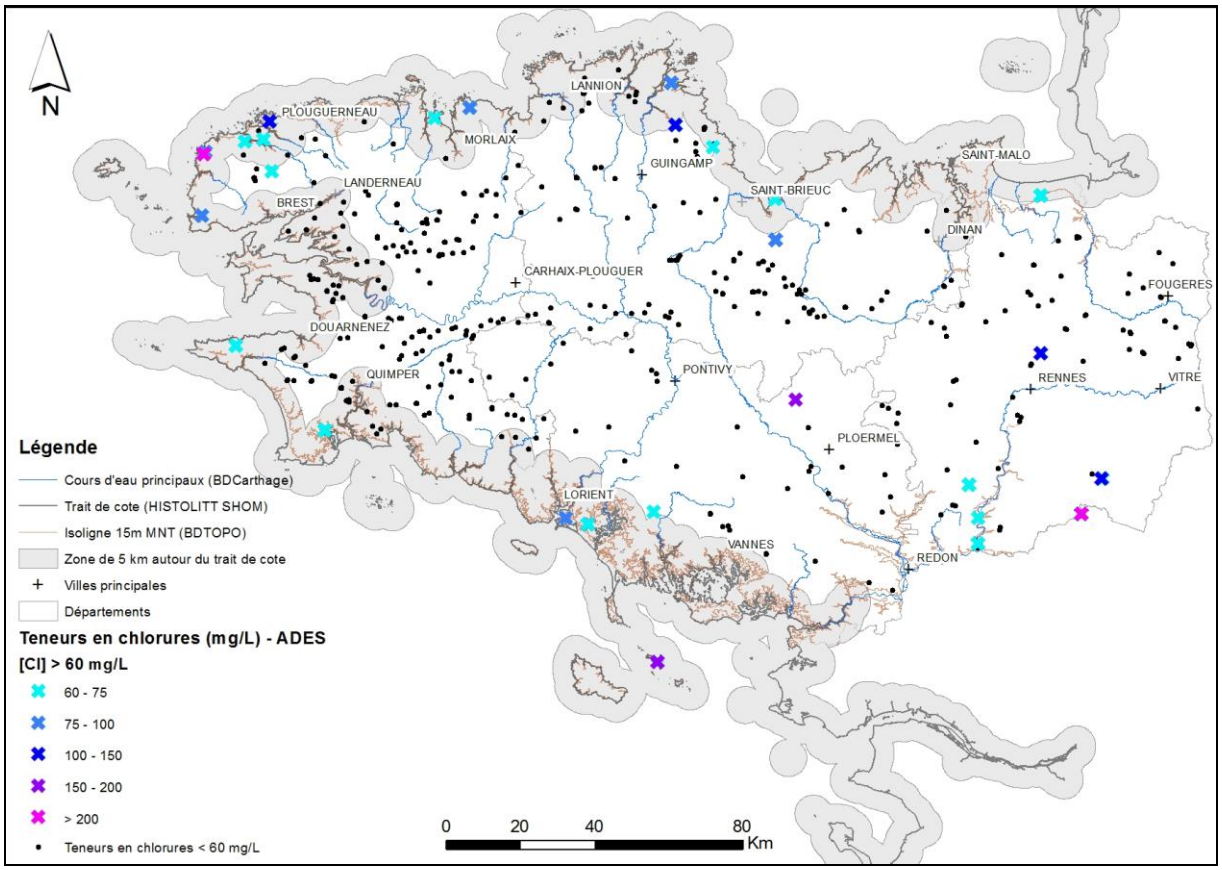


Illustration 52 : Localisation des qualitomètres ayant des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L

253 mesures de conductivité sont supérieures à 717 µS/cm (percentile 90 des mesures disponibles dans ADES sur la région) et concernent 26 qualitomètres, dont 8 sont situés dans la zone d'étude (Illustration 53).

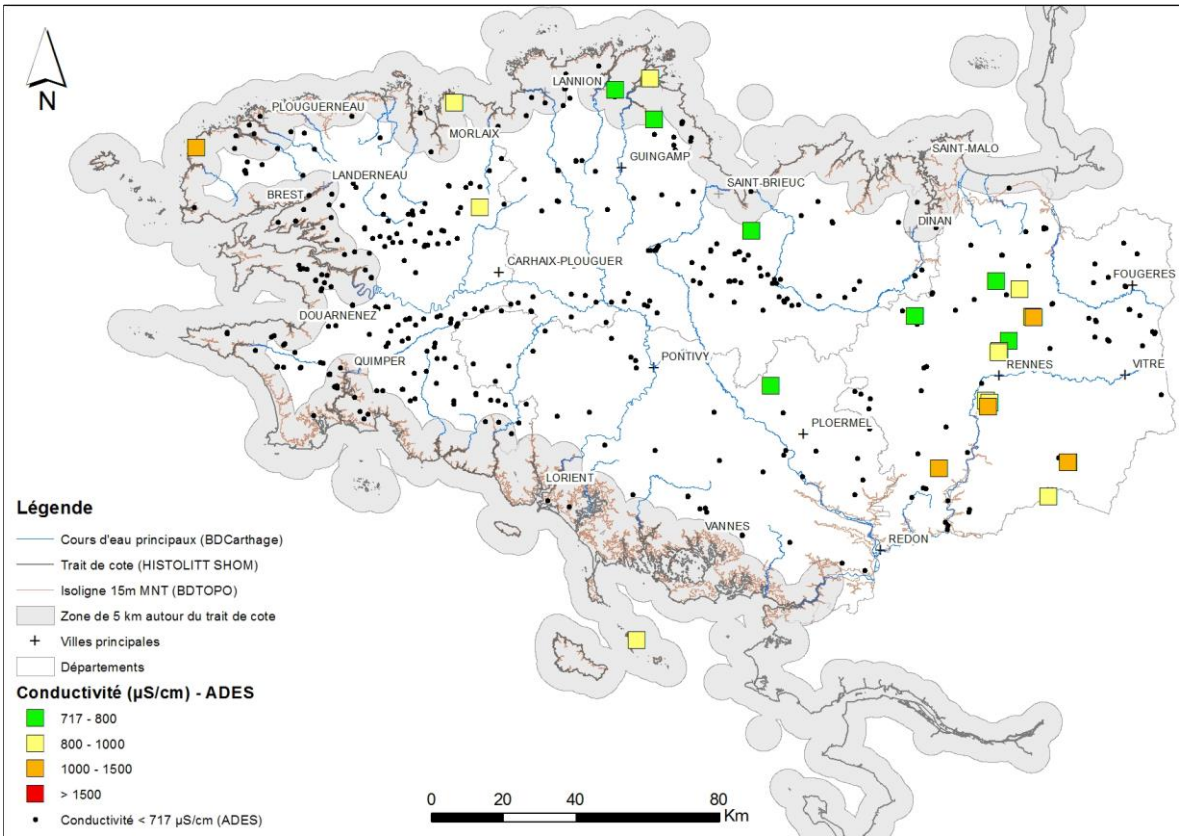


Illustration 53 : Localisation des qualitomètres ayant des valeurs de conductivité supérieures à 717 µS/cm

13 qualitomètres présentent des analyses avec à la fois des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et une conductivité supérieure à 717 µS/cm, dont seulement 6 sont situées dans la zone d'étude (Illustration 54). Ces valeurs, bien qu'inférieures aux références de qualité, paraissent donc anormalement élevées en contexte de socle.

Code BSS	Département	Commune	Libellé	Nature	Profondeur (m)	Altitude (m)
01716X0028/HY	22	PAIMPOL	TRAOU SCAVEN - RQ N.77	source	3	37
02047X0067/FE20	22	LANLEFF	PONT CARIOU	forage	100	26
02047X0068/FE19	22	LANLEFF	PONT CARIOU	forage	118	30
02026X0028/F1	29	PLOUGASNOU	KER FUNTUN - SA PRIMEL	puits		62
02374X0016/F1	29	PLOURIN	KERENNEUR	forage	97	19
04478X0003/P1	56	ILE-D'HOUAT	SALUS PUITS	puits	5	18

Illustration 54 : Qualitomètres situés dans la zone d'étude sur lesquels la conductivité et les teneurs en chlorures sont supérieures aux percentiles 90 des mesures disponibles dans ADES sur la région

Caractérisation hydrochimique

- **Faciès chimique**

Le diagramme de Piper (Illustration 55) permet de mettre en évidence les faciès chimiques des eaux des différents aquifères en fonction de la dominance des anions et cations.

Dans ce graphique, la médiane des concentrations par qualitomètre et par paramètre a été représentée.

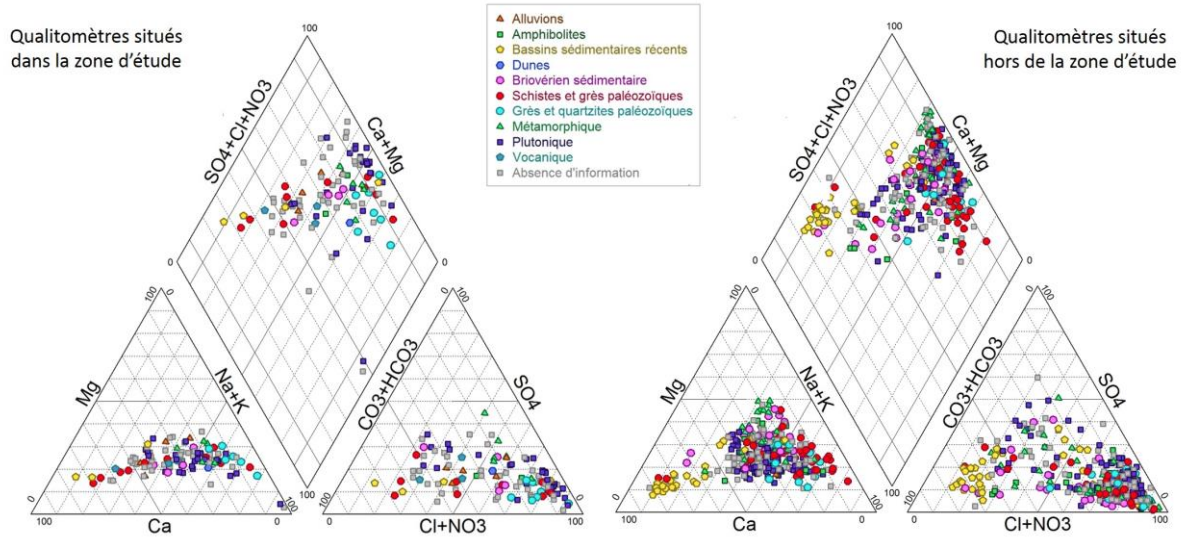


Illustration 55 : Représentation des qualitomètres classés par lithologie dans deux diagrammes de Piper (à gauche : qualitomètres situés dans la zone d'étude ; à droite : qualitomètres situés hors de la zone d'étude)

Les qualitomètres situés dans les formations sédimentaires récentes (en jaune sur l'Illustration 55) se distinguent nettement des qualitomètres captant les formations de socle. Ils présentent une chimie dominée par les ions calcium et bicarbonates (faciès bicarbonaté-calcique). Dans le pôle anions, le pourcentage de chlorures est faible (20 à 40 %) par rapport aux bicarbonates. Dans le pôle cations, le pourcentage de calcium est compris entre 55 et 80 %.

Les eaux contenues dans les différentes formations de socle ne présentent pas un faciès bien circonscrit. Les qualitomètres présentent un faciès chloruré et nitraté, plutôt sodique et potassique (Illustration 50), ce qui confirme la vulnérabilité des aquifères aux pollutions anthropiques (nitrates).

Les qualitomètres de la zone d'étude ne présentent pas de faciès particulier

- **Vulnérabilité aux pollutions anthropiques**

A l'état naturel, les concentrations en nitrates sont faibles (quelques mg/L au maximum) dans les eaux souterraines. On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg/L traduit un apport anthropique. Les sources anthropiques de nitrates sont nombreuses et sont essentiellement liées au lessivage des engrais et aux rejets domestiques et industriels. Dans les eaux souterraines, les chlorures peuvent également provenir de contamination d'origine agricole (cf. chapitre 2.1.3). C'est pourquoi il est intéressant d'étudier en parallèle les teneurs en nitrates et en chlorures afin de mettre en évidence une éventuelle origine agricole des chlorures sur certains qualitomètres (Illustration 56).

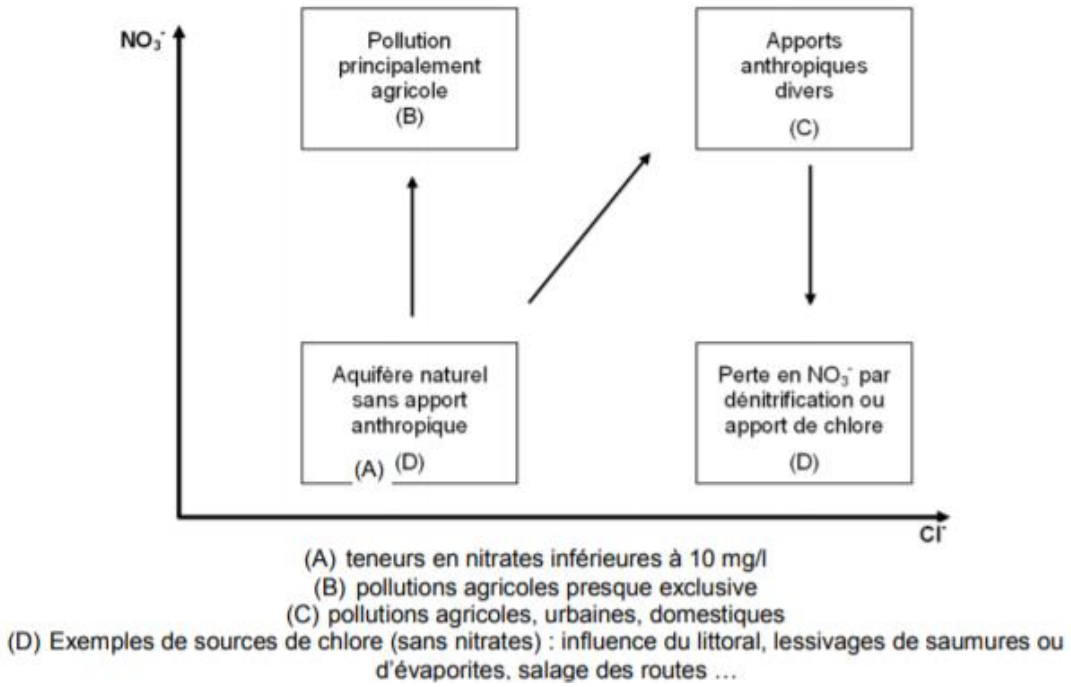


Illustration 56 : Diagramme corrélant deux indicateurs d'apports anthropiques (nitrates versus Chlorures) [Gourcy et Petelet-Giraud (2011)]

De nombreux qualitomètres bretons présentent des teneurs en nitrates élevées (médiane = 28 mg/L), parfois supérieures à la norme de potabilité de 50 mg/L.

D'après le graphique représentant les concentrations en fer en fonction des teneurs nitrates (Illustration 57), quelques points montrent de fortes teneurs en fer pour des concentrations en nitrates inférieures à 20 mg/L : un processus de dénitrification pourrait être en jeu. Cependant, les faibles teneurs en nitrates (< 20 mg/L) ne correspondent pas systématiquement à de fortes teneurs en fer. Quelques points révèlent de faibles teneurs en nitrates et en fer mais fortes en chlorures (Illustration 58) : ces chlorures ne seraient pas liés à une activité anthropique d'origine agricole.

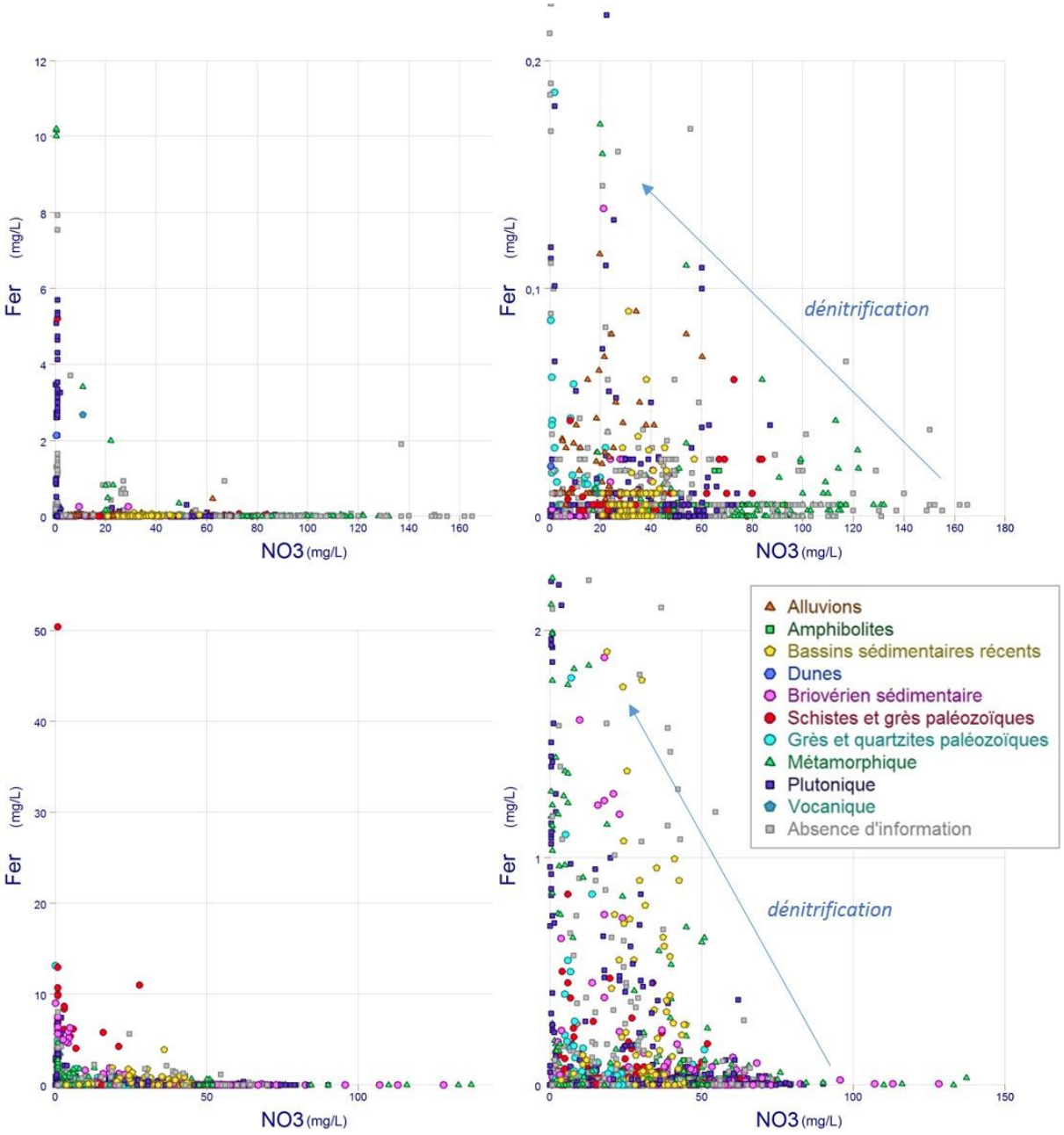


Illustration 57 : Diagrammes fer versus nitrates(en mg/L) par lithologie
En haut : dans la zone d'étude ; en bas : hors zone d'étude ; à droite : zoom

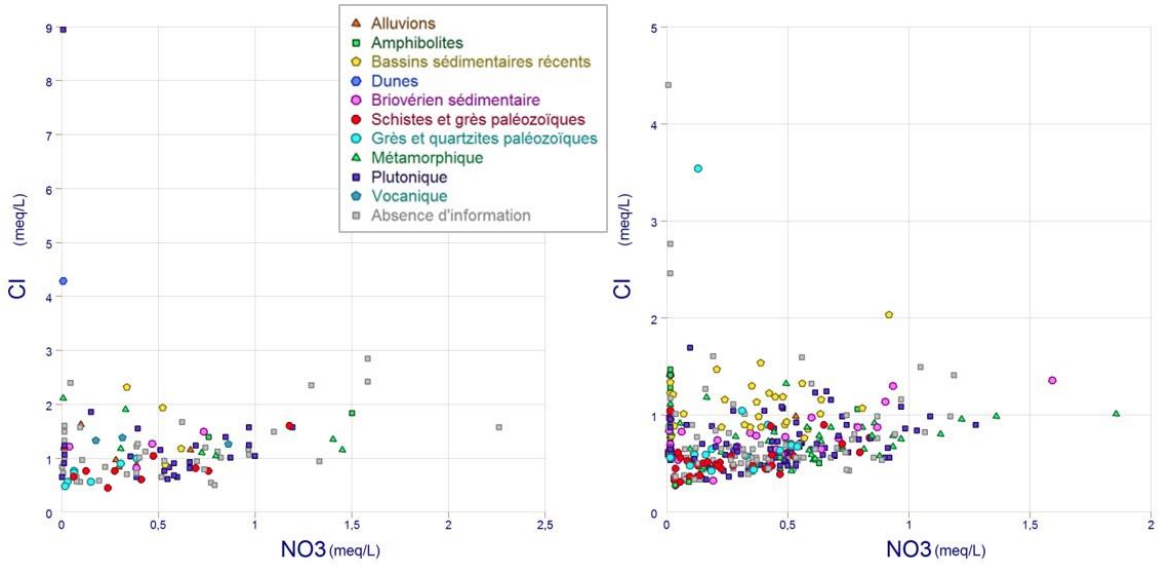


Illustration 58 : Diagramme des ions chlorures versus les ions nitrates (en meq/L) dans les principales formations géologiques de Bretagne
A gauche : dans la zone d'étude ; à droite : hors zone d'étude

D'après les deux illustrations ci-dessus, on observe que :

- L'apport agricole peut être matérialisé par une augmentation conjointe des teneurs en nitrates et chlorures.

- Certains points ayant des faibles teneurs en nitrates et de fortes teneurs en chlorures pourraient s'expliquer par un apport agricole mais en zone de dénitrification (fortes valeurs de fer et faibles teneurs en nitrates).

- Pour certains qualitomètres, les faibles teneurs en nitrates et les fortes teneurs en chlorures ne sont pas concomitantes avec de fortes teneurs en fer. Les fortes teneurs en chlorures (en l'absence de nitrates) ne semblent donc pas liées à l'activité anthropique mais à d'autres processus (mélange avec de l'eau de mer ancienne ou actuelle).

- **Processus de salinisation**

Les analyses des points d'eau présentent des salinités très inférieures à l'eau de mer (Illustration 59). Les chlorures, éléments conservatifs, sont souvent utilisés comme référentiel. Les éléments sodium et chlorures permettent d'identifier la salinisation des aquifères.

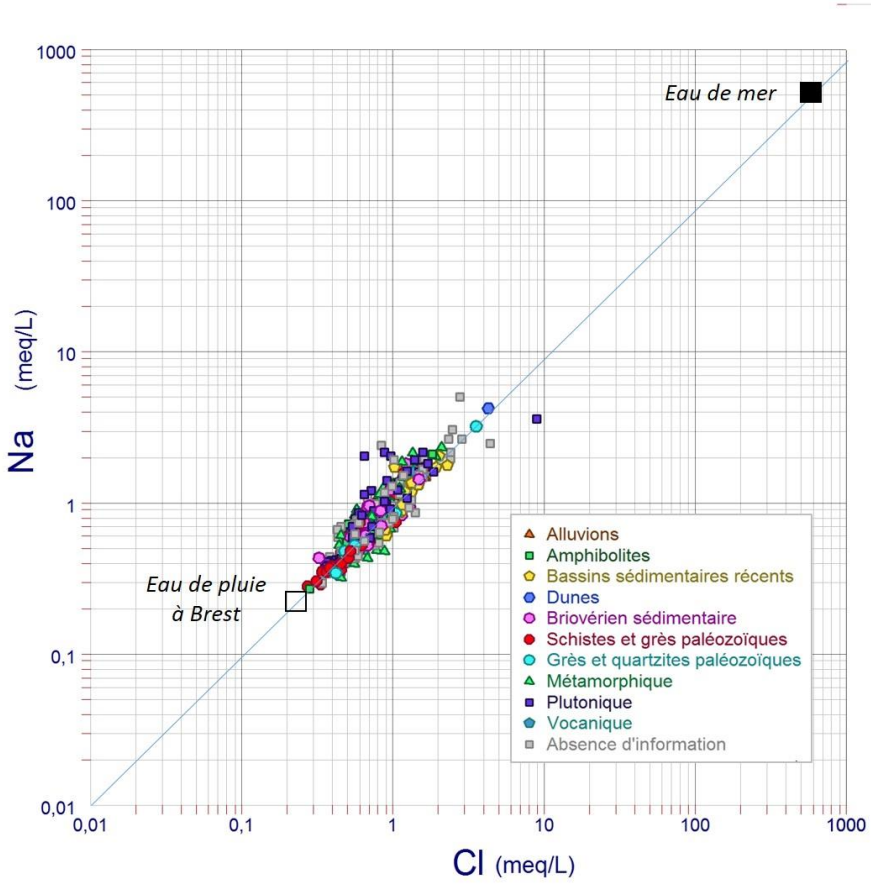


Illustration 59 : Diagramme sodium versus chlorures (meq/L) par lithologie sur l'ensemble des qualitomètres bretons (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer)

Les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines dépassent la norme de potabilité (200 mg/L) sur 14 qualitomètres.

Par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (Illustration 60) :

- la plupart des qualitomètres présentent des eaux enrichies en sodium, indiquant la domination des interactions eau-roche ;
- aucun pôle par lithologie n'apparait clairement ;
- deux points se distinguent nettement dans la zone d'étude :
    - le qualitomètre 04478X0003/P1 se rapproche de la droite de dilution de l'eau de mer avec des teneurs très élevées en sodium et en chlorures : il s'agit du puits de Salus sur l'île d'Houat implanté dans les sables dunaires
    - le qualitomètre 02374X0016/F1 s'écarte très nettement de la droite de dilution de l'eau de mer et présente un fort enrichissement en chlorures. Il s'agit du forage de Kerenneur à Plourin (cf. § 3.1.3).

Une teneur en chlorures supérieure à 61 mg/L (percentile 90) 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 (cf. 2.1.3).

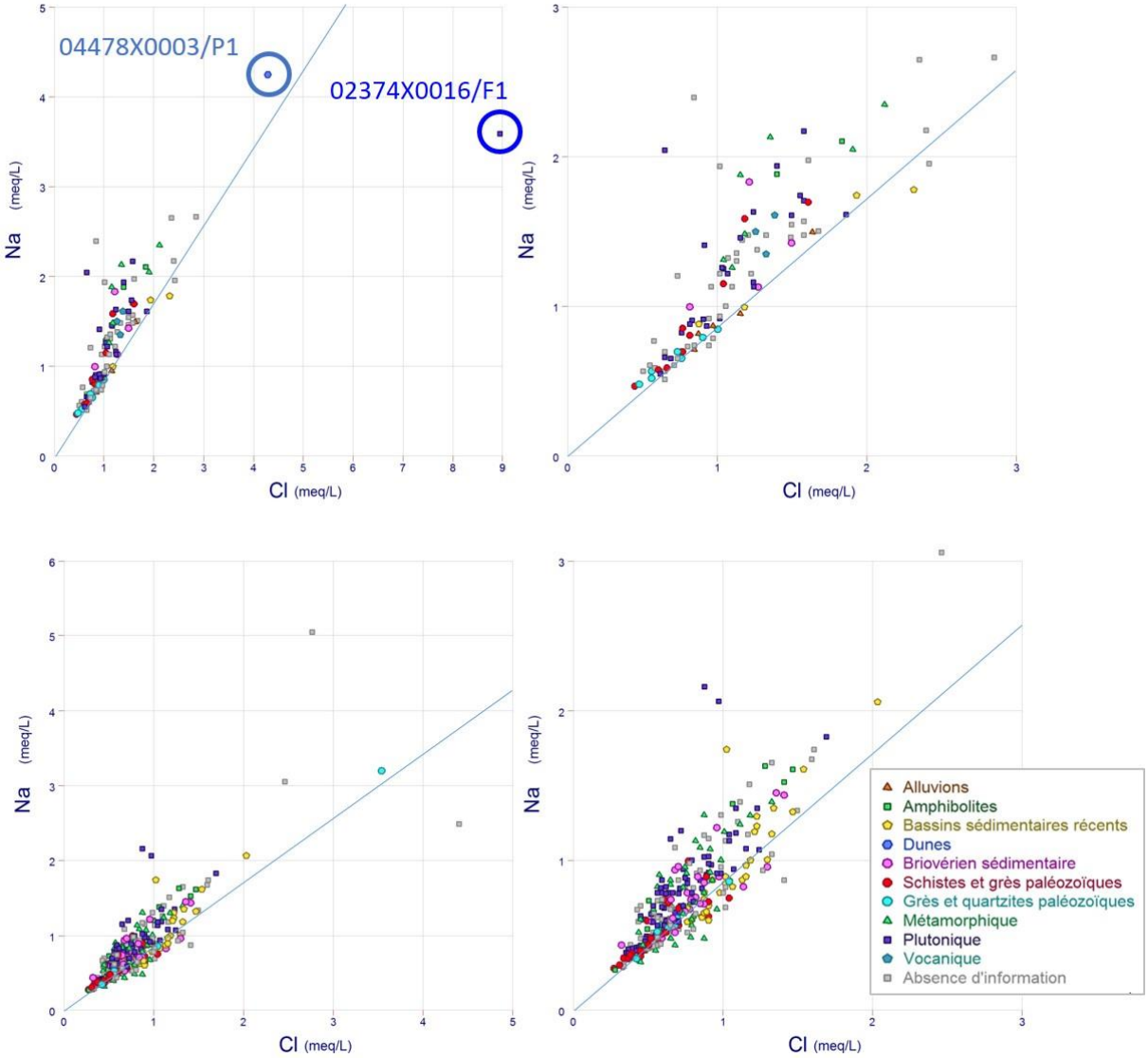


Illustration 60 : Diagrammes sodium versus chlorures (meq/L) par lithologie (en bleu, droite de dilution de l'eau de mer)
En haut : dans la zone d'étude ; en bas : hors zone d'étude ; à droite : zoom

Afin d'évaluer un possible phénomène de salinisation des eaux souterraines, il est nécessaire de disposer d'une chronique de concentration en chlorures et/ou de conductivité. Seules des études géochimiques plus approfondies (analyse des ions majeurs et traces, analyses isotopiques, datation des eaux) peuvent permettre d'identifier les processus en jeu et de mettre en évidence des intrusions salines actuelles.

3.3. IDENTIFICATION DES CAPTAGES AEP POTENTIELLEMENT VULNERABLES AUX INTRUSIONS SALINES

L'objectif est d'identifier de manière simple les captages souterrains (forages, puits, sources) utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) potentiellement vulnérables aux intrusions salines, compte tenu de leur localisation (proximité du littoral), de leur profondeur et de leur altitude.

3.3.1. Pré-sélection des captages potentiellement vulnérables

La méthodologie repose sur l'analyse du référentiel des captages destinés à l'Alimentation en Eau Potable (AEP) disponible sur le site internet ADES[3] (en mode authentifié). Ce référentiel est issu d'un travail de recoupement de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM et de la base SISE-Eaux de l'ARS, mené entre 2010 et 2017. Ces deux bases renseignent notamment sur la géolocalisation des forages, leur altitude, leur profondeur (non systématique). En réalité, ce référentiel ne contient pas uniquement les ouvrages souterrains destinés à l'AEP mais tous les captages souterrains d'Eau Destinée à la Consommation Humaine (EDCH), c'est-à-dire utilisés pour l'eau potable, l'eau conditionnée, les industries agro-alimentaires, … L'ensemble du référentiel a été traité lors de cette étude et pas uniquement les captages AEP.

Un export du référentiel des captages (tout usage, tout état) souterrains bretons a été réalisé à partir d'ADES le 12/04/2017. Cet export comprend 1 142 ouvrages (Illustration 64), dont 856 ouvrages actifs (parmi lesquels on trouve 666 captages pour l'alimentation en eau potable publique actifs).

	Abandonné	Actif	Projet de mise en service	Suspendu avec projet de récupération	**Total**
ACTIVITE AGRO-ALIMENTAIRE	7	142	3	1	**153**
ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	11	36	0	0	**47**
ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	213	666	46	2	**927**
EAU CONDITIONNEE	3	12	0	0	**15**
TOTAL	**234**	**856**	**49**	**3**	**1142**

Illustration 61 : Usage et état des captages AEP bretons au 12/04/2017 (source : ADES)

La sélection des captages souterrains EDCH potentiellement vulnérables a été réalisée en plusieurs étapes :

- Etape 1 : sélection à partir de l'export du référentiel des captages ADES des forages, puits ou sources, EDCH, situés dans une **frange côtière de 10 km** ou dont **l'altitude est inférieure à 15 m NGF** : zone tampon de 10 km autour du trait de côte Histolitt (soit un élargissement de 5 km par rapport à la zone d'étude de la phase 1, par mesure de sécurité), à laquelle ont été ajoutées les zones basses, inférieures à 15 m NGF.
    - *393 ouvrages EDCH sont situés dans la zone d'étude parmi les 1 142 ouvrages EDCH en Bretagne. Parmi ces 393 ouvrages EDCH, 317 sont des captages pour l'alimentation en eau potable publique.*
- Etape 2 : projection de l'altitude du Modèle Numérique de Terrain (MNT 25 m BD Alti IGN) sur les 393 ouvrages et comparaison avec l'altitude indiquée en BSS pour ces ouvrages.
    - *La différence entre l'altitude donnée par le MNT et celle donnée par la BSS est inférieure à 5 m pour 303 ouvrages EDCH.*

[3] Accès aux Données Eaux Souterraines (http://www.ades.eaufrance.fr/)

- *Pour 23 ouvrages, l'altitude n'est pas renseignée en BSS : l'altitude du MNT a été attribuée.*

- *On dénombre 67 ouvrages EDCH pour lesquels la différence entre l'altitude indiquée en BSS et celle donnée par le MNT est supérieure à ± 5 m (5 à 53 m d'écart). Après vérification sur SIG, l'altitude donnée par le MNT a été conservée, étant donné que peu d'ouvrages sont nivelés au moment de leur bancarisation en BSS.*

- Etape 3 : calcul de l'altitude du fond des ouvrages EDCH, à partir de l'altitude de l'ouvrage et de sa profondeur (lorsque celle-ci est renseignée en BSS).

  - *L'altitude du fond de l'ouvrage a pu être calculée sur 194 ouvrages EDCH pour lesquels la profondeur était renseignée.*

  - *On dénombre 199 ouvrages sans profondeur renseignée en BSS. Pour ces ouvrages, les documents disponibles ont été consultés afin de tenter de retrouver leur profondeur. La profondeur des 15 sources non renseignée est nulle et elle a pu être renseignée pour 20 forages supplémentaires.*

  - *Au final, l'altitude du fond de l'ouvrage a donc été calculée pour 229 ouvrages EDCH sur 393.*

- Etape 4 : sélection des captages EDCH dont l'altitude du fond de l'ouvrage se situe sous le niveau de la mer (0 m NGF), puis extension de la sélection aux ouvrages dont l'altitude du fond est supérieure au niveau de la mer et jusqu'à **+ 10 m NGF** (le niveau de la mer est largement supérieur au 0 NGF en Bretagne). Ce tri permet de conserver les ouvrages dont l'altitude du fond de l'ouvrage rend *a priori* improbable une contamination par les eaux marines mais qui pourraient être contaminées en cas de niveaux marins exceptionnellement importants (surcote ou de fortes marées). Cette marge de sécurité permet aussi de s'affranchir d'éventuelles inexactitudes de nivellement et de mesure du fond de l'ouvrage. Les résultats sont les suivants (Illustration 64 et Annexe 4) :

  - *80 ouvrages EDCH sont **non vulnérables** : sources ou puits/forage dont le fond est situé au-dessus de la cote + 10 m NGF,*

  - *119 ouvrages EDCH sont **a priori non vulnérables** : puits sans information sur la profondeur mais situés à une altitude suffisante (>15 m NGF),*

  - *156 ouvrages EDCH sont **potentiellement vulnérables** : fond de l'ouvrage situé en-dessous de la cote + 10 m NGF, dont 117 ouvrages actifs (parmi lesquels 67 forages AEP), 16 abandonnés (dont 11 AEP) et 23 dont la mise en service est projetée (forages AEP)* - Illustration 62 *et* Illustration 63*. Parmi ces 156 ouvrages potentiellement vulnérables, 121 se trouvent dans la zone d'étude la phase 1, c'est-à-dire dans une frange côtière de 5 km ou dont l'altitude est inférieure à 15 m NGF, dont 67 captages AEP actifs ou en projet.*

  - *On dénombre 38 ouvrages EDCH dont la **profondeur est inconnue**, pour lesquels la vulnérabilité aux intrusions salines ne peut être évaluée (altitude de l'ouvrage comprise entre 18 et 101 m NGF).*

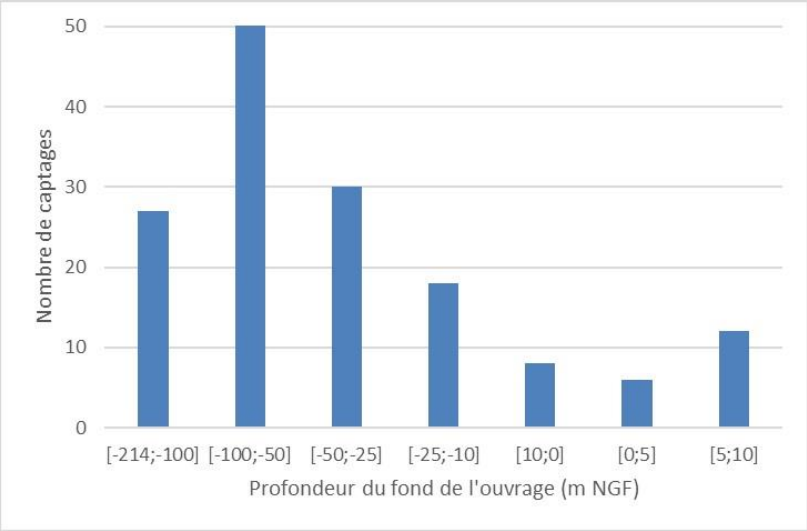


Illustration 62 : Altitude du fond de l'ouvrage des 156 captages EDCH potentiellement vulnérables

Si on considère uniquement les captages à usage AEP, ce traitement a permis de mettre en évidence **101 captages AEP souterrains potentiellement vulnérables aux intrusions salines,** dont 67 actuellement exploités (Etat « actif » dans le référentiel issu d'ADES), 23 en projet de mise en service et 11 abandonnés. **Il faut cependant noter que le traitement réalisé prend des marges de sécurité importantes**, notamment l'éloignement à la côte (10 km) et la cote du fond de l'ouvrage (+ 10 m NGF). Il s'agit donc d'une pré-sélection des captages souterrains potentiellement vulnérables, en vue d'une analyse plus spécifique pour définir la vulnérabilité réelle aux intrusions salines. Il faudrait également tenir compte de la cote piézométrique des ouvrages (selon le principe de Ghyben-Herzberg).

	Etat			
USAGE	**Abandonné**	**Actif**	**Projet de mise en service**	**TOTAL**
ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE		29		**29**
ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	4	14		**18**
ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	11	67	23	**101**
EAU CONDITIONNEE	1	7		**8**
TOTAL	**16**	**117**	**23**	**156**

Illustration 63 : Usage et état des captages EDCH vulnérables

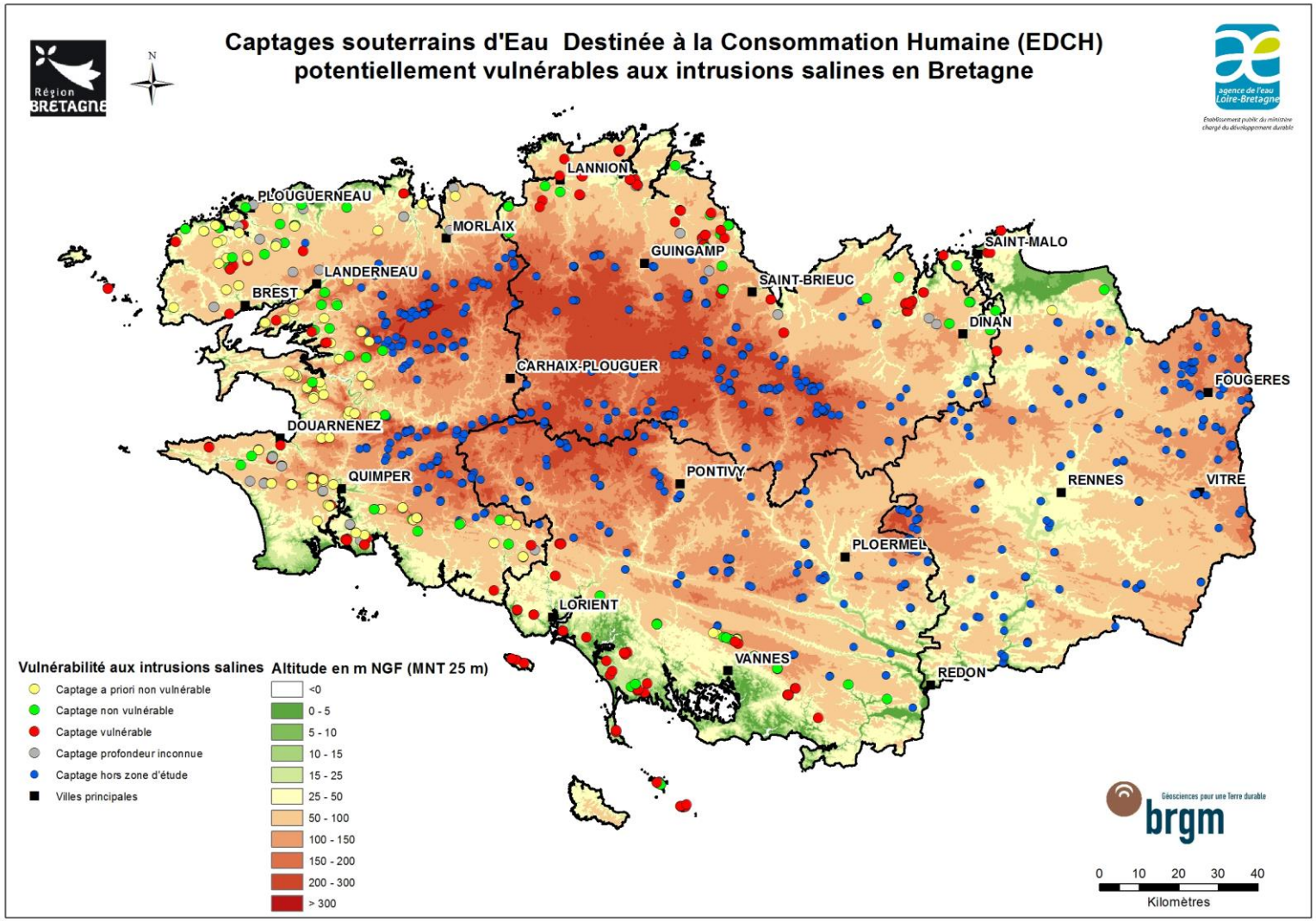


Illustration 64 : Captages souterrains d'Eau Destinée à la Consommation Humaine potentiellement vulnérables aux intrusions salines

3.3.2. Recherche des analyses disponibles sur les ouvrages EDCH potentiellement vulnérables aux intrusions salines

Les analyses chimiques précédemment extraites d'ADES (cf. § 3.2) ont été étudiées pour les forages potentiellement vulnérables, afin de vérifier la présence déjà avérée d'un phénomène d'intrusion saline sur ces ouvrages.

Des analyses sont disponibles dans ADES pour 44 captages potentiellement vulnérables.

Ainsi, 112 captages EDCH potentiellement vulnérables ne disposent pas d'analyses de conductivité et de chlorures dans ADES : la vulnérabilité ne peut donc pas être confirmée ou infirmée par les résultats d'analyses. Il conviendrait de réaliser des analyses sur ces forages afin de vérifier l'absence d'intrusions salines.

Pour 14 captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines avec des analyses disponibles, la conductivité maximale mesurée est supérieure ou égale à 800 µS/cm et/ou la teneur maximale en chlorures est supérieure ou égale à 60 mg/L (Illustration 65 et Illustration 66). 9 de ces captages sont situés sur des îles, plus vulnérables au phénomène d'intrusions salines.

Code BSS	Code SISE-Eaux	Nom installation	Code INSEE	Commune	Profondeur (m)	Altitude (m NGF)	Moyenne conductivité (µS/cm)	Moyenne chlorures (mg/L)
02047X0067/FE20	22001461	PONT CARIOU - FE20	22108	LANLEFF	100	25	676	81
02047X0068/FE19	22001462	PONT CARIOU - FE19	22108	LANLEFF	118	25	551	72
02374X0016/F1	29000068	KERENNEUR	29109	LANDUNVEZ	97	19	1284	315
02437X0090/F2	22000990	CARNIVET (FORAGE)	22258	QUESSOY	60	62	722	99
02731X0018/P	29000020	MOLENE 2	29084	ILE-MOLENE	9	8	897	/
03838X0022/P3	56000397	PONT ARROC'H (PUITS G)	56193	RIANTEC	24	6	704	82
04152X0002/S2-1	56000676	KERMOUZOUET (FORAGE)	56069	GROIX	52	27	759	107
04152X0010/S5-1	56000734	KERDURAND GROIX (FORAGE)	56069	GROIX	49	33	920	151
04478X0001/F	56000544	HOUAT (FORAGE NORD - F1)	56086	ILE-D'HOUAT	52	30	699	135
04478X0002/F	56000543	HOUAT (SALUS FORAGE - F2)	56086	ILE-D'HOUAT	58	18	1060	234
04478X0004/F	56001010	HOUAT (FORAGE BACHE - F4)	56086	ILE-D'HOUAT	55	29	658	133
04774X0001/P1	56000401	HOEDIC (PUITS P1)	56085	HŒDIC	3.1	11	944	202
04774X0003/F2	56000403	HOEDIC (FORAGE F2)	56085	HŒDIC	11	11	660	115
04781X0001/F5	56000404	HOEDIC (FORAGE F5)	56085	HŒDIC	13	15	1138	280

Illustration 65 : Captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines avec des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et/ou des conductivités supérieures à 800 µS/cm (en rouge) – source : ADES

Les chroniques de chlorures et de conductivité issues d'ADES de ces 14 captages sont présentées en Annexe 5. Hormis le forage de Kerenneur, aucune chronique ne présente de tendance à la hausse. 4 captages présentent des chroniques de conductivité et de nitrates assez stables et 3 captages montrent même des évolutions à la baisse (Pont Cariou FE20, Kermouzouet et Houat F1). Aucune tendance ne se dégage pour les 7 autres captages. Comme évoqué précédemment (3.1.3), le forage de Kerenneur semble touché par une intrusion d'eau salée mais des analyses complémentaires seraient nécessaires pour identifier l'origine du phénomène. Concernant les autres captages AEP, malgré les fortes teneurs en chlorures et la conductivité élevée pour ce contexte géologique, l'absence d'augmentation des valeurs de ces paramètres dans le temps ne permet pas de conclure qu'une contamination par des intrusions salines récentes est avérée sur les autres captages.

Les autres captages AEP vulnérables ne disposant pas d'analyses à l'heure actuelle mériteraient d'être étudiés plus précisément (réalisation d'analyses physico-chimiques ou a minima suivi de la conductivité).

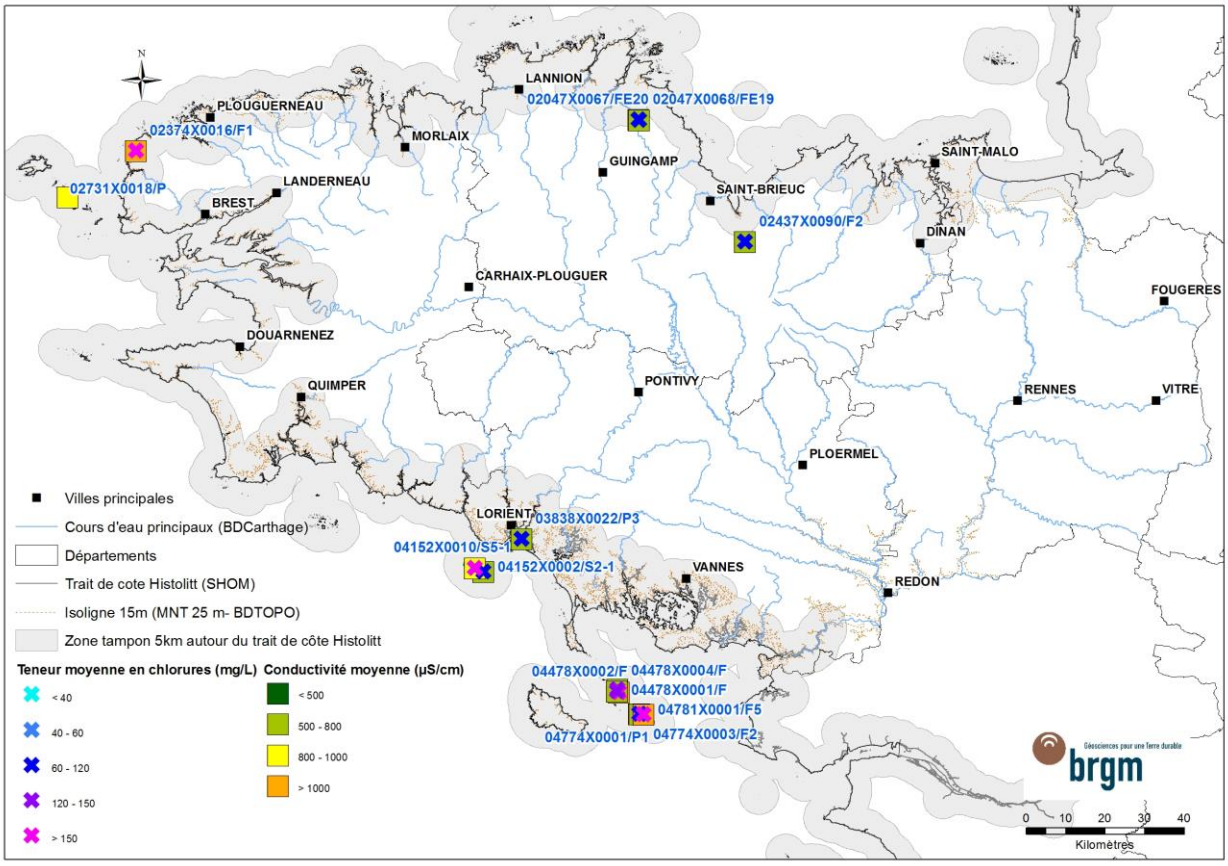


Illustration 66 : Localisation des captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines avec des teneurs en chlorures supérieures à 60 mg/L et/ou des conductivités supérieures à 800 µS/cm (analyses disponibles dans ADES)

3.3.3. Exploitation des ouvrages potentiellement vulnérables

Il était initialement prévu que les exploitants des forages AEP potentiellement vulnérables soient contactés afin de mettre en évidence d'éventuelles difficultés d'exploitation liées aux intrusions salines et d'identifier des forages ayant été réellement contaminés voire abandonnés.

Compte-tenu du nombre élevé de captages potentiellement vulnérables, il n'y a pas eu d'entretiens téléphoniques avec les exploitants. La liste des captages potentiellement vulnérables a été transmises aux syndicats départementaux (Syndicat Départemental d'Alimentation en Eau Potable des Côtes d'Armor, Conseil Départemental du Finistère, Syndicat Mixte de Gestion pour l'approvisionnement en eau potable d'Ille-et-Vilaine, Eau du Morbihan) ainsi qu'aux 4 délégations départementales de l'ARS.

Plusieurs forages nécessitent effectivement des adaptations du mode d'exploitation afin de garantir la distribution d'une eau de bonne qualité (teneur en chlorures inférieures à 250 mg/L et conductivité à 25°C inférieure à 1 100 µS/cm d'après l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine). L'un des moyens fréquemment utilisé pour l'utilisation AEP d'eau dépassant ces valeurs est la dilution avec des ressources de meilleure qualité (eau de surface ou autres forages non contaminés). Il faut noter que peu de captages dépassent l'un des 2 critères fixés par l'arrêté (forage de Kerenneur à Plourin et forage F5 à Hoëdic).

Eau du Morbihan a transmis au BRGM des informations sur l'exploitation des forages de Houat et Hoëdic, concernés par le biseau salé (cf. 3.1.3). Les forages de Hoëdic sont en pompage quasi-continu et s'avèrent sensibles à la marée (variations du niveau piézométrique en lien avec les marées et les coefficients).

Les délégations des ARS 29, 35 et 56 ont fourni au BRGM les analyses disponibles sur les captages d'adduction collective publique (AEP) et privée (campings et industries agro-alimentaires) connus pour avoir une sensibilité aux intrusions salines.

L'ensemble des données récoltées a été intégré aux cartes au 1/100 000 présentées en Annexe 6.

Les captages des campings du Morbihan identifiés comme vulnérables dans le cadre de cette étude ont été contrôlés conjointement par la DDTM du Morbihan et le BRGM en 2017 : les mesures de conductivité réalisées lors de contrôles et les analyses fournies par l'ARS56 n'ont pas révélé la présence d'eau fortement minéralisée.

3.3.4. Recommandations de gestion

Afin de garantir la pérennité des captages EDCH vulnérables, différentes actions peuvent être envisagées sur ces ouvrages :

- Contrôle du niveau dynamique de la nappe en pompage pour éviter un rabattement excessif : le niveau piézométrique dynamique doit rester supérieur au zéro maritime pour limiter les risques d'intrusions salines. Si ce n'est pas le cas, il faut diminuer le débit de pompage et augmenter le temps de pompage pour limiter les rabattements ou envisager la création d'un nouveau forage pour répartir les prélèvements sur plusieurs ouvrages. On peut également positionner la pompe à une altitude supérieure au niveau de la mer, ce qui limite les potentialités d'exploitation, mais le projet ADRESSAGE (Boisson, 2019) a montré qu'il ne s'agit pas d'une condition suffisante pour écarter tout risque ;

- Suivi de la conductivité régulièrement pendant l'exploitation (sonde automatique dans l'ouvrage ou mesures ponctuelles au moins hebdomadaires avec un conductimètre). Une augmentation de la conductivité, même légère, doit alerter l'exploitant sur les risques d'attirer de l'eau saumâtre dans l'ouvrage, le phénomène d'intrusion saline n'étant pas linéaire ;

- Sensibiliser les exploitants à la bonne gestion de leurs ouvrages pour garantir leur pérennité ;

- Sensibiliser la population au phénomène de biseau salé et aux économies d'eau (récupération d'eau de pluie, kits hydro-économes) afin de réduire les prélèvements d'eau souterraine dans les secteurs à risque ;

- A l'image du réseau de suivi des eaux souterraines pour l'AEP existant dans le Maine-et-Loire (Rouxel, 2012), mise en place d'un observatoire régional afin d'avoir une vision globale du phénomène d'intrusion saline et de son évolution, grâce à la collecte, la bancarisation et la valorisation des données qualité et quantité.

En cas de forages (quel que soit son usage) en projet sur le littoral, il convient d'alerter les maitres d'ouvrage sur la vulnérabilité potentielle de ces forages et leur recommander :

- un suivi de la conductivité à la foration et un arrêt de la foration si la conductivité augmente et dépasse 800 µS/cm ;

- un suivi de la conductivité pendant les essais de pompage pour mettre en évidence une évolution éventuelle de la conductivité et une contamination par de l'eau plus minéralisée ;

- un suivi fréquent de la conductivité pendant l'exploitation du forage pour prévenir tout risque d'intrusion saline ;

- pendant l'exploitation, un maintien du niveau piézométrique dynamique au-dessus du niveau de la mer par mesure de sécurité.

Si la contamination saline de l'eau d'un forage n'a pu être évitée, plusieurs actions peuvent être engagées pour réduire la salinité de l'eau captée. Une action relativement simple à mettre en œuvre est de réduire les prélèvements sur l'ensemble de l'aquifère pour rehausser le niveau piézométrique et repousser l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Cependant la réduction du débit de pompage d'un forage surexploité et contaminé par l'eau salée n'est pas accompagnée d'une décroissance immédiate et totale de la salinité. D'autres actions, plus coûteuses et plus difficiles à mettre en œuvre peuvent aussi être envisagées :

- recharger artificiellement l'aquifère pour rehausser le niveau piézométrique ;

- créer un barrage hydraulique par injection d'eau douce entre le forage exploité et l'origine du sel, qui aura pour conséquence d'élever localement le niveau piézométrique et éviter l'avancée du biseau salé ;

- créer un seuil anti-sel quand la contamination a lieu depuis la rivière (rentrant salé). Le seuil a un double effet :

    - bloquer physiquement la remontée de l'eau de mer dans l'estuaire et éviter les phénomènes de dispersion du sel entre l'eau salée et l'eau douce ;

    - mettre en charge la nappe d'accompagnement de la rivière (remontée du niveau piézométrique), ce qui pourra repousser le biseau salé (exemple en Corse, avec un seuil de galets mis en place chaque année sur la commune de Sari-Solenzara – Frissant, 2009).

3.4. DELIMITATION DES SECTEURS VULNERABLES

D'après les données recueillies, certains secteurs apparaissent comme particulièrement vulnérables aux intrusions salines (Illustration 67) :

- Baie du Mont Saint Michel,

- Secteur de Saint-Malo – Cancale,

- Trégor-Goëlo,

- Côte nord du Finistère,

- Presqu'île de Quiberon,

- Iles : Groix, Houat, Hoëdic, Molène.

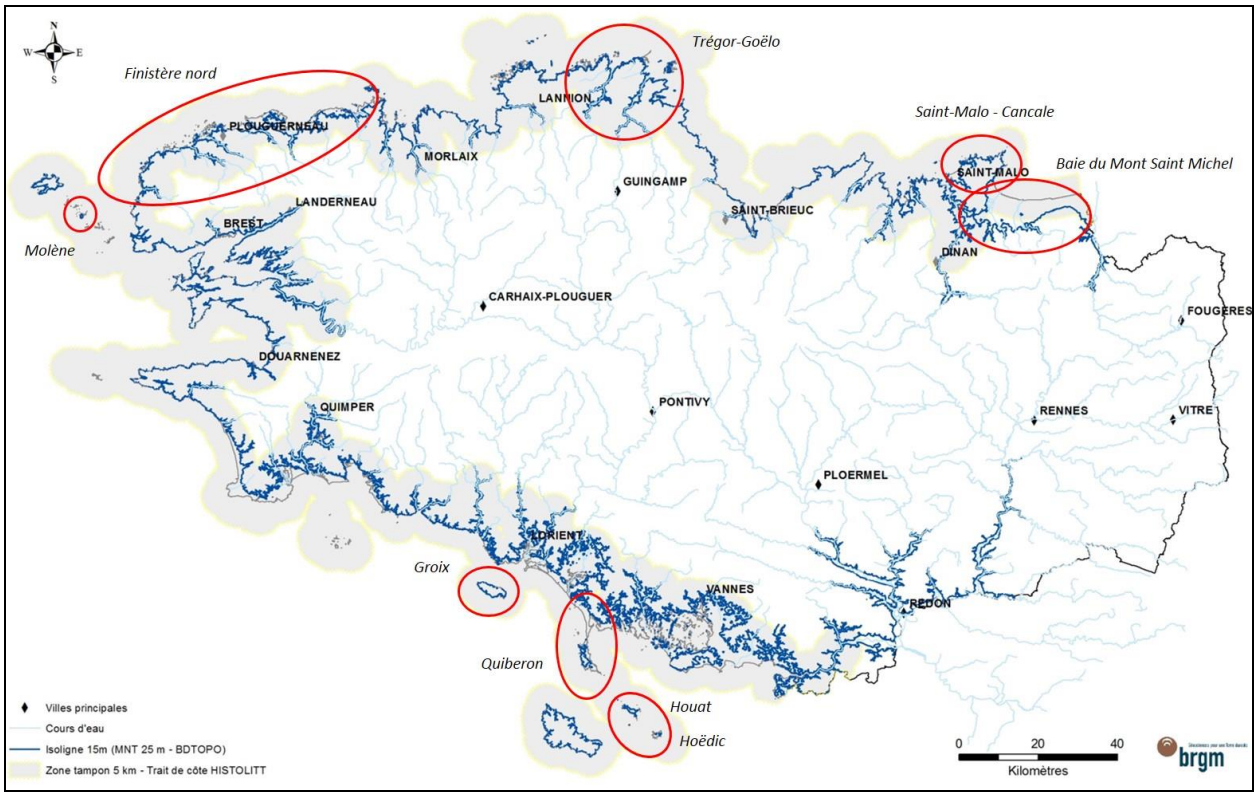


Illustration 67 : Localisation approximative des secteurs sensibles aux intrusions salines (cas de forages fortement minéralisés recensés)

Il conviendrait de réaliser une analyse plus fine sur les secteurs identifiés, notamment une étude du contexte géologique. Pour rappel, l'objectif du projet n'est pas de déterminer l'origine (actuelle ou ancienne) des intrusions salines ni d'identifier les processus en jeu mais de faire un premier état des lieux de la situation en Bretagne. Des analyses complémentaires sur ces secteurs vulnérables seront probablement nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes en cause.

Il faut noter que l'absence de données sur certains secteurs (notamment côte sud de la Bretagne et plus particulièrement golfe du Morbihan) ne permet pas de conclure à l'absence de vulnérabilité. Ainsi, pour tenter d'identifier les secteurs potentiellement vulnérables au phénomène d'intrusions salines à l'échelle de la Bretagne, il est proposé de croiser les paramètres pouvant avoir une importance dans le phénomène : données géologiques, géomorphologiques, dynamique d'érosion du trait de côte et données physico-chimiques ayant permis d'identifier certains captages concernés par les intrusions salines.

Les données suivantes ont été utilisées :

- **Données géologiques** : failles issues des cartes géologiques harmonisées au 1/50 000
- **Données géomorphologiques** :
    - Géomorphologie du trait de côte issue de l'étude intitulée « Atlas régional des aléas littoraux de Bretagne (départements des Côtes-d'Armor, du Finistère et de l'Ille-et-Vilaine) – Phase 1 : état des lieux du linéaire côtier » (Schroëtter, 2015).

Dans le cadre de cet atlas, la géologie des cartes géologiques du BRGM à 1/50 000, corrigée par des investigations de terrain au 1/15 000, a été affectée au trait de côte HistoLitt SHOM-IGN V2.0 et enrichie par les parties de trait de côte en érosion et altérées (l'érosion côtière peut constituer un facteur de risque d'intrusions salines). L'Atlas des aléas littoraux du Morbihan (Le Roy, 2019) n'était pas encore disponible à la date de rédaction de ce rapport. Le trait de côte n'a donc pas pu être caractérisé dans le Morbihan (nature dure ou meuble et érosion).

- Zones basses : isoligne 15 m issue du MNT 25 m (BDTOPO IGN).

- Linéaments digitalisés à partir du MNT au pas de 25 m pour compléter la base de données des failles, celle-ci n'étant pas toujours complète selon la date de levé des cartes géologiques.

- **Données physico-chimiques** :

  - Moyenne de chlorures et de conductivité issues du traitement de la base ADES (cf. 3.2.4)

  - Données de chlorures et de conductivité récoltées dans le cadre du projet (cf.3.2.1 et 3.2.2)

  - Ouvrages dont les données physico-chimiques récoltées dans le cadre de ce projet et du projet ADRESSAGE sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo (teneur maximale en chlorures et/ou conductivité) font suspecter la présence d'une intrusion saline

Pour compléter ces données, les captages EDCH potentiellement vulnérables aux intrusions salines (cf. 3.3) ont également été représentés.

Les cartes au 1/100 000 synthétisant l'ensemble de ces données sont présentées en Annexe 6.

La côte nord de la Bretagne semble plus affectée par les intrusions salines que la côte sud, hormis la presqu'île de Quiberon et les îles morbihannaises. Cependant, il existe moins de données physico-chimiques disponibles sur la côte sud.

Les 67 ouvrages de prélèvements d'eau souterraine issus de la base ADES ou de la base de données collectées au cours de ce projet et présentant une teneur moyenne en chlorures supérieure à 60 mg/L et/ou une conductivité moyenne supérieure à 800 µS/cm ont été analysés sur SIG à partir des données précédemment décrites. Ces fortes valeurs ne sont pas représentatives de la chimie des eaux souterraines dans le socle et dénotent une possible intrusion saline (bien que la présence de chlorures liés à l'eau de pluie ne soit pas prise en compte). Les champs suivants ont été complétés pour chaque ouvrage (Annexe 9) :

- zone basse (inférieure à 15 m NGF) : oui/non

- type de côte (si proximité immédiate) : dure/meuble/aménagée

- érosion : oui/non

- configuration particulière du trait de côte : île/presqu'île/marais maritime/sans objet

- distance au trait de côte (en m)

- tectonique : proximité d'une faille (carte géologique harmonisée au 1/50 000) ou d'un linéament (digitalisation à partir du MNT 25 m)

Cette analyse a révélé plusieurs points intéressants :

- 80% de ces ouvrages se trouvent à moins de 1,5 km du trait de côte et 50% à moins de 750 m ;

- 76% de ces ouvrages sont situés dans une configuration particulière du trait de côte (5% dans un marais maritime, 16% sur une île et 55% sur une presqu'île) ;

- 27% des ouvrages se trouvent dans une zone basse (inférieure à 15 m NGF) ;

- 39% des ouvrages se situent à proximité immédiate d'une faille ou d'un linéament, potentiels vecteurs d'intrusions salines ;

- seuls 10% des ouvrages ne se trouvent dans aucune configuration remarquable (île, presqu'île, marais, zone basse) ni à proximité d'une faille ou d'un linéament. Parmi eux, la moitié sont situés à plus d'un kilomètre du trait de côte et leur conductivité moyenne est voisine de 800 µS/cm. L'intrusion saline n'est donc pas avérée sur ces ouvrages.

A première vue, le type de côte (meuble, dure) et la dynamique d'érosion ne semblent pas représenter des critères prépondérants. Cependant, les ouvrages situés dans le Morbihan n'ont pas pu bénéficier de ces critères, l'atlas des aléas littoraux n'étant pas encore disponible.

Afin d'établir une première délimitation des secteurs potentiellement vulnérables aux intrusions salines (Illustration 68), un croisement SIG a été réalisé entre les paramètres identifiés précédemment : distance au trait de côte, failles et linéaments recoupant le trait de côte et zones basses. Des zones tampons de 500 m ont été tracées de part et d'autre des failles et des linéaments et une zone tampon de 1,5 km a été tracée autour du trait de côte. A ces zones tampons ont été ajoutées les zones basses (inférieures à 15 m NGF).

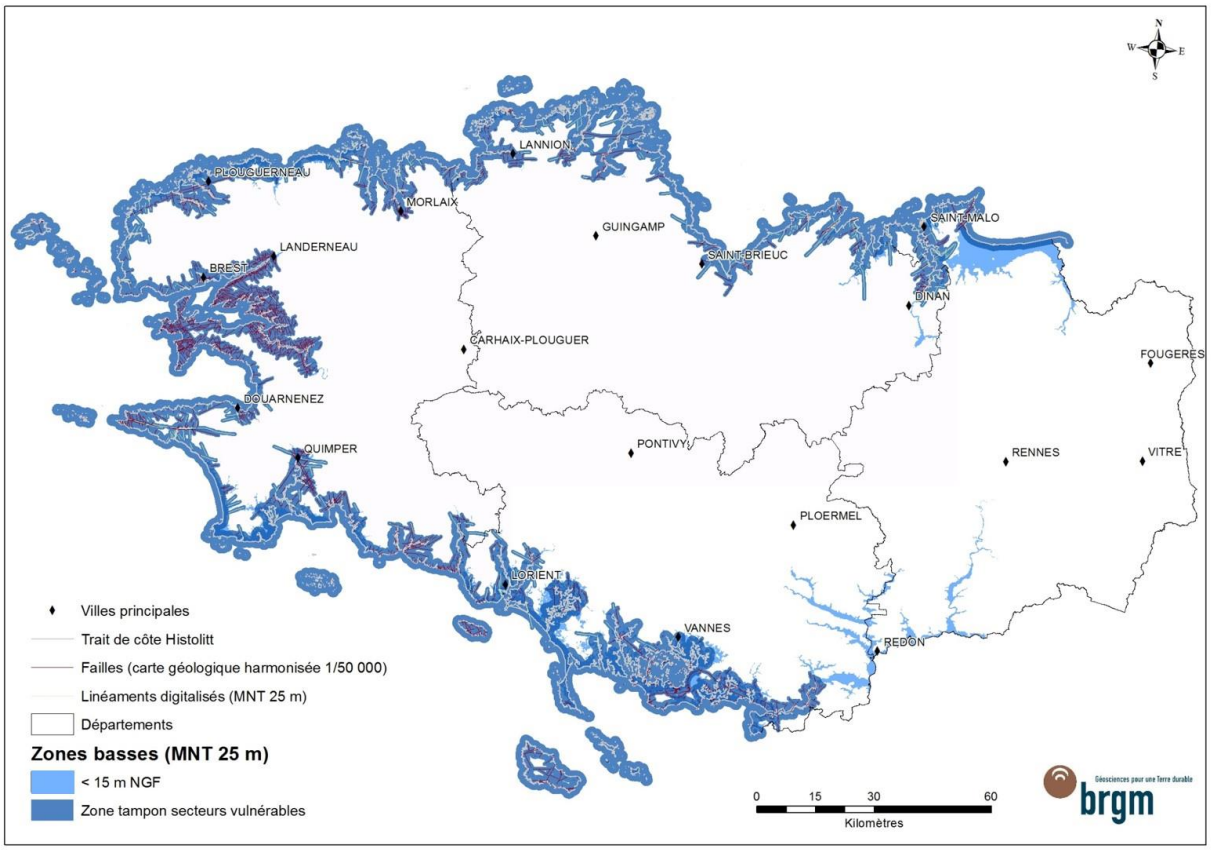


Illustration 68 : Localisation des secteurs potentiellement vulnérables aux intrusions salines

4. Phase 2 - Caractérisation de l'interface eau douce – eau salée

4.1. SUIVI DE LA CONDUCTIVITE SUR LES PIEZOMETRES LITTORAUX

Parmi les 52 piézomètres suivis par le BRGM en Bretagne dans le cadre du réseau national de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines, plusieurs ouvrages situés sur le littoral présentent des cycles journaliers (Illustration 69). C'est notamment le cas des piézomètres d'Hennebont (03834X0049/PZ) dans le Morbihan et de Trégunc (03822X0021/F) dans le Finistère, situés respectivement à 700 m et 1,7 km du littoral (Illustration 70). En première approche, ces variations piézométriques journalières semblent liées à la marée.

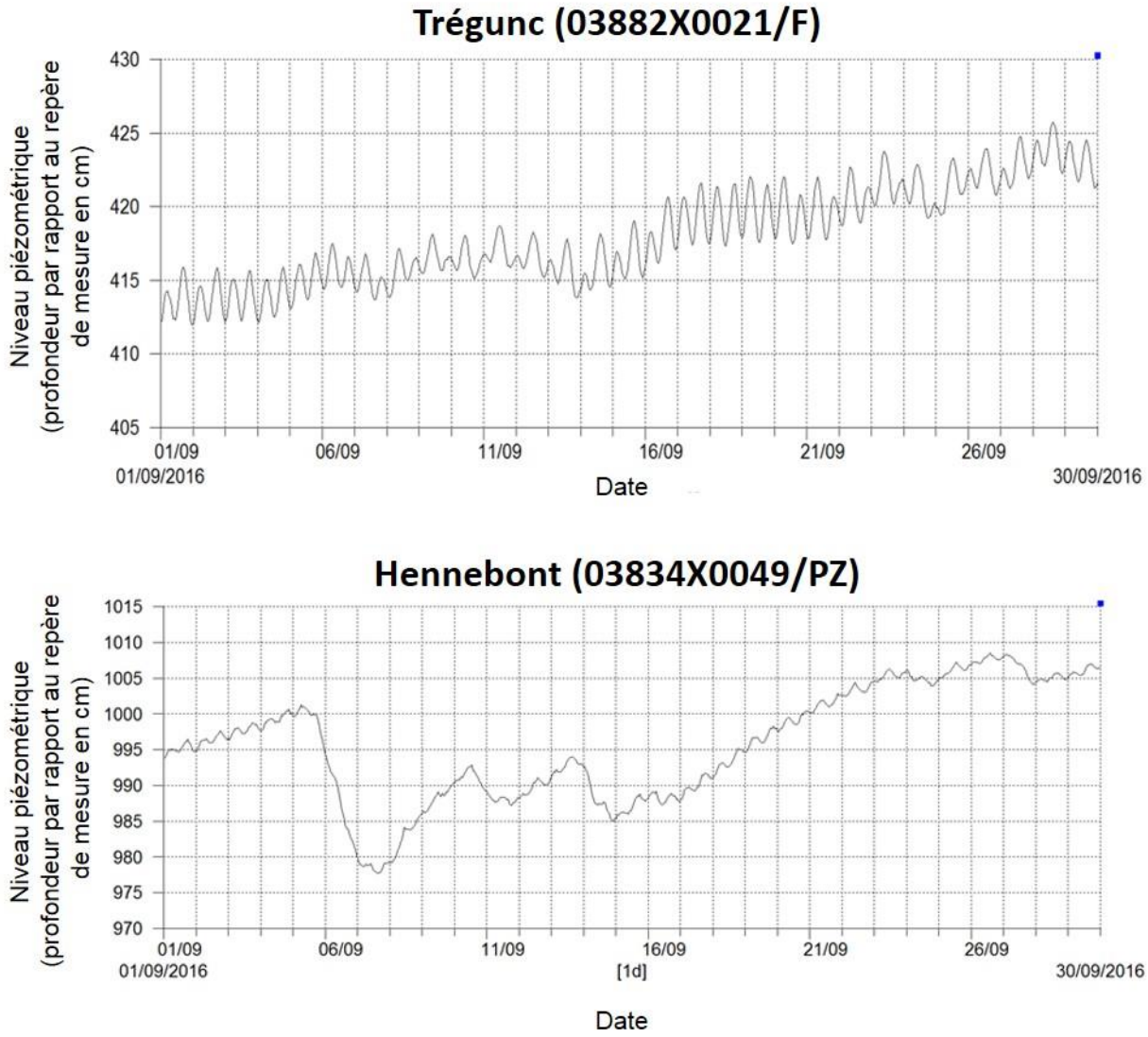


Illustration 69 : Chroniques piézométriques horaires des piézomètres d'Hennebont et Trégunc en septembre 2016 (coefficients de marée supérieurs à 90 du 1er au 3/09 et du 16 au 21/09)

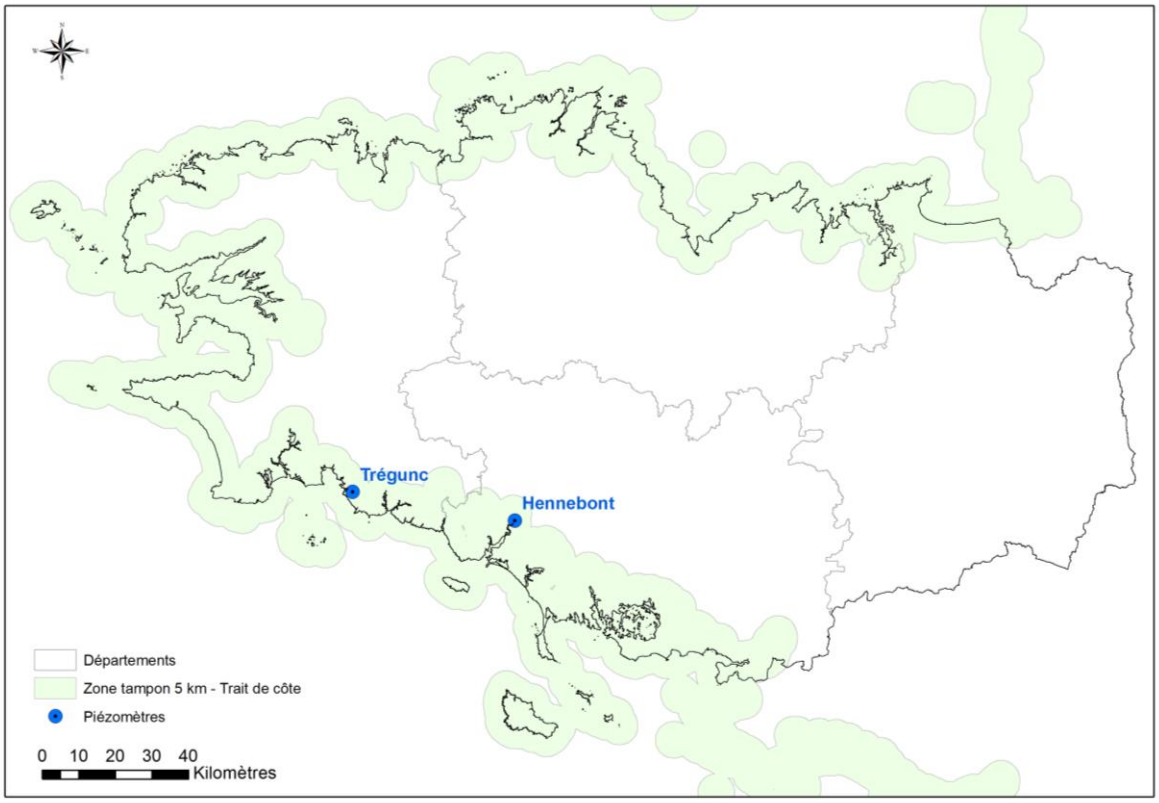


Illustration 70 : Localisation des piézomètres d'Hennebont et de Trégunc

Le piézomètre d'Hennebont est situé à 32 m d'altitude et sa profondeur est de 61 m. Le niveau piézométrique moyen est d'environ 23 m NGF. D'après le principe de Ghyben-Herzberg, l'interface eau douce – eau salée théorique serait située à 920 m sous le niveau de la mer.

Le piézomètre d'e Trégunc est situé à 25 m d'altitude et sa profondeur est de 28 m. Le niveau piézométrique moyen est de 22 m NGF. D'après le principe de Ghyben-Herzberg, l'interface eau douce – eau salée théorique serait située à 880 m sous le niveau de la mer.

Il est donc peu probable de rencontrer l'interface eau douce – eau salée sur ces 2 piézomètres, qui ne sont pas influencés par l'exploitation de forages voisins. Cependant, comme il ne s'agit que de calculs théoriques, il a tout de même été décidé de suivre la conductivité dans ces 2 ouvrages.

4.1.1. Diagraphies de conductivité

Des diagraphies de température et de conductivité ont été réalisées dans les deux piézomètres décrits précédemment.

Cette technique consiste à mesurer à intervalles rapprochés (par exemple à un pas de 20 cm) la conductivité électrique de la colonne d'eau dans un forage, à l'aide d'une sonde spécifique. Ces mesures sont réalisées depuis la surface piézométrique jusqu'au fond du forage, à la descente puis à la remontée afin de valider les observations.

Pour effectuer ces diagraphies, une sonde de mesure de la température et de la conductivité (Sonde Diver SDEC) a été descendue de manière régulière dans le forage, avec un pas de temps de mesure de 3 s pour Trégunc et 1 s pour Hennebont.

Aucun renouvellement de la colonne d'eau dans les piézomètres n'a été effectué avant la diagraphie.

Piézomètre de Trégunc

La diagraphie a été réalisée le 10/05/2017 matin (coefficient de marée : 81), à marée descendante (port de référence : Concarneau).

Sur le piézomètre de Trégunc, le niveau piézométrique a été mesuré avant de réaliser la diagraphie : le niveau d'eau était à 3,10 m de profondeur par rapport au repère de mesure (tête du tubage). On n'observe pas de gradient géothermique dans l'espace crépiné (température stable à partir de 16 m de profondeur, entre les deux traits orange sur l'Illustration 71), ce qui signifie que l'eau souterraine circule bien dans le piézomètre. La diagraphie a mis en évidence que le forage était bouché à 25,4 m de profondeur. La colonne d'eau est stratifiée dans ce piézomètre : la conductivité est de l'ordre de 0,3 mS/cm de 3 à 15 m (au niveau du tubage plein) puis elle augmente et reste globalement stable, autour de 0,530 mS/cm à partir de 16 m de profondeur. Deux légers sauts de conductivité sont visibles à 19 m et 23 m de profondeur, il pourrait s'agir de petites arrivées d'eau (flèches vertes sur l'Illustration 71). Lors de la foration, les principales arrivées d'eau ont eu lieu à 7 m et 26 m de profondeur (la colonne de captage est cimentée jusqu'à 13 m, ce qui masque l'arrivée d'eau superficielle, et le forage est bouché à 25,4 m, soit au niveau de la mer).

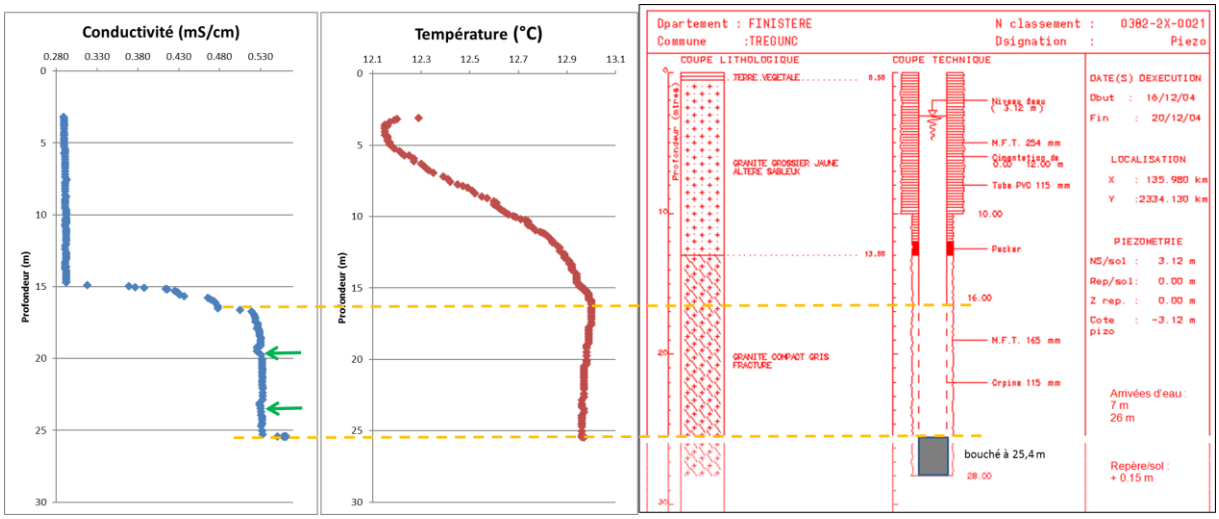


Illustration 71 : Résultats des diagraphies de conductivité et de température réalisées sur le piézomètre de Trégunc

Piézomètre d'Hennebont

La diagraphie a été réalisée le 09/05/2017 en début d'après-midi (coefficient de marée : 80), à marée montante (port de référence : Hennebont).

La diagraphie a été réalisée le 14/09/2017 en fin de matinée (coefficient de marée : 49), à marée montante (port de référence : Hennebont). Les mesures ont été effectuées à la descente (losanges sur l'Illustration 72) et à la remontée (croix) de la sonde.

Sur le piézomètre d'Hennebont, le niveau piézométrique a été mesuré avant de réaliser la diagraphie : le niveau d'eau se trouvait à 9,21 m de profondeur par rapport au repère de

mesure (tête du tubage). La circulation d'eau dans la zone crépinée semble moins bonne qu'à Trégunc : la température diminue avec la profondeur (Illustration 72). La sonde a pu descendre jusqu'à 54 m de profondeur. Deux légers sauts de conductivité sont visibles à 45 m et 52 m de profondeur, il pourrait s'agir de petites arrivées d'eau (flèches vertes sur l'Illustration 72). Les variations de conductivité sont faibles sur la colonne d'eau (entre 0,543 et 0,588 mS/cm). La conductivité est stable de 9,21 à 41 m de profondeur puis augmente à l'entrée dans la zone crépinée à 41 m (position de la crépine en orange sur l'Illustration 72).

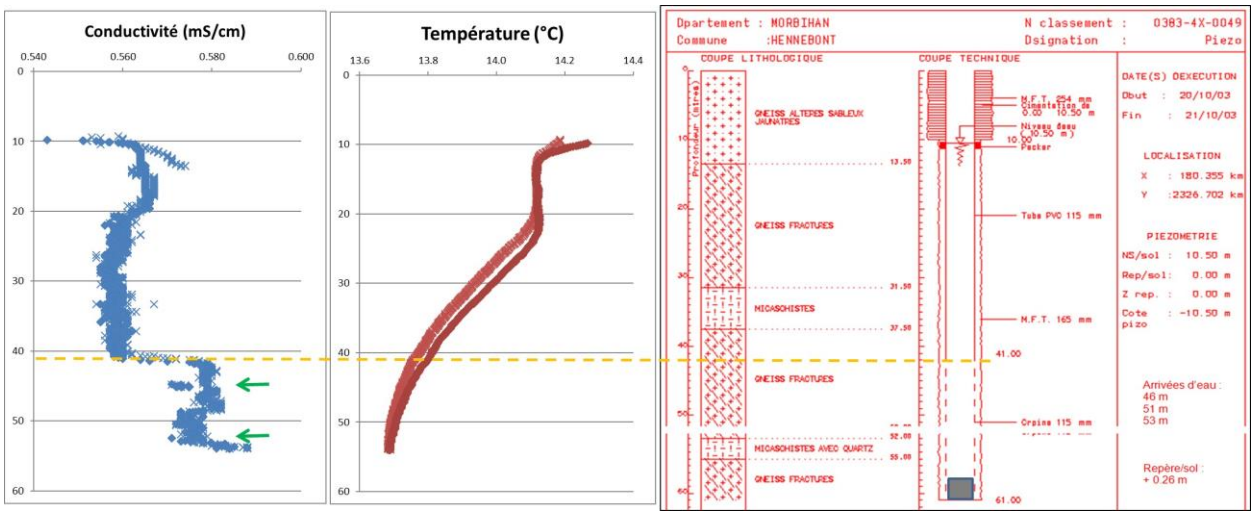


Illustration 72 : Résultats des diagraphies de conductivité et de température réalisées sur le piézomètre d'Hennebont

4.1.2. Suivi de la conductivité en continu

Bien que les valeurs de conductivité mesurées lors des diagraphies soient faibles, ces deux piézomètres ont été équipés d'une sonde de suivi en continu (1 mesure par heure) de la conductivité en complément de la sonde d'acquisition automatique du niveau de nappe déjà installée dans le cadre du réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines (sonde SEBA Dipper PTEC), dans le but d'étudier l'influence temporelle de la marée.

La sonde de mesure a été positionnée à 19 m de profondeur dans le piézomètre de Trégunc (soit à 6 m NGF) et à 54 m de profondeur à Hennebont (soit à – 22 m NGF), en fonction des arrivées d'eau repérées pendant les diagraphies.

Les enregistrements des niveaux piézométriques et de la conductivité sont télétransmis grâce aux équipements existants pour la transmission des mesures piézométriques.

L'Illustration 73 et l'Illustration 74 présentent les résultats du suivi de la conductivité sur les piézomètres d'Hennebont et Trégunc (mai 2017 à mai 2019).

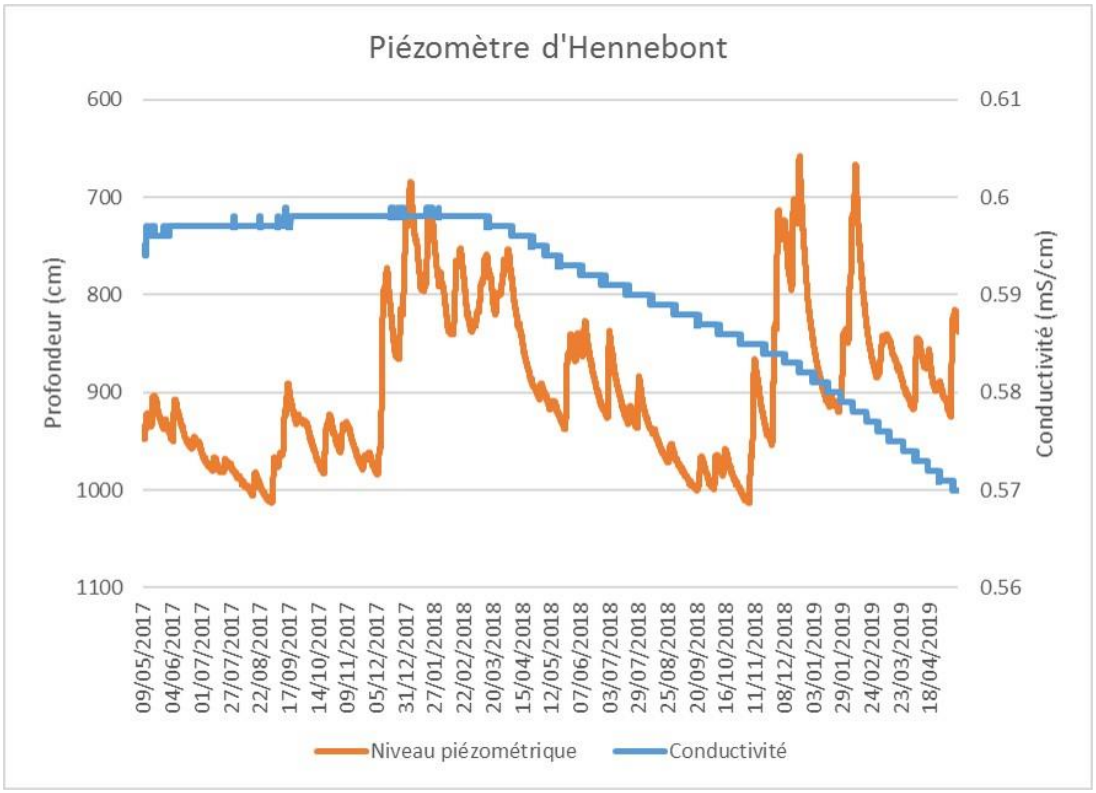


Illustration 73 : Chronique de conductivité sur le piézomètre d'Hennebont

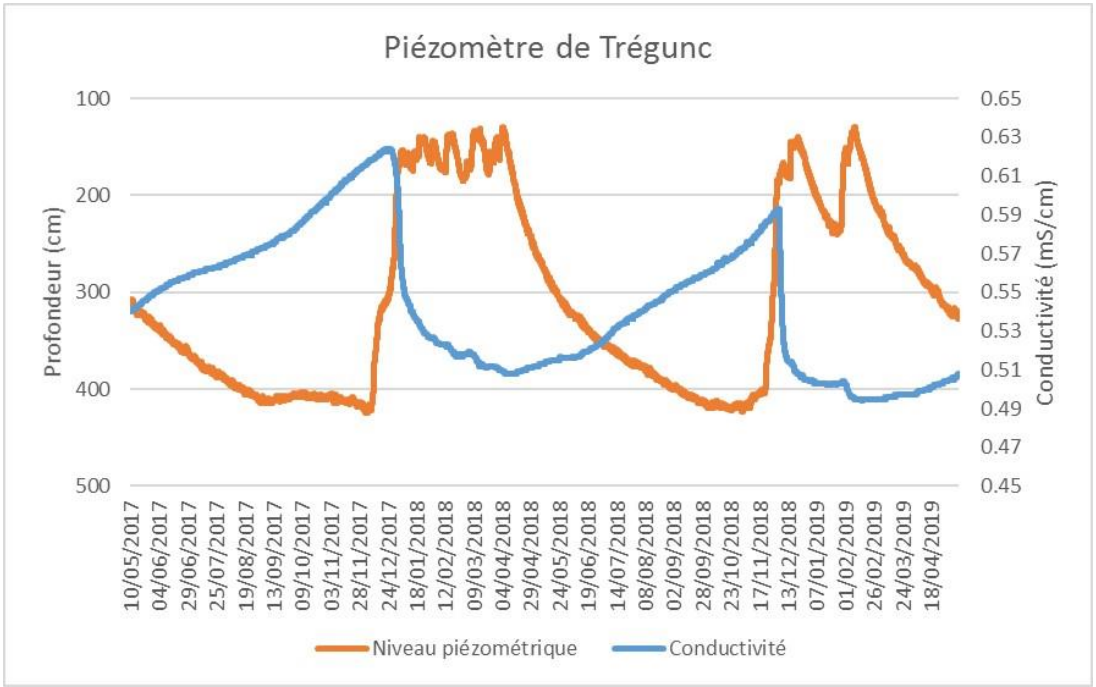


Illustration 74 : Chronique de conductivité sur le piézomètre de Trégunc

Les valeurs de conductivité sont assez faibles (< 650 µS/cm) sur les deux piézomètres, elles sont conformes aux valeurs habituellement observées dans les piézomètres de socle bretons et ne montrent pas de présence d'intrusions salines.

Comme on pouvait s'y attendre compte-tenu de l'altitude et de la cote piézométrique de l'ouvrage, la conductivité a très peu évolué sur le piézomètre d'Hennebont (Illustration 73) entre mai 2017 et mars 2018 (±5 µS/cm) puis elle a diminué très lentement à partir de mars 2018 (-27 µS/cm en 14 mois). L'évolution de la conductivité ne semble pas liée à la variation du niveau piézométrique et ne présente pas de cycle journalier.

Sur le piézomètre de Trégunc (Illustration 74), l'évolution de la conductivité semble liée aux variations du niveau piézométrique : augmentation de la conductivité lors de la vidange de la nappe (de mai à décembre 2017 puis d'avril à décembre 2018) et diminution en période de recharge (de janvier à avril 2018 et de décembre 2018 à février 2019). Contrairement au niveau piézométrique, la conductivité ne montre pas de cycle journalier.

Malgré des conductivités relativement peu élevées sur les 2 piézomètres qui ont été instrumentés, il est tout de même intéressant de poursuivre le suivi afin d'observer d'éventuelles tendances à plus long terme mais pas dans un objectif de suivi des intrusions salines.

4.1.3. Pistes de réflexion

Le suivi de la température et de la conductivité sur les piézomètres littoraux permettrait de mieux dimensionner des dispositifs de suivi qui pourraient être mis en place ultérieurement dans le cadre d'un réseau local de surveillance du biseau salé, en lien avec le projet national BRGM-AFB consistant à évaluer l'intérêt d'un suivi de la température et de la conductivité sur les piézomètres du réseau national (cf. rapport BRGM/RP-61623-FR) et les réflexions sur les possibilités de bancarisation des données de suivi de la conductivité dans la base de données ADES. Pour bien choisir les ouvrages à équiper (interface eau douce-eau salée visible), il faudra prendre en compte les cotes topographiques des ouvrages, leur profondeur et la cote piézométrique.

D'autre part, l'acquisition de chroniques de conductivité dans les eaux souterraines peut s'avérer intéressante sur le long terme pour l'interprétation de l'évolution de la qualité des eaux souterraines (nitrates, sulfates). Le suivi de la température des eaux souterraines à plus long terme peut également permettre d'évaluer l'impact du changement climatique.

4.2. CARACTERISATION SPATIALE DE L'INVASION SALEE PAR METHODES GEOPHYSIQUES DE SURFACE SUR UN SECTEUR TEST

4.2.1. Objectifs

Les invasions salines ont essentiellement été étudiées par méthodes géophysiques en zone sédimentaire (Guadeloupe) ou volcanique (Mayotte) et très peu en contexte de socle.

Dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines, il était prévu de réaliser des tests d'investigations géophysiques sur un secteur où le suivi d'un forage confirmait la présence d'une invasion salée (d'après les analyses de chlorures et/ou conductivité). Ces tests ont un double objectif :

- d'une part, la localisation et la caractérisation de l'interface eau douce-eau salée à l'échelle de ce secteur test ;

- d'autre part, un objectif méthodologique permettant d'établir une procédure d'investigation adaptée et pertinente pour répondre à cette problématique d'invasion salée en contexte de socle sur d'autres secteurs géographiques.

4.2.2. Programme technique envisagé initialement

Pour cette phase de test méthodologique, le programme technique initialement envisagé était le suivant (Illustration 75) :

- **Réalisation d'un log de conductivité de l'eau dans le forage** situé au centre du secteur test. Ces mesures de conductivité seront été effectuées pendant la période d'acquisition des panneaux électriques afin d'avoir un calage optimal pour l'interprétation de ces panneaux électriques. De plus ce log de conductivité sera réalisé à marée basse et réitéré à marée haute afin de contrôler l'influence du marnage sur la position de l'interface eau douce-eau salée ;

- **Réalisation de diagraphies de conductivité des terrains et de Gamma-Ray** dans ce même forage avec pour objectifs :
  - La discrimination entre les zones argilisées (réponses en conductivité et en Gamma-Ray) et les zones contaminées par les eaux saumâtres (réponses en conductivité seule) ;
  - Le calage (conductivité) pour l'inversion et l'interprétation des panneaux électriques.

- **Réalisation de 4 panneaux électriques :**
  - 1 panneau électrique perpendiculaire au trait de côte et passant par le forage sur lequel auront été effectuées les diagraphies pour le calage des interprétations en termes d'invasion salées. Sur ce panneau, l'acquisition des mesures sera effectuée à marée basse puis réitérée à marée haute pour contrôler l'influence du marnage sur la position de l'interface eau douce – eau salée ;
  - 2 autres panneaux électriques, de part et d'autre du précédent et perpendiculaires à la mer avec pour objectif la cartographie du biseau salé à l'échelle de la zone d'étude ;
  - 1 quatrième panneau électrique, perpendiculaire aux précédents c'est-à-dire parallèle à la mer avec pour objectif la détection et la caractérisation d'une éventuelle zone fracturée servant de vecteur à l'invasion salée.

- **Réalisation de 3 sondages de Résonance Magnétique des Protons (RMP)** alignés approximativement sur le quatrième panneau électrique, dans le but de de préciser les propriétés hydrodynamiques des aquifères favorisant l'invasion salée (zone fracturée par exemple). Les sondages RMP, en déterminant de

manière non ambigüe le toit de l'aquifère d'eau douce, contribueront en outre à préciser l'interprétation électrique en profondeur de l'invasion salée[4]. En contexte de socle, on attend comme premier résultat de la RMP de qualifier les propriétés hydrodynamiques des différents compartiments du socle qui auront une réponse différente à l'invasion salée.

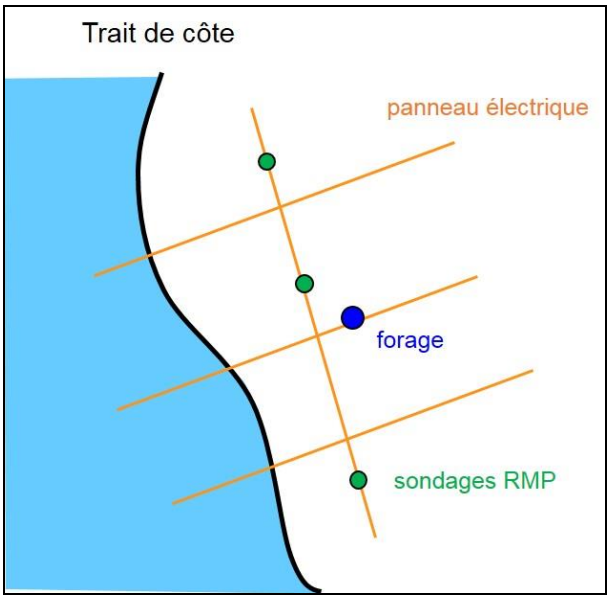


Illustration 75 : Plan schématique du dispositif envisagé sur la zone d'étude

4.2.3. Présentation des différentes méthodes

Diagraphie de conductivité électrique de l'eau en forage

Comme détaillé au chapitre 4.1.1, il s'agit de mesurer la conductivité électrique de l'eau à différentes profondeurs dans un forage.

Il s'agit de l'unique méthode d'observation directe de l'interface eau douce – eau salée, qui permet de caractériser avec précision la zone de mélange. Le seul facteur limitant est lié à la profondeur du forage, qui doit être suffisante pour atteindre l'interface en question. D'autre part, il est nécessaire que le forage soit non équipé (pompe retirée) afin de pouvoir effectuer les mesures.

Diagraphie de conductivité des terrains

Les mesures sont réalisées par un conductivimètre électromagnétique de forages (type EM39), dont le principe est basé sur l'émission d'un champ magnétique fréquentiel. Il permet de mesurer la distribution verticale de la conductivité (ou la résistivité, qui correspond à l'inverse de la résistivité) dans un forage. Le volume investigué par ce conductivimètre est une sphère d'environ 1 m de diamètre centrée sur le point de mesure en forage.

[4] La couche d'eau douce de résistivité intermédiaire entre la zone non saturée plus résistante et le biseau salé plus conducteur est généralement invisible en résultat d'inversion électrique (principe de suppression).

Cette diagraphie n'est réalisable que dans des forages non équipés de tubages métalliques. Corrélés aux données lithologiques du forage, le log obtenu permet d'identifier les différentes couches géologiques sans ambiguïté.

Diagraphie Gamma-Ray

La diagraphie de radioactivité naturelle (ou Gamma-Ray) met en évidence les matériaux plus ou moins radioactifs naturellement (notamment l'argile). Dans les massifs rocheux fissurés, les fissures peuvent être remplies d'argile. Lorsqu'elles le sont, le log Gamma-Ray les met bien en évidence.

En confrontant les différents types de diagraphies dans un même forage, on identifie les fissures remplies d'argile ou non (seules celles qui sont remplies d'argile sont radioactives).

Panneaux électriques

La prospection électrique est une méthode permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique (inverse de la conductivité) des matériaux en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes « panneau électrique » ou « tomographie électrique » sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité entre deux électrodes et de mesurer la différence de potentiel induite entre une autre paire d'électrodes. Le principe détaillé est décrit en Annexe 7.

L'objectif est de pouvoir réaliser une cartographie en 2D de l'invasion saline.

Résonance magnétique protonique (RMP)

Le principe détaillé est décrit en Annexe 8.

Les résultats pourront être présentées sous forme de coupes synthétiques réunissant à la fois les informations géologiques, les résultats des diagraphies et la distribution verticale des résistivités issues de l'inversion des panneaux électriques.

4.2.4. Choix du secteur test

Suite au dépouillement des questionnaires, le secteur de Plougrescant (Côtes d'Armor) est apparu comme étant un secteur sensible (cf. ADRESSAGE). Un forage agricole (01708X0155/F) de 1992 situé à 3 km à l'ouest du bourg au lieu-dit Lézernan a notamment retenu l'attention : il s'agit d'un forage de 93 m de profondeur, situé à une altitude 67 m et à 1 400 m de la mer (Illustration 76), avec un prélèvement d'eau supérieur à 10 000 m^3/an. Les teneurs en chlorures et la conductivité sont en augmentation ces dernières années (Illustration 77). Aucune mesure de niveau piézométrique (statique ou dynamique) n'a pu être effectuée dans l'ouvrage.

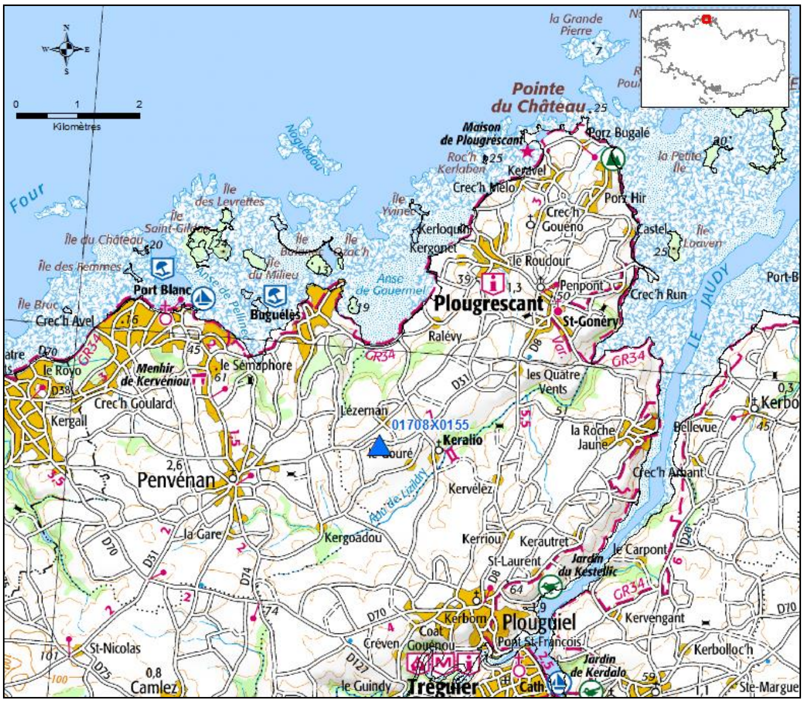


Illustration 76 : Localisation du secteur test et du forage en cours de salinisation suspectée (en bleu) (fond IGN 1/25 000)

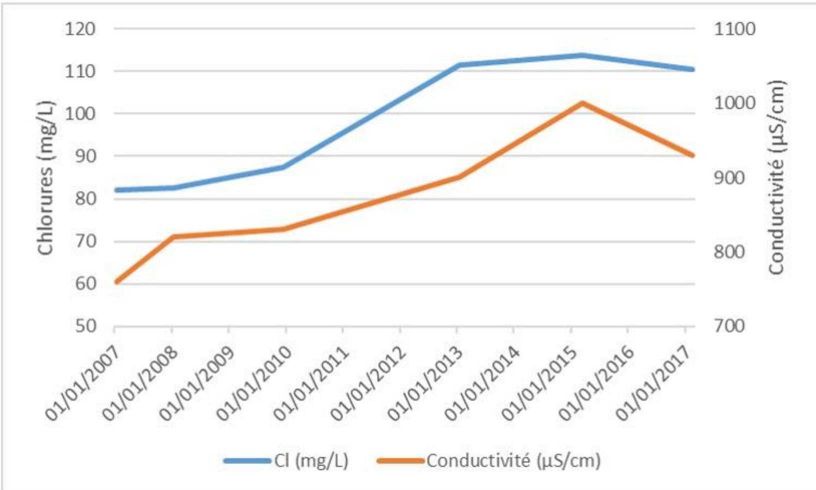


Illustration 77 : Evolution des teneurs en chlorures et de la conductivité sur le forage en cours de salinisation suspectée

4.2.5. Reconnaissance géologique du secteur

Cadre général

Le secteur test peut être divisé en 4 zones géomorphologiques distinctes (Illustration 78) :

1. La zone littorale accessible à marée basse, représentée par l'anse de Gouermel, relativement plane, sur laquelle affleure des pointements granitiques.

2. Une zone marécageuse située au sud de l'anse de Gouermel marquée par la présence de roseaux, de bois et clairières.

3. Le plateau, situé entre 50 et 70m forme un replat dans le paysage. C'est ici que se déroule toute l'activité agricole et maraîchère.

4. Une zone de pente faisant le lien entre le plateau à l'anse de Gouermel, caractérisée par la présence de forêt, séparée par quelques clairières et zones humides.

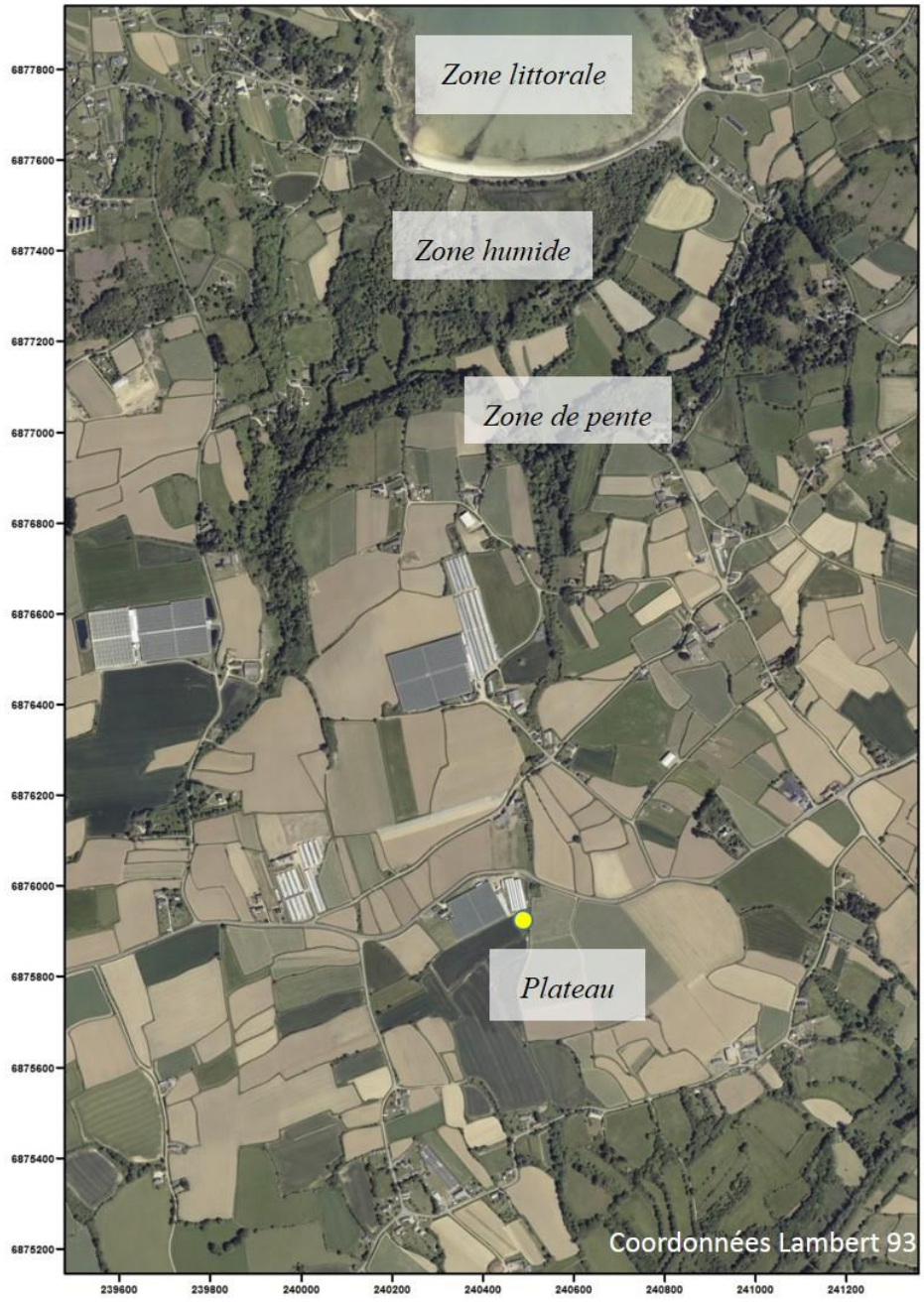


Illustration 78 : Localisation des différentes zones géomorphologiques de la zone d'étude et du forage de Lézernan (en jaune) sur fond orthophotographies IGN)

Ces zones géomorphologiques sont à mettre en relation avec la géologie et le profil d'altération.

Suite à un premier repérage du secteur, la zone d'investigation s'est naturellement focalisée vers la zone littorale et la zone de pente afin d'optimiser les observations et la compréhension du profil d'altération. Bien entendu, quelques points de contrôle ont été observés sur le plateau.

Données de la Banque du Sous-Sol

La Banque de données du Sous-Sol (BSS) référence plusieurs ouvrages dans la zone investiguée, mais seul le forage 01708X0035 fournit des informations géologiques (Illustration 79). Il est situé à environ 85 m du profil GOLE_P3, et projeté arriverait en abscisse à environ 105 m sur ce profil. D'une profondeur de 121 m, le log géologique indique la présence d'altérites jusqu'à 12 m de profondeur, puis des dolérites jusqu'en pied de forage.

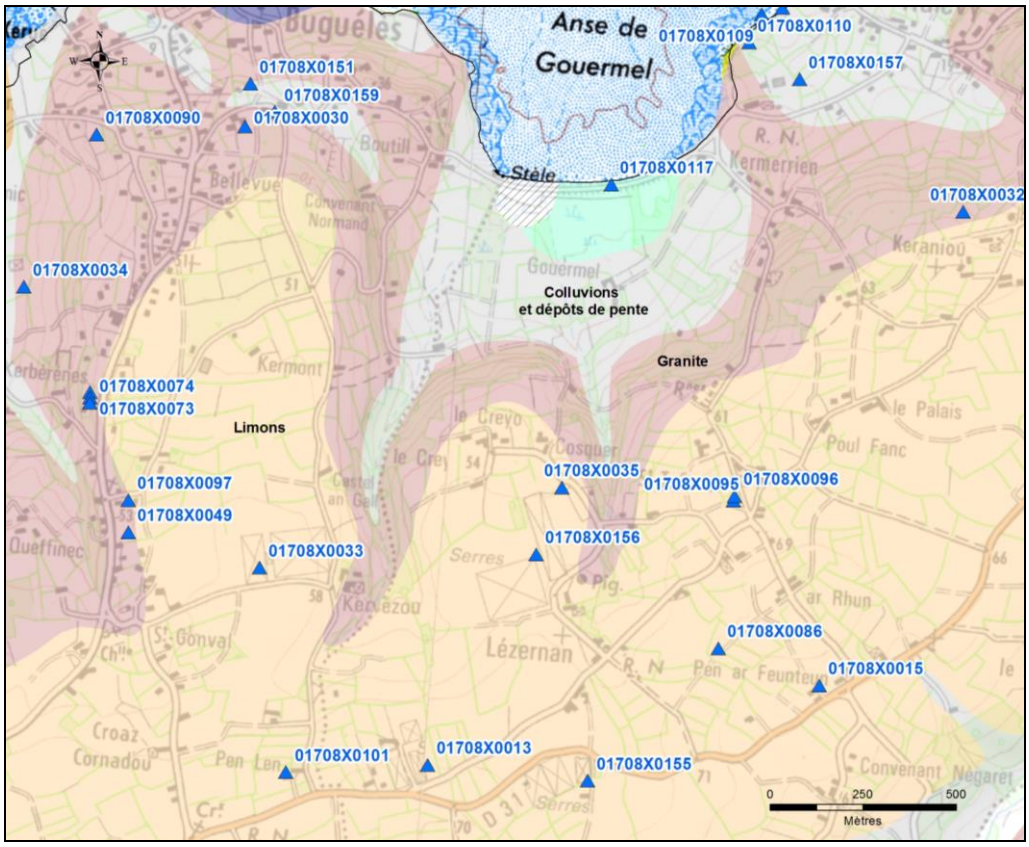


Illustration 79 : Forages de la BSS sur fond de carte géologique 1/50 000 harmonisée sur le secteur d'étude

Cadre géologique

La géologie du secteur est essentiellement marquée par la présence de plutons granitiques et de limons des plateaux (Illustration 80).

Les plutons granitiques sont surtout localisés au niveau de l'anse de Gouermel. Ils sont représentés par des granites néoprotérozoïques (cadomiens, environ 615 Ma) de diverses natures : la microgranodiorite de Pleubian ($\mu\gamma^4$), le granite à grains moyens de Porz-Scarff (γ^1) et plus localement le granite rose de Buguélès (γ^1B). Quelques enclaves de gneiss et paragneiss icartiens (2.1 Ga) se retrouvent au sein de ces granites.

La formation des plateaux appelée également limons pléniglaciaires (œ) s'étend essentiellement sur la partie sud de la zone d'étude (Illustration 80). Cette formation qui correspond à des dépôts glaciaires récents (environ 18Ka) masque la continuité du microgranite de Pleubian (Illustration 80).

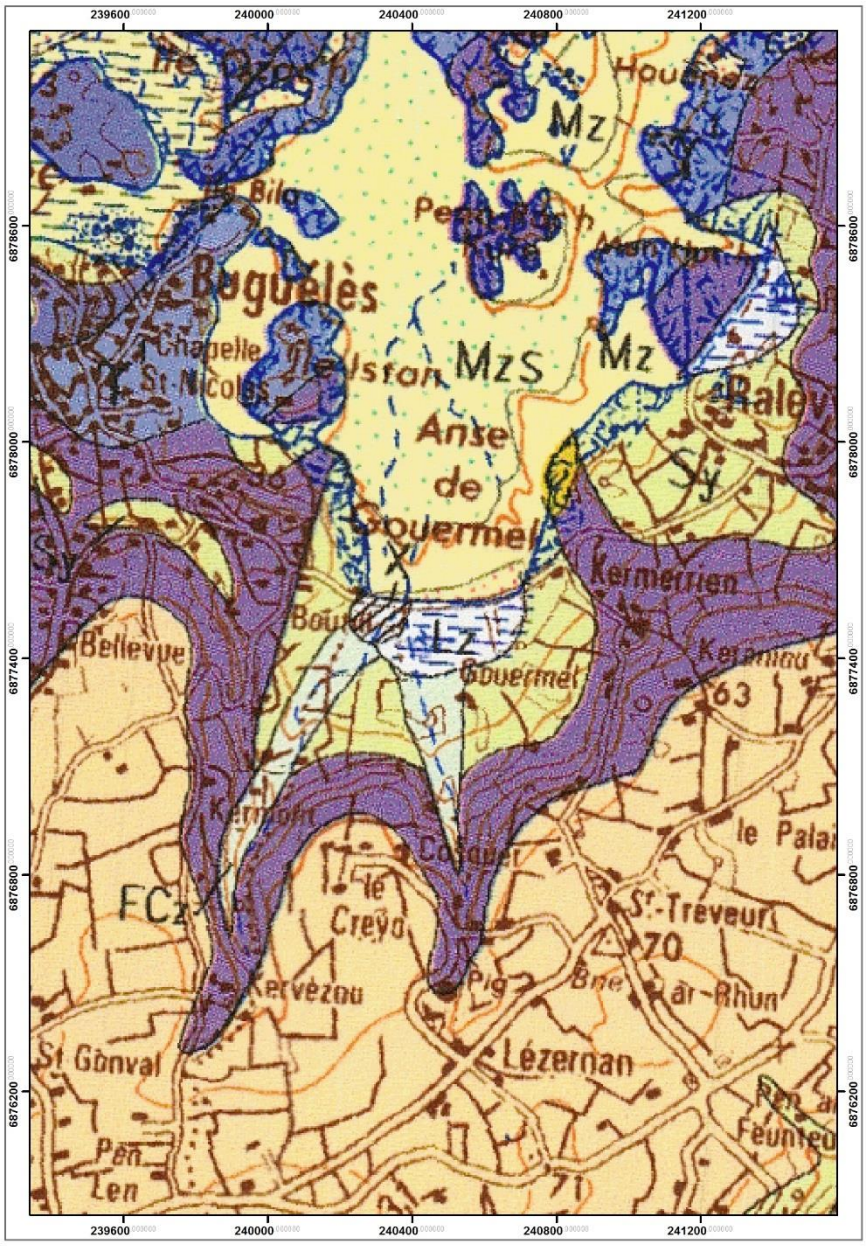


Illustration 80 : Extrait de la carte géologique de Perros-Guirec au 1/50 000ème (d'après Guennoc et al., 2015)

Il faut noter que l'ancienne carte géologique au 1/80 000 (Delattre *et al*., 1996) fait apparaitre des filons qui n'ont pas été repris dans la carte plus récente (Guennoc *et al*., 2015) mais dont l'existence supposée devra être prise en compte dans les interprétations.

Les corps granitiques, bien discriminés sur la carte géologique sont considérés comme co-magmatiques (Guennoc *et al.*, 2015), c'est-à-dire que chacun des granites s'enclave

mutuellement ; ce qui rend leur distinction plus complexe à l'affleurement. Ce comportement peut avoir une conséquence sur l'épaisseur des formations dans le profil d'altération, les granites dont les grains sont de différentes tailles auront des vitesses d'altération différentes.

Cartographie des altérites

Un géologue du BRGM a réalisé la cartographie des altérites (lithologies retrouvées à l'affleurement) en octobre 2017. La zone d'investigation (Illustration 81) s'est étendue bien plus au nord que la zone d'étude afin de réaliser un maximum de mesures de fracturation et d'améliorer la compréhension du profil d'altération. L'absence de point au sud est due au manque d'affleurement au sein des limons des plateaux. A l'est comme à l'ouest, les points d'affleurement marquent les limites de la zone étudiée et cartographiée.

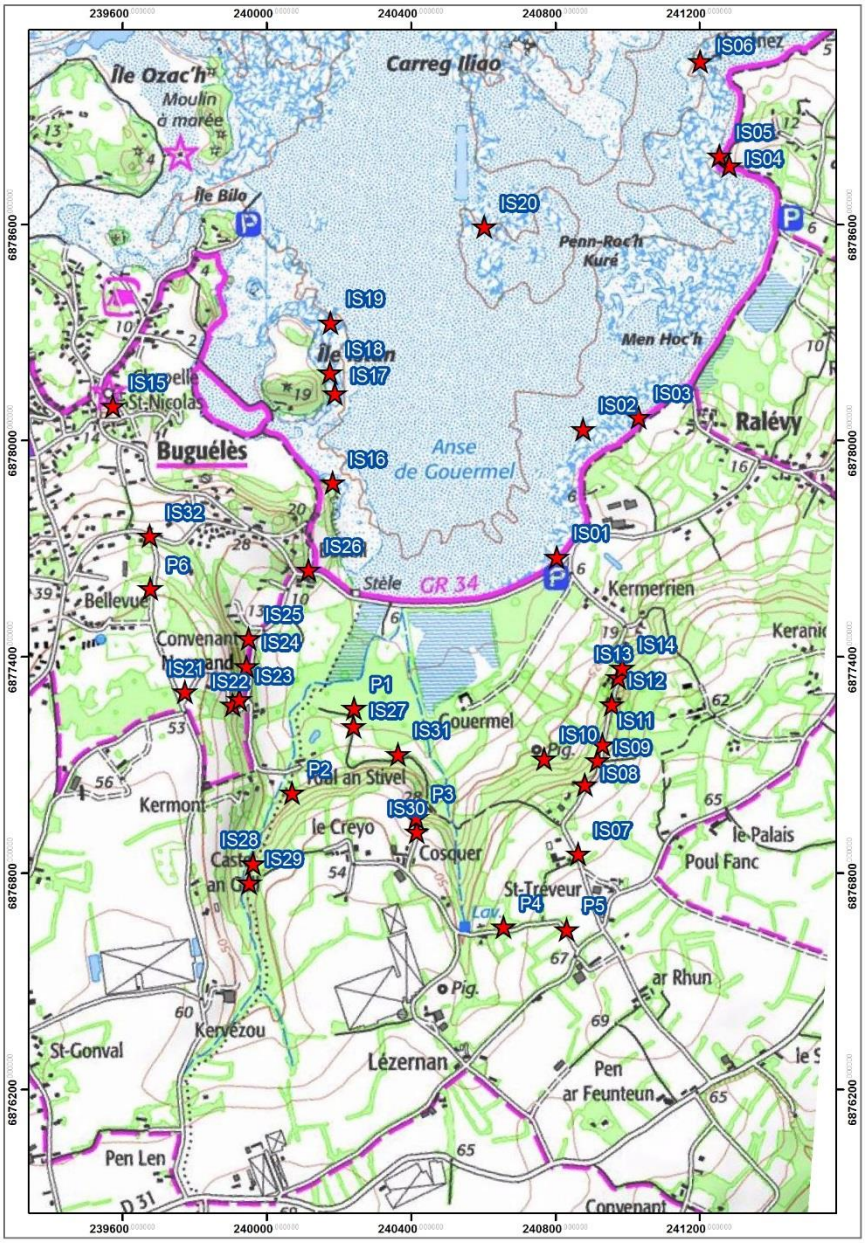


Illustration 81 : Localisation des affleurements visités (fond : IGN 1/25 000)

Les formations cartographiées (Illustration 82) sont détaillées une par une, du sommet vers la base :

- Dépôts de pente et colluvions :

Ces formations se retrouvent principalement au niveau de la zone humide, dans la pente et sur toute la bordure littorale. Au sommet, ce sont des dépôts limono-argileux bruns, sans blocs, qui possèdent une épaisseur d'environ 2 à 4 m. Ces dépôts surmontent des limons un peu plus argileux et sableux, jaunâtres, à blocs de socle (granites, micaschistes…) pluricentimétriques à décimétriques, disposés de manière hétérogène.

Dans la zone humide, ces formations sont horizontales et sont visibles aux points IS27 et IS31 jusqu'à une altitude d'environ 12 m. Ceci laisse suggérer une épaisseur assez importante dans cette zone. Ailleurs, les colluvions jaunâtres ne sont pas visibles mais les limons argileux bruns peuvent napper la topographie (par exemple IS12 et IS24) et semblent peuvent atteindre une épaisseur d'environ 1 à 2 m.

- Arène et zone de transition :

Les affleurements d'arènes granitiques (allotérites) sont très rares et ce pour au moins deux raisons : le décapage des arènes par le dernier évènement glaciaire et un profil d'altération récent (Eocène) peu développé. Ce dernier motif peut être étayé par le fait que peu de granite altéré soit retrouvé sous la couverture sédimentaire au sein des sondages ayant été réalisé dans le bassin Tertiaire proche de Le Gouré.

Néanmoins, ces arènes sont tout de même visibles sur deux affleurements (IS22 et IS30). Ce sont des grès/sables arkosiques à éléments pluri millimétriques de granites totalement altérés (pulvérulents). Au point IS22 les arènes sont légèrement inclinées vers la vallée. Cette position à 40 m d'altitude peut suggérer un glissement de cette formation. Leur position est donc à prendre avec précaution.

A un niveau structural inférieur (39 m) il est possible de trouver un horizon feuilleté (Isaltérite ; Illustration 83). Cet horizon est caractérisé par des plans horizontaux très faiblement espacés (quelques millimètres) donnant un aspect feuilleté au granite. Un seul affleurement permet de se rendre compte de la présence de cet horizon : IS30. Cet horizon peut être suivi sur environ 1 m d'épaisseur ; Il est très probable que cet horizon ne soit pas très développé. Malheureusement aucun n'affleurement vu ne permet de se rendre compte de son épaisseur.

La zone de transition correspond en réalité à la partie la plus sommitale de l'horizon fissuré. Cette zone est caractérisée par des blocs de granite décimétriques à pluri-décimétriques englobés dans une matrice argilo-sableuse, la taille des blocs étant plus importante vers la base. Cette formation se retrouve aussi bien sur les premiers plateau (50 m) que dans les pentes. Il est difficile d'observer un affleurement en place de cette zone de transition. Elle se marque parfois uniquement par la présence de blocs de granite arrondis. Vers le sommet (principalement dans les champs), les blocs de granite sont de couleur ocre et sont plus ou moins altérés en fonction de la nature du granite.

Vers la base de cette zone, les blocs de granites sont plus frais, et plus anguleux et évoluent très vite vers un horizon fissuré plus franc.

- Horizon fissuré :

Cet horizon est le plus remarquable. Il est principalement visible dans l'anse de Gouermel.

La partie la plus sommitale observable de cet horizon est néanmoins visible (dans de mauvaises conditions) au niveau du ruisseau situé au NE de Kervezou (IS28 et IS29). Il s'agit d'un granite où l'espacement entre les plans horizontaux est inférieur à 50 cm. Le granite est ici altéré, de couleur jaune orangée et se casse facilement. Par ailleurs, la partie légèrement inférieure à cet horizon est visible de manière remarquable à la Chapelle St-Nicolas de Buguélès (IS15). Il s'agit d'un horizon fissuré où le granite est encore frais et où les plans horizontaux sont espacés d'environ 50 cm à 1 m.

Dans l'anse de Gouermel, les granites ainsi que les gneiss icartiens sont caractérisés par cet horizon fissuré. Dans ce secteur, le granite est très peu altéré et les plans horizontaux ont un espacement compris entre 1 et 2 m. Le niveau marin étant le niveau zéro, le contact entre l'horizon fissuré et la roche saine ne peut malheureusement pas être observé.

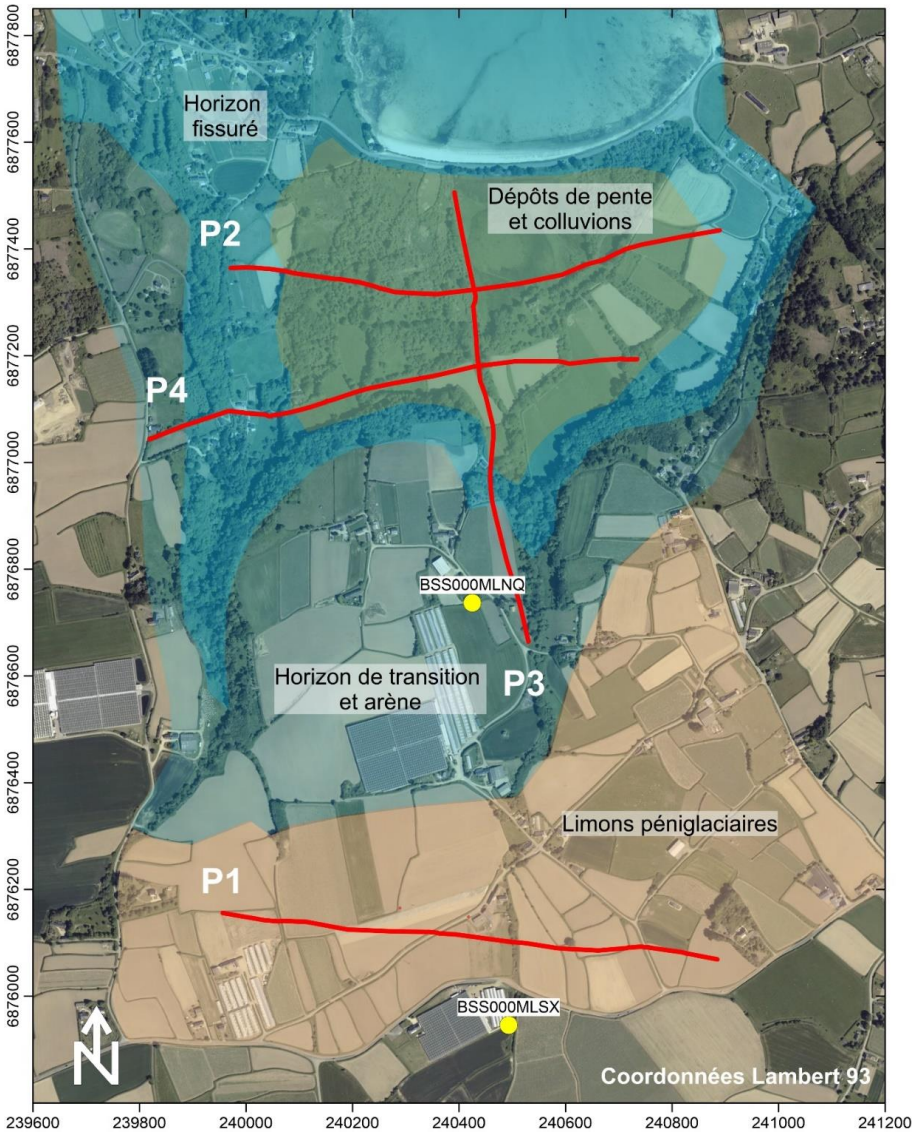


Illustration 82 : Cartographie des altérites de la zone d'étude et localisation des panneaux électriques (en rouge) et des forages (en jaune)

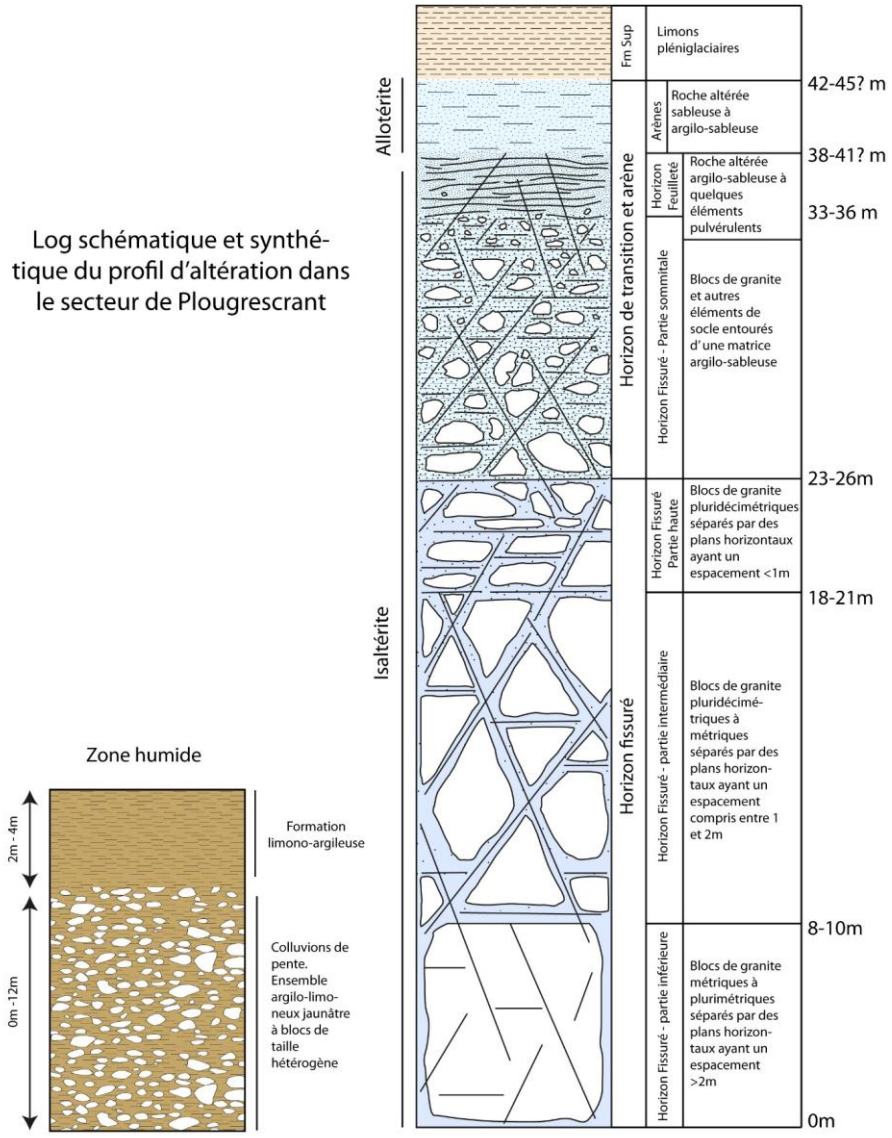


Illustration 83 : Log schématique et synthétique des formations cartographiées (les valeurs d'épaisseur des formations sont données à titre indicatif en référence aux altitude mesurées sur le terrain via GPS. Les espacements entre les plans horizontaux de l'horizon fissuré ne sont pas à l'échelle)

Mesure de la fracturation principale

La fracturation principale a été mesurée sur 9 affleurements de bonne qualité au sein de l'horizon fissuré. La fracturation principale a été définie à l'appréciation visuelle directement sur l'affleurement. Aucun stéréogramme de fréquence des fractures n'a pu être réalisé. Néanmoins la fracturation se traduit par 5 directions majeures (Illustration 84).

Affleurement	Direction moyenne	Pendage moyen (°)	Plongement
IS02	30-40	60	SE
	120-130	50-60	SE
	60	70	SE
	0	90	
IS03	60	70	SE
	120	60	SW
IS04	0	90	
	30	50	NW
	120	80	SW
	150-160	70	NE
IS15	60-70	40	SW
	150-160	40-70	SW
IS16	10	60	W
	60	70	NW
	120	60-70	SW
	160	60	SW
IS17	0	60E	
	30	50	NW
	60	40-60	NW
	90	40	E
	150	70	SW
IS18	60	90	
	150	90	
IS25	60	90	
	120	70	NE
	150	80	SW
IS26	60		90
	150		90

1	**N60°E**
2	**N150-60°E**
3	**N120-130°E**
4	**N-S**
5	**N30-40°E**

Illustration 84 : Valeurs moyennes de fracturation mesurées sur 9 affleurements et directions de fracturations principales (1 étant les plus fréquemment mesurées et 5 les moins fréquentes)

4.2.6. Investigations géophysiques réalisées

Introduction et objectifs

Cette partie du rapport traite des acquisitions géophysiques réalisées dans le cadre de ce projet. Ces acquisitions ont été proposées dans le but d'apporter de nouvelles informations sur la connaissance du sous-sol dans ce secteur afin de les corréler et les interpréter à la lumière des connaissances existantes ou nouvellement acquises. L'objectif final étant de montrer la pertinence de la mise en œuvre des techniques d'investigation géophysique pour la problématique des invasions salines.

Précisons que l'objectif initial du projet visait à utiliser les techniques géophysiques pour mettre en évidence la présence éventuelle d'intrusions salines en milieu granitique fracturé. Pour mener à bien ces investigations, il était initialement question d'utiliser un forage en zone côtière dont les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques étaient bien connues pour permettre de calibrer précisément les données géophysiques.

Toutefois en raison de problèmes d'autorisations et de permittage, le forage sélectionné se trouve situé à environ 1.5 km à l'intérieur des terres. De plus, et malheureusement, il :

- ne dispose pas de log géologique,
- ni de niveau piézométrique,
- n'a pas permis (pour l'instant) de réaliser une diagraphie de conductivité (pompe dans le forage).

En conséquence, les résultats obtenus dans cette étude ne pourront pleinement démontrer la pertinence de la mise en œuvre des techniques géophysiques pour la résolution des problèmes d'invasions marines en zone de socle qu'après avoir intégré ces contraintes et informations complémentaires.

Comme indiqué en 4.2.2, la mise en œuvre de 2 techniques géophysiques a été proposée : les profils de résistivité électrique (ERT) et la résonance magnétique protonique (RMP). La première (ERT) est destinée à mieux comprendre la distribution de résistivité électrique du sous-sol de manière à identifier des zones potentiellement favorables à la présence d'aquifères ou de zones d'écoulements préférentiels (failles, fractures) susceptibles de favoriser la pénétration d'eaux marines vers l'intérieur des terres. La seconde (RMP) n'a finalement pas été réalisée du fait de mesures de bruit ambiant trop élevées et sa pertinence en regard d'un complément de géophysique électrique fait l'objet d'un paragraphe dans ce rapport.

En accord avec les partenaires du projet, 4 panneaux électriques de 870 à 950 m ont été implantés sur les communes de Penvénan et Plougrescant (Illustration 85 à Illustration 87). Leurs noms découlent des noms GOuermel et LEzernan, soit GOLE_Px. Le premier (profil GOLE_P1) est situé au sud de la zone d'étude, à environ 1,5 km de l'anse de Gouermel à l'intérieur des terres. Les trois autres (GOLE_P2 à GOLE_P4) sont situés à proximité de l'anse de Gouermel.

L'implantation proposée visait les objectifs suivants :

- Réaliser un profil (GOLE_P1) à proximité d'un forage présentant une anomalie de conductivité électrique (lié à la présence de sel) susceptible de modifier de manière sensible la résistivité électrique du milieu, dans notre cas à environ 1,5 km à l'intérieur des terres;

- Mettre en évidence la présence d'un potentiel biseau salé en connexion avec la mer par les profils GOLE_P2 et GOLE_P4 et le suivre, s'il existe, vers l'intérieur des terres tout en suivant les potentielles zones d'écoulements préférentiels.

- Recouper des failles principales identifiées dans la région (mais pas sur le secteur investigué), orientées majoritairement N60 et N150, mais présentant également plusieurs autres orientations apparentées à cette dernière. Dans ce contexte de failles sub-perpendiculaires, il est délicat de positionner des profils recoupant perpendiculairement chacune de ces familles pour tenter de les mettre en évidence. Il a donc été choisi d'orienter les profils ouest-est (O-E) de manière à tenter de mettre en évidence des structures susceptibles de conduire des invasions marines vers le sud.

- Le profil GOLE_P3 vise à suivre le biseau salé, s'il existe, vers le sud.

Pour ces 4 profils, il s'agissait de :

- Mettre en évidence la distribution spatiale de résistivité au droit de ces sections jusqu'à une profondeur d'environ 150 m ;

- Identifier la présence d'un biseau salé ou de zones d'invasion saline qui se manifesteraient par des zones potentiellement plus conductrices ;

- Identifier la présence de discontinuités qui peuvent s'apparenter à des failles majeures ou à des transitions latérales de terrains (faciès géologiques) ;

- Relier les résistivités électriques à la connaissance géologique (granites sains, altérés, limons) et hydrogéologiques (présence d'aquifère de salinité connue).

Le permittage a permis d'obtenir l'assentiment de tous les exploitants locaux et ainsi un déroulement optimal des acquisitions au niveau de l'implantation, et ce malgré les nombreux champs en culture qu'il a fallu traverser.

Les profils P1 et P3 ont nécessité le débroussaillement de quelques portions courtes. Seul le profil P2 a dû faire l'objet d'un débroussaillement plus important (ronces, roseaux, buissons) dans la zone du marais de Gouermel, ralentissant la progression initialement envisagée.

Localisation des investigations

Les investigations géophysiques se sont déroulées sur un secteur d'environ 1.5 km^2 (Illustration 85 et Illustration 86).

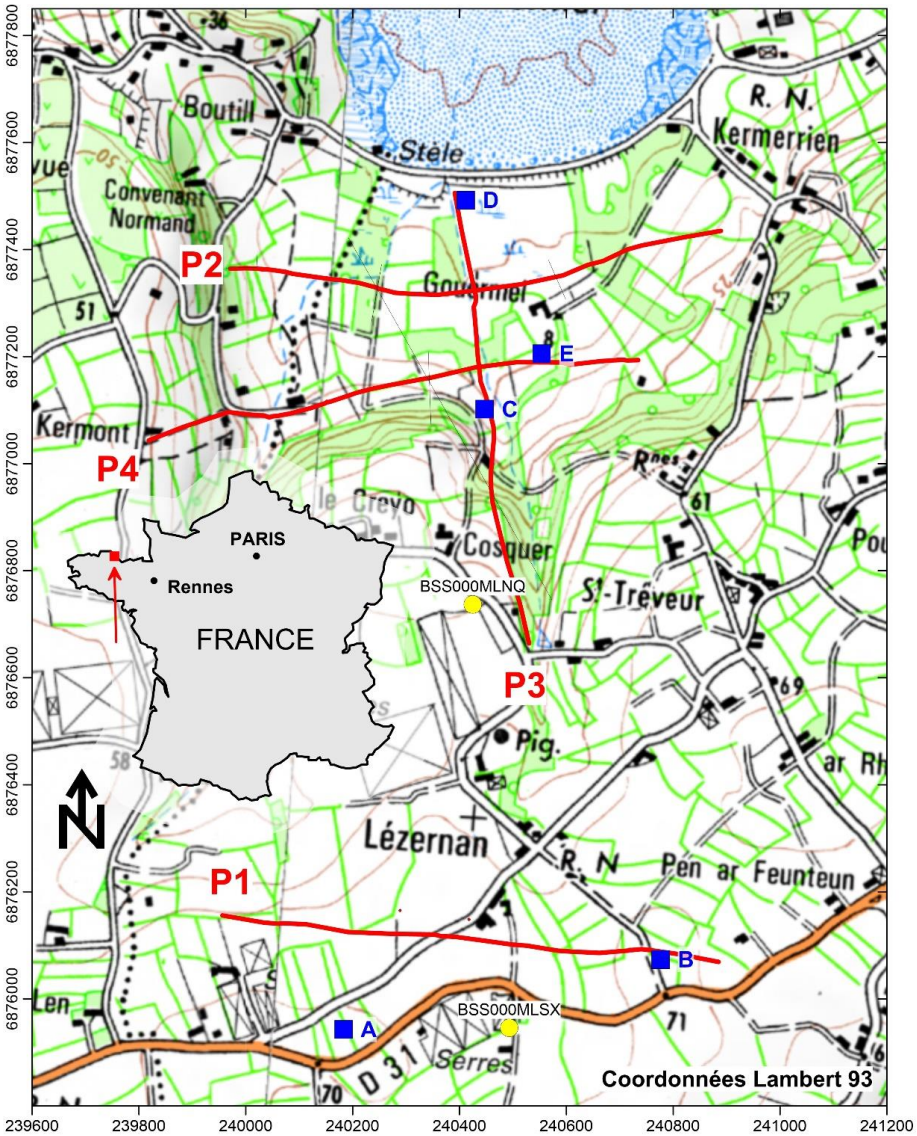


Illustration 85 : Localisation des panneaux électriques (traits rouges) réalisés sur fond de carte topographique IGN 1:25 000. Test de bruit RMP (carrés bleus) et quelques forages présents en BSS (ronds jaunes) sont également indiqués.

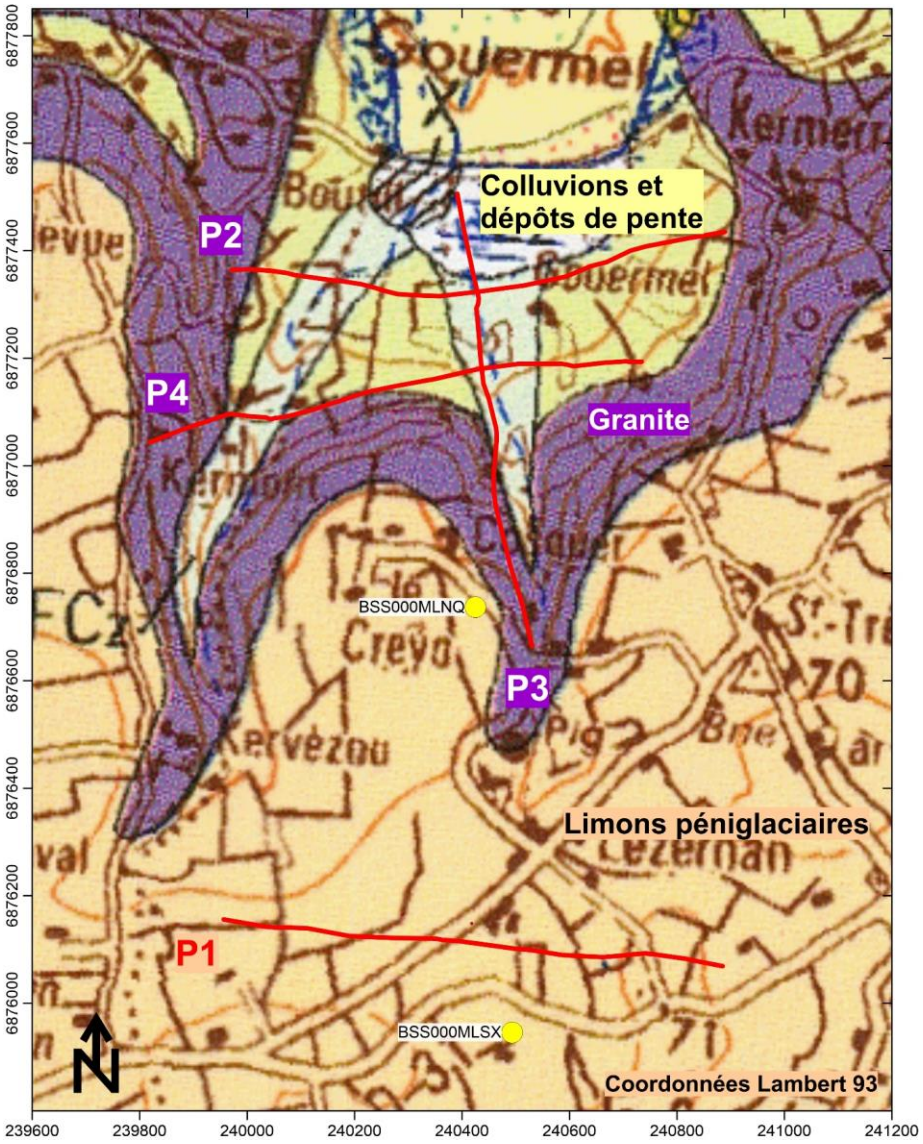


Illustration 86 : Localisation des panneaux électriques sur la carte géologique de Perros-Guirec au 1/50 000ème (d'après Guennoc et al., 2015) avec légende simplifiée

NOM	Coordonnées (Lambert 93) en mètres					
	Début de profil			Fin de profil		
	Easting	Northing	Altitude	Easting	Northing	Altitude
GOLE_P1	239956.2	6876155.9	65.5	240885.0	6876069.0	68.2
GOLE_P2	239970.8	6877364.3	22.0	240889.3	6877435.0	16.9
GOLE_P3	240530.3	6876664.2	52.3	240391.2	6877505.9	4.3
GOLE_P4	239818.4	6877043.4	51.1	240734.4	6877193.6	20.4

Illustration 87 : Coordonnées du début et fin de chaque panneau électrique

Principe et matériel utilisé

Les principes du panneau électrique et de la résonance magnétique protonique sont décrits en Annexes 7 et 8 du présent rapport.

Deux agents BRGM ont réalisé les acquisitions (4 panneaux électriques et mesures de bruit).

Le matériel suivant a été utilisé pour la réalisation des acquisitions électriques :

- 1 Syscal PRO (Iris-Instruments),
- 12 flûtes de 8 traces,
- 96 électrodes.

Les séquences d'acquisition consistent en une suite de quadripôles (2 électrodes d'injection de courant et 2 électrodes de mesures de potentiel. Deux séquences ont été mises en œuvre pour tirer parti des avantages de chacune. La première, Dipôle-Dipôle (DD), permet de mieux mettre en évidence des contrastes latéraux (type faille ou changement de lithologies abruptes) de résistivité électrique. De pénétration souvent moindre que la séquence Wenner-Schlumberger (WS) en raison de signaux devenant trop faibles pour les grands espacements, cette séquence, outre son intérêt majeur pour la raison précédente, permet d'utiliser au maximum les capacités du Syscal PRO par l'utilisation de l'ensemble des voies disponibles sur l'appareil. Pour la séquence Wenner-Schumberger, très utilisée pour sa stabilité, la force du signal mesuré ainsi que la profondeur d'investigation maximale qu'elle fournit est plus englobante et restitue (en fonction du contexte géologique) parfois moins d'informations de détail.

La séquence Dipôle-Dipôle choisie contient (pour 96 électrodes) 3218 quadripôle et la Wenner-Schlumberger 1216.

Une fois les données acquises par le Syscal et transférées sur l'ordinateur, les données sont filtrées afin d'éliminer les données aberrantes ou présentant des erreurs trop élevées.

Profil	GOLE_P1		GOLE_P2		GOLE_P3		GOLE_P4	
Date d'acquisition	17/10/2017		18/10/2017		19/10/2017		20/10/2017	
Longueur du profil (m)	950		950		870		950	
Configuration de mesure	WS	DD	WS	DD	WS	DD	WS	DD
NB de quadripôles acquis	1210	3286	1210	3286	1013	2805	1210	3286
NB de quadripôles après suppression des "gapfiller" (mesures additionnelles non conservées)	1210	2160	1210	2160	1013	1840	1201	2160
Paramètres de filtrage								
Q (erreur) max tolérée (%)	4	4	1	1	1	3	2	5
Min U tolérée (mV)	5	1	1	1	30	1	10	1
Min I toléré (mA)	10	10	10	10	2	10	3	10
Min RHOapp tolérée (Ωm)	1	1	1	1	60	40	1	1
Max RHOappa tolérée (Ωm)	2000	2000	2000	2000	2000	3000	3000	3000
NB de quadripôles rejetés	6	53	3	46	0	15	65	261
NB de quadripoles utilisés pour l'inversion	1204	2107	1207	2114	1013	1825	1136	1899
% de données conservées	100	98	100	98	100	99	95	88

Illustration 88 : Récapitulatif des paramètres d'acquisition et de filtrage des données (WS=Wenner-Schlumberger, DD=Dipôle-Dipôle, Q=erreur de mesure, U=différence de potentiel mesurée, I courant injecté, RHOapp=résistivité apparente)

Mesures de bruit

Préalablement à la réalisation de sondages par résonance magnétique protonique, des mesures de bruit électromagnétique sont indispensables afin d'évaluer la pertinence des sondages RMP (possibilités d'interprétation).

5 mesures de bruit ont été réalisées dans le secteur d'étude (Illustration 85) à l'aide d'une boucle carrée de 5m de côté. Les valeurs suivantes ont été obtenues :

A	7-8 µV
B	7-8 µV
C	3-4 µV (puis saturation)
D	Saturation
E	Saturation

Illustration 89 : Mesures de bruit réalisées dans le secteur d'étude

Au point C, la batterie du testeur a été remplacée par une batterie neuve. Les données collectées consécutivement à ce changement se sont révélées aberrantes. Il paraît donc délicat de statuer pleinement sur ces mesures.

Les niveaux de bruit ambiant observés sur le terrain montrent qu'il ne serait pas possible d'atteindre un rapport signal sur bruit (S/N) suffisant, y compris après 2 nuits et 1 journée de mesure. Finalement, le site de Plougrescrant apparait peu favorable à l'application de la RMP du fait d'un niveau de bruit électromagnétique ambiant trop élevé.

Toutefois, considérant l'intérêt de la RMP pour l'application, nous recommandons soit de choisir un site expérimental plus favorable soit de préciser les conditions de bruit à Plougrescant[5].

Un des critères d'implantation des sondages RMP retenu pour le programme SILURES Bretagne (Mougin *et al.*, 2008) était de maintenir une distance de 500 m de toute installation humaine importante (une exploitation agricole, par exemple). Ce critère, qui peut être une appréciation préliminaire des conditions d'application de la RMP, n'est nulle part respecté sur le site de Plougrescant et pourrait être difficile à obtenir sur la majeure partie du littoral breton étant donné le maillage assez serré de l'urbanisation en zone côtière. Cela reste à préciser afin d'affiner les conditions d'applicabilité de la méthode pour l'étude des intrusions salées.

Inversion des données de tomographie (panneaux électriques)

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser les données acquises (cf. Annexe 7). L'inversion des données de tomographie a été réalisée avec le logiciel RES2DINV64 (Loke and Barker, 1996).

Les coefficients d'ajustement (entre la réponse du modèle calculé en résultat d'inversion et les valeurs mesurées) compris entre 1.3 et 2.8 pour la configurations WS et 1.9 et 5.7 pour la DD sur les profils GOLE_P1 à GOLE_P4 indiquent une bonne qualité des données en accord avec les taux élevés de conservation de mesure après filtrage (Illustration 88).

Une même échelle de couleur couvrant l'ensemble des variations observées sur les différentes tomographies a été appliquée à l'ensemble des sections de résistivité (inverse de la

[5] Les niveaux de bruit ambiants baissent significativement durant la nuit mais cela reste à confirmer et évaluer sur le site de Plougrescant.

conductivité) présentées dans le chapitre suivant. Elle est limitée entre 20 et 40 000 Ω.m pour permettre une comparaison aisée des résultats.

La bonne qualité globale des données et les bons indicateurs d'inversion permettent de présenter des résultats fiables des tomographies réalisées sur tous les sites.

Résultats et interprétation des panneaux électriques

Les illustrations présentant les résultats des inversions des données de résistivité apparentes mesurées sur le terrain sont construites de la manière suivante :

- La première illustration (en haut) montre le résultat de l'inversion des données acquises selon le dispositif dipôle-dipôle. Y figurent également des informations géologiques ainsi que des indications de positionnement de terrain. Les références à des emplacements précis sont indiquées sur la première illustration selon la distance au sol depuis le début du profil.

- La seconde illustration (au milieu) montre le résultat de l'inversion des données acquises selon le dispositif Wenner-Schlumberger.

- La troisième et dernière illustration montre l'inversion jointe des données acquises selon les deux dispositifs précédents. Y figurent également les interprétations géologiques, stratigraphiques et structurales. Les horizons ou structures géo-électriques identifiés sont notés :

    - C pour conducteur,

    - R pour résistant,

    - S pour les terrains de résistivité intermédiaire (cf. ci-dessous),

    - D pour discontinuité (il peut s'agir d'une faille ou d'un brusque changement de lithologie),

    - Les chiffres 1, 2, 3, 4 identifient des horizons différents et/ou sont en relation, si possible, avec la notion de superposition de différents terrains (1 étant le terrain de surface).

D'une manière générale, la résistivité des terrains rencontrés durant cette étude est globalement élevée (majoritairement > 100 Ωm) par rapport à la gamme générale des résistivités des formations du sous-sol (0.1 – 10 000 Ωm).

Bien que quelques profils présentent des portions (souvent superficielles) de résistivités électriques inférieures à 100 Ωm, il a été choisi de représenter tous les panneaux avec une même échelle de résistivité pour en faciliter la lecture et la comparaison. Celle-ci s'étend de 20 à 40 000 Ωm.

Afin d'éviter une terminologie lourde, et considérant les valeurs relatives de résistivité, la catégorisation suivante sera adoptée:

- Résistivité < 100 Ωm → Terrains conducteurs (jaune à rouge)

- Résistivité > 100 Ωm et < 500 Ωm → Terrains de résistivité intermédiaire (jaune à vert foncé)
- Résistivité > 500 Ωm et < 2000 Ωm → Terrains résistants (vert foncé à bleu foncé)
- Résistivité > 2000 Ωm → Terrains très résistants (bleu foncé à violet)

D'une manière générale, les panneaux GOLE_P2-P3-P4 sont affectés par des effets 3D résultant de forts contrastes latéraux de résistivité, qu'il est parfois délicat d'interpréter sans avoir une couverture haute-résolution de la zone d'étude. Ces effets se manifestent notamment par une résolution variable des structures complexes selon les configurations d'acquisition (dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger).

Comme il sera mentionné dans les descriptions des profils électriques réalisés, il est rarement possible d'associer une résistivité à un horizon géologique précis sachant que l'ensemble procède de processus d'altération complexes qui se manifestent au travers de la résistivité. Toutefois, les résistivités observées sont en très bonne corrélation avec la distribution de résistivité électrique attendue sur les profils d'altération en milieu granitique.

Dans le cas général et sauf complexité locale, le profils d'altération en milieu de socle et en particulier granitoïde est imagé par une succession de haut en bas R1/C/R2. Le niveau résistant supérieur R1 correspond à la partie supérieure du profil d'altération et attribué à l'augmentation de la teneur en oxydes et hydroxydes et une diminution relative la teneur en argiles. Le conducteur intermédiaire marque le développement d'altération avec augmentation de la teneur en minéraux altéré, en argiles, l'augmentation de la porosité liée à l'altération des minéraux (fissuration) et une possible augmentation de la conductivité de l'eau de formation dans le profil de haut en bas. Le résistant R2 est attribué au substratum sain ou peu altéré. La correspondance entre l'interface R/C inférieur et la base de l'horizon fissuré telle que définie par les géologues dans les forages n'est pas évidente notamment du fait du caractère progressif de la fissuration et des différents facteurs influençant la résistivité électrique dans cette base du profil d'altération. Des niveaux résistants pouvant localement s'intercaler à l'intérieur de la couche conductrice C complexifie le schéma.

Dans le cas de Plougrescant, la partie supérieure du profil d'altération est érodée et l'image de résistivité (hors faille et anomalie localisée) se résume à la succession de haut en bas C/R.

- **Profil GOLE_P1**

Le panneau électrique GOLE_P1 est localisé au sud du secteur investigué. Il est orienté O-E et s'étend sur 950 m. Géologiquement, il est implanté uniquement sur les limons pléniglaciaires (Illustration 86). Aucune faille n'est reconnue à l'affleurement ni cartographiée dans le secteur. Seule la prolongation d'un éventuel linéament axé sur le vallon est de la zone d'étude pourrait recouper le profil GOLE_P1.

L'acquisition a été effectuée à marée montante (coefficient : 82).

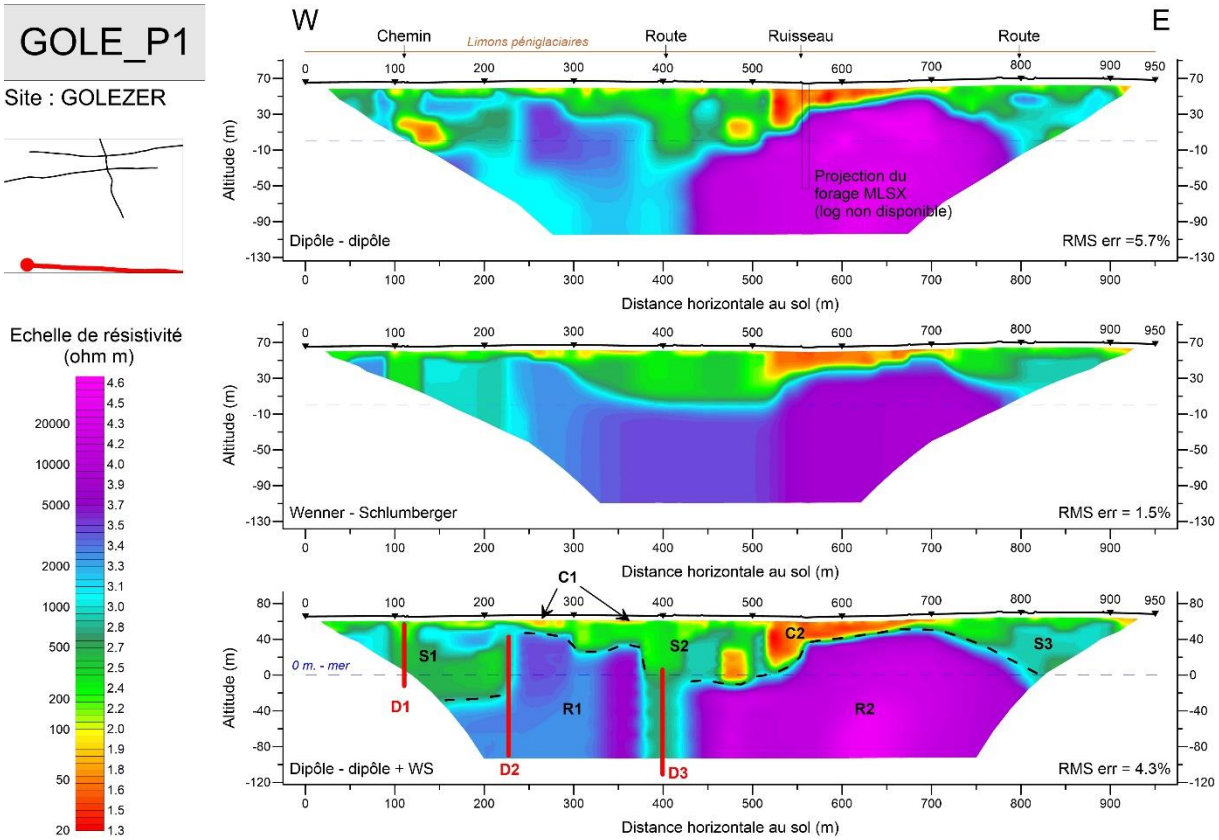


Illustration 90 : Résultat des inversions du profil GOLE_P1

En haut : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration dipôle-dipôle (DD). Au centre : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration Wenner-Schlumberger (WS). En bas ; profil de résistivité électriques issu de l'inversion de l'ensemble des données (DD + WS).

Les horizons géo-électriques observés sur GOLE_P1 sont les suivants (Illustration 90) :

- Un terrain conducteur (C1, ~100 Ωm) très superficiel, peu épais (quelques mètres) et disséminé sur plusieurs endroits du profil caractérise la surface. Il est interprété comme le sol et les limons pléniglaciaires de plateau.

- Un terrain plus conducteur (C2, ~50 Ωm) apparaît distinctement entre les abscisses 520-700 m, atteignant une épaisseur maximale d'environ 55 m en abscisses 525 m. Il pourrait s'agir d'une zone où le profil d'altération est beaucoup plus développé qu'ailleurs, ou d'un épaississement des limons pléniglaciaires.

- Un terrain d'épaisseur variable et de résistivité intermédiaire 100-500 Ωm marque le sommet du profil (S1, S2, S3). Il atteint une épaisseur maximale à l'est (~90m), au centre (65-70m) et à l'ouest (65-70m) du profil. Cet horizon géo-électrique est interprété comme le profil d'altération décrit en détail dans la section géologie du présent rapport. On observe également des horizons légèrement plus résistants à 10-20 m de profondeur et de 20 m d'épaisseur au sein de S1 (abscisses 130-230m). Dans la partie centrale, cette zone d'altération se situe à l'aplomb de l'interruption ouest du résistant profond, marquée par la discontinuité D3, peut-être associée à la présence d'une structure de faille majeure (voir chapitre modélisation 3D).

- En profondeur, on note un corps très résistant (R2, > 5000 Ωm) dans la partie est du profil (abscisses 420-800m), ainsi qu'un second un peu moins résistant (R1, >1000 Ωm) en partie ouest. Dans la partie est, il forme un bloc massif d'environ 400 m de large, interprété comme le granite sain. Bien que plus lissée sur le dispositif WS, la distribution de résistivité est cohérente entre les configurations DD et WS, indiquant un milieu globalement 2D à l'échelle de la mesure.

- Deux autres discontinuités sont représentées sur la partie ouest du profil. D1 marque une discontinuité dans le profil d'altération et D2 marque la limite ouest du corps résistant R1, peut-être associée à une fracture majeure (voir chapitre modélisation 3D) ou à la présence d'un filon.

Les points particuliers de ce panneau sont les suivants :

- La présence d'un contraste de résistivité très élevé (20-40 000 Ωm), avec des valeurs de résistivité électrique augmentant avec la profondeur.

- La mise en évidence d'une interface « ondulée » séparant un horizon très résistant en profondeur d'un autre plus conducteur en surface, interprétée comme la base d'un profil d'altération.

- La mise en évidence de discontinuités latérales, sans doute significatives, en bordure des corps résistants interprétés comme le granite sain.

- **Profil GOLE_P2**

Le panneau électrique GOLE_P2 est localisé au nord du secteur investigué, parallèle à la mer. Il est orienté O-E et s'étend sur 950 m. Géologiquement, il est implanté presqu'uniquement sur des dépôts de pentes et colluvions, à l'exception de l'extrémité ouest qui empiète sur le granite. Il recoupe le profil GOLE_P3 en abscisse 460 m. Aucune faille reconnue à l'affleurement n'est cartographiée dans le secteur. Seule la prolongation d'éventuels linéaments axés sur les deux vallons de la zone d'étude pourrait recouper le profil GOLE_P2.

L'acquisition a été effectuée à marée montante (coefficient : 89).

Bien que l'ensemble de la section de résistivité soit à peu près équivalente entre les dispositifs DD et WS avec des corps résistants plus superficiels entre les abscisses 280-420 et 680-820 m, en profondeur la restitution des anomalies de conductivité plus forte n'est pas identique, indiquant des effets 3D sans doute importants discutés dans le chapitre « modélisation 3D ».

Les horizons géo-électriques observés sur GOLE_P2 sont les suivants (Illustration 91) :

- Un terrain conducteur (C1, ~100 Ωm) très superficiel et irrégulier caractérise la surface. A l'extrémité ouest, à la jonction entre le granite et les dépôts de pente sa résistivité s'abaisse à ~50 Ωm (C2). Similaire à celui que l'on observe sur GOLE_P1, il peut être associé au sol ou à des invasions d'eaux saumâtres dans les altérites, à l'intérieur de l'anse de Gouermel.

- En partie centrale du profil (S2, abscisses 420-620 m), ainsi qu'aux extrémités (S1 et S3), C1 est souligné par un horizon de résistivité intermédiaire épais qui atteindrait 70 mètres d'épaisseur à l'ouest. Au centre, de 20 à 30 m d'épaisseur, il correspond à la partie « colluvions » de la carte géologique. Présence d'eau saumâtre à vérifier par

forage. Un ruisseau s'écoule une vingtaine de mètres à l'ouest du croisement avec le P3.

- On observe trois corps très résistants. Deux, moins épais et plus superficiels (R1 et R3) bordent le troisième central (R2) plus profondément enraciné. Leur résistivité dépasse les 10 000 Ωm. Leur proximité de la surface est en lien direct avec la proximité de la mer qui par son action a contribué à décaper la quasi-totalité du profil d'altération. Cette érosion est également attribuée à l'action des écoulements de surface.

- A l'est, une alternance d'horizons de résistivité intermédiaire et conducteurs pourrait marquer des terrains envahis par une eau saumâtre plus en profondeur. Cette portion pourrait faire l'objet d'un contrôle par résonance magnétique protonique RMP.

- En profondeur, un conducteur massif (C3) apparaît entre les abscisses 550 et 680 m, principalement sur le dispositif DD et se reporte ainsi sur le résultat global (DD+WS). Son origine est inconnue, la présence d'horizons argileux n'est pas connue et les deux corps résistants massifs de part et d'autres suggèrent que l'on se trouve dans le granite sain et par conséquent sous le profil d'altération. Pourrait-il s'agit d'une structure majeure pénétrée par de l'eau saumâtre (à confirmer par RMP) ?

- Plusieurs discontinuités (failles, structures, transitions lithologiques, …) sont relevées. D1 limite la zone de résistivité intermédiaire à l'ouest S1, du résistant R2'. D2 limite à l'ouest le résistant R1. D3 est hypothétiques. D4, D5 et D6 limitent les résistants R2 et R3.

Les points particuliers de ce panneau sont les suivants :

- La présence d'un contraste de résistivité très élevé (50-40000 Ωm)

- La mise en évidence de compartiments très résistants, isolés ou segmentés par des zones plus conductrices.

- La présence d'un corps central très résistant que l'on peut associer à celui identifié sur le profil GOLE_P4, tout comme les deux parties plus conductrices le bordant de part et d'autre.

- La mise en évidence d'une partie centrale présentant une zone d'altération ou alluvions plus épaisses (ou imbibées d'eau plus conductrice)

- La mise en évidence de discontinuités, sans doute majeure, en bordure des corps résistants interprétés comme le granite sain.

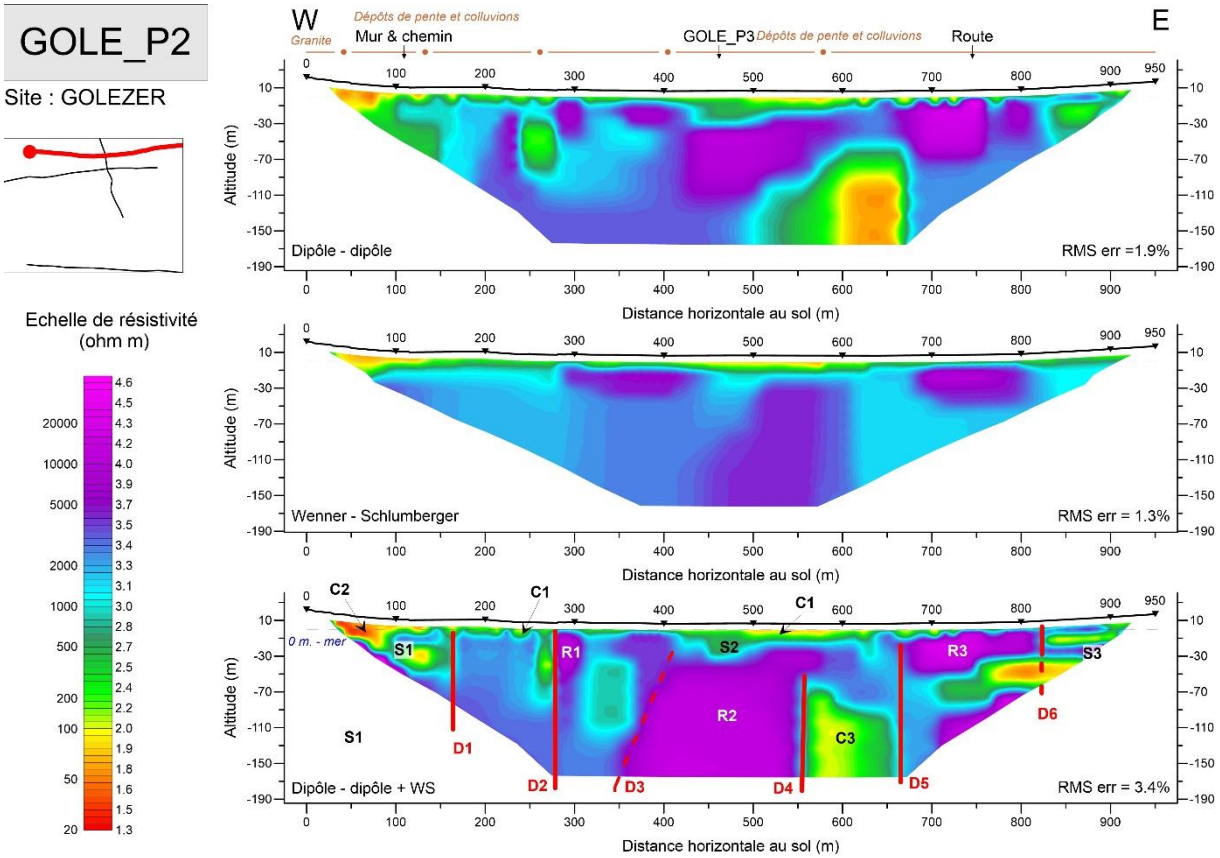


Illustration 91 : Résultat des inversions du profil GOLE_P2

En haut : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration dipôle-dipôle. Au centre : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration Wenner-Schlumberger. En bas ; profil de résistivité électriques issu de l'inversion de l'ensemble des données (DD + WS).

- **Profil GOLE_P3**

Le panneau électrique GOLE_P3 est localisé au nord du secteur investigué, perpendiculairement à la côte. Il est orienté S-N et s'étend sur 870 m. Géologiquement, il est implanté presque uniquement sur des dépôts de pentes et colluvions en partie aval, et sur du granite à l'amont (Illustration 86). Il recoupe le profil GOLE_P4 en abscisse 525 m et le profil GOLE_P2 en abscisse 670 m. Aucune faille reconnue à l'affleurement n'est cartographiée dans le secteur. Seule la prolongation d'un éventuel linéament axé sur le vallon est de la zone d'étude pourrait longer le profil GOLE_P3.

L'acquisition a été réalisée à marée basse (coefficient : 93) et n'a pas été répétée à marée haute.

L'inversion des données DD ou WS séparément fournit des modèles de résistivités relativement différents dans le détail. Le substrat résistant est bien révélé par les deux configurations de mesure mais leurs limites et leurs valeurs varient considérablement. En outre, le résultat du WS montre des compartiments de résistivité plus découpés que le résultat DD, aux interfaces plus lisses. Ces différences sont le reflet de structures géologiques plus complexes qui nécessiteraient des investigations réellement 3D pour être mises plus finement en évidence.

Les horizons géo-électriques observés sur GOLE_P3 sont les suivants (Illustration 92) :

- Un terrain conducteur (C1, ~100 Ωm) très superficiel, plus présent et continu dans la partie nord caractérise la surface.

- Trois zones de résistivité intermédiaire (S1, S2 et S3) marquent essentiellement la partie sud du profil (abscisses 80-500m). Celles-ci marquerait la présence d'un horizon d'altération plus développé dans cette zone en accord avec les observations géologiques, alors que ce dernier aurait été largement décapé par l'érosion fluviatile et l'action marine. Celles-ci sont délimitées par les discontinuités D1, D2, D4 et D5.

- Trois zones plus conductrices (C2, C3 et C4) se distinguent en profondeur sous le niveau de la mer. Sans contraintes extérieures (forage, par exemple), il est délicat d'en affirmer l'origine. Entre les abscisses 160 et 380 m, les corps C2 et C3 semblent positionnés à la base du profil d'altération et pourraient refléter soit la présence d'argiles soit des arènes granitiques imbibées d'eau saumâtre qui abaisserait significativement la résistivité des terrains. Au nord, le conducteur C3 n'apparaît que sur l'inversion conjointe des deux dispositifs (aucunement sur le DD, ni sur le WS). De même sur les données mesurées (en WS par exemple), aucune baisse de résistivité apparente n'est observée. Il pourrait s'agir d'un artefact inversion, ou, si réel, cette anomalie pourrait refléter l'invasion d'eau saumâtre dans un horizon fissuré par exemple ou une zone argilisée.

- Les données du forage BSS000MLNQ (atteignant 121 m de profondeur) montrent la présence d'altérites sur 12 m d'épaisseur (interface à 43 m d'altitude), puis des dolérites jusqu'en pied de forage. La projection du forage, situé à environ 85 m du profil, le positionnerait en abscisse ~105 m. Considérant que cette projection géométrique n'est peut-être pas exacte, on observe qu'à gauche de la discontinuité D1 (en abscisse 80 m environ), on trouve une succession verticale de résistivité conforme à la description géologique de l'ouvrage.

- En profondeur, on trouve un horizon très résistant (R1 et R2) remontant vers la surface au nord du profil. Il apparaît segmenté en de nombreux compartiments illustrés par les discontinuités ajoutées sur la figure interprétée. Le profil P2, recoupé en abscisse ~670 m montre également la présence d'un corps massif et très résistant à quelques dizaines de mètres de profondeur. Le profil P4, recoupé en abscisse ~525 m, montre également ce corps résistant massif, interprété comme le granite sain.

Les points particuliers de ce panneau sont les suivants :

- La présence d'un contraste de résistivité très élevé (50-40 000 Ωm)

- La mise en évidence d'une zone complexe entre les abscisses 180-380 m, liée au développement d'un profil d'altération plus épais ou à l'interconnexion d'un important réseau de fractures.

- La mise en évidence de corps conducteur (C2 et C3) en profondeur dont l'origine est inconnue, mais pourrait être liée soit la présence d'horizon argileux épais, soit à la présence d'un horizon poreux (arènes granitique) imbibées d'eau saumâtre.

- Un corps conducteur suspect (C4), notamment parce qu'il n'est pas imagé sur le profil transverse P2 : ce peut être un effet latéral mal résolu par l'inversion 2D.

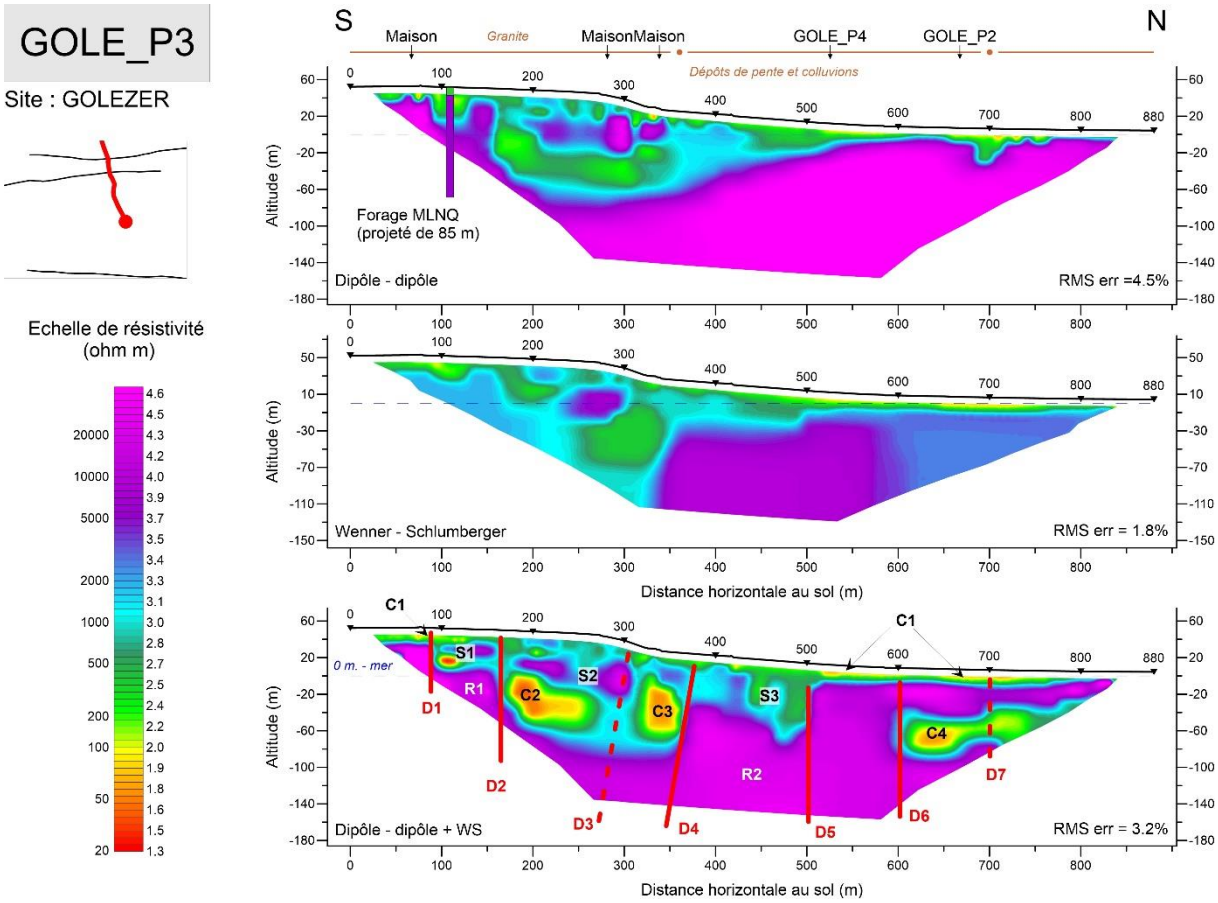


Illustration 92 : Résultat des inversions du profil GOLE_P3

En haut : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration dipôle-dipôle. Au centre : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration Wenner-Schlumberger. En bas ; profil de résistivité électriques issu de l'inversion de l'ensemble des données (DD + WS).

- **Profil GOLE_P4**

Le panneau électrique GOLE_P4 est localisé au nord du secteur investigué, parallèlement à la côte et donc à P2. Il est orienté O-E et s'étend sur 950 m. Géologiquement, il est implanté sur des dépôts de pentes et colluvions en partie est et sur le granite entre les abscisses 0-160 m et 260-440 m aval sur la partie ouest (Illustration 86). Il recoupe le profil GOLE_P3 en abscisse 640 m. Aucune faille reconnue à l'affleurement n'est cartographiée dans le secteur. Seule la prolongation d'éventuels linéaments axés sur les deux vallons de la zone d'étude pourrait recouper le profil GOLE_P4.

L'acquisition a été réalisée à marée basse (coefficient : 93).

Les sections de résistivité issues des inversions des dispositifs DD et WS sont globalement équivalentes, présentant un horizon superficiel plus conducteur surmontant un massif très résistant segmenté en profondeur. On note néanmoins une meilleure restitution des variations latérales de résistivité par le dispositif DD et ainsi dans le résultat final (DD+WS). Des effets 3D sont ici également présents.

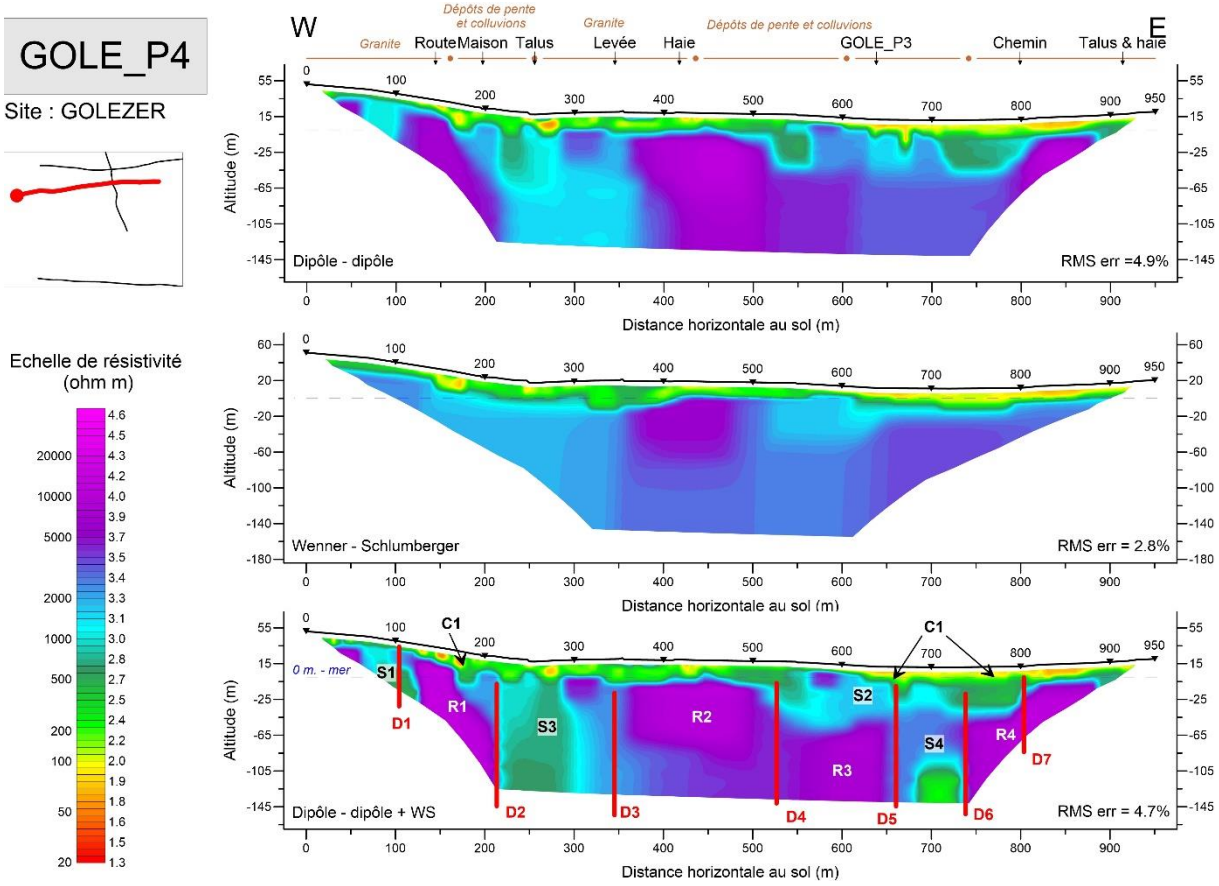


Illustration 93 : Résultat des inversions du profil GOLE_P4

En haut : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration dipôle-dipôle. Au centre : profil de résistivité électrique issu de l'inversion des données acquises en configuration Wenner-Schlumberger. En bas ; profil de résistivité électriques issu de l'inversion de l'ensemble des données (DD + WS).

Les horizons géo-électriques observés sur GOLE_P4 sont les suivants (Illustration 93) :

- Un terrain conducteur (C1, <100 Ωm) de 20-30m d'épaisseur apparaît sur l'ensemble du profil, avec une légère différence de conductivité avant et au-delà de l'abscisse 580 m (correspondant au passage dans la plaine herbeuse du marais de Gouermel). Il est associé aux dépôts de pente et colluvions et certainement au profil d'altération.

- Deux zones de résistivité intermédiaire superficielles dessinant un approfondissement du profil d'altération sont identifiées. La première (abscisses 60 à 120 m) est localisée et associée à la discontinuité D1. La seconde est plus étendue (abscisses 520-800 m) se développe sur environ 30-40 mètres d'épaisseur avec des portions plus ou moins résistantes.

- Deux autres zones de résistivité intermédiaire (S3 et S4) limitent clairement le corps résistant central (R2 et R3) et se manifestent verticalement entre les discontinuités D2-D3, et D5-D6, respectivement. Celles-ci pourraient être associées à la présence de failles importantes et se prolongeraient au nord sur le profil P2 (voir interprétation générale). L'implication d'invasion marines par ces deux discontinuités majeures n'est pas à exclure.

- Un corps très résistant central (R2 + R3), sans doute discontinu (D4), marque le centre du profil de résistivité. De part et d'autre du profil, deux résistants (R1 et R4) atteignent presque la surface. Ceux-ci sont associés au granite sain.

Les points particuliers de ce panneau sont les suivants :

- La présence d'un contraste de résistivité très élevé (50-40 000 Ωm)

- La présence de deux zones de résistivité intermédiaire, larges bordant le corps résistant massif central et que l'on peut rattacher à la distribution de résistivité observée sur le profil P2.

- La segmentation des corps résistants en compartiments bien différenciés.

Modélisation 3D

Dans le but de mieux comprendre les distributions de résistivité observées, et notamment les différences entre les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger, une modélisation 3D a été réalisée à l'aide du logiciel RES3DMOD.

Le but de ces modélisations est de fournir des informations supplémentaires pour améliorer et affiner l'interprétation des résultats obtenus en posant des limites physiques à celle-ci. De nombreux cas pourrait être simulés et ne sont pas l'objet du présent rapport.

Inspiré des résistivités observées et de la géologie, le milieu comprend un horizon de 40 m d'épaisseur à 100 Ωm (correspondant au profil d'altération) surmontant un milieu très résistant (10000 Ωm, correspondant au granite sain) dans lequel sont insérées 3 failles de 40 m d'épaisseur (en bleu sur l'Illustration 94). Deux zones de failles sont verticales et parallèles, séparées de 200 m, et sont recoupées à environ 60° par la troisième. Leur résistivité a été fixée à 10 Ωm. Le modèle comprend 12 couches. Aucun bruit artificiel n'a été ajouté à ces données synthétiques.

A partir de ce modèle, les résistivités apparentes sont calculées pour 2 profils orientés E-O et deux configurations (dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger), sans ajout de bruit.

Les données sont ensuite inversées (avec les mêmes paramètres d'inversion qu'utilisés dans cette étude) à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke and Barker, 1996) et présentées ci-dessous (Illustration 95 à Illustration 100). Chaque figure montre :

- En haut : la section de résistivités apparentes calculées (issue de la modélisation directe du modèle 3D) ;

- Au milieu : la section de résistivités apparentes calculées à partir du modèle de résistivité recherché (qui doit se rapprocher le plus possible de la précédente) ;

- En bas le modèle de résistivité obtenu avec une échelle de résistivité commune s'étendant de 2 à 11 000 Ωm.

Pour le cas de l'inversion jointe DD+WS (Illustration 97 et Illustration 100), la figure ne montre que le modèle de résistivité obtenu (impossibilité d'afficher les sections de résistivité apparente dans le cas de configurations jointes).

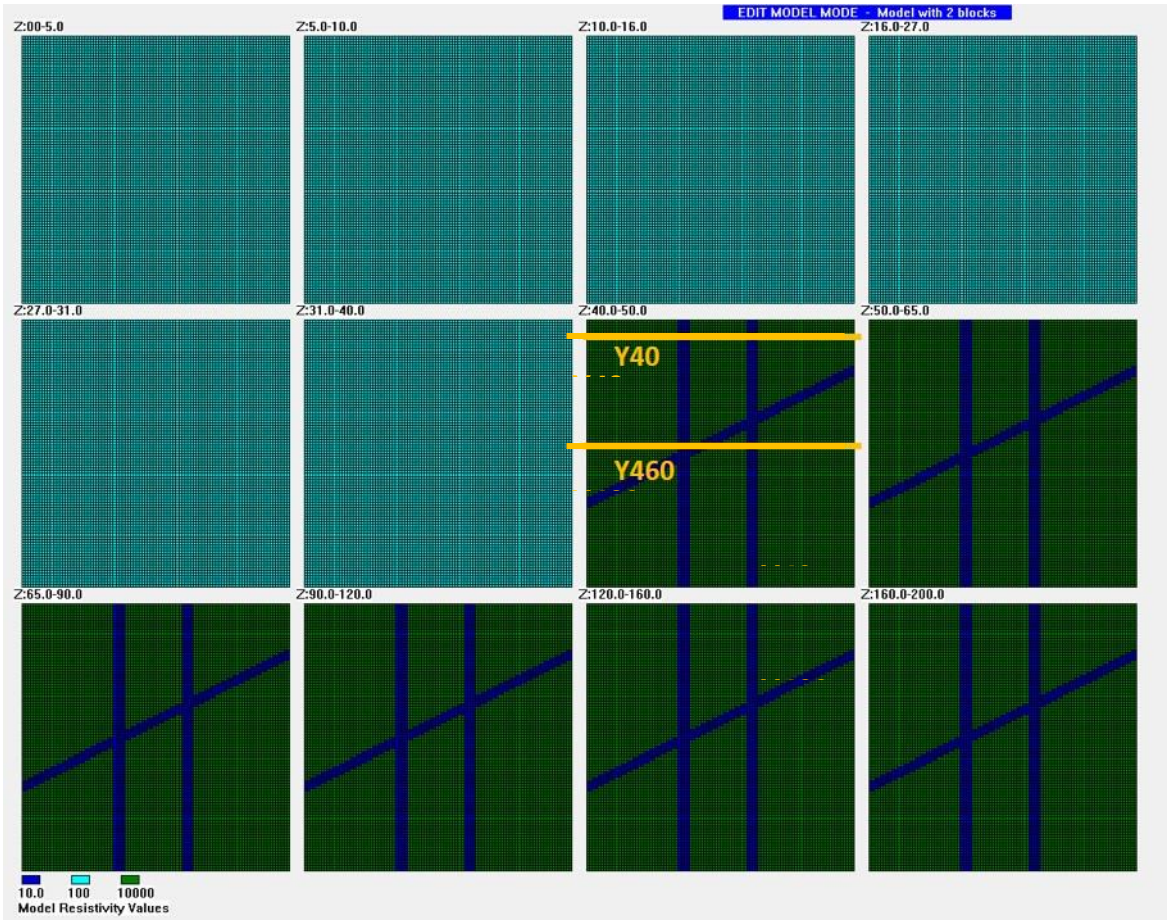


Illustration 94 : 12 couches du modèle de résistivité synthétique 3D avec localisation des profils extraits Y40 et Y460 (lignes horizontales oranges) et failles (lignes bleu). De haut en bas et de gauche à droite : coupes horizontales dans le modèle aux profondeurs Z indiquées en haut à gauche pour chaque coupe.

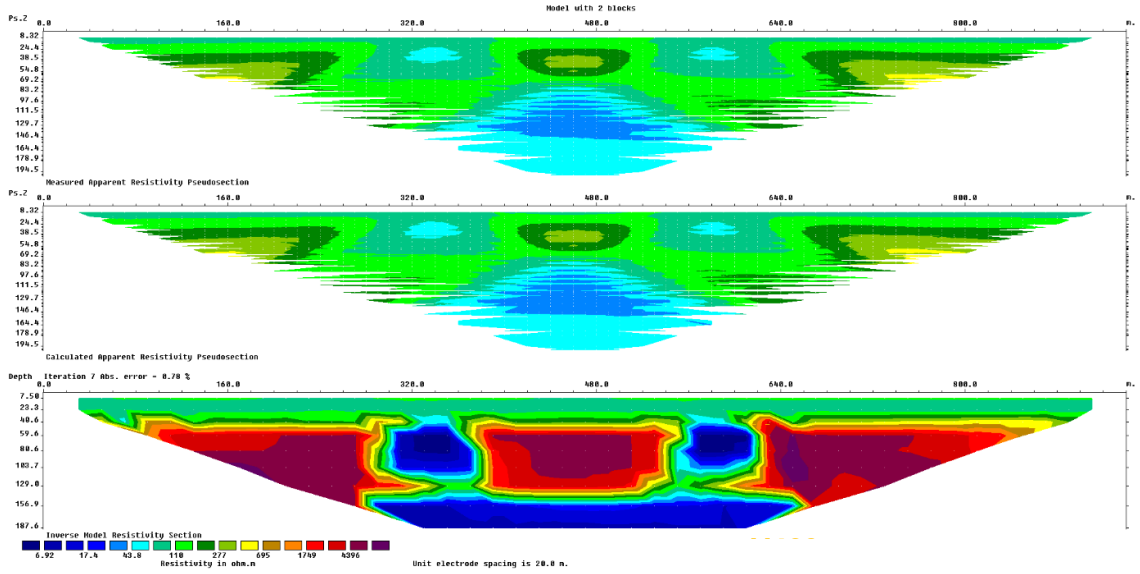


Illustration 95 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration dipôle-dipôle.

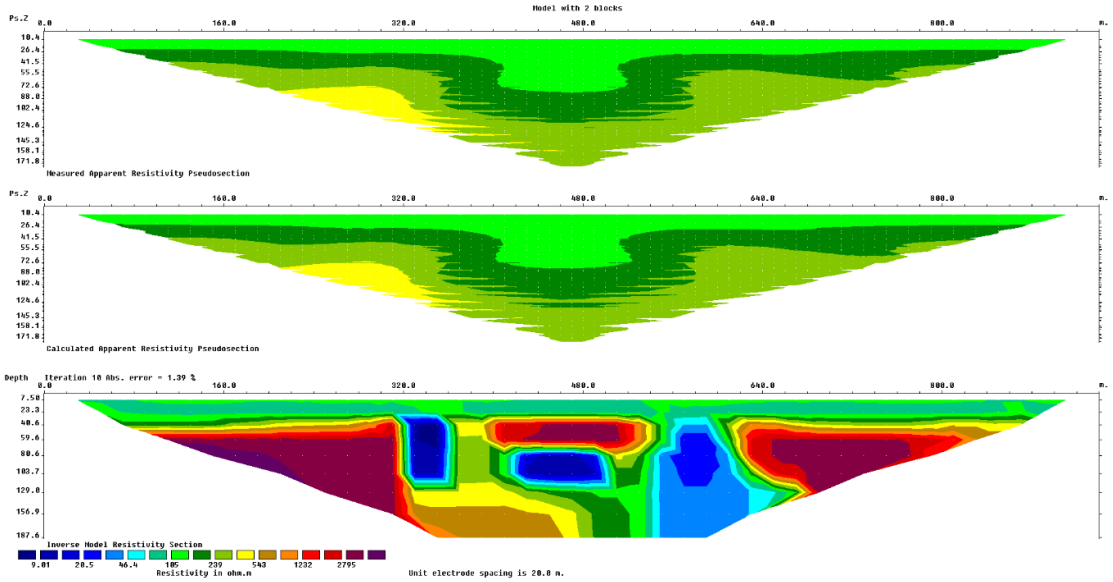


Illustration 96 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration Wenner-Schlumberger.

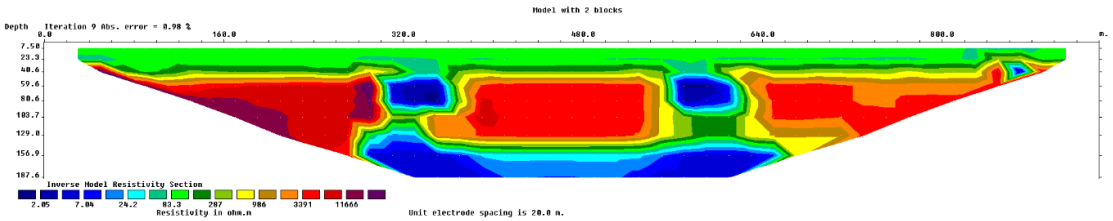


Illustration 97 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y40), configuration Dipôle-Dipôle + Wenner-Schlumberger.

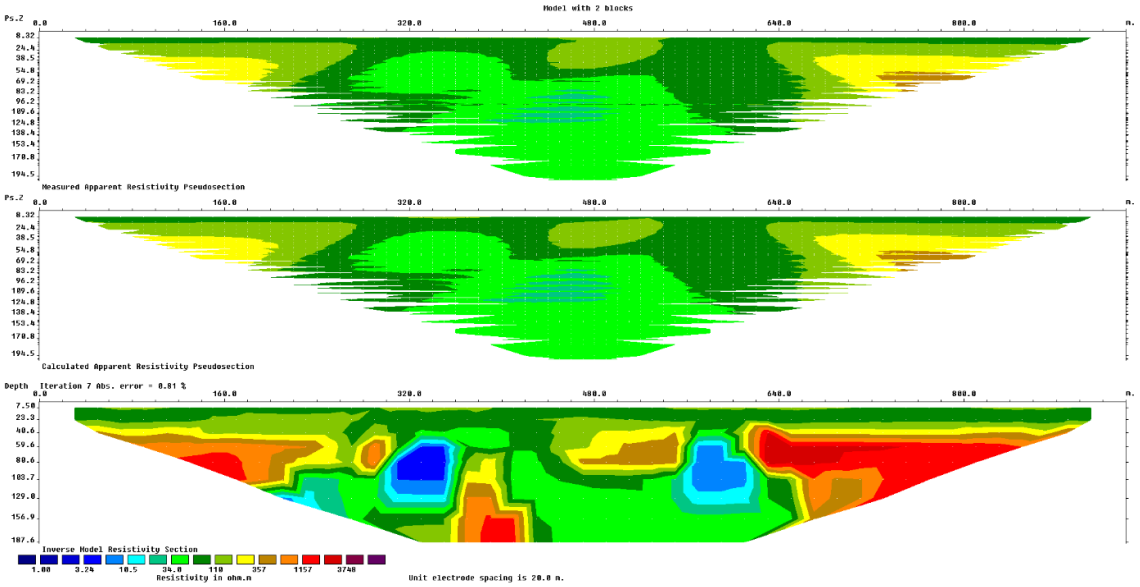


Illustration 98 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration dipôle-dipôle.

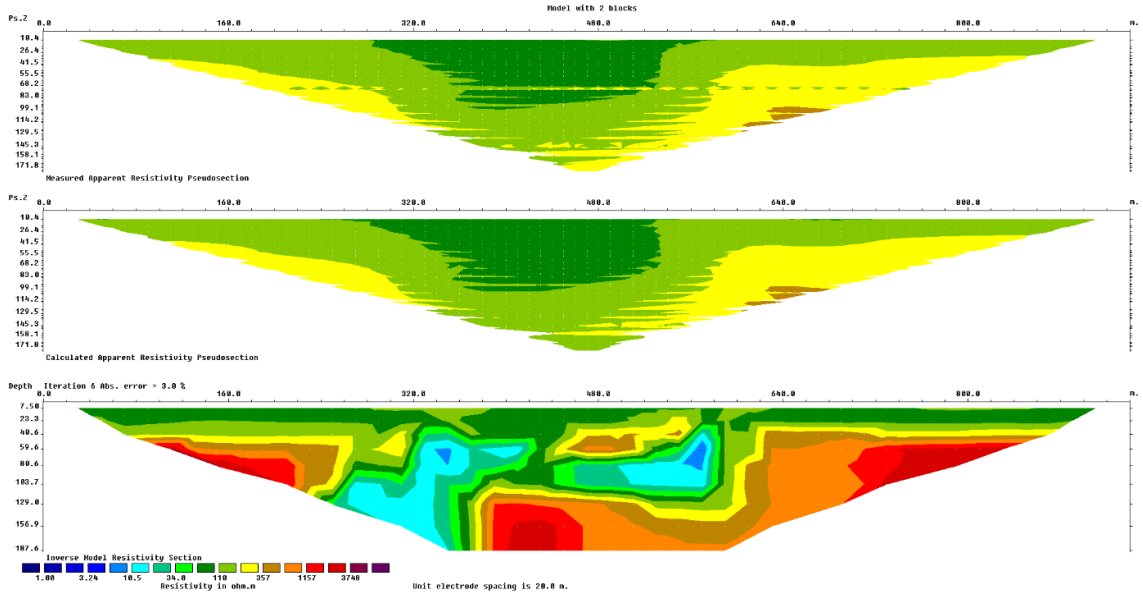


Illustration 99 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration Wenner-Schlumberger.

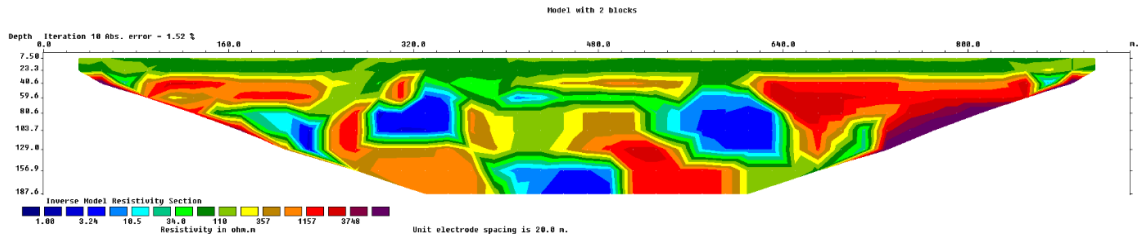


Illustration 100 : Résultat de l'inversion du profil E-O (Y460), configuration Dipôle-Dipôle + Wenner-Schlumberger.

On observe principalement les points suivants :

- Le premier horizon, homogène, correspondant au profil d'altération est globalement toujours bien reconstitué.
- Le toit du granite sain ou peu altéré, est également très bien retrouvé à la profondeur de 40 m.
- En revanche, on observe que la présence des failles affecte profondément la reconstitution en profondeur, selon qu'elles sont recoupées perpendiculairement (cas quasi 2D du profil Y40, Illustration 95 à Illustration 97) ou que la géométrie est réellement 3D (cas du profil Y460, Illustration 98 à Illustration 100).
- Par exemple, la reconstitution en profondeur du granite sain entre les failles (Illustration 95 à Illustration 97, au centre) est incomplète avec l'illusion qu'un bloc très résistant « flotte » dans un milieu plus conducteur.
- Sur le profil Y460 (Illustration 98 à Illustration 100), cet effet est amplifié par la présence de la troisième faille, dont le résultat se manifeste par un assemblage de bloc aux résistivités variables (notamment sur le dispositif dipôle-dipôle).

L'intérêt de cette section est d'illustrer l'interprétation des profils GOLE_P2 et GOLE_P4, sur lesquels on observe précisément une distribution de résistivité similaire avec des blocs très résistants semblant « flotter » dans un milieu un peu plus conducteur. On comprend qu'une interprétation basée sur des grands couloirs de faille est alors plausible.

Interprétation générale

Afin de discuter d'une interprétation générale des données collectées dans le cadre de cette étude, les panneaux électriques ont été positionnés sur l'ancienne carte géologique (Delattre *et al.*, 1966) qui, comme évoqué précédemment, faisait ressortir la présence de nombreux filons d'albitophyre de Pors-Hir dans la zone d'étude (Illustration 101). On observe les points suivants :

- La discontinuité D1 du profil GOLE_P4 pourrait être associée à des alluvions
- La zone perturbée du profil GOLE_P3 pourrait être associée soit à :
    - des fractures qui abaisseraient le profil d'altération vers l'ouest ;
    - la traversée des filons d'albitophyres, recoupés dans ce cas de manière optimale, soit perpendiculairement ;
    - ou encore à des zones d'altération différentielle dans différents granites et dans des zones plus fissurées et fracturées.
- Il se pourrait que des filons, non cartographiés par absence d'affleurements dans le marais de Gouermel, puissent exister (à confirmer par forage). Leur présence et par conséquent leurs propriétés électriques peuvent expliquer la géométrie 3-D du milieu en termes de résistivité, et donc les réponses différentes obtenues par les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger.

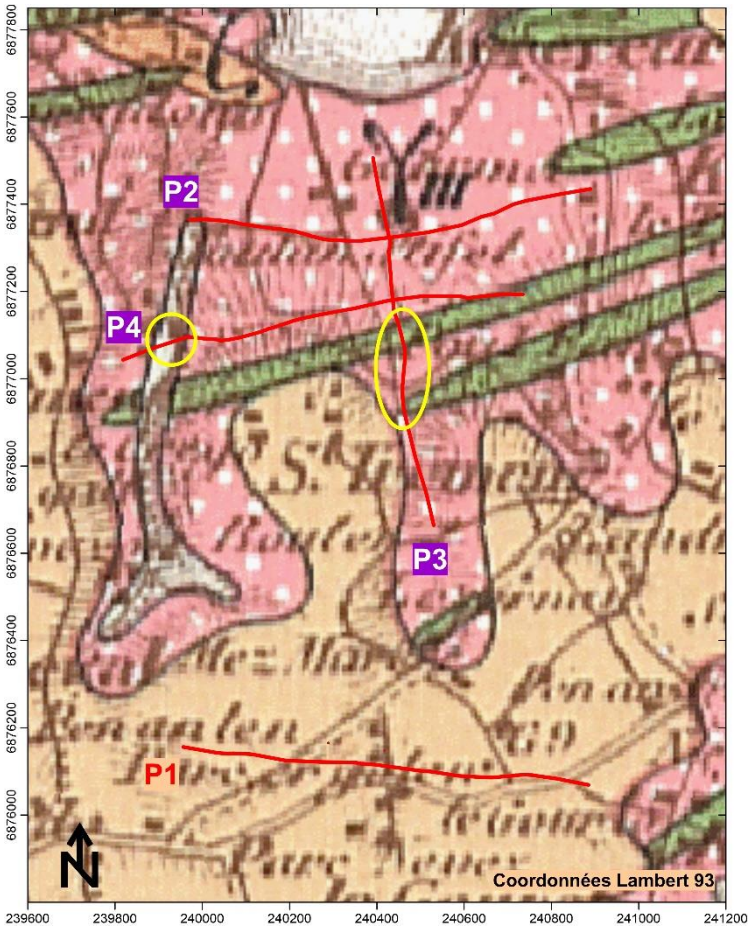


Illustration 101 : Localisation des panneaux électriques sur l'ancienne carte géologique (Delattre et al., 1996). Les deux ellipses jaunes marquent l'emplacement d'anomalies de résistivité électrique observées.

D'une manière générale, les points suivants ressortent de l'analyse des 4 panneaux électriques effectués sur le secteur de Lézernan-Gouermel :

- Un horizon superficiel conducteur (50-100 Ωm) de quelques mètres d'épaisseur observé dans tout le secteur ;

- Cet horizon superficiel est souligné, par portions, par un horizon de résistivité intermédiaire d'épaisseur variable, mais atteignant plusieurs dizaines de mètres par endroit, attribué au profil d'altération. Sa base, généralement constituée d'un horizon fissuré, peut faire l'objet de cibles hydrogéologiques d'intérêt (par ex. sur le profil GOLE_P1) ;

- Sous ce dernier, on observe sur tout le domaine investigué des corps très résistants (>10000 Ωm) bien individualisés, au gré d'une hétérogénéité du milieu associée à une fracturation complexe et 3-D expliquant les réponses différentes obtenues pour les dispositif dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger.

- La fracturation, l'hétérogénéité des corps granitiques et l'altération différentielle qui les caractérise se manifestent au travers de zones moins résistantes segmentant le granite sain qui peuvent atteindre la base des profils de résistivité (par ex. GOLE_P1 ou GOLE_P4). L'impact du complexe filonien resterait mineur. L'interprétation la plus fiable que l'on puisse fournir sur la base des discontinuités observées, est la présence de deux

couloirs plus conducteurs qui semblent s'organiser dans l'axe des deux petites vallées descendant sur le marais de Gouermel.

- Sans éléments de contraintes additionnels (données de forage par exemple), il est impossible de statuer sur l'origine de cette baisse de résistivité qui peut être de diverses natures :

    - Zones de fractures altérées associées à des perméabilités plus élevées et possiblement présence d'eau douce, voire d'invasions d'eau saumâtre (par ex : GOLE_P2 ou GOLE_P4), comme le montrent la modélisation 3D ;

    - Hétérogénéité des corps granitiques « sains » ayant subi une cinétique d'altération différente en fonction de leur composition minéralogique (d'où des teneurs en argiles variables).

Conclusions sur les investigations géophysiques

L'étude géophysique entreprise dans le cadre du présent programme d'investigations des potentielles invasions salines en milieu fissuré breton a permis de mettre en évidence une structuration du milieu en compartiments de granite « sain » et très résistants, séparés par des zones plus conductrices. Les structures conductrices verticales ou horizontales identifiées sont de potentielles réponses électriques des intrusions salines selon la géométrie de l'horizon fissuré (développement horizontal) ou selon la géométrie de zone faillée/fissurée (développement vertical). Les modélisations réalisées montrent que des structures verticales (zone faillée/fissurée, filon) peuvent se manifester par des anomalies ayant un développement horizontal en résultat d'inversion 2D.

Il est cependant nécessaire d'acquérir des informations complémentaires (par forages et diagraphies, et hydrochimie de l'eau) pour permettre de conforter et d'asseoir les interprétations proposées dans le présent travail (notamment valider les hypothèses d'invasions salines évoquées) afin d'optimiser et généraliser l'application de cette technique d'investigation du milieu fissuré côtier à plus grande échelle. L'approche 2D utilisée est insuffisante et devrait être complétée par une couverture plus détaillée (série de profils 2D plus rapprochés ou couverture 3D).

Par ailleurs, l'interprétation de ces anomalies conductrices reste ambigüe dans ce contexte étant donné qu'une augmentation de l'argilosité (défavorable au flux hydrique) comme une augmentation de la teneur en eau saumâtre (favorable au flux hydrique) peuvent être expliquer ces conductivités plus élevées relativement à leur environnement.

En principe les sondages RMP s'appliquent à préciser les propriétés hydriques de ces structures conductrices en définissant leur teneur en eau et leur transmissivité RMP. Si l'environnement s'y était prêté, les sondages RMP auraient ainsi permis de distinguer les structures favorables au flux hydrique des structures défavorables.

Comme effectué dans le cadre de cette étude, une reconnaissance géologique préalable (cartographie des altérites et mesure des directions principales de fracturation) semble indispensable pour bien identifier les structures en jeu en cas de travail similaire sur d'autres secteurs.

4.3. CONFRONTATION DES INVESTIGATIONS IN SITU GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES AU REGARD DE LA CONNAISSANCE REGIONALE

La caractérisation spatiale des intrusions salines sur un secteur test a mis en évidence la complexité du phénomène et la difficulté d'en identifier les causes, notamment en raison d'un manque de connaissance de la géologie en profondeur.

Dernièrement de nouvelles investigations de terrain sur une centaine de forages d'eau bretons à travers le projet ANAFORE (*en cours*) mené par le BRGM, ont permis de caractériser à l'échelle de chaque forage mais aussi à l'échelle régionale : (1) le fonctionnement hydraulique au droit de ces forages par une ré-interprétation des pompages d'essais et (2) la géométrie immédiate de l'aquifère de socle à chaque forage.

Statistiquement, dans le projet ANAFORE, la géométrie principale qui ressort des analyses de terrain **au niveau régional**, à savoir :

- Cartographie des altérites ;
- Analyse structurale ;
- Analyse des jeux tectoniques des failles en présence ;
- Et analyse des données acquises pour l'implantation de ces forages : analyse linéamentaire, profils de géophysique, etc. ;

est une géométrie de type « graben » (bassin d'effondrement) dont les directions de failles/fractures ont une orientation N150, NS et N040. L'effondrement est mis en évidence par la cartographie des altérites où il est possible d'observer une surface d'altération souvent effondrée par rapport à une autre et lu directement sur les miroirs de failles.

Un jeu tectonique transtensif dextre pour les failles d'orientation N150, est lu alors que pour les failles de direction sub NS et N040, le jeu tectonique est transtensif senestre.

Pour en revenir à **cette présente étude**, en reprenant les profils de géophysique levés sur le site de l'anse de Gouermel, il est possible d'identifier des structures principales correspondant aux contrastes électriques les plus importants. De profils en profils, chaque structure peut être identifiée et nommée (Illustration 102) en faille F1 à F3. On retrouve les directions de fracturation mesurées par le géologue et la géométrie montre un système de forme triangulaire qui rappelle la géométrie des fracturations identifiée dans le projet ANAFORE.

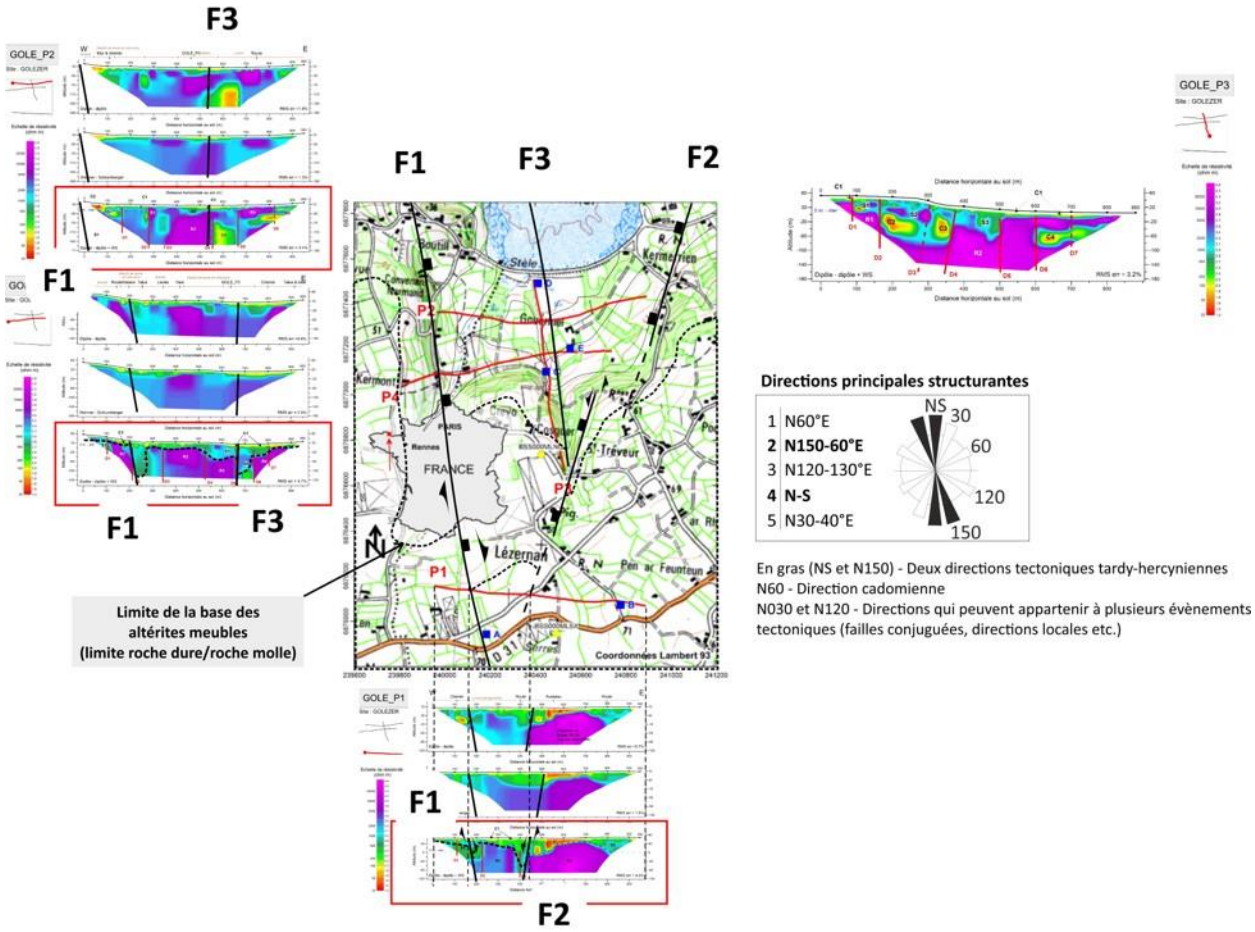


Illustration 102 : Réinterprétation des résultats des profils électriques P1 à P4 sur fond de carte topographique 1:25 000 (SCAN-IGN)

La cartographie de la base des altérites meubles montre que les structures tectoniques affectent celle-ci et permet de proposer un schéma structural cohérant avec ce qui est déjà connu (projet ANAFORE *en cours*).

Les structures tectoniques identifiées sur les profils de géophysique donnent l'allure principale à l'anse de Gouermel qui serait structurée tectoniquement par des failles d'orientation N150/170 et N020 (Illustration 103).

La zone basse en arrière du trait de côte occupée par un marais maritime holocène serait une zone effondrée comprise entre ces directions sub NS à N020/040. Le profil électrique orienté NS (P3) montrerait que les structures tectoniques cadomiennes héritées auraient accommodé la déformation et auraient été réutilisées.

Le plateau topographique montrant des résistances électriques supérieures à celle de la zone basse, serait constitué des roches sur lesquelles l'altération est réduite (en partie érodée ?) alors que la zone basse montre des résistances électriques plus faibles qui illustrent le fait que les altérites meubles soient effondrées et préservées en fond de bassin (Illustration 103).

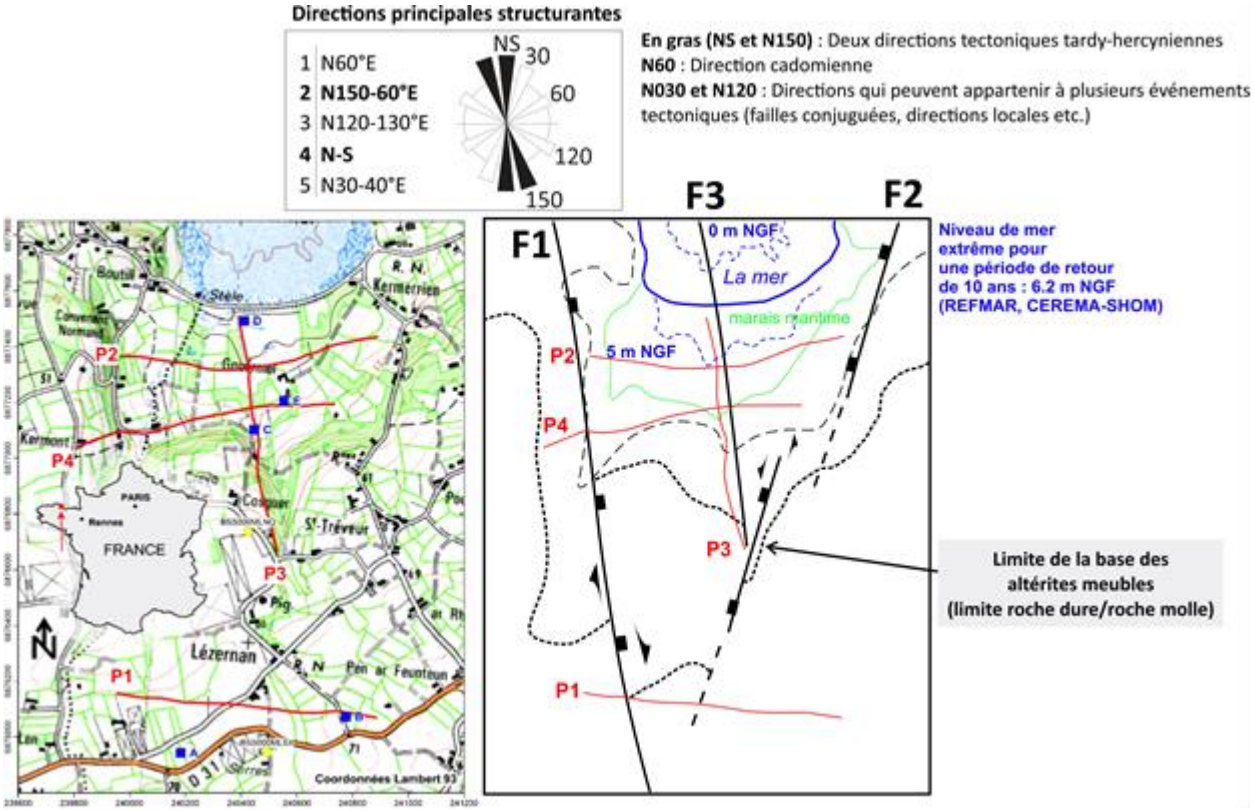


Illustration 103 : Schéma structural de l'anse de Gouermel tiré de la cartographie géologique, des profils de géophysique et de la connaissance régionale des aquifères de socle issue du projet ANAFORE (en cours)

La cartographie géologique, l'analyse structurale et les investigations géophysiques ont permis d'établir un canevas structural (un modèle géologique) expliquant la géométrie de l'anse de Gouermel. Toutefois, la caractérisation d'une possible intrusion saline dans ce cadre géologique n'est toutefois pas cernée.

Le Profil électrique P3 orienté Nord-Sud permet :

- d'avoir deux interprétations possibles qui sont la conséquence de deux versions différentes des cartes géologiques (Illustration 104). En effet, la carte géologique actuelle au 1/50 000 du BRGM, ne mentionne pas la présence de filons de dolérites (intrusions magmatiques mineures de forme filonienne), sous le marais maritime de l'anse de Gouermel alors que l'ancienne carte au 1/80 000, les mentionnait ;

- et de proposer une relation possible entre le littoral et l'anse de Gouermel.

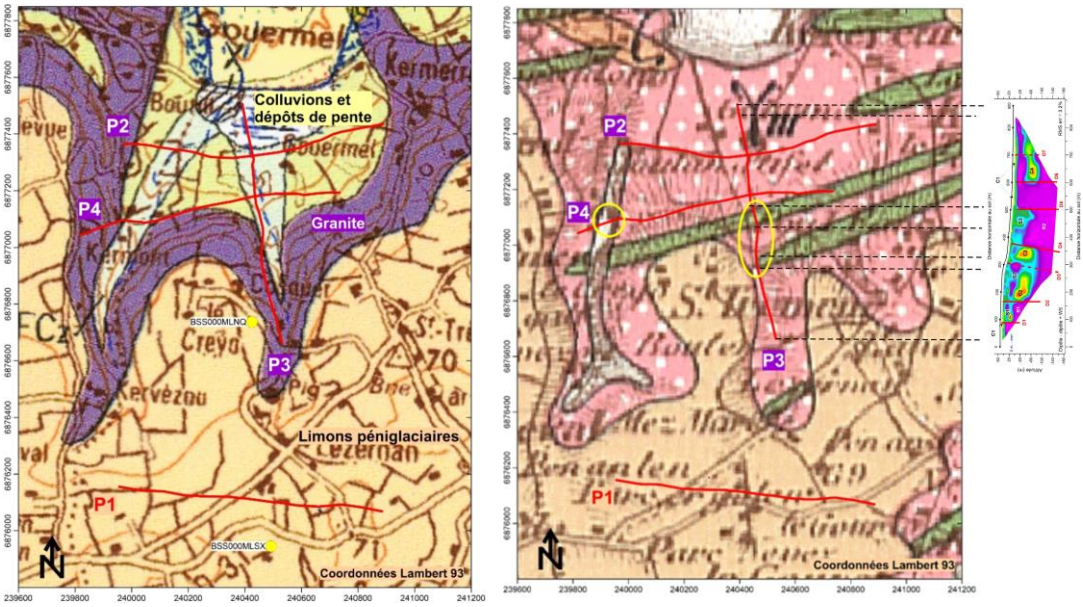


Illustration 104 : Cartes géologiques du secteur : A gauche carte ancienne au 1/80 000 ; à droite carte géologique actuelle 1:50 000 (source : BRGM)

L'analyse de l'ensemble des résultats et interprétation du profil P3 permet de proposer une coupe géologique : cf. Illustration 105 (en haut)), . Ainsi, du Sud vers le Nord (de gauche à droite, en haut sur l'Illustration 105), c'est-à-dire depuis le plateau vers la mer en passant par l'anse :

- il est possible de mentionner sur cette coupe géologique, la présence des filons de dolérites, en raison de la présence de masses résistantes au sein de masses conductrices. Cependant la présence ou non de ces filons n'influe que marginalement sur l'interprétation finale. Hydrauliquement, ces filons se comportent comme des barrières étanches.

- la limite entre les résistivités élevées (en rose-violet) et les résistivités plus faibles (vert à bleu) du profil P3, est affectée par des accidents tectoniques sub Est-Ouest (hérités du Cadomien) qui abaissent progressivement cette limite autour de -80 m NGF très nettement en dessous des niveaux de mer.

La projection du niveau de mer moyen situé à 0.5 m NGF et du niveau de mer extrême pour une période de retour décennale (comme la tempête de mars 2008) à 6.8 m NGF montre que le secteur peut être en proie à des submersions marines.

Ainsi la zone basse du site de l'anse de Gouermel, est située au-dessus d'un réservoir certainement altéritique avec une plus grande porosité que les roches sous-jacentes, plus saines et celles qui encadrent la dépression à cause des failles sub NS et N020 (Illustration 105).

La base de cet aquifère situé proche du littoral, mais sous le niveau de mer au sens large, constitue un réservoir souterrain vulnérable aux intrusions marines. La forte sollicitation hydraulique de l'aquifère continental peut favoriser ces intrusions salines.

Pour illustrer ces propos, un biseau supposé en bleu clair a été représenté sur la coupe géologique schématique. La limite en rouge entre les eaux continentales et les eaux marines

est un front de lutte pressiométrique entre l'aquifère continental et l'aquifère marin qui dépend de la charge de la nappe (cote piézométrique inconnue).

La singularité du site de l'anse de Gouermel, qui constitue une particularité des aquifères dit « de socle », est que souvent un aquifère latéritique (constituant un réservoir supérieur) alimente une faille (un réservoir inférieur plus restreint). Dans le cas présent, la faille F3 correspondrait à ce réservoir inférieur qui se situe aux niveaux des mers et qui mettrait en correspondance l'aquifère marin et l'aquifère continental. Cette faille F3 n'est pas représentée sur la coupe géologique interprétée car elle est parallèle à la coupe mais elle est représentée sur le schéma structural avec l'intrusion saline associée (Illustration 105, à droite).

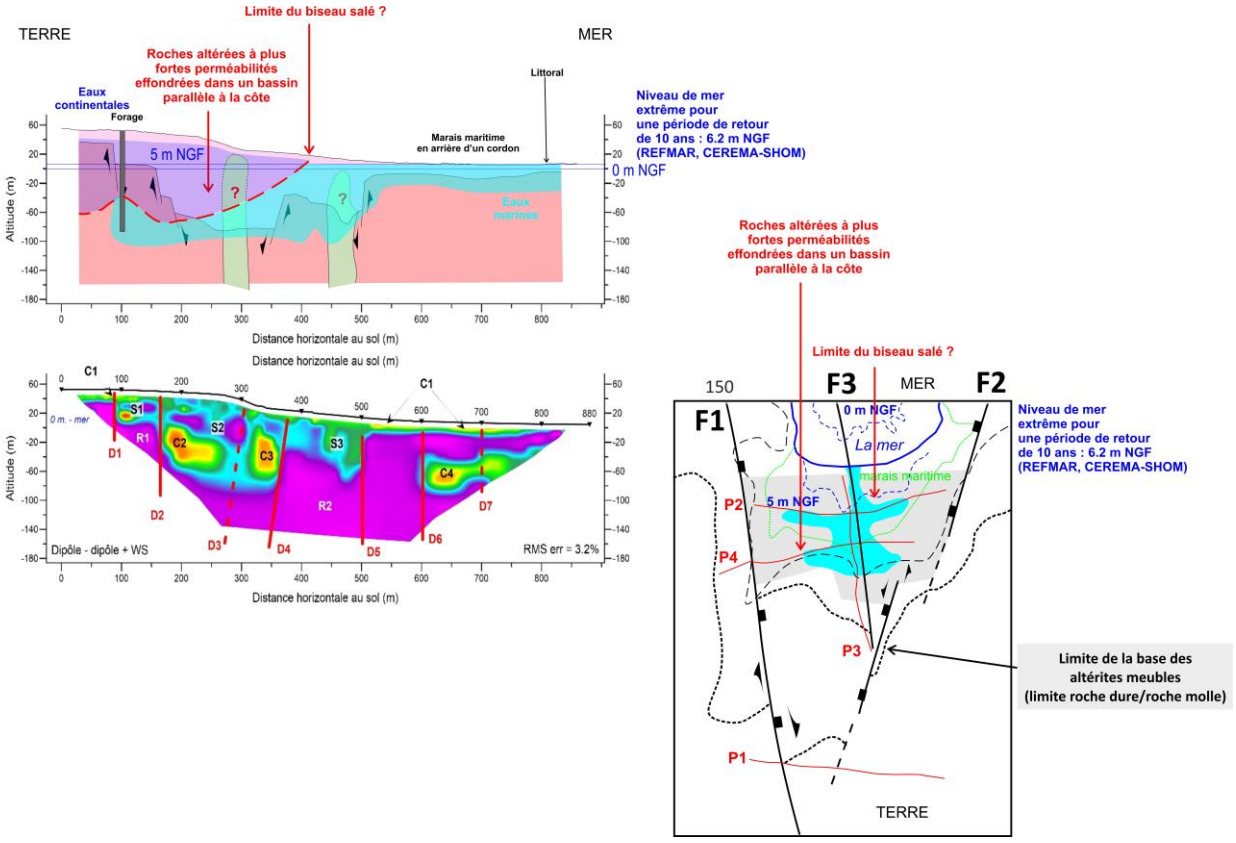


Illustration 105 : A gauche, en haut - Coupe géologique Terre-Mer interprétée et tirée du profil électrique P3 situé dessous (à gauche, en bas) et à droite - Schéma structural avec la réprésentation schématique de l'intrusion saline en bleu ciel

5. Phase 3 –Propositions d'actions et d'investigations complémentaires sur les secteurs vulnérables

Plusieurs recommandations de gestion ont été formulées au chapitre 3.3.4 pour les captages EDCH potentiellement vulnérables aux intrusions salines.

En complément, et à l'image de ce qui a été proposé en Basse-Normandie dans le cadre d'une étude similaire (rapport BRGM/RP-66052-FR) et dans le cadre du projet ADRESSAGE (rapport BRGM/RP-68709-FR), plusieurs propositions d'actions et d'investigations complémentaires peuvent être proposées.

5.1. COMMUNICATION ET SENSIBILISATION AU PHENOMENE DE BISEAU SALE

Il est essentiel de mener diverses actions de communication et de sensibilisation des exploitants (eau potable, agriculteurs, industriels) situés en zone littorale mais aussi des décideurs locaux sur les risques et impacts de la salinisation des eaux souterraines. En effet, le projet ADRESSAGE a montré que les impacts économiques d'une salinisation des eaux souterraines pouvait être importants.

Comme évoqué précédemment (3.3.4), afin d'éviter ce phénomène, quelques bonnes pratiques simples et peu coûteuses peuvent donc être communiquées aux exploitants :

- Réaliser un suivi de la conductivité pendant la foration et tout au long de l'exploitation de l'ouvrage,

- Adapter les modes de pompage pour limiter les remontées salines : pomper à un débit moins fort mais pendant plus longtemps (au lieu de pomper à un débit élevé peu de temps) ou bien répartir les prélèvements sur plusieurs forages, maintenir la pompe à une altitude située au-dessus du niveau de la mer pour limiter les rabattements (même si cela ne garantit pas une absence de remontée du biseau salé).

De plus, il est nécessaire de mettre en place des actions collectives (cf. 5.4) sur les secteurs vulnérables afin d'avoir une action significative. En cas de salinisation avérée sur un secteur, les actions isolées n'auraient que des impacts très limités et ne pourraient, en cas de pompages en amont d'un bassin versant, induire qu'un ralentissement local du phénomène et non l'arrêter ou le mitiger.

5.2. ETUDES GEOCHIMIQUES

A minima, on ne peut que recommander un suivi régulier de la conductivité de l'eau sur les forages situés sur la zone littorale, afin d'anticiper une salinisation en cours en cas d'augmentation de ce paramètre.

Cependant, afin d'identifier et de comprendre les processus d'intrusions salines, et notamment afin de distinguer les intrusions salines anciennes de celles sub-actuelles, il est nécessaire de mener des études géochimiques dans les secteurs concernés (analyses des ions majeurs et traces, isotopes, datation des eaux). Le rapport BRGM/RP-60026-FR (Kloppmann, 2011a) recense les outils géochimiques permettant de réaliser une caractérisation spatiale et

temporelle des phénomènes d'intrusions salines (éléments traces, bore, isotopes stables de l'eau et des sulfates – cf. 2.2.1).

5.3. CARTOGRAPHIE DE LA CONDUCTIVITE

Une cartographie ponctuelle de la conductivité des eaux souterraines (quel que soit l'usage des puits et forages) et des eaux de surface pourrait être réalisée sur les secteurs vulnérables afin d'identifier de manière rapide et peu couteuse l'ampleur du phénomène d'intrusions salines.

5.4. RECOLTE ET ANALYSES DES DONNEES DISPONIBLES

Ce projet a montré la difficulté de collecte des analyses d'eau disponibles. En effet, il n'a pas été possible de recueillir et synthétiser les résultats d'analyses disponibles auprès des exploitants agricoles via les laboratoires ou les coopératives, pour des raisons de confidentialité, hormis sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo. Sur ce secteur, la collecte de données a nécessité l'implication de nombreux acteurs locaux et plusieurs actions de communication, et une partie des résultats est resté anonyme, ce qui complexifie l'interprétation des données faute de localisation précise.

Afin d'avoir une vision globale de la qualité de la ressource sur les secteurs vulnérables, il conviendrait d'envisager la collecte des suivis physico-chimiques (conductivité, chlorures, sodium) réalisés sur les exploitations agricoles au sein d'un organisme implanté localement et chargé de la valorisation de ces données (SAGE, coopérative agricole, etc.) ou au travers de la mise en place d'un observatoire participatif.

5.5. REALISATION D'UN PIEZOMETRE EXPERIMENTAL DANS LE SECTEUR DE PLOUGRESCANT

Il n'a pas été possible de réaliser des diagraphies dans le forage étudié sur le secteur test de cette présente étude (Plougrescant), qui ne dispose pas par ailleurs de coupe géologique permettant le calage des panneaux électriques. Afin de mieux caractériser ce secteur test et mieux comprendre les intrusions salines, il est proposé de réaliser un piézomètre expérimental de 150 m de profondeur dans le secteur d'étude, entre le forage ayant rencontré de l'eau fortement minéralisé et la mer (le long du profil électrique P3). La réalisation de ce piézomètre présente les avantages suivants :

- Acquisition d'une coupe géologique du secteur pour caractériser les formations géologiques en présence (et donc interpréter les panneaux électriques), leur état de fracturation, la présence d'aquifères et leur productivité.

- Possibilité de réaliser des diagraphies et de valider les résultats des panneaux électriques.

- Possibilité de réaliser des analyses physico-chimiques sur les eaux souterraines interceptées (majeurs, datation, isotopes).

- Mise en place d'un suivi en continu du niveau piézométrique, de la température et la conductivité permettant de caractériser l'évolution du biseau salé dans le temps (influence des marées, du cycle hydrologique) et donc de mieux comprendre les mécanismes en jeu.

- Aspect pédagogique : la réalisation de cet ouvrage permettra de mettre en avant les bonnes pratiques de forage en milieu littoral auprès des agriculteurs du secteur d'étude et d'entretenir la dynamique locale engagée lors de la première phase du projet.

La réalisation de ce piézomètre permettra d'adapter le protocole d'investigation géophysique mis en place dans le cadre de cette étude afin de le reproduire éventuellement sur d'autres secteurs vulnérables.

5.6. MEILLEURE DELIMITATION DES SECTEURS VULNERABLES

En complément de la cartographie réalisée dans le présent rapport, les propositions précédemment décrites permettraient de mieux délimiter les secteurs vulnérables. Il faudrait ensuite les croiser avec les secteurs à enjeux (zones urbaines, agricoles, espaces protégés) afin d'identifier les secteurs prioritaires.

5.7. ETUDE GEOPHYSIQUE

Comme présenté au § 2.2.2, les outils géophysiques peuvent permettre d'étudier la répartition et l'évolution de la résistivité/conductivité dans un aquifère. Par exemple, l'équipement SMD (ImaGeau) permet de mesurer la résistivité en continu à différentes profondeurs dans un forage, ce qui permet de suivre l'évolution de la résistivité en fonction de différents paramètres (variation du niveau piézométrique et du niveau de la mer, modification des prélèvements d'eau souterraine, …).

Comme évoqué au paragraphe précédent, d'autres investigations géophysiques pourraient être menées sur des secteurs sensibles d'après le protocole établi après la réalisation du piézomètre expérimental.

5.8. MISE EN PLACE DE RESEAUX DE SURVEILLANCE DES INTRUSIONS SALINES

Sur les secteurs vulnérables identifiés, la mise en place d'un réseau de surveillance des intrusions salines permettrait de contribuer à l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine (directive fille 2006/118/CE), d'évaluer l'évolution dans le temps du biseau salé et d'alerter les acteurs du domaine de l'eau dans les secteurs vulnérables. Le choix de piézomètres/forages pour le suivi de la salinité dans les eaux souterraines pourrait se faire à l'exemple de ce qui a été mis en place dans le département de la Manche par la Société d'Investissement LEgumière et maraîchère de BAsse-Normandie (SILEBAN), où une liste de 9 piézomètres a été établie pour la surveillance des intrusions salines dans l'arrêté préfectoral de 2012 relatif à la définition de seuils pour la mise en œuvre de mesures en période de sécheresse (voir rapport BRGM/RP-66052-FR). Des profils de conductivité en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre sont réalisés tous les mois.

Pour orienter le choix des forages pouvant constituer le réseau, les critères suivants pourraient être pris en compte :

- coupe géologique disponible,
- forage non équipé de pompe : sinon il faudra envisager une analyse ponctuelle mensuelle sans réaliser de profil ou l'installation d'une sonde d'acquisition automatique ou la réalisation d'un profil de conductivité au-dessus de la pompe.

Il reste à déterminer quels pourraient être les maitres d'ouvrage de ce réseau (services de l'Etat, Conseil régional ou départemental, structures porteuses de SAGE, collectivités, coopératives agricoles, …).

5.9. ETUDES A PLUS LONG TERME

Des études théoriques et ou de modélisations numériques sur le comportement de biseau salé en milieu hétérogène (aquifères de socle) seraient pertinentes pour déterminer l'évolution dans le temps de la salinisation des eaux. Dans le cas où les données collectées seraient suffisantes, la réalisation d'un ou des modèles prédictifs et de gestion seraient envisageables. Ces modèles permettraient de tester et définir des mesures préventives à mettre en place et de tester leur efficacité dans le temps.

6. Conclusion

Les phénomènes d'intrusions salines sont fréquents dans les aquifères côtiers et la Bretagne n'est pas épargnée. L'intrusion d'eau saline dans les aquifères côtiers peut limiter de façon irréversible d'exploitation de ces ressources en eau souterraine. L'hétérogénéité des conditions géologiques et hydrogéologiques dans les aquifères de socle rend difficile la compréhension du phénomène sur le littoral breton. La morphologie du littoral a également un impact, difficilement quantifiable, sur les intrusions salines. L'exploitation des aquifères a également un impact sur l'évolution du biseau salé.

L'identification et la cartographie du biseau salé sont des éléments importants pour évaluer les ressources. Plusieurs méthodes complémentaires peuvent être utilisées : analyses physico-chimiques et isotopiques, suivi piézométrique, méthodes géophysique de surface, diagraphies en forage, modélisations hydrodynamiques.

Pour les domaines de « socle » comme le Massif Armoricain, les échanges entre les aquifères côtiers au sens large et le milieu littoral, constituent une thématique scientifique peu investiguée.

Avec ses 2 700 km de côtes très découpées, à la géologie complexe, où alternent plateaux rocheux plus ou moins altérés, d'altitude variable côtes basses, l'interface terre-mer de la Bretagne est latéralement comme verticalement complexe. A ceci s'ajoute un régime marégraphique méga tidal où le niveau de mer varie sur plus de 13 mètres et l'invasion marine au niveau des rias et abers jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres. Ainsi, la caractérisation des aquifères côtiers en domaine de « socle » pour un territoire tel que la Bretagne et leurs échanges avec le milieu littoral, doit prendre en considération ces contextes géomorphologiques littoraux, mais aussi les contextes géologiques au sens large qui sont le siège de l'interaction entre tectonique (faille et fracture), altération et zones basses.

La synthèse des données disponibles a montré que peu d'études nationales et locales avaient été réalisées jusqu'alors sur les aquifères littoraux bretons mais que ces études avaient montré une certaine vulnérabilité de la Bretagne au phénomène d'intrusions saline (notamment la côte nord, la presqu'île de Quiberon et les îles morbihannaises – Dörfliger *et al.*, 2011a ; note BRGM 07.03 ; LABOCEA, 2015 ; SOGREAH, 2004). Plusieurs auteurs ont mis en évidence la présence de fluides salés dans les aquifères de socle du Massif Armoricain (Ayraud *et al.*, 2008 ; Pauwels *et al.*, 2010, Armandine Les Landes *et al.*, 2014a), liés à l'introduction d'eau de mer lors des transgressions marines et dont l'empreinte est encore visible actuellement (Aquilina and De Dreuzy, 2011 ; Armandine les Landes *et al.*, 2015), sur l'ensemble de la région et pas uniquement au niveau des aquifères côtiers. Cependant dans le cadre de cette étude, seules les intrusions salines sur le littoral ont été prises en compte

Beaucoup d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines sont disponibles dans la d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES) mais il existe également de nombreuses analyses réalisées sur des forages littoraux, à usage agricole notamment, qui ne sont pas rassemblées dans une base de données et dont les informations pourraient pourtant être d'un grand intérêt pour mieux identifier les secteurs touchés par les intrusions salines en Bretagne. Le recueil de ces analyses physico-chimiques s'est révélé chronophage en raison d'une méconnaissance des données disponibles et des problèmes de disponibilité des données (droit d'accès, format papier, …). Un questionnaire envoyé aux exploitants agricoles de la

frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo a permis de récolter des chroniques intéressantes, qui n'étaient pas disponibles dans les bases de données nationales (ADES) et de pouvoir évaluer le phénomène de salinisation (Boisson, 2019). Bien que la présence d'eaux salines fossiles en profondeur ne puisse être exclue (Armandine Les Landes *et al.*, 2015) tout comme des anomalies ponctuelles, la salinisation en cours dans ce secteur est plus vraisemblablement due à une remontée du biseau salé actuel (Boisson, 2019). Ce phénomène est en augmentation et les pompages liés aux serres semblent être un facteur majeur de cette évolution. Les effets de cette intrusion saline semblent être visibles jusqu'à plusieurs kilomètres dans les terres indiquant un phénomène de grande ampleur. Le secteur de Plougrescant (Côtes d'Armor) est donc apparu intéressant pour mener les investigations géophysiques complémentaires, en raison de la présence de forages captant de l'eau saumâtre, des enjeux économiques importants (forte activité de culture de tomates sous serres, dépendante d'une bonne qualité de l'eau souterraine) et de l'implication des acteurs locaux.

D'après les analyses disponibles dans la base ADES, le percentile 90 des teneurs en chlorures est de 61 mg/L sur l'ensemble de la région. Pour la conductivité, il est de 717 µS/cm. Quelques qualitomètres présentent à la fois des teneurs en chlorures supérieures à 61 mg/L et des conductivités supérieures à 717 µS/cm sur la frange littorale mais aussi dans l'intérieur des terres. Ces valeurs, bien qu'inférieures aux références de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine, paraissent donc anormalement élevées en contexte de socle. Afin d'évaluer un possible phénomène de salinisation des eaux souterraines, il est nécessaire de disposer d'une chronique de concentration en chlorures et/ou de conductivité. Seules des études géochimiques plus approfondies (analyse des ions majeurs et traces, analyses isotopiques, datation des eaux) peuvent permettre d'identifier les processus en jeu et de mettre en évidence des intrusions salines actuelles.

Un des objectifs de ce projet était d'identifier de manière simple les captages souterrains (forages, puits, sources) utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) potentiellement vulnérables aux intrusions salines, compte tenu de leur localisation (proximité du littoral), de leur profondeur et de leur altitude. **101 captages AEP souterrains ont été identifiés comme étant potentiellement vulnérables aux intrusions salines,** dont 67 actuellement exploités (Etat « actif » dans le référentiel issu d'ADES). **Il faut cependant noter que le traitement réalisé prend des marges de sécurité importantes**, notamment l'éloignement à la côte (10 km) et la cote du fond de l'ouvrage (+ 10 m NGF). Il s'agit donc d'une pré-sélection des captages souterrains potentiellement vulnérables, en vue d'une analyse plus spécifique pour définir la vulnérabilité réelle aux intrusions salines. La présence d'une intrusion saline n'est confirmée par des analyses que sur un seul forage AEP actif (forage de Kerenneur à Plourin) et les captages situés sur des îles semblent effectivement plus vulnérables à ce phénomène (Groix, Houat, Hoëdic).

Afin de garantir la pérennité des captages d'eau potable vulnérables, différentes actions peuvent être envisagées sur ces ouvrages : contrôle du niveau dynamique de la nappe en pompage pour éviter un rabattement excessif, diminution du débit de pompage et augmentation du temps de pompage pour limiter les rabattements, répartition des prélèvements sur plusieurs ouvrages, suivi de la conductivité pendant l'exploitation, sensibilisation des exploitants à la bonne gestion de leurs ouvrages pour garantir leur pérennité et sensibilisation de la population au phénomène de biseau salé et aux économies d'eau, mise en place d'un observatoire régional afin d'avoir une vision globale du phénomène d'intrusion saline et de son évolution. Il est également utile de rappeler les bonnes pratiques en matière de forage sur le littoral :

- suivi de la conductivité à la foration et un arrêt de la foration si la conductivité augmente et dépasse 800 µS/cm ;

- suivi de la conductivité pendant les essais de pompage pour mettre en évidence une évolution éventuelle de la conductivité et une contamination par de l'eau saumâtre.

Afin de caractériser l'interface eau douce – eau salée, des sondes de mesure en continu de la conductivité ont été installées sur 2 piézomètres littoraux faisant partie du réseau national de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines (Hennebont et Trégunc). Malgré des conductivités relativement peu élevées sur ces 2 piézomètres instrumentés, il est tout de même intéressant de poursuivre le suivi afin d'observer d'éventuelles tendances à plus long terme.

Des investigations géophysiques sur un secteur test (Plougrescant – anse de Gouermel) ont ensuite été menées afin de localiser et caractériser l'interface eau douce-eau salée mais également dans un objectif méthodologique, afin d'établir une procédure d'investigation adaptée et pertinente pour répondre à la problématique d'invasion salée en contexte de socle sur d'autres secteurs géographiques. Compte tenu de la complexité des aquifères de socle, une reconnaissance géologique préalable (cartographie des altérites et mesure des directions principales de fracturation) a été réalisé pour bien identifier les structures en jeu dans tous les secteurs où des intrusions salines ont été mises en évidence (reconnaissance indispensable pour la compréhension du système aquifère). Quatre panneaux électriques centrés sur un forage ayant capté de l'eau fortement minéralisée, situé à 1,5 km de la mer, ont ensuite été réalisés. L'absence de coupe géologique du forage, l'impossibilité de réaliser une diagraphie de conductivité (forage équipé d'une pompe) et des sondages RMP (en raison d'un bruit électromagnétique ambiant trop élevé) permettant de discriminer les zones argileuses ont empêché un calage correct des panneaux électriques. L'étude géophysique a tout de même permis de mettre en évidence une structuration du milieu en compartiments de granite « sain » et très résistants, séparés par des zones plus conductrices. Il est cependant nécessaire d'acquérir des informations complémentaires (par forages et diagraphies, et hydrochimie de l'eau) pour permettre de conforter et d'asseoir les interprétations proposées (notamment valider les hypothèses d'invasions salines évoquées) afin d'optimiser et généraliser l'application de cette technique d'investigation du milieu fissuré côtier à plus grande échelle.

Toutefois, au regard des connaissances régionales récentes (projet ANAFORE en cours), il est possible d'identifier les structures principales mises en évidence par les panneaux électriques. Ainsi le site de l'anse de Gouermel est constitué d'un bassin d'effondrement situé au-dessus d'un réservoir certainement altéritique avec une plus grande porosité que les roches sous-jacentes plus saines et que celles qui encadrent la dépression. Ces failles pourraient être le vecteur d'intrusions salines.

Pour tenter d'identifier les secteurs vulnérables au phénomène d'intrusions salines à l'échelle de la Bretagne, plusieurs paramètres ont été croisés et présentés sous forme de cartes au 1/100 000 : données géologiques (failles), géomorphologiques (zones basses, nature du trait de côte et linéaments), dynamique d'érosion du trait de côte et données physico-chimiques ayant permis d'identifier certains captages concernés par les intrusions salines. La majorité des ouvrages présentant une teneur moyenne en chlorures supérieure à 60 mg/L et/ou une conductivité moyenne supérieure à 800 µS/cm sont situés à moins de 1,5 km du trait de côte et

dans une configuration particulière du trait de côte (marais maritime, île et presqu'île) et plus d'un tiers se trouvent à proximité immédiate d'une faille ou d'un linéament. Ces critères ont permis de délimiter sous SIG des secteurs potentiellement vulnérables aux intrusions salines.

Il convient d'être particulièrement vigilant lors de la réalisation de nouveaux forages dans ces secteurs potentiellement vulnérables et de prendre des précautions lors de l'exploitation des forages déjà en service afin de limiter les risques d'intrusions salines.

D'autres investigations seraient cependant nécessaires dans chaque secteur pour identifier l'origine des intrusions salines et en réaliser un suivi. Les processus d'intrusions salines sont en effet complexes et peuvent s'établir par le biais de biseau salé, par drainance verticale, par invasion salée dans les rias et il peut s'agir d'eau récente ou ancienne. Plusieurs propositions d'actions à mettre en œuvre ont été formulées pour améliorer la connaissance, suivre les intrusions salines et sensibiliser les utilisateurs des eaux souterraines dans la frange littorale.

Afin de compléter les investigations et collecter des données en continu permettant de caractériser le fonctionnement du biseau salé et son évolution dans le temps, la Région Bretagne et le BRGM vont prochainement lancer la réalisation d'un piézomètre de 150 m de profondeur sur la commune de Plougrescant (22). Cet ouvrage permettra :

- de mettre en place des instruments de mesures permettant de suivre l'évolution du biseau salé dans le temps et de mieux comprendre son fonctionnement dans le contexte géologique breton,
- de valider le contexte géologique local (types de roches, failles etc.),
- d'interpréter les mesures géophysiques réalisées par le BRGM,
- de constituer un site pédagogique montrant la bonne réalisation d'un forage d'eau et d'expliquer le phénomène d'intrusion saline.

La collectivité Lannion-Trégor Communauté assurera la maintenance du site et de ses équipements au-delà du projet de mise en œuvre du piézomètre et le BRGM assurera annuellement une analyse technique des données collectées.

La connaissance des mécanismes en jeu dans les phénomènes d'intrusion saline suscite donc un intérêt majeur de la part des acteurs du domaine de l'eau en Bretagne. En effet, le risque est actuellement élevé dans certains secteurs, et dans un contexte de changement climatique qui pourrait induire une augmentation du niveau de la mer et une modification de la recharge des aquifères, une accentuation du phénomène serait à craindre.

7. Bibliographie

ANTEA (2009) – Etudes préalables aux périmètres de protection du forage de Kerenneur sur la commune de Plourin (Finistère). Phase 1 : Etude hydrogéologique.

AQUILINA L. and DE DREUZY J.-R. (2011) – Relationship of present saline fluid with paleomigration of basinal brines and the basement/sediment interface (Southeast basin - France). *Applied Geochemistry*, Elsevier, 2011, 26 (12), pp.1933-1945.

ARMANDINE LES LANDES A. (2014). Impact des variations climatiques sur les ressources hydrogéologiques. Hydrology. Université Rennes 1, Thèse de doctorat en hydrogéologie 2014. French.

ARMANDINE LES LANDES A., AQUILINA L., DAVY P., VERGNAUD V., LE CARLIER DE VESLUD C. (2015) – Time scales of regional circulation of saline fluids in continental aquifers (Armorican Massif, Western France), *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 19, 1413-1426, https://doi.org/10.5194/hess-19-1413-2015, 2015.

ARTELIA (2012) -– Etudes hydrogéologiques et d'environnement et dossiers de régularisation des forages AEP de l'île d'Hoëdic. Rapport de phase 2 N°4-53-0751.

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

AYRAUD V., AQUILINA L., LABASQUE T., PAUWELS H., MOLENAT J., *et al.* (2008) - Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Applied Geochemistry*, Elsevier, 2008, 23 (9), pp.2686-2707.

BEAR J., VERRUIJT A. (1987) - Modeling Two-Dimensional Flow in Aquifers. In book: Modeling Groundwater Flow and Pollution, pp.85-122

BENSE V.F., GLEESON T., LOVELESS S.E., BOUR O. et SCIBEK J. (2013) - Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews, n°127, pp. 171-192.

BOISSON A., LUCASSOU F., MOUGIN B., avec la collaboration de LE GAL X. (2019) – Récolte et analyse des données relatives aux prélèvements d'eau souterraine des irrigants travaillant sur la zone littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo. Conseils et préconisations pour une gestion durable de la ressource (projet ADRESSAGE). Rapport final. BRGM/RP-68709-FR, 73 p., 45 ill., 5 ann.

CARN A. (2005) - Enquête sur les forages d'eau saumâtre en Ille et Vilaine (35). Note BRGM 05.149

CARN A. (2006) - Analyse de la conductivité de l'eau des forages des régions littorales de Quiberon (56) et Paimpol (22) - Influence du biseau salé. BRGM SGR/BRE N° 07.03

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

CHERY L. (2006) – Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français, Collection « Scientifique et technique », Editions du BRGM, 240 p., 1 CDROM

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. p. 15-31.

COURBIN.A., JOSEPH.B., PARIZOT.M. (2012) - Evolution de la remontée du front des 1 000 µS/cm sur le fleuve Maroni. Année 2012. Rapport final. BRGM/RP-62127-FR, 60 p., 2 ann.

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

CUSTODIO E. (2010). Coastal aquifers of Europe: an overview, (2010) 18: 269-280

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.

DELATTRE C., PRUVOST P. ET WATERLOT G. (1996) – Carte géologique détaillée de la France 1/80.000, 42, Tréguier. Ministère de l'industrie, Service de la carte géologique.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., WYNS R., MARÉCHAL J-C. et KRISHNAMURTHY N.S. (2006) - A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptuel model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., 330, pp. 260-284.

DÖRFLIGER N., SCHOMBURGK S., BOUZIT M., PETIT V., CABALLERO Y., DURST P., DOUEZ O. (2011a) – Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquence sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.

DÖRFLIGER N., FLEURY P., ASFIRANE F., BLANC M. (2011b). 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 ». Disponible sur : www.burgeap.fr/index.php/fr/innovations/methodologie/grain-d-sel (consulté le 23/03/2017).

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.

FRISSANT N., RENE-CORAIL C., BONNIER J. et DE LA TORRE Y. (2005) – Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64 p., 27 ill., 4 tabl.

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

GARING C., LUQUOT L., PEZARD P.A., GOUZE P., 2013. Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain. Applied Geochemistry 39, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.09.011

GOURCY L., PETELET-GIRAUD E. (2011) - Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable. Rapport BRGM/RP-59729-FR, 62 p., 22 Ill.

GUENNOC P., HALLEGOUET B., LEBRET P., FEYBESSE J.-L., CHOULET F., EGLINGER A., BARRIERE M. (2015) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Perros-Guirec (170). Orléans : BRGM. Notice explicative par Guennoc P., Feybesse J.-L., Hallegouët B., Lebret P, Chauris L., Lucassou F., Thiéblemont D., Choulet F., Eglinger A. (2015), avec la collaboration de Bourdillon C., Cocherie A., Tegyey M. 264p.

HENTINGER.R., JONQUET.P. (1970) - Station automatique pour l'observation des interfaces dans les forages (S.O.I.F.). Comportement et résultats acquis en 1969. Rapport BRGM BRGM/70-SGN-103-GPH, 10 p., 2 pht.

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. 145 p.

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. 105 p.

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. 37 p.

LABOCEA (2015) – Société Publique Locale Eau du Ponant – Syndicat du chenal du four – Etude sur le devenir du forage de Kerenneur (Plourin 29830) – Rapport définitif. 33 p.

LE ROY S. (2019) - Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) dudépartement du Morbihan. Rapport BRGM *à paraitre*.

LOKE M. H. & BARKER R.D (1996) – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting (44), p.131-152.

LOKE M.H., ACWORTH I. AND DAHLIN T. (2003) – A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. Explor. Geophys. 34, 182–187.

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

MARÉCHAL J.-C., DEWANDEL B. et SUBRAHMANYAM K. (2004) - Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. Water Resources Research, vol. 40, pp.W11508.

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.

MATHIEU.F., LE.JEUNE.F., MIEHE.J.-M. (1997) - Imagerie de la dynamique sédimentaire et du biseau salé en zone littorale. Etude géophysique sur le secteur de Sables-d'Or-les-Pins (Côtes-d'Armor). BRGM/RR-39362-FR, 30 p. 4 cartes

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.

MOUGIN B., ALLIER D., BLANCHIN R., CARN A., COURTOIS N., GATEAU C., PUTOT E., COLLABORATION JEGOU J-P., LACHASSAGNE P., STOLLSTEINER P. ET WYNS R. (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR - 129 p., 37 ill., 7 ann. dont 2 planches.

PETIT V. (1996) - avec la collaboration pour les synthèses régionales : CAOUS JY. (Nord-Pas-de-Calais), CZERNICHOWSKI I. (Picardie), DE LA QUERIERE P. (Haute- Normandie), MÄZENE B. (Basse-Normandie), TALBO H. (Bretagne), EHIERMAEL G. (Poitou-Charentes), SOURISSEAU B. (Aquitaine), BERARD P. (Languedoc-Roussillon), BEL F. (Provence-Côte-d'Azur). Les aquifères littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM R 39298. 120 p. 36 figures, 1 annexe.

ROUXEL E. (2012) - Réseau de suivi départemental des ressources en eau souterraine utilisées pour l'AEP, Maine-et-Loire. Année 2011-2012 : Mise en service. Rapport final. Rapport BRGM/RP-61830-FR, 70 p., 2 ann.

SEATON WILLIAM J., THOMAS J. BURBEY (2002) – Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. Journal of Applied Geophysics 51, 21– 41.

SCHOMBURGK S., NICOLAS J. (2013) – Réflexions exploratoires sur l'utilisation des données de température et de conductivité collectées via les stations du réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la France. Rapport final BRGM/RP63123-FR. 35 p., 16 ill.

SCHROËTTER J.-M. et BLAISE E., avec la collaboration de V. DEBERT, B. LE GALL, G. GILBERT, H. TISSOT, F. MEUNIER, J. AUDO, F. PILLOIS, M. PREMALLION, B. GOUYGOU, E. PLAVADEAU ET S. SUANEZ (2015) - Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1, Rapport final, BRGM/RP-65212-FR, 1282 p., 861 ill., 19 annexes, 1 CD.

SCHROËTTER J.-M., AUDO J., MEUNIER F., AUBERTIN F., PREMALION M. PALVDEAU E., (2016) Influence de la tectonique, des lithologies et de l'histoire géologique du Massif armoricain sur la géomorphologie de son trait de côte et les aléas littoraux associés : exemple de 2000 km de côtes bretonnes de la Manche, Présentation, Réunion des Sciences de la Terre 2016, Caen.

SHOM (2016) – Ouvrage de marée – Références Altimétriques Maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer – Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. X16-HYC. Edition 2016

SOGREAH (2004) – Etude hydrogéologique et modélisation de l'île d'Houat – Rapport N° 1 11 5600.

SOGREAH (2011) – Etudes hydrogéologiques et d'environnement et dossiers de régularisation des forages AEP de l'île d'Houat. Rapport de phase 1 N°4-53-0750.

SOGREAH (2011) – Etudes hydrogéologiques et d'environnement et dossiers de régularisation des forages AEP de l'île d'Hoëdic. Rapport de phase 1 N°4-53-0750.

TALBO H. (1987) - Recherches d'eau souterraine de bonne qualité. Synthèse et résultats des travaux réalisés dans la partie occidentale du Léon. Première partie. Présentation générale. Rapport BRGM SGR/BRE 87-02, 19 p.

TALBO H. (1998) – Département du Finistère - Recherche des ressources en eau souterraine de bonne qualité – Appui technique aux collectivités – Commune de Kérenneur. Rapport BRGM SGR/BRE 98-13

VOUILLAMOZ J.M., CHATENOUX B., MATHIEU F., BALTASSAT J.M., LEGCHENKO A. (2007) – Efficiency of joint use of MRS ans VES to characterize coastal aquifer in Myanmar. Journal of Applied Geophysics. pp. 142-154

VOUILLAMOZ J.M., LAWSON F.M.A, YALO N., DESCLOITRES M. (2014) – The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers : The example of Benin. Journal of Applied Geophysics. pp. 17-24

WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France, t. 175, n°1, pp. 21-34

Annexe 1

Courrier envoyé en début de projet pour recenser les données disponibles sur les intrusions salines en Bretagne

Rennes, le 19 décembre 2016,

N.Réf : MB/ FL 16.123
Objet : **Projet SENSIBILITE DES AQUIFERES COTIERS BRETONS AUX INTRUSIONS SALINES – recensement des données disponibles**
Affaire suivie par Flora Lucassou : f.lucassou@brgm.fr

Madame, Monsieur,

Depuis quelques années, un phénomène d'intrusion d'eau de mer salée dans les eaux souterraines douces continentales est observé sur le littoral breton. Cela se traduit par le captage d'eau salée dans certains forages d'eau, et peut rendre l'eau prélevée impropre à son usage habituel.

Ce phénomène étant complexe et irréversible, une étude vient d'être engagée par le BRGM, avec le soutien de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et de la Région Bretagne pour identifier les secteurs touchés et comprendre les mécanismes en jeu.

Afin d'identifier les secteurs concernés par ce phénomène d'intrusion saline, il est nécessaire de récolter un maximum de données de terrain. Aussi, toutes les **analyses et mesures réalisées sur les captages d'eau souterraine situées dans la frange littorale** sont importantes pour faire avancer la connaissance.

Le BRGM cherche à recueillir auprès de vos services des données sur la **qualité des eaux des forages littoraux**, mais aussi des données **de niveaux d'eau** (analyses physico-chimiques ponctuelles ou suivi continu (notamment conductivité et chlorures), chroniques piézométriques, coordonnées des propriétaires, etc.). Nous sollicitons également vos services afin que vous puissiez nous indiquer **les cas de contamination de captage souterrain** par le biseau salé dont vous auriez connaissance et nous transmettre les données dont vous disposez sur les ouvrages concernés, ou les futurs forages réalisés à proximité du littoral (possibilité de suivre la conductivité en cours de foration).

Toutes ces données peuvent être sous format papier ou numérique. Les données ponctuelles sont intéressantes et seront traitées dans le cadre de l'étude, mais les données de suivi sur une période donnée apportent une dimension supplémentaire.

Afin de faciliter la collecte de ces données, nous vous proposons de remplir le tableau présenté en pièce-jointe. Sa version numérique est téléchargeable sur le site du SIGES Bretagne, dans la rubrique « Actualités » à l'adresse suivante : http://sigesbre.brgm.fr/Lancement-de-l-etude-Sensibilite-des-aquiferes-cotiers.html

Dans ce tableau, vous pourrez indiquer quelles sont les données disponibles au sein de votre structure (et les coordonnées de votre contact). Vous pouvez joindre à ce fichier tous les documents que vous jugerez utiles : scan, fichiers (date-valeur dans n'importe quel format : excel, csv, txt ….) à l'adresse mail suivante : f.lucassou@brgm.fr.

Si vos données sont au format papier, vous pouvez le préciser dans le tableau fourni en PJ. Nous prendrons alors l'attache de la personne mentionnée en contact pour convenir d'un rendez-vous au sein de votre établissement.

La réussite de ce projet, qui vise à comprendre et localiser les phénomènes d'intrusions salines, afin de mieux les prévenir, dépend de l'implication des acteurs locaux et de la quantité de données que nous pourrons recueillir : votre collaboration est donc très précieuse.

Par ailleurs, n'hésitez pas à faire suivre ce courrier aux personnes intéressées.

Enfin, vous trouverez en pièce-jointe de ce courrier un descriptif succinct du projet. Un article est également disponible sur le SIGES Bretagne : http://sigesbre.brgm.fr/Lancement-de-l-etude-Sensibilite-des-aquiferes-cotiers.html

Nous vous remercions par avance pour votre aimable participation. N'hésitez pas à nous indiquer si vous souhaitez être invités aux comités de suivi de cette étude.
Et pour toute question ou demande de précision, votre contact est :

Mme Flora Lucassou / 02.99.84.26.73 / f.lucassou@brgm.fr

Comptant sur votre collaboration, je reste à votre disposition pour de plus amples informations et je vous prie de croire, Madame, Monsieur, en l'expression de ma considération distinguée.

Mélanie Bardeau

Directrice du
BRGM Bretagne

DESCRIPTIF SOMMAIRE DU PROJET « SENSIBILITE DES AQUIFERES COTIERS BRETONS AUX INTRUSIONS SALINES »

Les aquifères littoraux constituent des ressources en eau souterraine importantes tant pour les activités humaines (alimentation en eau potable, usages agricoles, industriels, touristiques et conchylicoles) que pour l'environnement (zones humides littorales, marais et lagunes côtières situées à l'exutoire de ces nappes). Dans ces contextes littoraux, l'eau douce qui s'écoule vers la mer entre en contact avec l'eau de mer. Une zone d'interface se forme entre l'eau douce plus légère s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente dont la densité est plus importante.

Le contexte particulier de la Bretagne, avec ses 2 700 km de côtes et sa fréquentation touristique estivale, la rend particulièrement vulnérable à l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères : les prélèvements excessifs d'eau souterraine par pompages dans des forages proches du littoral peuvent occasionner un déséquilibre de l'interface eau douce-eau salée et générer une intrusion saline irréversible dans les aquifères côtiers d'eau douce et dans les forages qui les captent.

Le caractère hétérogène des aquifères de socle bretons complique la compréhension du fonctionnement du système aquifère à l'interface avec la mer. De plus, le phénomène pourrait être exacerbé par la remontée du niveau marin liée au changement climatique. C'est pourquoi, en collaboration avec l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et la Région Bretagne, le BRGM a initié un projet visant à déterminer la sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines.

Ce projet, d'une durée de 18 mois, permettra dans un premier temps de faire un état des lieux de la situation en Bretagne (ouvrages d'eau souterraine touchés par des intrusions salines, secteurs déjà identifiés, …) puis de tester la caractérisation spatiale des intrusions salines par des méthodes géophysiques de surface sur un secteur (à déterminer), et enfin de proposer des dispositifs expérimentaux à mettre en place dans le cadre d'une étude ultérieure sur les secteurs à enjeux.

Un premier travail de synthèse a été engagé afin de recueillir l'ensemble des données disponibles sur le sujet. En particulier, des analyses d'eau sur des forages agricoles (irrigation, élevage, …) situés à proximité du littoral pourraient venir compléter les analyses d'eau souterraines disponibles dans la base de données ADES, provenant essentiellement de captages d'eau potable. Les paramètres suivants sont notamment recherchés dans le cadre de cette étude : conductivité, chlorures, sodium, piézométrie.

Le traitement de toutes les données recueillies permettra d'identifier les secteurs littoraux les plus touchés et d'identifier une zone test au sein de laquelle plusieurs méthodes géophysiques seront mises en œuvre et testées afin de localiser le biseau salé. Par ailleurs, si des forages destinés à l'alimentation en eau potable ont été identifiés comme contaminés par des eaux salées, des préconisations spécifiques seront apportées aux exploitants des sites.

Ces travaux permettront de mieux comprendre les mécanismes liés aux intrusions salines en domaine de socle, qui peut s'avérer localement très complexe, et de proposer ainsi des préconisations pour éviter, suivre et anticiper ces phénomènes.

Code BSS Si existant (PS : il n'est pas nécessaire que l'ouvrage soit déclaré en BSS).	Commune	Lieu-dit	X	Y (peu importe le système de projection)	Système de projection	Données piézométriques	Conductivité	Température	Ions majeurs	Autres paramètres	Format des données	Contacts pour récupérer les données	
Pas de code	*Lalloup*	*Le bourg*	*6288256*	*250450*	*Lambert 93*	*X*	*X*	*X*		*Cl- / K+ / NO3-*	*Autre*	*Monsieur Paul X, 9 rue du Temple 22 000 ST BRIEUC / 02.99.84.88.45 / paul.xxx@gmail.com*	*Exemple*

Le fichier Excel de ce tableau est téléchargeable sur : http://sigesbre.brgm.fr/

Annexe 2

Réponses obtenues suite à l’envoi du courrier de recensement des données

Expéditeur	Code BSS Si existant (NB : pour cette étude, il n'est pas nécessaire que l'ouvrage soit déclaré en BSS).	Commune	Lieu-dit	Données piézométriques	Conductivité	Température	Ions majeurs	Chlorures	Autres paramètres	Format des données	Contacts pour récupérer les données
Fiona McLaughlin Syndicat EPAB Baie de Douarnenez / 02 29 40 41 27 / qualite.eau@epab.fr	03094X0023	Telgruc sur Mer	Fontaine Le Caon		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03094X0024	Telgruc sur Mer	Pen Ar Stang		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03094X0025	Telgruc sur Mer	Aval Croas Semeno		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03101X0056	St Nic	Fontaine Ar Zont		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03101X0057	St Nic	Fontaine Chapelle Neuve - Coatherel		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03102X0048	Plomodiern	Toul Douar (amont)		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03102X0049	Plomodiern	Fontaine St Corentin		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03101X0058	Plomodiern	Fontaine St Sébastien		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03101X0059	Ploeven	Fontaine de Kergonan		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03102X0050	Ploeven	Kerchouren aval		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03102X0051	Plomodiern	Forage Kerdalae		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03102X0052	Plomodiern	Source Goarem Richard		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03103X0093	Cast	Lavoir de Cast		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03103X0094	Cast	Fontaine St Gildas		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0043	Plonevez Porzay	Fontaine St Anne		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0044	Plonevez Porzay	Ruisseau St Anne		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0045	Plonevez Porzay	Fontaine Le Reun		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0046	Plonevez Porzay	Kervel		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0047	Kerlaz	Fontaine St Germain		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03106X0055	Locronan	Fontaine Kerjacob		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03106X0056	Plogonnec	Fontaine St Pierre		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0048	Kerlaz	Kermarc		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0049	Douarnenez	Fontaine Kroaz Kerloc'h		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03461X0094	Pouldergat	Fontaine Bodonap		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03098X0071	Douarnenez	Fontaine St Vendal		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03098X0072	Poullan sur Mer	Fontaine St They		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03098X0073	Douarnenez	Fontaine St Pierre		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03093X0032	Crozon	Lavoir de Lesquervenec		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03461X0095	Douarnenez	Source de Kersigon		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03461X0096	Pouldergat	Ruisseau de Kergonnec		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03105X0050	Kerlaz	Ruisseau Kerstrat		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03106X0057	Plonevez Porzay	Ruisseau Le Leuriou		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	
	03101X0060	St Nic	Ruisseau St Côme		X	X			NO3/ Cl-/ pH/ O2 (in situ)	Numérique (fichier)	

Expéditeur	Code BSS Si existant (NB : pour cette étude, il n'est pas nécessaire que l'ouvrage soit déclaré en BSS).	Commune	Lieu-dit	Données piézométriques	Conductivité	Température	Ions majeurs	Chlorures	Autres paramètres	Format des données	Contacts pour récupérer les données
Janine CONAN (ARS 29)	02742X0139/F	BREST	Camping du Goulet		338 µS/cm le 14/02/2011			Cl = 40 mg/L le 14/02/2011		Papier	
	BSS003RQSC	POULLAN-SUR-MER	Pilkoad - Camping Baie de Douarnenez		319 µS/cm le 05/04/2006			Cl = 44 mg/L le 05/04/2006		Numérique (fichier)	
	02374X0016	PLOURIN	KERENNEUR		analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	Numérique (fichier)	Une étude a été faite par LABOCEA en 2015 sur le devenir du forage de Kerenneur pour le compte du syndicat du Chenal du Four et de la SPL Eau du Ponant. Cette étude comporte une partie sur l'origine des chlorures. Contact Bertrand Corre à Eau du Ponant : 210 bd François Mitterrand CS 30117 GUIPAVAS - 29802 BREST CEDEX LD : +33 2 29 00 78 70 M : +33 6 82 90 11 38 bertrand.corre@eauduponant.fr
	02731X0019	ILE-MOLENE			analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	analyses jointes	Numérique (fichier)	3 forages sensibles aux intrusions salines sont exploités en complément des eaux recueillies dans l'impluvium en période de déficit pluviométrique. Les analyses jointes peuvent correspondre à un mélange des forages. Contact pour ce dossier, toujours la SPL Eau du Ponant où la mairie de l'Ile Molène.
Gérard BIHANNIC (DDTM 29)	02374X0016	PLOURIN	KERENNEUR								Eau du Ponant
Bruno Grua (Terrandis)	Pas en BSS	PLOUGUERNEAU	CREAC'H LOSQUET								Forage cité dans rapport BRGM R-39298 (+ étude ANTEA)
	02006X0001/HY	PLOUGUERNEAU	POULOULAN		669			100			
Aude MAHOT (Pays d'Iroise Communauté)	02374X0017	LANDUNVEZ	TRAON		546 µS/cm en moyenne (ADES)			82 mg/L Cl en moyenne (ADES)			Voir Eau du Ponant
Pierre-Emmanuel TOREL (BCE)	BSS000QZUR 02075X0109/F	SAINT BRIAC SUR MER	GOLF F1	NP = 9,5 mNGF en mai 2015	1050 µS/cm en 2015 ; 1200 µS/cm en 2017					Numérique (fichier)	Pe TOREL (torel.bce@gmail.com),DDTM35
	BSS000QZUS 02075X0110/F	SAINT BRIAC SUR MER	GOLF F2	NP = 13,16 mNGF en mai 2015	650 µS/cm en 2015 ; 860 µS/cm en 2017					Numérique (fichier)	Pe TOREL (torel.bce@gmail.com),DDTM35
	BSS000QZUZ 02075X0117/F	SAINT BRIAC SUR MER	GOLF F3	NP = 13,76 mNGF en mai 2015	450 µS/cm en 2015 ; 422 µS/cm en 2017					Numérique (fichier)	Pe TOREL (torel.bce@gmail.com),DDTM35
	BSS000QZQQ 02075X0011/F	SAINT BRIAC SUR MER	GOLF								
	BSS003RCFY (ouvrage rebouché, remontée du biseau)	LANCIEUX	Le GOLF								
Marie-Agnès PILARD (ARS 35)	02073X0002/F	ST COULOMB	Camping des Chevrets forage n°1								
	02073X0003/F	ST COULOMB	Camping des Chevrets forage n°2								
	02076X0044/F	ST MALO	Camping de la Ville Huchet								
	BSS003SGBM/F1 et BSS003SGDQ/F2	ST JOUAN DES GUERETS	Blanchisserie		Moyenne 550 µS/cm			Cl = Moyenne 61,5 mg/L			
	02075X0069/F	SAINT-BRIAC-SUR-MER	FORAGE EMERAUDE N°1		Moyenne 616 µS/cm			Cl = Moyenne 93.95 mg/L			
	02077X0146/F1	ST MALO	Compagnie des pêches		Moyenne 803 µS/cm			Cl = Moyenne 90.24 mg/L			
Alice LANDAIS (SAGE Rance-Frémur)										Rapport + couches SIG	

Expéditeur	Code BSS Si existant (NB : pour cette étude, il n'est pas nécessaire que l'ouvrage soit déclaré en BSS).	Commune	Lieu-dit	Données piézométriques	Conductivité	Température	Ions majeurs	Chlorures	Autres paramètres	Format des données	Contacts pour récupérer les données
Didier Corvenne (ARS 56)	04485X0001	HOËDIC	Forage F10	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	ARS DD56 - Dominique LE TALOUR 02.97.62.77.46 Dominique.letalour@ars.sante.fr
	04774X003	HOËDIC	Forage F2	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04781X0001	HOËDIC	Forage F5	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0008	HOUAT	Forage F7	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0004	HOUAT	Forage bâche - F4	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0001	HOUAT	Forage Nord - F1	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0006	HOUAT	Forage stade - F5	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0002	HOUAT	Salus forage - F2	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04478X0003	HOUAT	Salus puits - P4	x	X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04152X0010	GROIX	Kerdurand (Forage)		X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04152X0002	GROIX	Kermouzouet (Forage)		X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	04152X0018	GROIX	Pradino (Forage)		X	X			*Cl- / NO3-*	Numérique (fichier)	
	03836X0048	PLOEMEUR	Kermadoye - Forage PE	x	X	X			*Cl- / K+ / NO3-*	Numérique (fichier)	
Dominique LE TALOUR (ARS 56)	04161X0014/F	ERDEVEN	CAMPING LES SEPT SAINTS		477 µS/cm			Cl non alnalysés	*analyses jointes*	Numérique (fichier)	
	04161X0044/F	ERDEVEN	CAMPING DE CROEZ VILLIEU		660 µS/cm			Cl non alnalysés	*analyses jointes*	Numérique (fichier)	
	04162X0029/F	ERDEVEN	CAMPING KERZERHO		807 µS/cm			Cl non alnalysés	*analyses jointes*	Numérique (fichier)	
	04166X0023/F	CARNAC	CAMPING DU MOULIN DE KERMAUX		446 µS/cm			Cl non alnalysés	*analyses jointes*	Numérique (fichier)	
Arnaud LE GAL (Eau du Morbihan)		HOUAT et HOEDIC		x	x	x	x	x	x	Rapports	
Michel BERNARD (DDTM56)		GUIDEL	Saint Mathieu		700 µS/cm			> 100 mg/L		Rapport	Lorient Agglomération
FC Lorient	03837X0207/F	PLOEMEUR	Kerlir		490 µS/cm	22°C					
Couesnon aval											Pas de données. Contacter : - Eau du Bassin Rennais - Syndicat Mixte de Production du Bassin du Couesnon
LABOCEA											Laboratoire pas propriétaire des données, contacter les clients pour récupérer les résultats
CAPINOV											Laboratoire pas propriétaire des données, contacter les clients pour récupérer les résultats
Sébastien MOLLET (UD DREAL 35)											Pas de données
ZH Bocage Kermorvan											Pas de données
Saint Brieuc Armor Agglomération											Pas de données
Cœur Emeraude											Pas de données
Alexandre HELBERT (foreur)											Pas de données
Fabienne DAOUDAL (DDPP 29)											Pas de données

Annexe 3

Questionnaire utilisé pour la collecte d'informations sur les eaux souterraines sur la frange littorale du SAGE Argoat-Trégor-Goëlo

Nombre de forages sur votre exploitation		
QUESTIONNAIRE 1 – Forage(s) (répondre de manière distincte pour chaque forage, reproduire le questionnaire 1 si nécessaire) :		
Caractéristiques générales / piézométrie		
Ouvrage exploité	oui	non
Cause de l'abandon du forage (exemple : salinité)		
Usage de l'eau souterraine		
Pompe enlevée ?	oui	non
Seriez-vous d'accord pour que des prélèvements soient réalisés dans cet ouvrage ?	oui	non
Forage déclaré au titre du Code Minier	oui	non
Forage déclaré au titre de la Loi sur l'Eau	oui	non
Rapport papier relatif au forage	oui	non
Seriez-vous d'accord pour transmettre ce rapport ?	oui	non
Code BSS[8] (si déclaré)		
Année de réalisation		
Entreprise de forage		
Commune		
Coordonnées de localisation du forage (possibilité de joindre un plan IGN et/ou cadastral) X : Y :		
Lieu-dit		
Altitude de l'ouvrage (carte IGN)		
Diamètre de l'ouvrage		
Profondeur de l'ouvrage (/terrain naturel)		
Equipement de l'ouvrage (tubage, profondeur des crépines)		
Profondeur de la pompe dans le forage (/terrain naturel)		
Profondeurs des sondes d'alerte / d'arrêt de pompe (/terrain naturel)		
Présence d'une sonde de niveau ?	oui	non
Année de la donnée la plus ancienne de mesure de niveau		
Année de la donnée la plus récente de mesure de niveau		
Fréquence de mesures de niveau		
Format des données	Fichiers informatiques	Données papiers
Seriez-vous d'accord pour transmettre ces données dans le cadre de ces études ?	oui	non
Des pompages d'essais ont-ils été réalisés sur le forage ?	oui	non
Connaissance des plaquettes « Le forage en Bretagne » et « Forages en milieu littoral » (éditées en 2006 puis 2012)	oui	non
Données quantitatives		
Profondeur moyenne de la nappe lors de l'arrêt de la pompe		
Profondeur moyenne de la nappe lors du pompage en fonctionnement		
Présence d'un compteur volumétrique (compteur totalisant les prélèvements d'eau dans le forage)	oui	non
Année de la donnée la plus ancienne		

du compteur		
Année de la donnée la plus récente du compteur		
Fréquence de mesures des volumes		
Volume moyen prélevé annuellement		
Volume mini/maxi prélevé annuellement		
Format des données	Fichiers informatiques	Données papiers
Présence d'un débitmètre	oui	non
Année de la donnée la plus ancienne		
Année de la donnée la plus récente		
Fréquence de mesures		
Format des données de débits	Fichiers informatiques	Données papiers
Seriez-vous d'accord pour transmettre ces données (volumes/débits) dans le cadre de ces études ?	oui	non
Débit d'exploitation moyen du forage		
Mode d'exploitation (durée et fréquence des cycles marche/arrêt de la pompe)		
Capacité des réservoirs remplis avec l'eau souterraine prélevée, et temps de remplissage		
Données qualitatives		
Année de l'analyse d'eau la plus ancienne		
Année de l'analyse d'eau la plus récente		
Fréquence d'analyses		
Paramètres mesurés régulièrement (cocher dans la liste ci-contre)	pH ; Chlorures ; Conductivité ; Fer total ; Manganèse total ; Nitrates ; Ammonium ; Sulfates ; Sodium ; Potassium ; Autres :	
Format des données	Fichiers informatiques	Données papiers
Laboratoire réalisant les analyses		
Etes-vous d'accord pour que le laboratoire transmette ces données dans le cadre de ces études ?	oui	non
Seriez-vous d'accord pour transmettre les données qualitatives dont vous disposez dans le cadre de ces études ?	oui	non
Chlorures maxi observés (mg/l), date		
Conductivité maxi observée (µS/cm), date		
Avez-vous observé une tendance sur l'un ou l'autre paramètre chimique, laquelle ?		
Environnement de l'ouvrage		
Distance au forage exploité le plus proche		
Distance à la mer (ou estuaire)		
Distance aux lignes électriques (haute et moyenne tension) les plus proches		
Distance des clôtures électriques ou filets lapins les plus proches		
Distance des transformateurs les plus proches		

[1] Code de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS) qui est l'identifiant unique du forage. Ce code peut être trouvé dans un rapport papier relatif au forage, sur sa coupe technique, ou via les documents disponibles sur le site Internet InfoTerre (http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do ; (il faut ensuite zoomer sur la commune et cocher dans « Dossiers du sous-sol BSS » la case « BSS - Tous les ouvrages de la Banque du Sous-Sol (BRGM) »).

Seriez-vous d'accord pour que le BRGM réalise des mesures de géophysiques (semaine du 16 au 20 octobre 2017) sur des parcelles que vous exploitez à proximité du forage ? (les parcelles peuvent être en cultures au moment des mesures)	oui	non
Données complémentaires et autres remarques		

6

Annexe 4

Résultat de l’identification des captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines

Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune	Inclus dans zone étude phase 1 (frange littorale < 5km)	Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude BSS (m)	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
22	22001635	STE ALIX - FORAGE J1 LA LANDE JACQUES	EAU CONDITIONNEE	Actif	22014	BOURSEUL		02448X0060/S2	Forage	35	250	35.8	1	-214.2	Captage vulnérable
22	22001636	STE ALIX - FORAGE J2 LA LANDE JACQUES	EAU CONDITIONNEE	Actif	22014	BOURSEUL		02448X0061/S3	Forage	32	199	33.0	1	-166.0	Captage vulnérable
22	22003765	KERLEO FORAGE (SUR SONDAGE SR2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	22030	CAOUENNEC-LANVEZEAC		02033X0082/F	Forage	62	99	58.8	3	-40.2	Captage vulnérable
22	22000207	KERLEO	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22030	CAOUENNEC-LANVEZEAC		02033X0027/F	Forage	67	100	60.8	6	-39.2	Captage vulnérable
22	22001147	FORAGE DE SAINT URIAC	EAU CONDITIONNEE	Abandonné	22048	CORSEUL		02455X0047/F	Forage	78	-	79.6	2		Captage profondeur inconnue
22	22001146	FONTAINE ROMAINE DE CORSEUL	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Abandonné	22048	CORSEUL				-	-	84.8			Captage profondeur inconnue
22	22001161	LNA: FORAGE F2	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22049	CREHEN		02444X0029/F	Forage	49	121	48.2	1	-72.8	Captage vulnérable
22	22001162	LNA: FORAGE F3	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22049	CREHEN		02444X0030/F	Forage	49	133	47.8	1	-85.2	Captage vulnérable
22	22001163	LNA:FORAGE F3 BIS (EN SECOURS)	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22049	CREHEN		02444X0032/F	Forage	49	31	47.8	1	16.8	Captage non vulnérable
22	22001164	LNA: FORAGE F5	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22049	CREHEN		02444X0031/F	Forage	49	130	46.4	3	-83.6	Captage vulnérable
22	22001160	LNA: FORAGE F1 (EN SECOURS)	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22049	CREHEN		02444X0036/F	Forage	33	73	35.7	3	-37.3	Captage vulnérable
22	22000154	KEROUANTON (FORAGE N° 1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22063	GOMMENEC'H		02047X0037/F1	Forage	58	-	54.9	3		Captage profondeur inconnue
22	22000155	KEROUANTON (FORAGE N° 2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22063	GOMMENEC'H		02047X0038/F2	Forage	59	-	53.2	6		Captage profondeur inconnue
22	22001477	LOSTEN STANG (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22078	HENGOAT		02041X0116/FEH5	Forage	22	137	26.8	5	-110.2	Captage vulnérable
22	22000432	STANG BIZIEN (FORAGE N°6)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22078	HENGOAT		02041X0063/F6	Forage	51	102	38.9	12	-63.1	Captage vulnérable
22	22000431	STANG BIZIEN (FORAGE N°5)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22078	HENGOAT		02041X0064/F5	Forage	51	92	38.4	13	-53.6	Captage vulnérable
22	22001214	YFFINIAC INDUSTRIE : FORAGE F1	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22106	LANGUEUX		02437X0043/FC31	Forage	10	45	9.5	1	-35.5	Captage vulnérable
22	22001193	YFFINIAC INDUSTRIE : FORAGE F2	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22106	LANGUEUX		02437X0057/F	Forage	7	60	8.0	1	-52.0	Captage vulnérable
22	22001461	PONT CARIOU - FE20	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22108	LANLEFF		02047X0067/FE20	Forage	26	100	25.2	1	-74.8	Captage vulnérable
22	22001460	PONT CARIOU - FE13	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22108	LANLEFF		02047X0066/FE13	Forage	27	93	24.1	3	-68.9	Captage vulnérable
22	22001462	PONT CARIOU - FE19	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22108	LANLEFF		02047X0068/FE19	Forage	30	118	24.8	5	-93.2	Captage vulnérable
22	22001473	WARENGHEM LANNION FORAGE	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22113	LANNION		02032X0089/FE	Forage	72	104	72.3	0	-31.7	Captage vulnérable
22	22001289	KERNEVEC FORAGE F2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22152	MINIHY-TREGUIER		02034X0070/P1	Forage	38	68	40.1	2	-27.9	Captage vulnérable
22	22001290	KERNEVEC FORAGE F3	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22152	MINIHY-TREGUIER		02034X0071/P2	Forage	43	90	37.3	6	-52.7	Captage vulnérable
22	22000560	KERNEVEC FORAGE F1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22152	MINIHY-TREGUIER		02034X0069/P	Forage	34	60	40.9	7	-19.1	Captage vulnérable
22	22001261	TRAOU SCAVEN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22162	PAIMPOL		01716X0028/HY	Source	38	3	37.0	1	34.0	Captage non vulnérable
22	22001157	SASSOY - FORAGE OUEST	EAU CONDITIONNEE	Actif	22172	PLANCOET		02444X0028/F	Forage	24	43	23.7	0	-19.3	Captage vulnérable
22	22001150	STE ALIX - FORAGE F1	EAU CONDITIONNEE	Actif	22172	PLANCOET		02448X0035/FE1-S3	Forage	25	121	26.5	2	-94.5	Captage vulnérable
22	22001152	SASSOY - FORAGE SUD (F3)	EAU CONDITIONNEE	Actif	22172	PLANCOET		02448X0036/PZ1	Forage	40	36.5	42.1	2	5.6	Captage vulnérable
22	22001155	SASSAY - FORAGE EST	EAU CONDITIONNEE	Abandonné	22172	PLANCOET		02444X0024/F	Forage	25	100	28.4	3	-71.6	Captage vulnérable
22	22001156	SASSOY - FORAGE NORD	EAU CONDITIONNEE	Actif	22172	PLANCOET		02444X0027/F	Forage	41	109	36.5	4	-72.5	Captage vulnérable
22	22001151	STE ALIX - FORAGE F2	EAU CONDITIONNEE	Actif	22172	PLANCOET		02444X0047/S2-FE2	Forage	42	130	37.1	5	-92.9	Captage vulnérable
22	22001664	PINTENAOU (F1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0147/F1C1A	Forage	86	108	86.0	0	-22.0	Captage vulnérable
22	22000480	KERIO (FORAGE N°1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0049/F1	Forage	92	-	92.4	0		Captage profondeur inconnue
22	22001665	PINTENAOU (F2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0148/F2C2C	Forage	82	108	82.8	1	-25.2	Captage vulnérable
22	22001521	FORAGE DU VIRNIC (GZ8)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	22177	PLEGUIEN		02048X0077/GZ8	Forage	66	-	65.0	1		Captage profondeur inconnue
22	22001666	PINTENAOU (F3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0149/F3C4A	Forage	85	156	86.0	1	-70.0	Captage vulnérable
22	22000481	KERIO (FORAGE N°2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0050/F2	Forage	97	-	96.0	1		Captage profondeur inconnue
22	22001581	KERIO (F4)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0082/F4	Forage	86	121	89.7	4	-31.3	Captage vulnérable
22	22001580	KERIO (F2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0081/F2	Forage	98	127	94.0	4	-33.0	Captage vulnérable
22	22001142	FORAGE DU VIRNIC (PLE 5)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0052/PLE5	Forage	60	100	65.0	5	-35.0	Captage vulnérable
22	22001520	FORAGE DU VIRNIC (GZ7)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	22177	PLEGUIEN		02048X0076/GZ7	Forage	59	-	64.2	5		Captage profondeur inconnue
22	22001511	FORAGE DU VIRNIC (GZ3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	22177	PLEGUIEN		02048X0066/GZ3	Forage	74	130	65.9	8	-64.1	Captage vulnérable
22	22001141	FORAGE DU VIRNIC (PLE 2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22177	PLEGUIEN		02048X0051/PLE2	Forage	100	100	65.0	35	-35.0	Captage vulnérable
22	22001088	CAPTAGE DE LA CORDERIE PLELO	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	22182	PLELO		02424X0032/INC	ture inconn	100	-	100.9	1		Captage profondeur inconnue
22	22003272	PRE JAFFRAY FC (EX SR1-P3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	22188	PLERNEUF		02431X0247/F	Forage	152	196	152.2	0	-43.8	Captage vulnérable
22	22000449	PRE JAFFRAY (FOR.2 PRES ANC ST	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22188	PLERNEUF		02431X0104/FOR2	Puits	142	80	148.0	6	68.0	Captage non vulnérable
22	22000448	PRE JAFFRAY (FOR.1 PRES NV STA	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22188	PLERNEUF		02431X0082/F	Forage	151	11	153.3	2	142.3	Captage non vulnérable
22	22001456	PRE JAFFRAY (FORAGE 99-1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22188	PLERNEUF		02431X0105/F99-1	Forage	154	13	149.9	4	136.9	Captage non vulnérable
22	22000399	LE STALVAR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22194	PLESTIN-LES-GREVES		02028X0015/P1	Puits	108	13	104.9	3	91.9	Captage non vulnérable
22	22000502	LA POMMERET	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22197	PLEUDIHEN-SUR-RANCE		02457X0007/P	Puits	74	5.4	46.2	28	40.8	Captage non vulnérable
22	22001878	STANG BIZIEN (FORAGE N°11)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22204	PLOEZAL		02041X0097/F	Forage	37	164	37.0	0	-127.0	Captage vulnérable
22	22000433	CAMPORS (FORAGE N°7)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22204	PLOEZAL		02041X0061/F7	Forage	41	100	39.8	1	-60.2	Captage vulnérable
22	22001667	STANG BIZIEN (FORAGE N°10)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22204	PLOEZAL		02041X0095/F10	Forage	38	-	39.7	2		Captage profondeur inconnue
22	22000434	CAMPORS (FORAGE N°8)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22204	PLOEZAL		02041X0065/F8	Forage	52	-	40.2	12		Captage profondeur inconnue
22	22000092	KERANGLAS	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22211	PLOUBEZRE		02032X0042/P	Puits	35	8.5	65.8	31	57.3	Captage non vulnérable
22	22000269	LA VILLEE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22213	PLOUER-SUR-RANCE		02452X0042/P1	Puits	45	4.5	45.6	1	41.1	Captage non vulnérable
22	22000268	SAINT MAUDAN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22213	PLOUER-SUR-RANCE		02452X0043/P1	Puits	56	7	57.8	2	50.8	Captage non vulnérable
22	22001247	TRAOU GUERN - FE 3	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22218	PLOUGRESCANT		01708X0026/FE3	Forage	34	100	48.3	14	-51.7	Captage vulnérable
22	22001246	TRAOU GUERN - FE 2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22218	PLOUGRESCANT		01708X0025/FE2	Forage	20	71.6	40.6	21	-31.0	Captage vulnérable
22	22001245	TRAOU GUERN - FE 1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22221	PLOUGUIEL		01708X0027/FE1	Forage	30	100	42.0	12	-58.0	Captage vulnérable
22	22001139	FORAGE SP1 POULDOURAN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22222	PLOUHA		02048X0048/SP1	Forage	84	106.5	84.0	0	-22.5	Captage vulnérable
22	22000425	KERMINF	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22222	PLOUHA		02048X0043/P1	Puits	85	10.3	85.5	0	75.2	Captage non vulnérable
22	22001138	FORAGE SP3 POULDOURAN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22222	PLOUHA		02048X0047/SP3	Forage	87	106.5	84.2	3	-22.3	Captage vulnérable
22	22000521	BOURG	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22224	PLOULEC'H		02032X0043/PUITS	Source	98	0	88.0	10	88.0	Captage non vulnérable

Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune		Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
22	22001309	KERDURAISON	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22226	PLOUMILLIAU		02035X0041/FE98-1	Forage	102	175	92.0	10	-83.0	Captage vulnérable
22	22000515	KERTANGUY (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22226	PLOUMILLIAU		02035X0017/S98-1	Forage	103	139	99.6	3	-39.4	Captage vulnérable
22	22000165	BEAUGOUYEN (FORAGE FE 6)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22232	PLOURHAN		02048X0042/FE6	Forage	80	133.5	80.5	0	-53.0	Captage vulnérable
22	22000163	VILLE HELIO	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22232	PLOURHAN		02048X0045/P1	Puits	102	4	91.1	11	87.1	Captage non vulnérable
22	22001487	FORAGE BEAUGOUYEN 2003	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22232	PLOURHAN		02048X0070/S1	Forage	93	140	82.0	11	-58.0	Captage vulnérable
22	22000164	BEAUGOUYEN (FORAGE FE 2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22232	PLOURHAN		02048X0040/FE2	Forage	98	151	80.0	18	-71.0	Captage vulnérable
22	22000278	LA BROUSSERIE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22237	PLUDUNO		02444X0065/P1	Puits	10	10	8.0	2	-2.0	Captage vulnérable
22	22000435	LAUNAY (FORAGE N°1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0056/F1	Forage	45	60	45.9	1	-14.1	Captage vulnérable
22	22001879	LAUNAY (FORAGE N°12)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0096/F	Forage	48	136	45.0	3	-91.0	Captage vulnérable
22	22000438	LAUNAY (FORAGE N°4)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0059/F4	Forage	48	100	45.0	3	-55.0	Captage vulnérable
22	22001522	LAUNAY (FORAGE N°9)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0082/F5	Forage	43	200	47.4	4	-152.6	Captage vulnérable
22	22000436	LAUNAY (FORAGE N°2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0057/F2	Forage	54	60	46.6	7	-13.4	Captage vulnérable
22	22000437	LAUNAY (FORAGE N°3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22247	POMMERIT-JAUDY		02041X0058/F3	Forage	62	100	47.2	15	-52.8	Captage vulnérable
22	22000989	LE CARPONT	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22258	QUESSOY		02437X0089/P	Forage	63	70	62.0	1	-8.0	Captage vulnérable
22	22000990	CARNIVET (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22258	QUESSOY		02437X0090/F2	Forage	60	60	62.3	2	2.3	Captage vulnérable
22	22000487	LE BOIS RIOU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22259	QUEVERT		02455X0046/P1	Puits	70	5	89.6	20	84.6	Captage non vulnérable
22	22001527	L'HOPITAL FORAGE FE4	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22265	ROSPEZ		02033X0046/F4	Forage	72	139	66.0	6	-73.0	Captage vulnérable
22	22000242	L'HOPITAL FORAGE N°3	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22265	ROSPEZ		02033X0045/F3	Forage	55	199	64.0	9	-135.0	Captage vulnérable
22	22000205	L'HOPITAL FORAGE N°1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22265	ROSPEZ		02033X0042/F1	Forage	45	63	64.0	19	1.0	Captage vulnérable
22	22000357	EDAM	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22286	SAINT-DENOUAL		02442X0080/P1	Puits	72	3	61.4	11	58.4	Captage non vulnérable
22	22001476	PONT AUX CHATS (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22299	SAINT-HELEN		02457X0046/CHA	Forage	43	80	44.0	1	-36.0	Captage vulnérable
22	22000504	LE PONT AU CHAT (PUITS)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22299	SAINT-HELEN		02457X0040/P1	Puits	53	5	46.0	7	41.0	Captage non vulnérable
22	22001263	SOURCE DES FROIDES FONTAINES	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22323	SAINT-POTAN		02443X0057/HY	Source	56	0	52.7	3	52.7	Captage non vulnérable
22	22000760	PONT COUENNEC	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22324	SAINT-QUAY-PERROS		01706X0035/P1	Puits	30	10	9.2	21	-0.8	Captage vulnérable
22	22000756	LA FONTAINE ACCENT	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22356	TREGOMEUR		02424X0038/P1	Puits	100	4	101.8	2	97.8	Captage non vulnérable
22	22000482	SAINT GUENAEL	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	22361	TREGUIDEL		02048X0053/P1	Source	77	3.3	93.3	16	90.0	Captage non vulnérable
22	22000728	KERSENANT	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22366	TREMEL		02411X0027/P1	Puits	97	5	97.2	0	92.2	Captage non vulnérable
22	22001282	LE CARPONT (PUITS 3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22377	TREVENEUC		02055X0220/P3	Puits	57	4	56.4	1	52.4	Captage non vulnérable
22	22000754	LE CARPONT (PUITS 1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22377	TREVENEUC		02055X0061/P1	Puits	55	4	56.1	1	52.1	Captage non vulnérable
22	22001281	LE CARPONT (PUITS 2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22377	TREVENEUC		02055X0062/P2	Puits	64	4	65.3	1	61.3	Captage non vulnérable
22	22001086	FORAGE DE KERPELLEN	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	22378	TREVEREC		02047X0020/F	Forage	70	73	75.6	6	2.6	Captage vulnérable
22	22000503	LE QUART D'EAU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	22385	VICOMTE-SUR-RANCE(LA)		02457X0041/P3	Puits	38	5.5	40.0	2	34.5	Captage non vulnérable
22	22001194	YFFINIAC INDUSTRIE : FORAGE F3	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22389	YFFINIAC		02437X0058/F	Forage	7	73	7.4	0	-65.6	Captage vulnérable
22	22001168	STALAVEN YFFINIAC: FORAGE	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	22389	YFFINIAC			Forage	-	-	83.9			Captage profondeur inconnue
29	29000281	CLEGUER.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		03101X0018/P1	Puits	139	-	139.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000285	KERNERON.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		03101X0016/P1	Puits	87	-	87.9	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000280	SAINT AGNES.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		02755X0024/P1	Puits	101	-	102.1	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000282	GOAREM AN ABAD.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		03101X0017/P1	Puits	116	-	114.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000283	PENANROS CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		02755X0022/P1	Puits	84	-	85.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000284	PENANROS FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29001	ARGOL		02755X0023/P	Puits	86	-	87.7	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000286	KERNAGOFF.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29001	ARGOL		02748X0014/P1	Puits	54	-	55.8	2		Captage a priori non vulnérable
29	29002305	NOUVEAU FORAGE KERLEN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29002	ARZANO		03486X0036/F	Forage	66	-	65.9	0		Captage profondeur inconnue
29	29001379	KERLEN 2.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29002	ARZANO		03832X0041/P	Puits	67	-	66.8	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000149	KERALVE-CAPTAGE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29002	ARZANO		03486X0019/P1	Puits	72	-	72.3	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000150	KERALVE-FORAGE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29002	ARZANO		03486X0016/F	Forage	67	59	65.0	2	6.0	Captage vulnérable
29	29000295	KERLEN 1 CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29002	ARZANO		03832X0042/P	Puits	66	-	63.6	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000155	KERCARNIC.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29004	BANNALEC		03478X0014/P1	Puits	83	-	83.2	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000154	INTRON VARIA.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29004	BANNALEC		03477X0011/HY	Source	87	8	88.1	1	80.1	Captage non vulnérable
29	29002387	FORAGE KERAVEN F3	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29006	BENODET		03467X0175/F3	Forage	7	142	7.0	0	-135.0	Captage vulnérable
29	29002391	FORAGE KERAVEN F4	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29006	BENODET		03467X0176/F4	Forage	11	142	10.4	1	-131.6	Captage vulnérable
29	29002200	FORAGE GUENODOU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29006	BENODET		03467X0086/F1	Forage	15	139	19.0	4	-120.0	Captage vulnérable
29	29004016	POULRINOU FORAGE	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29011	BOHARS		02386X0041/F1	Forage	79	106.4	78.0	1	-28.4	Captage vulnérable
29	29004015	POULRINOU PUITS	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29011	BOHARS		BSS003ALPU/X	Puits	-	-	80.0			Captage a priori non vulnérable
29	29001990	FORAGE PETITE ILE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29015	BOURG-BLANC		02387X0085/F	Forage	64	139	64.0	0	-75.0	Captage vulnérable
29	29000003	PRAT-AR-ZARP_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29015	BOURG-BLANC		02387X0084/P1	Puits	65	-	68.1	3		Captage a priori non vulnérable
29	29004111	KERGONC	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29015	BOURG-BLANC				-	-	66.9			Captage a priori non vulnérable
29	29003138	GOULET	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29019	BREST		02742X0139/F	Forage	62	55	62.3	0	7.3	Captage vulnérable
29	29001551	PONT/BELLEC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29023	CARANTEC		02025X0036/P1	Puits	25	-	25.1	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000174	GRANNEC HAUT.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29025	CAST		03103X0044/P3	Puits	151	-	150.9	0		Captage a priori non vulnérable
29	29001497	GRANNEC BAS.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29025	CAST		03103X0046/P2	Puits	159	-	159.8	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001498	GRANNEC SUD.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29025	CAST		03103X0045/P4	Puits	157	-	156.1	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001540	MENEZ-KELEC'H.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29025	CAST		03103X0042/P	Puits	170	-	167.4	3		Captage a priori non vulnérable
29	29001506	COATILIGER FOR SS.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29026	CHATEAULIN		03104X0039/P	Puits	100	-	100.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000278	COATILIGER PL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29026	CHATEAULIN		03104X0037/P1	Puits	111	-	109.8	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001522	PRAT AR ROUZ	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29026	CHATEAULIN		03103X0041/P1	Puits	152	-	153.2	1		Captage a priori non vulnérable

Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune		Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
29	29000314	COATILIGER SS.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29026	CHATEAULIN		03104X0038/P2	Puits	100	-	101.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29004060	COOK FORAGE F2*	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29031	CLOHARS-CARNOET		03831X0153/F2	Forage	62	150	61.4	1	-88.6	Captage vulnérable
29	29001318	ROUD GUEN.PUITS SUD.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29032	CLOHARS-FOUESNANT		03467X0078/P3	Puits	44	-	44.5	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002110	ROUD GUEN.PUITS PRINCIPAL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29032	CLOHARS-FOUESNANT		03467X0003/HY	Source	46	6	45.0	1	39.0	Captage non vulnérable
29	29000157	CHEFFONTAINES.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29032	CLOHARS-FOUESNANT		03468X0049/P1	Puits	48	-	49.8	2		Captage a priori non vulnérable
29	29001317	ROUD GUEN.PUITS NORD.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29032	CLOHARS-FOUESNANT		03467X0025/F	Forage	42	-	44.0	2		Captage profondeur inconnue
29	29000006	GOADEC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29035	COAT-MEAL		02386X0004/HY	Source	63	0	65.1	2	65.1	Captage non vulnérable
29	29000181	FROUTGUEN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29037	COMBRIT		03466X0040/P1	Puits	35	-	33.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000032	PORSGUENNOU_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29043	DAOULAS		02751X0001/PE	Forage	65	6	61.8	3	55.8	Captage non vulnérable
29	29000187	KERGAOC.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29044	DINEAULT		03102X0020/P1	Puits	162	-	162.5	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000188	LEZAFF.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29044	DINEAULT		03102X0021/P1	Puits	151	-	151.5	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002145	FORAGE LANNUGAT	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29046	DOUARNENEZ		BSS003ALPQ/X	Forage	-	100	41.0		-59.0	Captage vulnérable
29	29000008	LA GARE 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29047	DRENNEC(LE)		02384X0152/P	Puits	52	6	53.7	2	47.7	Captage non vulnérable
29	29000007	LA GARE 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29047	DRENNEC(LE)		02384X0014/F280	Forage	55	35	57.6	3	22.6	Captage non vulnérable
29	29000194	PENNAVERN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29053	FAOU(LE)		02756X0036/P1	Puits	60	-	57.2	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000028	LANNUCHEN 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29055	FOLGOET(LE)		02384X0145/P1	Puits	45	7	46.0	1	39.0	Captage non vulnérable
29	29000030	KERGOFF_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29055	FOLGOET(LE)		02384X0063/PE	Forage	56	18	59.2	3	41.2	Captage non vulnérable
29	29000029	LANNUCHEN 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29055	FOLGOET(LE)		02384X0146/P2	Puits	46	-	50.0	4		Captage a priori non vulnérable
29	29000010	CASTEL-NEVEZ_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29056	FOREST-LANDERNEAU(LA)		02395X0061/P1	Puits	15	-	12.0	3		Captage a priori non vulnérable
29	29003544	BREHOULOU F2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29058	FOUESNANT		03468X0190/F	Forage	49	100	49.0	0	-51.0	Captage vulnérable
29	29002240	BREHOULOU F1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29058	FOUESNANT		03468X0187/F	Forage	48	100	47.9	0	-52.1	Captage vulnérable
29	29003542	KEROURGUE FOR F1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29058	FOUESNANT		03468X0133/F	Forage	60	160	60.7	1	-99.3	Captage vulnérable
29	29002043	KERASPLOC'H.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29058	FOUESNANT		03468X0147/F	Forage	39	-	38.3	1		Captage profondeur inconnue
29	29000200	KEROURGUE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29058	FOUESNANT		03468X0051/P1	Puits	59	-	60.0	1		Captage a priori non vulnérable
29	29003543	KEROURGUE FOR F2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29058	FOUESNANT		03468X0191/F	Forage	59.2	170	61.0	2	-109.0	Captage vulnérable
29	29000201	GWEZENN VRAZ.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29062	GOUEZEC		03104X0021/F1	Forage	148	58	145.8	2	87.8	Captage non vulnérable
29	29000203	MOULIN NEUF.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29062	GOUEZEC		03104X0036/P1	Puits	100	-	90.4	10		Captage a priori non vulnérable
29	29000243	LANNOUREC CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29063	GOULIEN		03096X0022/P1	Puits	81	-	81.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000244	LANNOUREC FOR NOUVEAU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29063	GOULIEN		03452X0035/F	Forage	59	148	68.0	9	-80.0	Captage vulnérable
29	29001983	CANDY	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29069	GUILERS		02386X0156/F	Puits	79	-	80.6	2		Captage a priori non vulnérable
29	29004109	CREACH BURGUY ANCIENNE CARRIdRE	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29075	GUIPAVAS		BSS003ECSC/X	Puits	-	-	83.0			Captage profondeur inconnue
29	29004110	DORGUEN	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29075	GUIPAVAS		BSS003ECRY/X	Puits	-	2.1	65.0		62.9	Captage non vulnérable
29	29000015	TOUL AN DOUR_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29076	GUIPRONVEL		02386X0070/P1	Puits	65	-	65.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001481	KERIGENT 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29077	GUISSENY		02008X0003/HY	Source	49	3	51.8	3	48.8	Captage non vulnérable
29	29001482	KERIGENT 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29077	GUISSENY		02008X0034/P	Puits	46	-	49.5	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000073	POULGUERN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29078	HANVEC		02753X0017/P1	Puits	260	-	260.2	0		Captage a priori non vulnérable
29	29002129	KERLIVER 1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29078	HANVEC		02756X0039/F1	Forage	47	134	47.8	1	-86.2	Captage vulnérable
29	29000074	BRIANTEL 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29078	HANVEC		02753X0014/P2	Puits	172	-	171.1	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000077	BRIANTEL 4_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29078	HANVEC		02753X0016/P4	Puits	185	-	183.3	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000011	KERANCLOUAR_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29078	HANVEC		02756X0034/P	Puits	44	-	49.6	6		Captage a priori non vulnérable
29	29002082	KERLIVER 2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29078	HANVEC		02756X0040/F2	Forage	24	134	42.3	18	-91.7	Captage vulnérable
29	29000019	MOLENE 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29084	ILE-MOLENE		02731X0003/F3	Forage	17	29	15.0	2	-14.0	Captage vulnérable
29	29000020	MOLENE 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29084	ILE-MOLENE		02731X0018/P	Puits	9	-	7.9	1	< 8	Captage vulnérable
29	29002717	MOULIN DU ROSSIOU	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29086	IRVILLAC		02752X0037/P	Puits	39	1.2	44.7	6	43.5	Captage non vulnérable
29	29000016	LE CREC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29086	IRVILLAC		02752X0013/P1	Puits	50	-	57.4	7		Captage a priori non vulnérable
29	29000021	KERSULANT_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29093	KERNILIS		02384X0001/HY	Source	70	3.8	67.9	2	64.1	Captage non vulnérable
29	29000022	TROMENEC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29101	LANDEDA		02382X0049/P1	Puits	92.05	-	38.4	54		Captage a priori non vulnérable
29	29001501	KERGAMET FORAGE 1.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29108	LANDUDEC		03454X0026/F	Forage	68	28	68.3	0	40.3	Captage non vulnérable
29	29001502	KERGAMET FORAGE 2.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29108	LANDUDEC		03454X0025/F	Forage	68	53	68.3	0	15.3	Captage non vulnérable
29	29002204	FORAGE KERLOSQUET	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29108	LANDUDEC		03454X0061/F1-S2	Forage	71	127.5	70.3	1	-57.2	Captage vulnérable
29	29000267	SAINT RENAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29108	LANDUDEC		03454X0068/PE	Forage	66	-	67.5	1		Captage profondeur inconnue
29	29000215	KERGAMET	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29108	LANDUDEC		03454X0067/P	Puits	65	-	69.0	4		Captage a priori non vulnérable
29	29000067	TRAON_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29109	LANDUNVEZ		02374X0017/P1	Puits	25	-	25.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000068	KERENNEUR_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29109	LANDUNVEZ		02374X0016/F1	Forage	17	97	19.4	2	-77.6	Captage vulnérable
29	29000066	QUELERET_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29109	LANDUNVEZ		02374X0002/PE	Source	24	0	21.0	3	21.0	Captage non vulnérable
29	29000026	KEROUEN 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29117	LANNILIS		02382X0023/F	Forage	18	71	18.3	0	-52.7	Captage vulnérable
29	29002117	LANVEUR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29117	LANNILIS		02383X0038/F2-S2	Forage	44	139.5	47.0	3	-92.5	Captage vulnérable
29	29000027	KEROUEN 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29117	LANNILIS		02382X0050/P2	Puits	15	-	18.3	3		Captage profondeur inconnue
29	29000228	KERVAVARN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29134	LOCRONAN		03106X0019/P1	Puits	120	-	120.9	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002016	GOASVEN 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29137	LOGONNA-DAOULAS		02751X0077/F	Puits	44	-	44.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29001275	GOASVEN 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29137	LOGONNA-DAOULAS		02751X0028/F	Forage	40	82	44.6	5	-37.4	Captage vulnérable
29	29000230	NIVOT.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29139	LOPEREC		02758X0006/F	Forage	104	46	107.9	4	61.9	Captage non vulnérable
29	29000229	KERGOTER.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29139	LOPEREC		02757X0002/PE	Forage	177	5	170.4	7	165.4	Captage non vulnérable
29	29000080	GUERNEVEZ_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29140	LOPERHET		02744X0048/P1	Puits	70	-	71.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000081	CARN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29140	LOPERHET		02744X0049/P1	Puits	102	-	106.4	4		Captage a priori non vulnérable

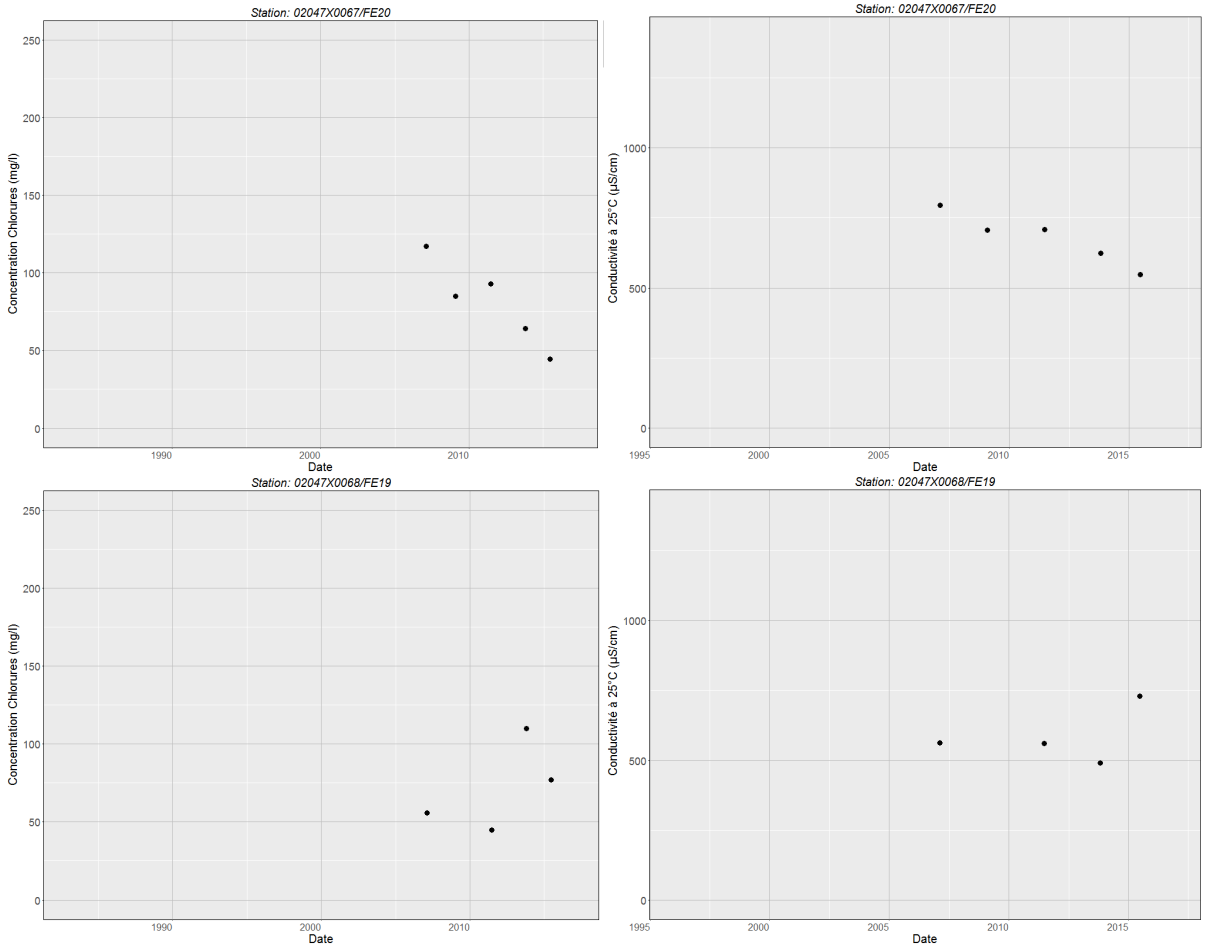
Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune		Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
29	29000232	RUNIGOU VIHAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29142	LOTHEY		03104X0041/P1	Puits	105	-	107.1	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000233	KERVOAD.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29145	CONFORT-MEILARS		03453X0020/HY	Source	45	0	40.5	4	40.5	Captage non vulnérable
29	29002248	FORAGE ROZORMAN.F2.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29146	MELGVEN		03476X0076/F2	Forage	110	80	110.4	0	30.4	Captage non vulnérable
29	29004011	KERNIOUARN-FORAGE FEX1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0064/S1	Forage	132	61	133.2	1	72.2	Captage non vulnérable
29	29000182	CADOL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0030/P	Puits	103	-	105.7	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000235	KERNIOUARN-5.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0032/P1	Puits	145	-	122.5	23		Captage a priori non vulnérable
29	29001271	KERNIOUARN-6.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0034/P3	Puits	146	-	122.4	24		Captage a priori non vulnérable
29	29000234	KERNIOUARN-1A4.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0033/P2	Puits	146	-	120.6	25		Captage a priori non vulnérable
29	29001525	KERNIOUARN-FORAGE FE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29146	MELGVEN		03476X0035/P	Puits	145	-	119.2	26		Captage a priori non vulnérable
29	29000236	TY BODEL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29147	MELLAC		03485X0013/P1	Puits	80	-	81.0	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002149	FORAGE VENEGUEN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29149	MILIZAC		02386X0157/F	Forage	85	100	85.2	0	-14.8	Captage vulnérable
29	29000034	PONT-CLEAU 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29149	MILIZAC		02386X0071/P1	Puits	74	-	74.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001560	LANNER_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29149	MILIZAC		02385X0041/P	Puits	84	-	85.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000033	PONT-CLEAU 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29149	MILIZAC		02386X0054/SP6	Forage	82	8	83.8	2	75.8	Captage non vulnérable
29	29002674	LANGOADEC	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29149	MILIZAC		02386X0151/F	Forage	76	148	78.1	2	-69.9	Captage vulnérable
29	29001278	VENEGUEN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29149	MILIZAC		02386X0065/S3	ture inconn	83	109	85.3	2	-23.7	Captage vulnérable
29	29002239	FORAGE	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29151	MORLAIX			Forage	-	-	80.1			Captage profondeur inconnue
29	29000035	LOGUELLOU_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29156	PENCRAN		02396X0024/P1	Puits	140	4	141.8	2	137.8	Captage non vulnérable
29	29000036	TRAON-EDERN 1_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29160	PLABENNEC		02384X0061/S2	Forage	55	115	55.0	0	-60.0	Captage vulnérable
29	29001997	FORAGE 1 TY CORN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29160	PLABENNEC		02384X0186/F	Forage	54	-	51.0	3		Captage profondeur inconnue
29	29001998	FORAGE 2 TY CORN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29160	PLABENNEC		02384X0187/F	Forage	54	-	50.6	3		Captage profondeur inconnue
29	29001285	TRAON-EDERN 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29160	PLABENNEC		02384X0149/P	Puits	51	-	56.1	5		Captage a priori non vulnérable
29	29000250	SAINT AVE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29167	PLOGASTEL-SAINT-GERMAIN		03461X0035/P1	Puits	122	-	122.1	0		Captage a priori non vulnérable
29	29001503	SAINT AVE FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29167	PLOGASTEL-SAINT-GERMAIN		03461X0036/P	Puits	110	-	108.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000256	COMBREN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29170	PLOMELIN		03467X0076/P	Puits	37	-	36.2	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002362	REUNIAT-FOR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29170	PLOMELIN		03466X0096/F	Forage	39	-	40.3	1		Captage profondeur inconnue
29	29001523	NENEZ.FORAGE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29170	PLOMELIN		03466X0027/PE	Forage	32	-	29.1	3		Captage profondeur inconnue
29	29000255	REUNIAT-CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29170	PLOMELIN		03466X0042/P	Puits	55	-	51.7	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000254	BOISSAVARN.NOUVEAU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29170	PLOMELIN		03467X0081/F	Forage	25	130	25.0	0	-105.0	Captage vulnérable
29	29000257	KERLOT-ABA	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29170	PLOMELIN		03466X0041/P1	Puits	54	-	61.5	8		Captage a priori non vulnérable
29	29001480	CROAZ RU.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29172	PLOMODIERN		03102X0018/P1	Puits	95	-	94.4	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000258	DOUR BIHAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29172	PLOMODIERN		03102X0017/P1	Puits	140	-	138.4	2		Captage a priori non vulnérable
29	29001504	PEN GOYEN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0032/P1	Puits	130	-	130.3	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000245	KERBENNIC CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29173	PLONEIS		03462X0034/P1	Puits	110	-	110.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29003520	PEN GOYEN-FORAGE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0096/F7	Forage	132	130	133.1	1	3.1	Captage vulnérable
29	29000246	KERBENNIC FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29173	PLONEIS		03462X0033/F	Puits	110	-	112.6	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000248	KERNEVES FOR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0036/P	Puits	120	-	123.2	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000294	LEURRE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0037/P1	Puits	130	-	125.1	5		Captage a priori non vulnérable
29	29000247	KERNEVES CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0035/P1	Puits	115	-	122.1	7		Captage a priori non vulnérable
29	29001380	MARC'HALLAC'H.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29173	PLONEIS		03462X0041/P	Puits	130	-	118.1	12		Captage a priori non vulnérable
29	29000293	DOURGUEN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29173	PLONEIS		03462X0038/P1	Puits	90	-	76.3	14		Captage a priori non vulnérable
29	29001279	GARO_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29178	PLOUDALMEZEAU		02381X0034/P	Puits	43	-	43.2	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000039	FEUNTEUN-AR-PELL_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29178	PLOUDALMEZEAU		02381X0033/P1	Puits	40	-	40.9	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001385	EVEN LAIT	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29179	PLOUDANIEL		02384X0108/F1	Forage	55	71	57.0	2	-14.0	Captage vulnérable
29	29001478	PORZLAZOU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29180	PLOUDIRY		02396X0025/P1	Puits	140	-	139.1	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000104	SAINT-JEAN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29180	PLOUDIRY		02396X0026/P1	Puits	135	-	137.1	2		Captage a priori non vulnérable
29	29001387	FORAGE ROLLAND	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29181	PLOUEDERN		02395X0049/F1	Forage	93	-	93.0	0		Captage profondeur inconnue
29	29002375	REST 3	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29184	PLOUENAN		02018X0121/F	Puits	52	-	52.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29002374	REST 1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29184	PLOUENAN		02018X0120/F	Puits	47	-	48.0	1		Captage a priori non vulnérable
29	29004058	FORAGE F2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29184	PLOUENAN			Forage	-	-	69.1			Captage profondeur inconnue
29	29001532	ST NICOLAS_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29188	PLOUGASNOU		02022X0001/F	Forage	69	-	68.9	0		Captage profondeur inconnue
29	29001384	FORAGE SA PRIMEL	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29188	PLOUGASNOU		02026X0029/P	Puits	63	-	63.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000063	KERGONNEC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29189	PLOUGASTEL-DAOULAS		02743X0051/P1	Puits	38	-	35.8	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000061	BRELEIS_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29189	PLOUGASTEL-DAOULAS		02744X0047/P1	Puits	28	-	24.9	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000062	LODOEN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29189	PLOUGASTEL-DAOULAS		02743X0050/P1	Puits	39	-	31.8	7		Captage a priori non vulnérable
29	29002399	PORZ AR LOC'H	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29189	PLOUGASTEL-DAOULAS		BSS003ALOA/X	Puits	-	6.2	9.0		2.8	Captage vulnérable
29	29000044	KERGADAVARN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29195	PLOUGUERNEAU		02007X0022/PE	Forage	47	-	50.0	3		Captage profondeur inconnue
29	29000043	POULOULAN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29195	PLOUGUERNEAU		02006X0001/HY	Source	34	3	37.8	4	34.8	Captage non vulnérable
29	29001987	LANNALOUARN	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	29196	PLOUGUIN		02382X0093/F	Puits	48	-	48.0	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000045	TOURHIP_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29196	PLOUGUIN		02381X0035/P1	Puits	68	-	68.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000205	BROMUEL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29197	PLOUHINEC		03453X0018/HY	Puits	60	4	60.1	0	56.1	Captage non vulnérable
29	29000105	DOURMAP_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29198	PLOUIDER		02008X0004/PE	Forage	46	-	43.7	2		Captage profondeur inconnue
29	29000004	KERZELEN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29198	PLOUIDER		02008X0005/PE	Source	44	0	49.9	6	49.9	Captage non vulnérable
29	29000051	TY-PLATT_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29206	PLOUNEVEZ-LOCHRIST		02016X0036/P1	Puits	45	9	44.9	0	35.9	Captage non vulnérable
29	29000052	CAELEN_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29209	PLOUVIEN		02383X0001/PE	Source	55	0	55.0	0	55.0	Captage non vulnérable

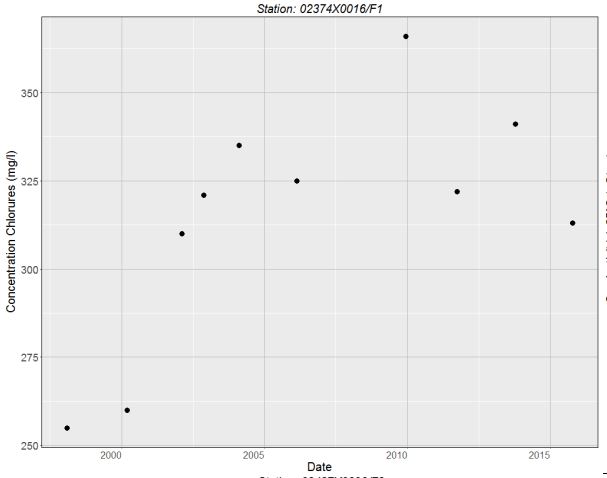
Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune		Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
29	29004089	PENHER	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Projet	29209	PLOUVIEN				-	-	41.0			Captage profondeur inconnue
29	29004090	BOIS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Projet	29209	PLOUVIEN				-	-	41.0			Captage profondeur inconnue
29	29001524	FEUNTEUN-VEUR_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29210	PLOUVORN		02393X0043/P1	Puits	93	-	91.8	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001394	KERALIOU_	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	29212	PLOUZANE		02741X0034/P	Puits	78	-	69.4	9		Captage a priori non vulnérable
29	29004079	KERIARS MARINE NATIONALE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29212	PLOUZANE			Forage	62		77.2			Captage profondeur inconnue
29	29002292	F2-COOK PLZ	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29215	PLOZEVET		03453X0110/F2	Forage	-	-	72.0			Captage profondeur inconnue
29	29001500	KERVOELLIC SECONDAIRE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29216	PLUGUFFAN		03462X0039/P2	Puits	55	-	56.0	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000268	KERVOELLIC.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29216	PLUGUFFAN		03462X0027/P2	Puits	46.5	-	54.3	8		Captage a priori non vulnérable
29	29001266	KERVOELLIC.FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29216	PLUGUFFAN		03462X0028/P3	Forage	46.5	-	55.0	8		Captage profondeur inconnue
29	29002188	kERSTAT NORD	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29224	POULDERGAT		03461X0054/F	Forage	75	-	75.3	0		Captage profondeur inconnue
29	29001476	BOTCARN-1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29224	POULDERGAT		03454X0069/P1	Puits	53	-	53.3	0		Captage a priori non vulnérable
29	29000249	KERSTRAT	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29224	POULDERGAT		03461X0034/P1	Puits	102	-	101.0	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000191	KERYANES.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29224	POULDERGAT		03454X0009/HY	Source	50	0	51.1	1	51.1	Captage non vulnérable
29	29002187	kERSTRAT SUD60	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	29224	POULDERGAT		03461X0053/F	Forage	74	-	75.3	1		Captage profondeur inconnue
29	29000190	KERGAOULEDAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29224	POULDERGAT		03454X0012/F	Forage	55	60	59.9	5	-0.1	Captage vulnérable
29	29004019	BOTCARN-2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29224	POULDERGAT				-	-	50.1			Captage profondeur inconnue
29	29001505	LESAFF EXTRDME CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29226	POULLAN-SUR-MER		03098X0030/P2	Puits	56	-	56.6	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000242	LESAFF FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29226	POULLAN-SUR-MER		03098X0029/P	Puits	65	-	66.2	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000241	LESAFF CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29226	POULLAN-SUR-MER		03098X0028/P1	Puits	65	-	66.3	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000287	KERGOAT.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29229	QUEMENEVEN		03106X0018/125	Puits	125	-	128.4	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000291	KERANT SPARL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29230	QUERRIEN		03486X0020/P1	Puits	99	-	99.8	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000288	LAND GUERRIEN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29230	QUERRIEN		03485X0014/P1	Puits	125	-	126.3	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000290	CATELOUARN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29230	QUERRIEN		03485X0002/HY	Source	118	0	111.8	6	111.8	Captage non vulnérable
29	29000292	COATLIGAVAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29232	QUIMPER		03463X0088/P1	Puits	43	-	44.5	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000075	BRIANTEL 2_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29246	SAINT-ELOY		02753X0015/P2	Puits	180	-	180.6	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002115	LAN AR BOURHIS	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29246	SAINT-ELOY		02753X0033/F	Puits	167	-	167.6	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001319	TROUHARN SECONDAIRE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29247	SAINT-EVARZEC		03468X0052/P2	Puits	56	-	62.2	6		Captage a priori non vulnérable
29	29002112	TROUHARN.PUITS PRINCIPAL.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29247	SAINT-EVARZEC		03468X0048/P1	Puits	51	5	58.6	8	53.6	Captage non vulnérable
29	29000305	CHAPELLE NEUVE.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29256	SAINT-NIC		03101X0020/P	Puits	125	-	125.7	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000306	YEUN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29256	SAINT-NIC		03101X0021/P	Puits	136	-	137.9	2		Captage a priori non vulnérable
29	29000107	POULLOC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29257	SAINT-PABU		02381X0006/PE	Source	30	0	29.1	1	29.1	Captage non vulnérable
29	29002409	BENIGUET	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29257	SAINT-PABU		02381X0005/HY	Puits	20	-	12.8	7		Captage a priori non vulnérable
29	29001989	FORAGE N°1	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29259	SAINT-POL-DE-LEON		02018X0126/F	Forage	-	117	36.0		-81.0	Captage vulnérable
29	29002167	FORAGE N°2	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29259	SAINT-POL-DE-LEON		02018X0127/F	Forage	-	160	47.0		-113.0	Captage vulnérable
29	29002168	F3 KERISNEL	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29259	SAINT-POL-DE-LEON		02018X0129/F	Forage	-	167.8	41.0		-126.8	Captage vulnérable
29	29002169	F4 CR+ëAC'H GUEZOU	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	29259	SAINT-POL-DE-LEON		02018X0131/F	Forage	-	106	11.0		-95.0	Captage vulnérable
29	29000274	POULDU.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29263	SAINT-SEGAL		02757X0011/P	Puits	82	-	84.8	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000106	PEN-AR-QUINQUIS_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29268	SAINT-THONAN		02388X0106/PE	Forage	93	-	90.7	2		Captage profondeur inconnue
29	29000055	BALANEC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29270	SAINT-URBAIN		02752X0002/HY	Source	104	0	103.8	0	103.8	Captage non vulnérable
29	29000321	STANG LINGUENNEC CAP.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29272	SAINT-YVI		03475X0036/P1	Puits	120	-	119.3	1		Captage a priori non vulnérable
29	29001126	TREVINEC-FOR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29272	SAINT-YVI		03468X0199/F	Forage	73	51	73.9	1	22.9	Captage non vulnérable
29	29000322	STANG LINGUENNEC FOR.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29272	SAINT-YVI		03475X0037/P	Puits	113	-	114.2	1		Captage a priori non vulnérable
29	29002666	TREVINEC-CAPT	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29272	SAINT-YVI		03468X0053/P1	Puits	74	-	75.3	1		Captage a priori non vulnérable
29	29000083	PEN AR PRAT_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29282	TREBABU		02734X0047/F	Puits	34	-	36.3	2		Captage a priori non vulnérable
29	29001280	MILINIC_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29286	TREFLEVENEZ		02752X0014/P1	Puits	106	-	108.6	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000056	SAINT-PIERRE_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29286	TREFLEVENEZ		02752X0001/PE	Forage	96	3	91.9	4	88.9	Captage non vulnérable
29	29000336	BRIGNEUN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29289	TREGARVAN		03102X0019/P1	Puits	117	-	119.7	3		Captage a priori non vulnérable
29	29000335	TOUL AR GLOET.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29289	TREGARVAN		03101X0015/P	Puits	155	-	144.2	11		Captage non vulnérable
29	29000057	KERLOHOU_	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	29290	TREGLONOU		02382X0048/P1	Puits	45	-	49.8	5		Captage a priori non vulnérable
29	29000339	LOST AR HOCQ.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29297	TREMEVEN		03485X0003/HY	Source	67.09	8.4	66.6	0	58.2	Captage non vulnérable
29	29000275	GOASTALLAN.	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	29302	PONT-DE-BUIS-LES-QUIMERCH		02757X0009/F2	Forage	85	45	89.5	5	44.5	Captage non vulnérable
35	35000596	PIGEARD	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	35009	BAGUER-MORVAN		02461X0004/P	Puits	38	-	36.4	2		Captage a priori non vulnérable
35	35003546	FE5 LA LANDE DE MALHEUR	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	35225	PLESDER		02457X0091/FE5	Forage	91	133.5	91.0	0	-42.5	Captage vulnérable
35	35003547	FE3 LA HUTIERE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	35225	PLESDER		02457X0087/FE3	Forage	80	115	81.2	1	-33.8	Captage vulnérable
35	35001379	FORAGE EMERAUDE N°1	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	35256	SAINT-BRIAC-SUR-MER		02075X0069/F	Forage	20	58	27.0	7	-31.0	Captage vulnérable
35	35003157	FORAGE DES CHEVRETS N°1	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	35263	SAINT-COULOMB		02073X0002/F	Forage	30	162	31.4	1	-130.6	Captage vulnérable
35	35003158	FORAGE DES CHEVRETS N°2	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	35263	SAINT-COULOMB		02073X0003/F	Forage	30	156	31.6	2	-124.4	Captage vulnérable
35	35000699	CHANEL	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	35270	SAINT-GEORGES-DE-GREHAIGNE		02463X0510/P	Puits	60	5	69.0	9	64.0	Captage non vulnérable
35	35000333	DRAINS DU BOIS DE PONTUAL	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	35287	SAINT-LUNAIRE		02075X0001/SOURCE	Source	53	0	54.0	1	54.0	Captage non vulnérable
35	35000992	FORAGE DE LA VILLE HUCHET	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	35288	SAINT-MALO		02076X0044/F	Forage	32	145	32.6	1	-112.4	Captage vulnérable
35	35000968	FORAGE COMPAGNIE DES PECHES N°1	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	35288	SAINT-MALO		02077X0146/F1	Forage	23	133	21.1	2	-111.9	Captage vulnérable
56	56000489	CARROUIS	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56011	BEGANNE		04184X0005/P	Puits	29	4.1	18.2	11	14.1	Captage non vulnérable
56	56000696	SPI DIANA FORAGE 1	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56015	BERRIC		04174X0036/F1	Forage	53	196	53.0	0	-143.0	Captage vulnérable
56	56000697	SPI DIANA FORAGE 2	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56015	BERRIC		04174X0037/F1	Forage	53	205	52.3	1	-152.7	Captage vulnérable
56	56000242	MANEHER (PUITS)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56021	BRANDERION		03841X0036/P1	Puits	40	6.4	47.2	7	40.8	Captage non vulnérable

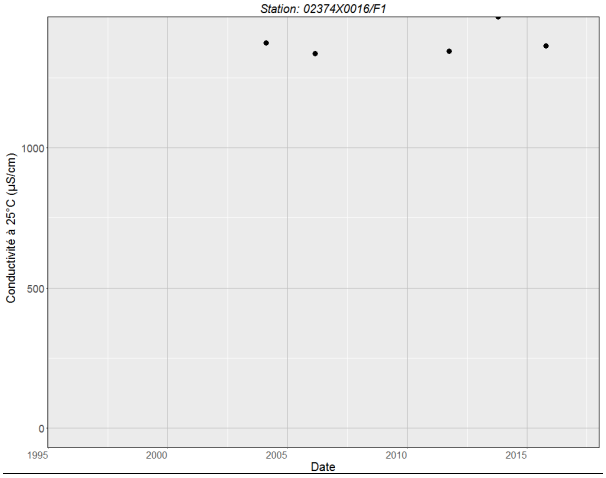
Département	Code SISE-Eaux	Nom du captage	Usage	Etat	Code INSEE	Commune		Code BSS	Nature	Altitude BSS (m NGF)	Profondeur (m)	Altitude MNT (m NGF)	MNT-Altitude	Profondeur fond de l'ouvrage (m NGF) = MNT-Profondeur	Vulnérabilité
56	56000643	MOULIN DE KERMAUX	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56034	CARNAC		04166X0023/F	Forage	15	62	14.6	0	-47.4	Captage vulnérable
56	56000645	L'ETANG	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56034	CARNAC		04166X0029/PE	Source	19	0	18.0	1	18.0	Captage non vulnérable
56	56000642	LE LAC	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56034	CARNAC		04163X0015/F	Forage	5	53	6.8	2	-46.2	Captage vulnérable
56	56000639	LA GRANDE METAIRIE	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56034	CARNAC		04167X0029/F	Forage	10	-	7.4	3	< 10	Captage vulnérable
56	56000644	LES ALIGNEMENTS DE KERMARIO	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56034	CARNAC		04166X0030/PE	Source	7	0	11.9	5	11.9	Captage non vulnérable
56	56004059	SENEBRET (FORAGE FE10)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56040	CLEGUER		03833X0092/PSR10	Forage	70	169	70.0	0	-99.0	Captage vulnérable
56	56004058	SENEBRET (FORAGE FE9)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56040	CLEGUER		03833X0091/PSR9	Forage	67	159	68.0	1	-91.0	Captage vulnérable
56	56000975	CROEZ-VILLIEU (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56054	ERDEVEN		04161X0044/F	Forage	16	92	16.5	0	-75.5	Captage vulnérable
56	56000647	KERZERHO	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56054	ERDEVEN		04162X0029/F	Forage	17	50	18.0	1	-32.0	Captage vulnérable
56	56000646	LES SEPT SAINTS	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56054	ERDEVEN		04161X0014/F	Forage	8	85	9.6	2	-75.4	Captage vulnérable
56	56000074	TY GLAS	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56067	GRAND-CHAMP		03855X0027/INC	Puits	79.4	-	79.3	0		Captage a priori non vulnérable
56	56000075	COULAC	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56067	GRAND-CHAMP		03855X0025/P1	Puits	72	-	72.8	1		Captage a priori non vulnérable
56	56000734	KERDURAND GROIX (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56069	GROIX		04152X0010/S5-1	Forage	32	49	33.0	1	-16.0	Captage vulnérable
56	56000676	KERMOUZOUET (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56069	GROIX		04152X0002/S2-1	Forage	26	52	27.1	1	-24.9	Captage vulnérable
56	56000675	PRADINO (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56069	GROIX		04152X0018/S9-1	Forage	33	52	35.4	2	-16.6	Captage vulnérable
56	56004062	ST MATHIEU (FORAGE FE17)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56078	GUIDEL		03836X0178/FE17	Forage	10.42	164	11.2	1	-152.8	Captage vulnérable
56	56004061	ST MATHIEU (FORAGE FE16)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56078	GUIDEL		03836X0177/FE16	Forage	9.58	164	10.6	1	-153.4	Captage vulnérable
56	56004060	ST MATHIEU (FORAGE FE3)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56078	GUIDEL		03836X0103/PSR3	Forage	11	106	12.5	1	-93.5	Captage vulnérable
56	56000403	HOEDIC (FORAGE F2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56085	HOEDIC		04774X0003/F2	Forage	11	-	11.0	0	< 11	Captage vulnérable
56	56000404	HOEDIC (FORAGE F5)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56085	HOEDIC		04781X0001/F5	Forage	13	-	14.7	2	< 15	Captage vulnérable
56	56000401	HOEDIC (PUITS P1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56085	HOEDIC		04774X0001/P1	Puits	9	3.1	11.0	2	7.9	Captage vulnérable
56	56000402	HOEDIC (PUITS P2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56085	HOEDIC		04774X0002/P2	Puits	8	4.9	10.4	2	5.5	Captage vulnérable
56	56004054	HOEDIC (FORAGE F10)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56085	HOEDIC		04485X0001/F10	Forage	-	76	14.0		-62.0	Captage vulnérable
56	56000544	HOUAT (FORAGE NORD - F1)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0001/F	Forage	29.25	52	30.0	1	-22.0	Captage vulnérable
56	56001010	HOUAT (FORAGE B+éCHE - F4)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0004/F	Forage	28.21	55	29.0	1	-26.0	Captage vulnérable
56	56000543	HOUAT (SALUS FORAGE - F2)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0002/F	Forage	14.68	58	17.6	3	-40.4	Captage vulnérable
56	56001009	HOUAT (FORAGE STADE - F5)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0006/F	Forage	30.3	-	34.1	4		Captage profondeur inconnue
56	56000542	HOUAT (SALUS PUITS - P4)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0003/P1	Puits	14.59	5	20.6	6	15.6	Captage non vulnérable
56	56003983	HOUAT (F7)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Projet	56086	ILE-D'HOUAT		04478X0008/F7	Forage	-	72	26.0		-46.0	Captage vulnérable
56	56000628	PROCANAR FORAGE 1	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56109	LAUZACH		04178X0021/F1	Forage	43	75	42.9	0	-32.1	Captage vulnérable
56	56000629	PROCANAR FORAGE 2	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56109	LAUZACH		04178X0022/F2	Forage	43	79	44.0	1	-35.0	Captage vulnérable
56	56000630	PROCANAR FORAGE 3	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56109	LAUZACH		04178X0023/F3	Forage	44	67	45.0	1	-22.0	Captage vulnérable
56	56000155	BRESPAN	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56111	LIMERZEL		04182X0010/P	Puits	68	6.5	72.2	4	65.7	Captage non vulnérable
56	56000935	FORAGE N°2 KERLYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56119	LOCOAL-MENDON		04162X0036/F2	Forage	28	200	29.0	1	-171.0	Captage vulnérable
56	56000937	FORAGE N°4 KERLYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56119	LOCOAL-MENDON		04162X0038/F4	Forage	27	200	28.0	1	-172.0	Captage vulnérable
56	56000936	FORAGE N°3 KERLYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56119	LOCOAL-MENDON		04162X0037/F3	Forage	27	200	28.3	1	-171.7	Captage vulnérable
56	56000073	CADUAL	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56132	MEUCON		03856X0027/P1	Puits	85	9	86.7	2	77.7	Captage non vulnérable
56	56000071	GUERNEVE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56132	MEUCON		03856X0024/P1	Puits	95	1	97.7	3	96.7	Captage non vulnérable
56	56000072	GRANUHAC	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56132	MEUCON		03856X0026/P1	Puits	88	2	90.8	3	88.8	Captage non vulnérable
56	56000652	LA BLANCHE HERMINE	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56143	MUZILLAC		04185X0014/F	Forage	40	40	41.3	1	1.3	Captage vulnérable
56	56000249	KERMADOYE - FORAGE PE	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56162	PLOEMEUR		03836X0048/PE	Forage	24.44	110	25.0	1	-85.0	Captage vulnérable
56	56004051	KERMADOYE - FORAGE PA1 (F29)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56162	PLOEMEUR		03836X0053/F2	Forage	22.7	103	23.8	1	-79.2	Captage vulnérable
56	56004052	KERMADOYE - FORAGE PA3 (F31)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56162	PLOEMEUR		03836X0055/F4	Forage	23.8	103	25.0	1	-78.0	Captage vulnérable
56	56000923	FORAGE N°4 CELTYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56166	PLOUAY		03487X0027/F4	Forage	60.5	151	60.8	0	-90.2	Captage vulnérable
56	56000922	FORAGE N°3 CELTYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56166	PLOUAY		03487X0026/F	Forage	62.1	272	61.2	1	-210.8	Captage vulnérable
56	56000921	FORAGE N°2 CELTYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56166	PLOUAY		03487X0025/F2	Forage	65.9	210	65.0	1	-145.0	Captage vulnérable
56	56000920	FORAGE N°1 CELTYS	ACTIVITE AGRO ALIMENTAIRE	Actif	56166	PLOUAY		03487X0024/F1	Forage	66	242	62.0	4	-180.0	Captage vulnérable
56	56000238	PONT MOUTON (PUITS)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56169	PLOUHINEC		03838X0017/P	Source	14	8.6	12.8	1	4.2	Captage vulnérable
56	56000711	KERGOUDELER (FORAGE)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56177	PLUVIGNER		03847X0006/F	Forage	43	100	43.0	0	-57.0	Captage vulnérable
56	56000243	KERGOUDELER (PUITS)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56177	PLUVIGNER		03847X0004/P	Puits	38	5	44.0	6	39.0	Captage non vulnérable
56	56000649	DO.MI.SI.LA.MI. N°2	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56186	QUIBERON		04472X0035/F2	Forage	8	-	8.2	0	< 10	Captage vulnérable
56	56000650	DO.MI.SI.LA.MI. N°1	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Actif	56186	QUIBERON		04472X0007/F1	Forage	7	35	7.8	1	-27.2	Captage vulnérable
56	56000648	BEAUSEJOUR	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56186	QUIBERON		04472X0021/F	Forage	6	27	8.5	2	-18.5	Captage vulnérable
56	56000397	PONT ARROC'H (PUITS G)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56193	RIANTEC		03838X0022/P3	Puits	6	24	6.0	0	-18.0	Captage vulnérable
56	56000398	PONT ARROC'H (PUITS E)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56193	RIANTEC		03838X0047/F1	Forage	6	-	5.9	0	< 10	Captage vulnérable
56	56000399	PONT ARROC'H (PUITS F)	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56193	RIANTEC		03838X0021/P2	Puits	6	15	5.2	1	-9.8	Captage vulnérable
56	56000038	LIHANTEU	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56206	SAINT-AVE		03856X0029/P1	Puits	108	-	107.9	0		Captage a priori non vulnérable
56	56000039	KERBOTIN PUITS 1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56206	SAINT-AVE		03856X0001/PE	Puits	128	6.4	126.9	1	120.5	Captage non vulnérable
56	56004068	KERBOTIN PUITS 2	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56206	SAINT-AVE		03856X0028/P2	Puits	123	-	125.2	2		Captage a priori non vulnérable
56	56000972	KERBOTIN FORAGE 6	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Abandonné	56206	SAINT-AVE		03856X0097/SRA6	Forage	-	103	98.4		-4.6	Captage vulnérable
56	56000971	KERBOTIN FORAGE 8	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56206	SAINT-AVE		03856X0101/SRA8	Forage	-	121	111.4		-9.6	Captage vulnérable
56	56000022	SAINT COLOMBIER	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56231	SAINT-NOLFF		04173X0007/P	Puits	80	6.5	81.2	1	74.7	Captage non vulnérable
56	56000032	KERHON	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56231	SAINT-NOLFF		04173X0040/P1	Puits	75	5.2	77.4	2	72.2	Captage non vulnérable
56	56000031	TREFLIS	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56231	SAINT-NOLFF		04173X0010/P	Puits	100	9.5	104.2	4	94.7	Captage non vulnérable
56	56000030	COSQUERIC	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56231	SAINT-NOLFF		04173X0008/P	Source	82	0	70.3	12	70.3	Captage non vulnérable
56	56004070	CRAN PUITS STATION	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56255	TREFFLEAN		04174X0011/P	Puits	87	11	88.6	2	77.6	Captage non vulnérable
56	56000460	CRAN PUITS 1	ADDUCTION COLLECTIVE PUBLIQUE	Actif	56255	TREFFLEAN		04174X0035/P1	Puits	84	5	89.0	5	84.0	Captage non vulnérable
56	56000651	KERVILOR	ADDUCTION COLLECTIVE PRIVEE	Abandonné	56258	TRINITE-SUR-MER(LA)		04167X0020/F	Forage	20	70	20.4	0	-49.6	Captage vulnérable

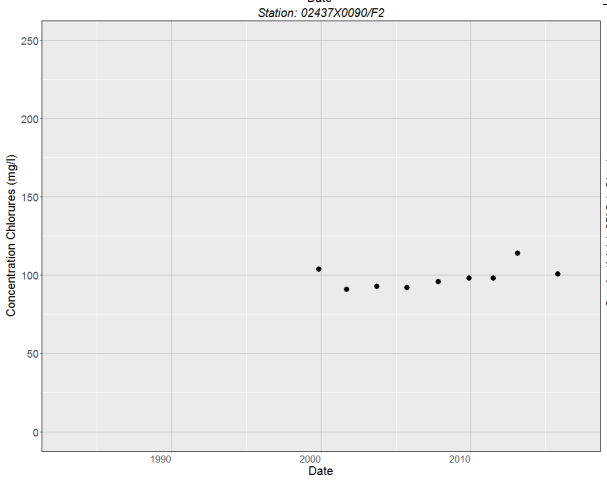
Annexe 5

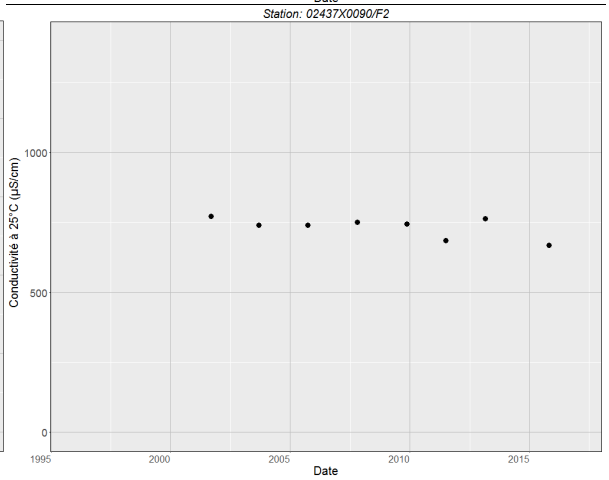
Chroniques de chlorures et de conductivité issues d'ADES pour les captages AEP potentiellement vulnérables aux intrusions salines

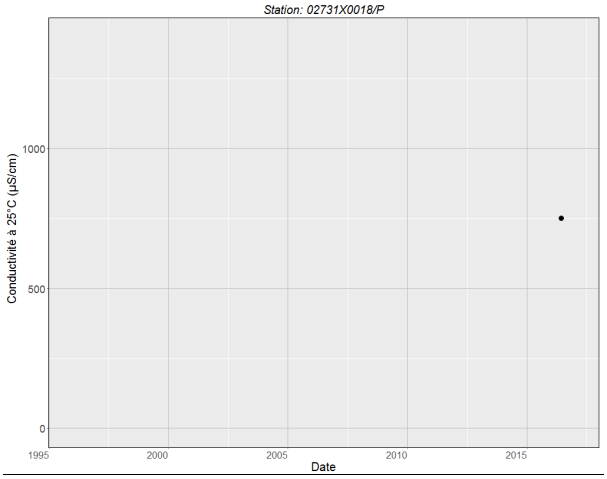

Station: 02047X0067/FE20
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 02047X0067/FE20
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 02047X0068/FE19
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 02047X0068/FE19
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date

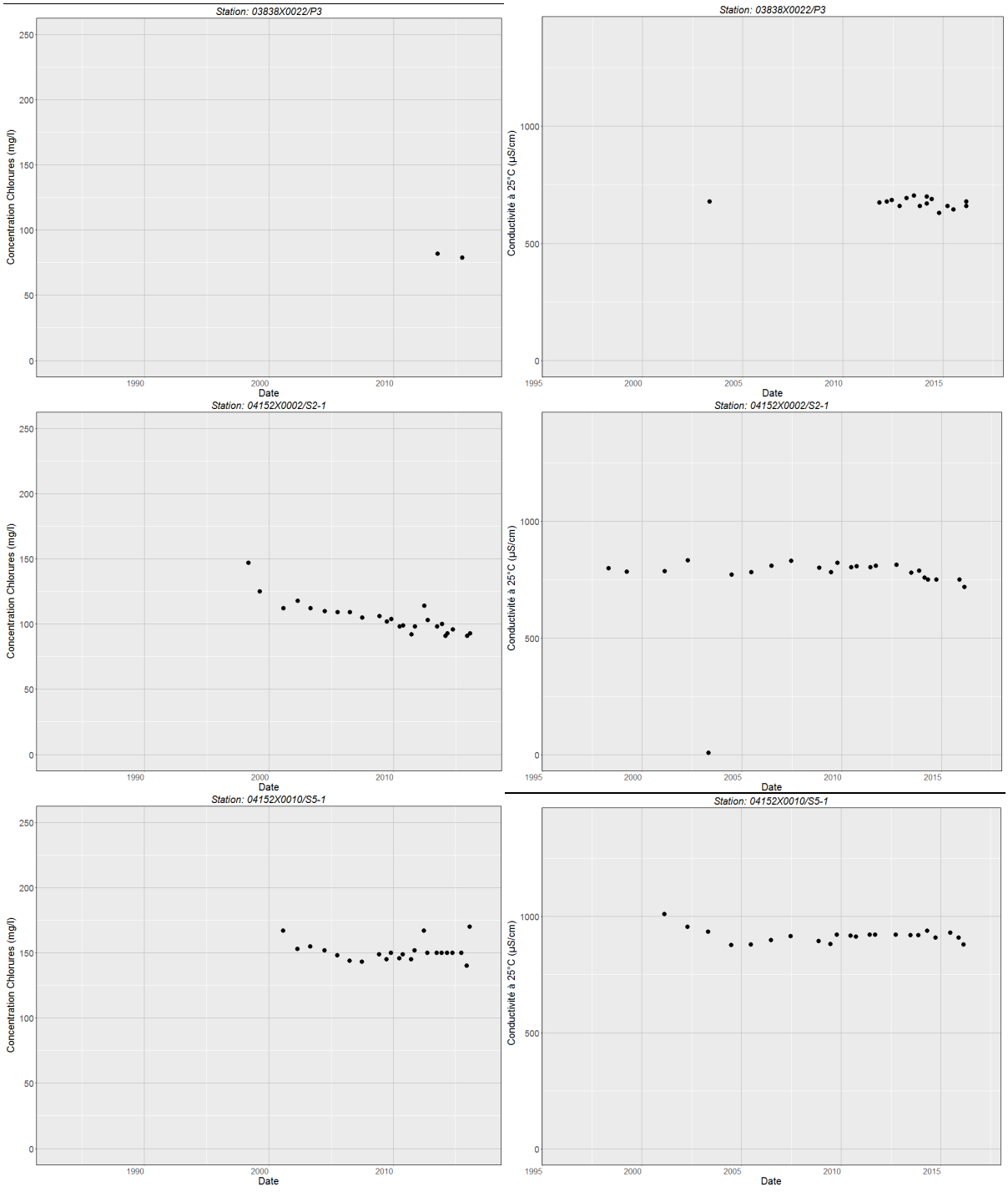

Station: 02374X0016/F1
Concentration Chlorures (mg/l)
350
325
300
275
250
2000
2005
2010
2015
Date

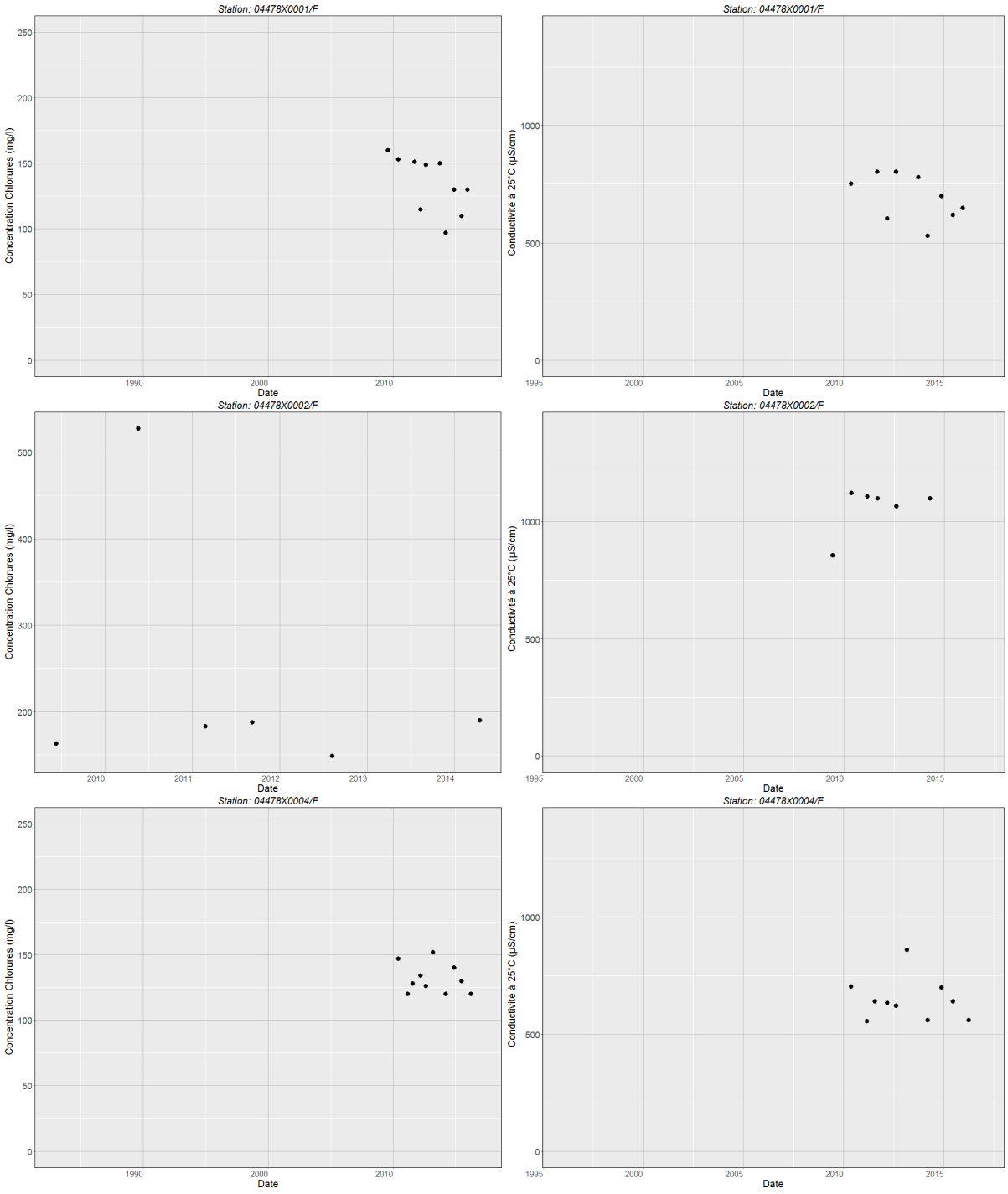

Station: 02374X0016/F1
Conductivité à 25°C (µS/cm)
1000
500
0
1995
2000
2005
2010
2015
Date

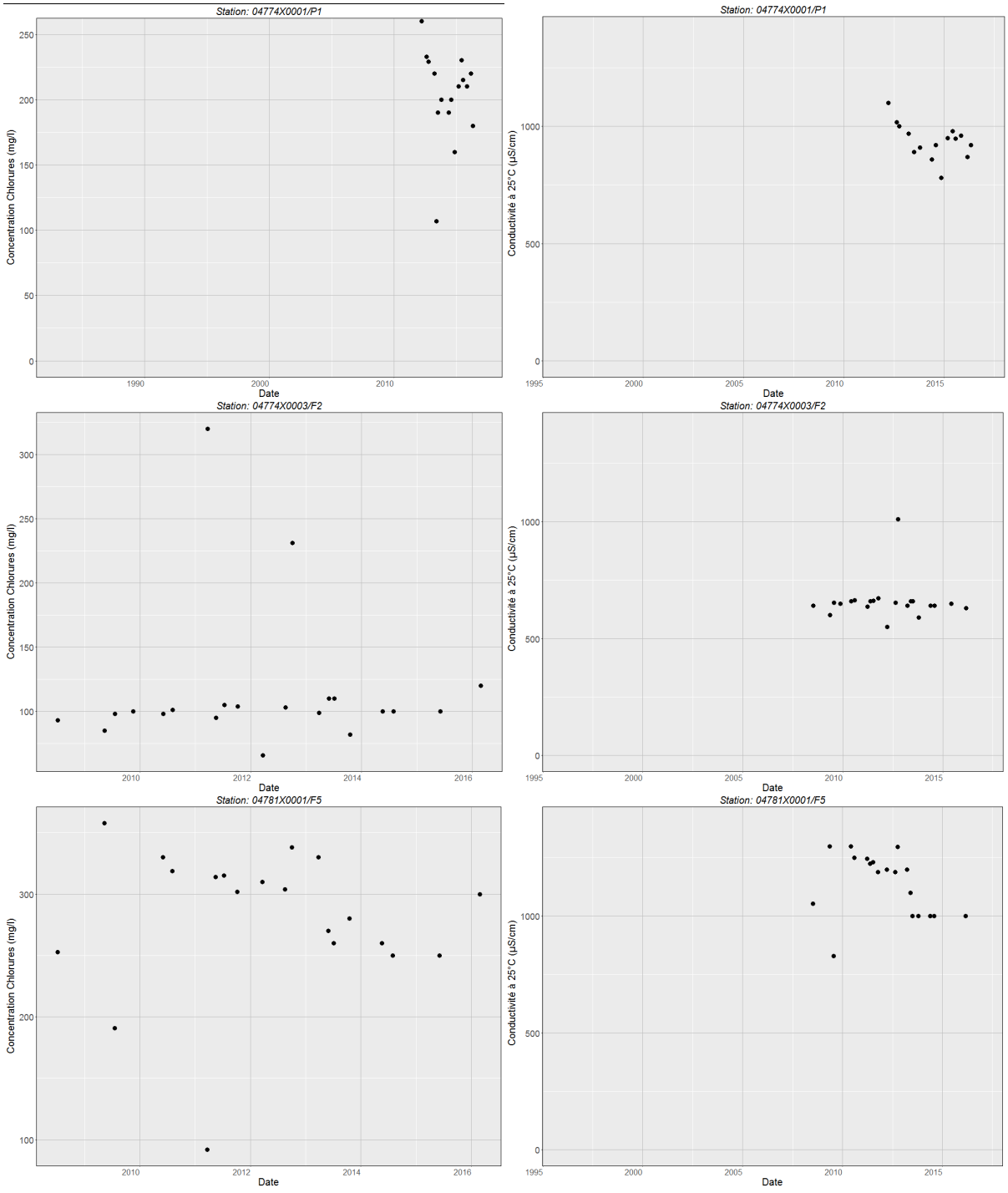

Station: 02437X0090/F2
Concentration Chlorures (mg/l)
250
200
150
100
50
0
1990
2000
2010
Date


Station: 02437X0090/F2
Conductivité à 25°C (µS/cm)
1000
500
0
1995
2000
2005
2010
2015
Date


Station: 02731X0018/P
Conductivité à 25°C (µS/cm)
1000
500
0
1995
2000
2005
2010
2015
Date

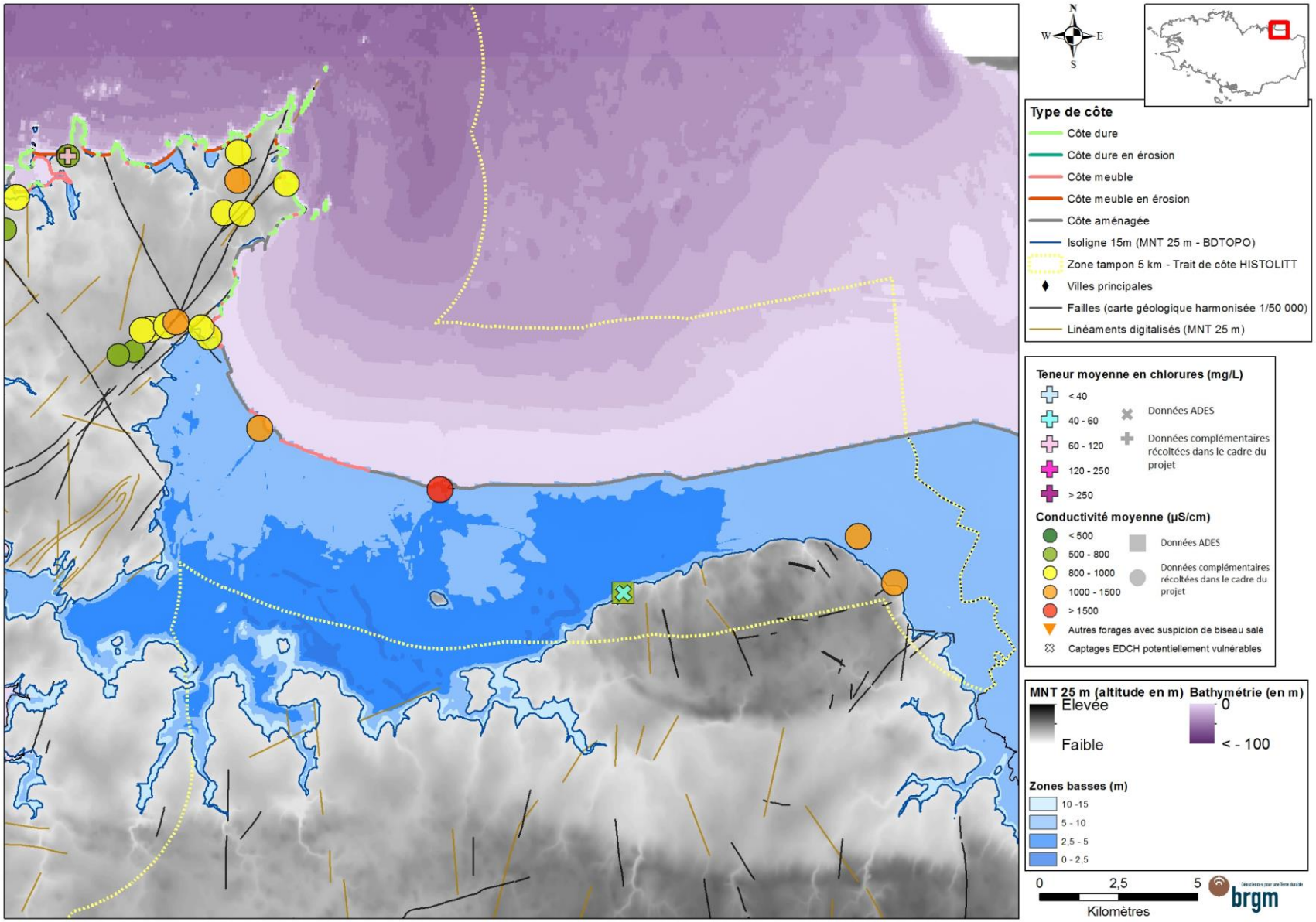

Station: 03838X0022/P3
Concentration Chlorures (mg/l)
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 04152X0002/S2-1
Station: 04152X0010/S5-1

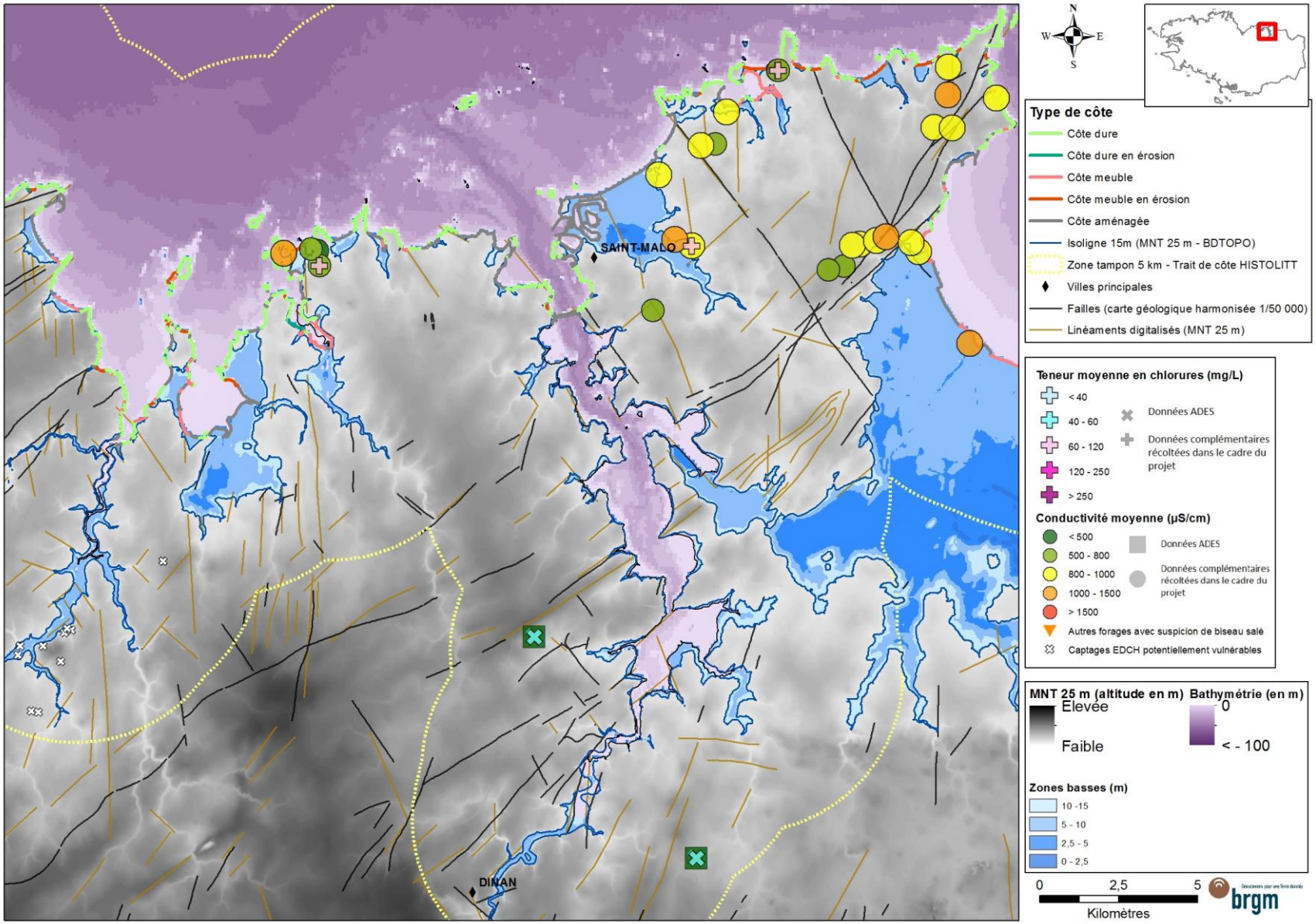

Station: 04478X0001/F
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04478X0001/F
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 04478X0002/F
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04478X0002/F
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 04478X0004/F
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04478X0004/F
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date

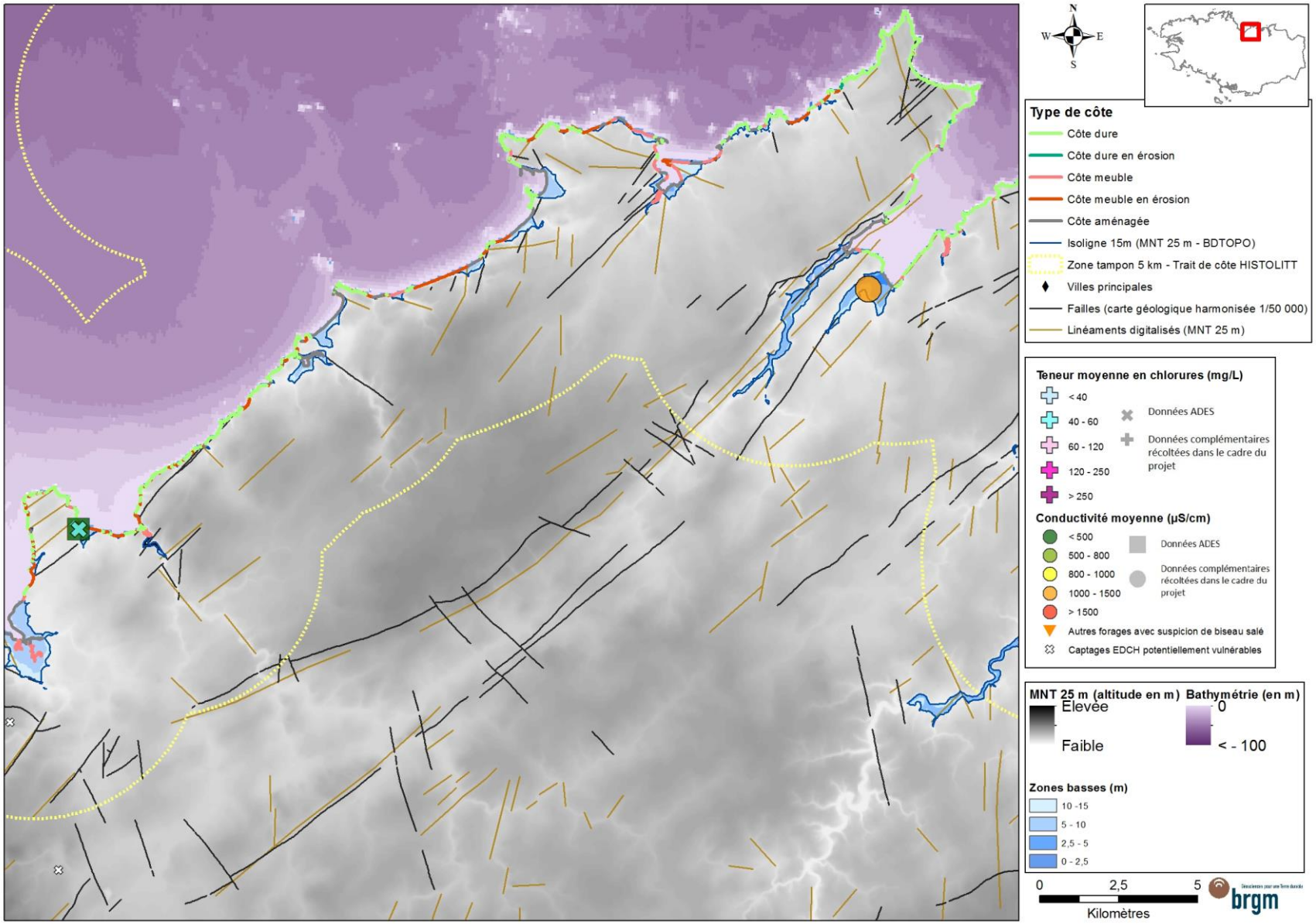

Station: 04774X0001/P1
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04774X0001/P1
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 04774X0003/F2
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04774X0003/F2
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date
Station: 04781X0001/F5
Concentration Chlorures (mg/l)
Date
Station: 04781X0001/F5
Conductivité à 25°C (µS/cm)
Date

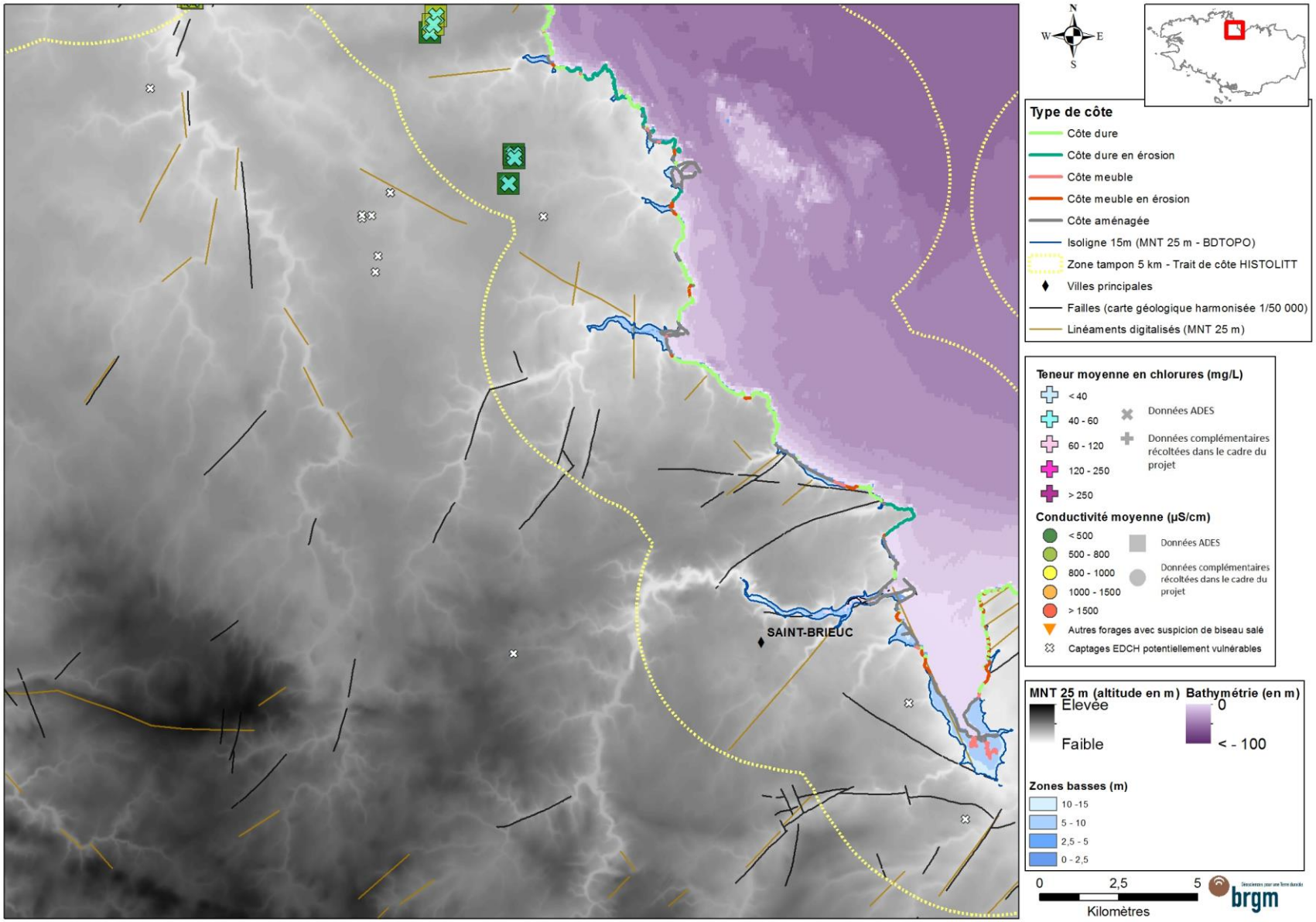
Annexe 6

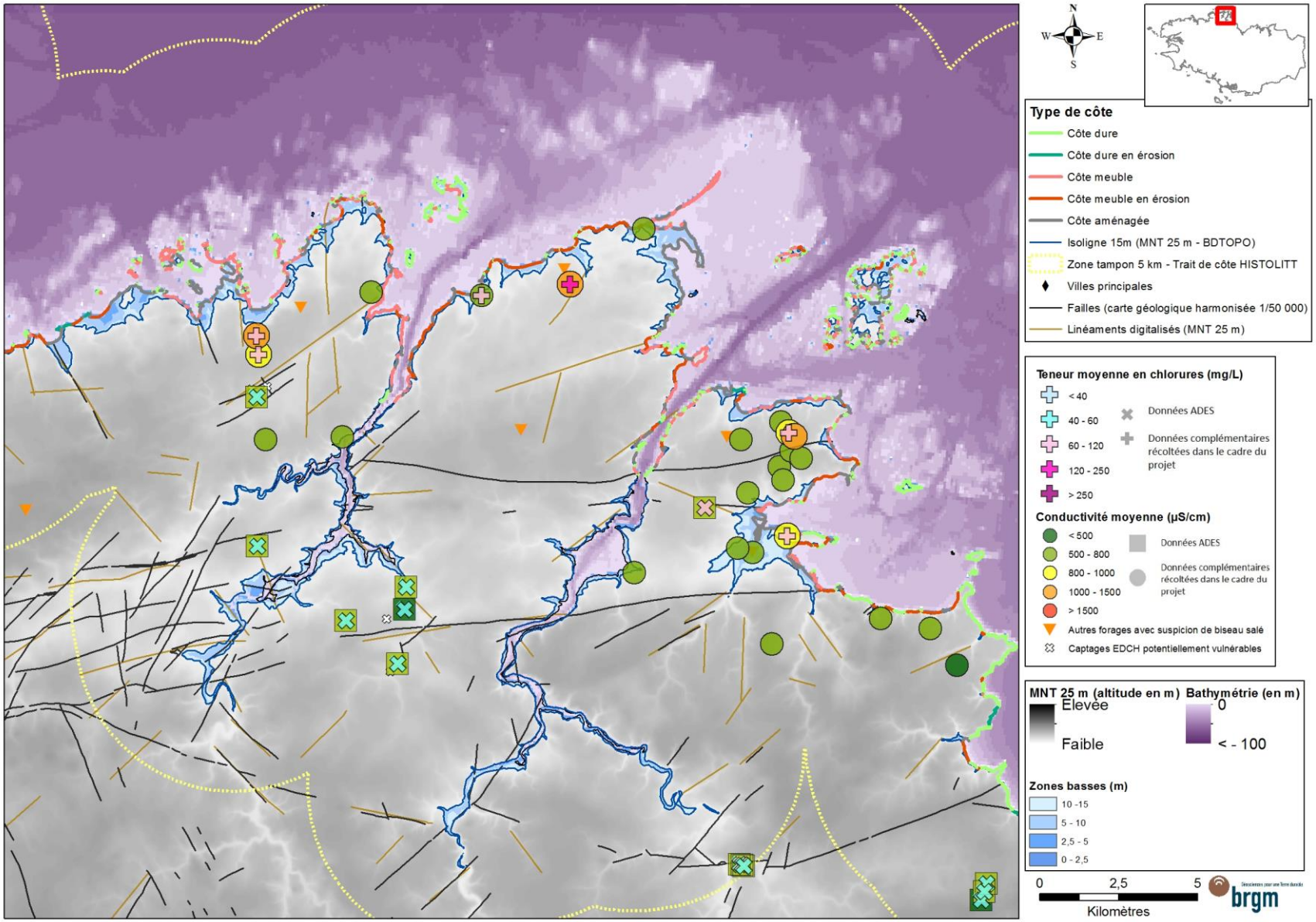
Cartes au 1/100 000 présentant les données analysées dans le cadre du projet (géomorphologie, géologie, données physico-chimiques)

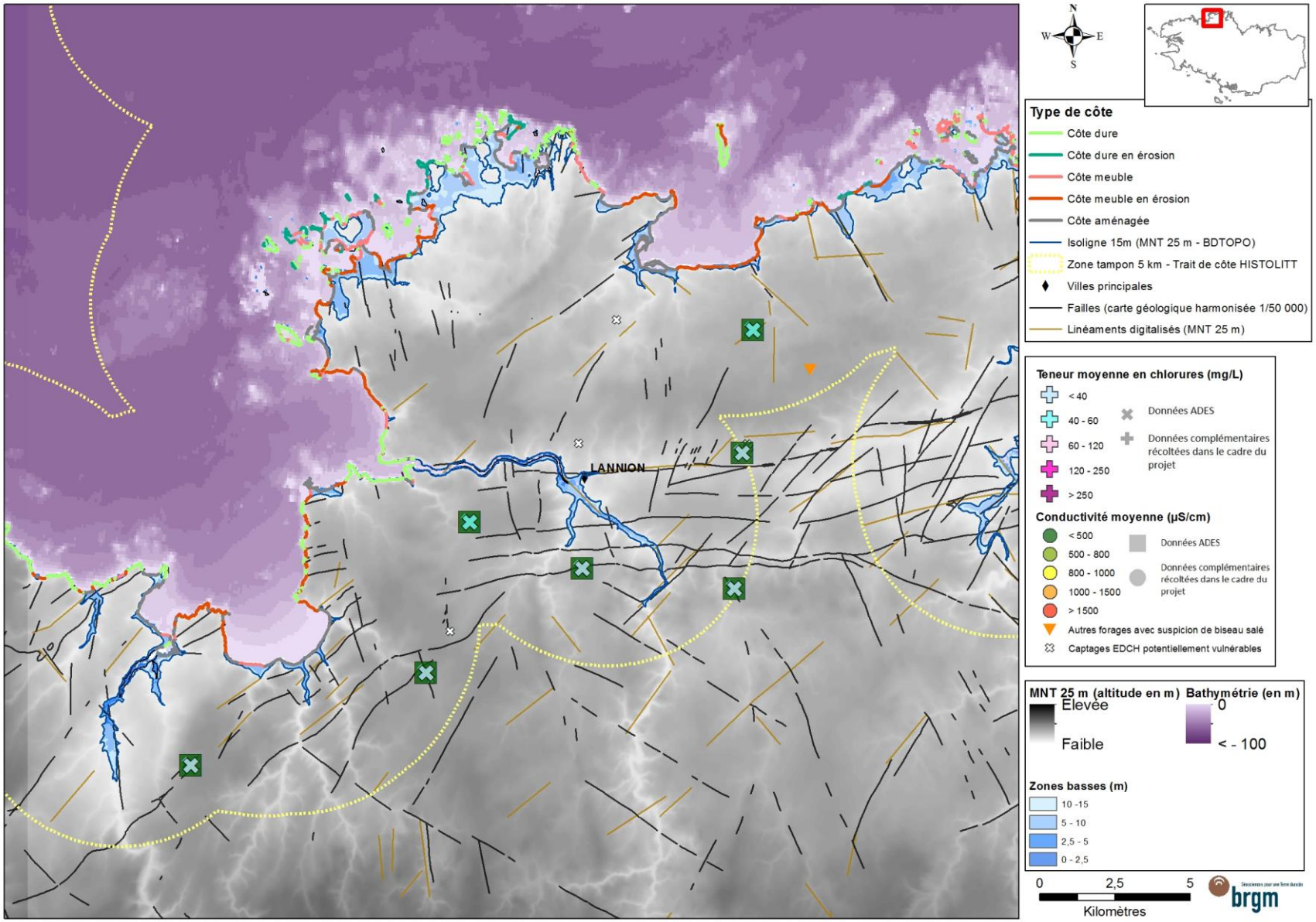

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

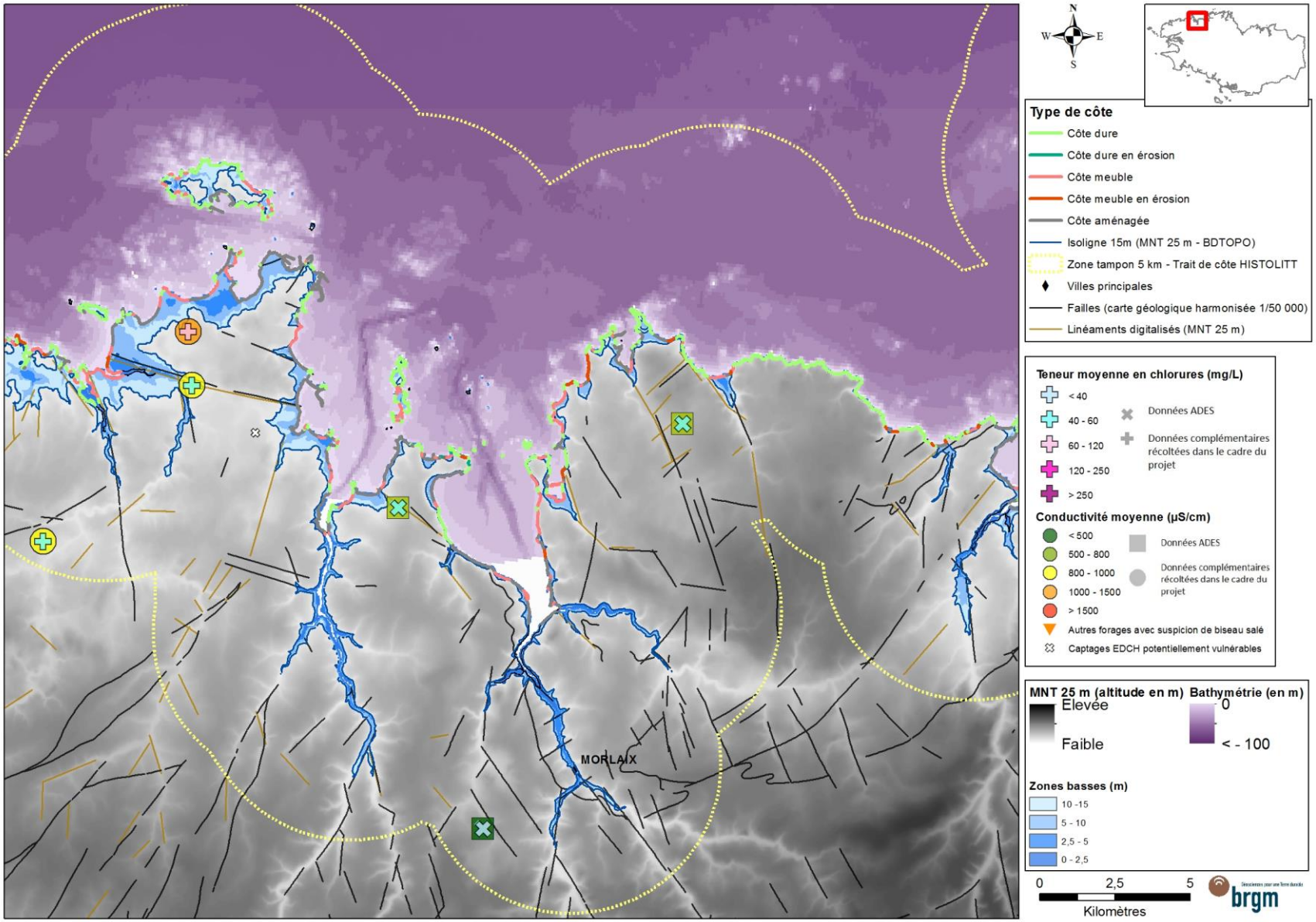

SAINT-MALO
DINAN
N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

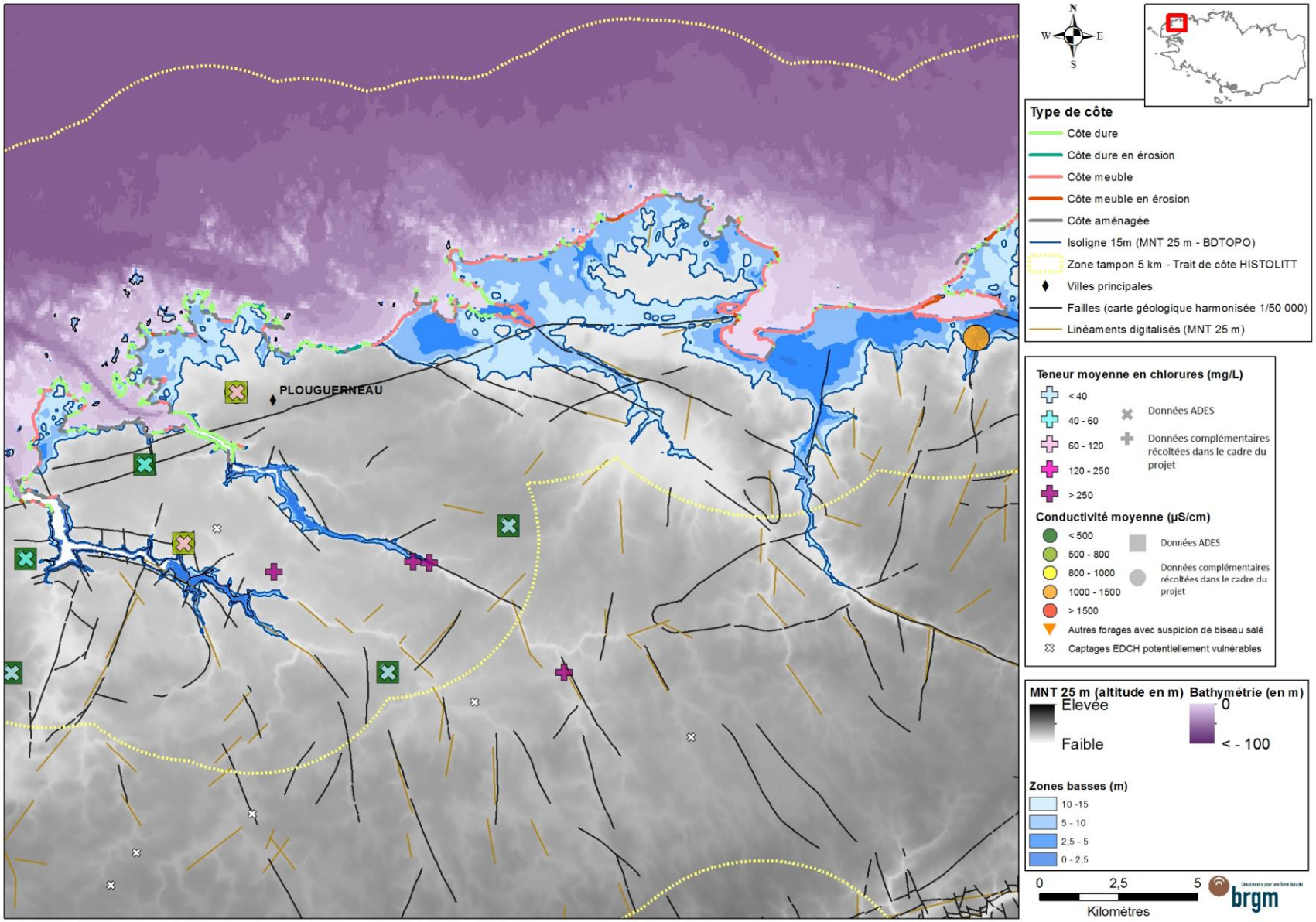

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

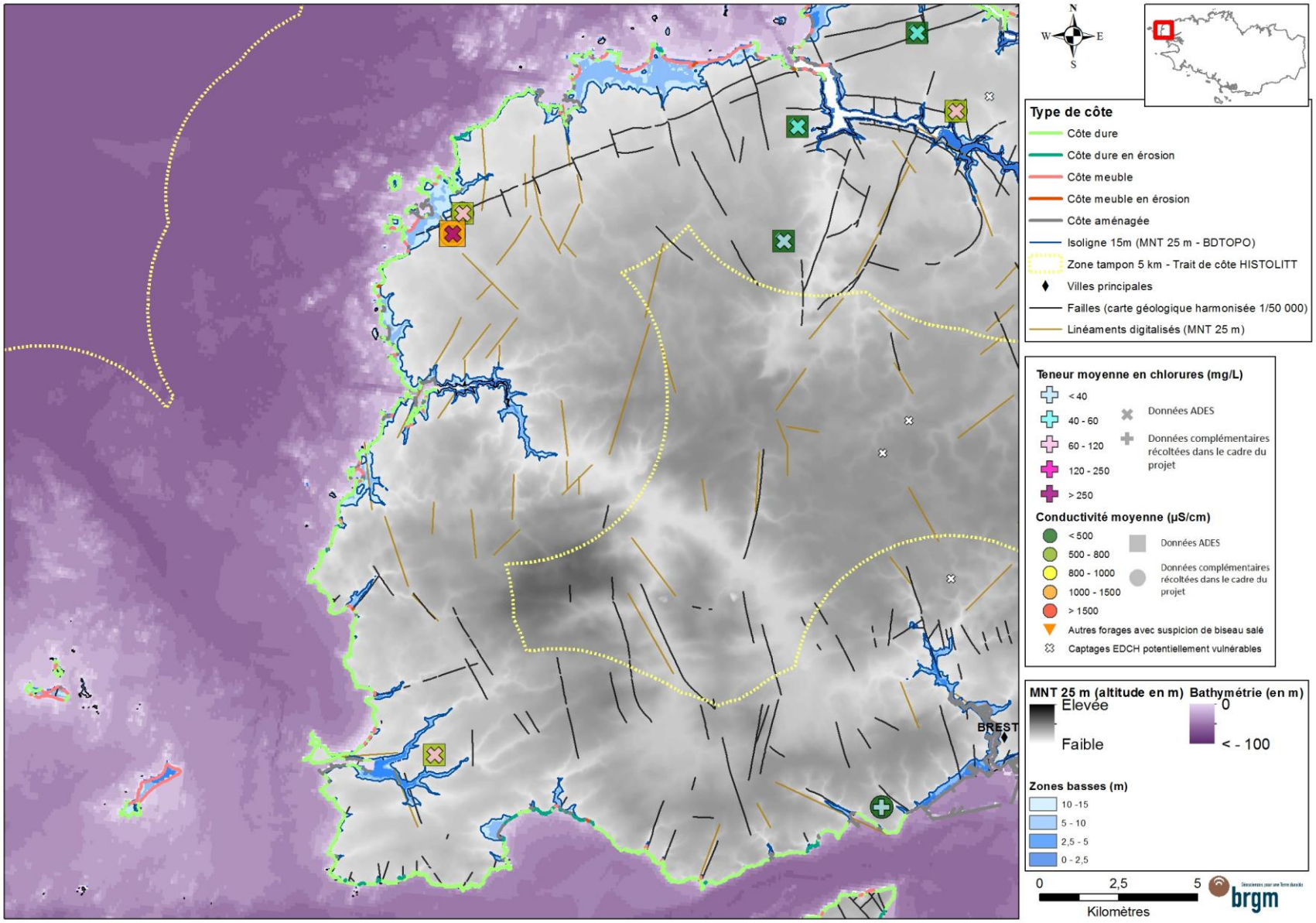

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
SAINT-BRIEUC
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

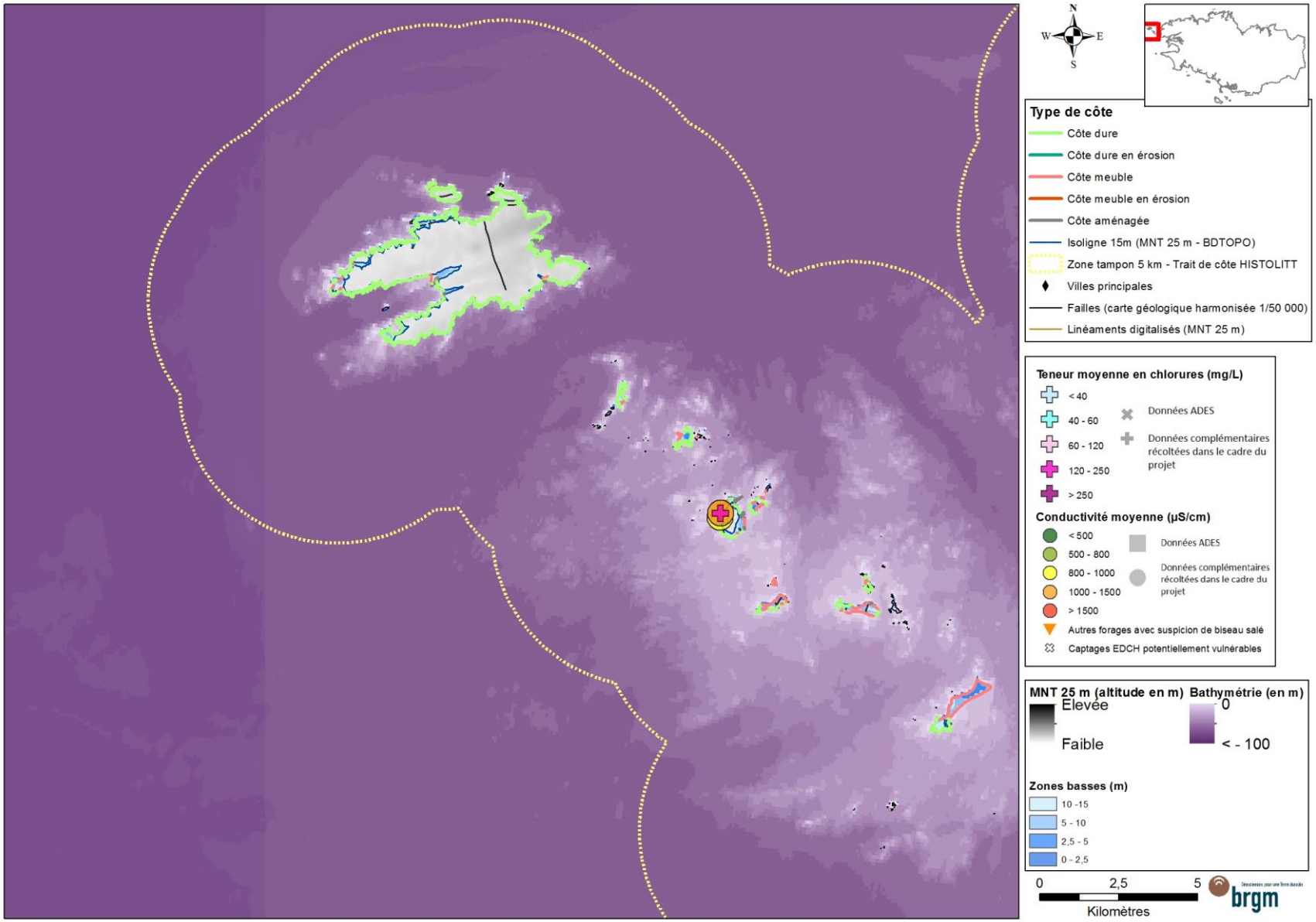

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

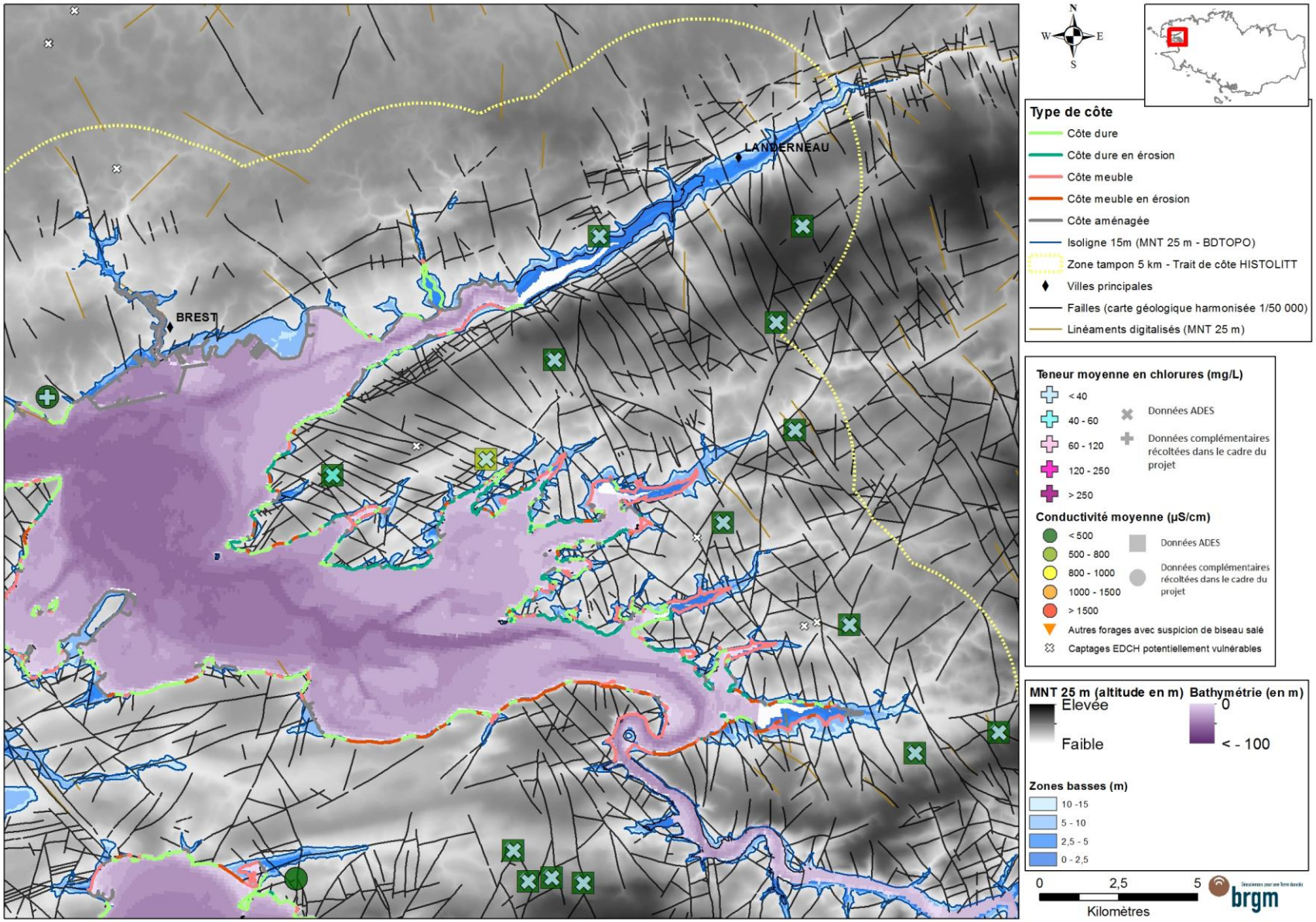

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
LANNION
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

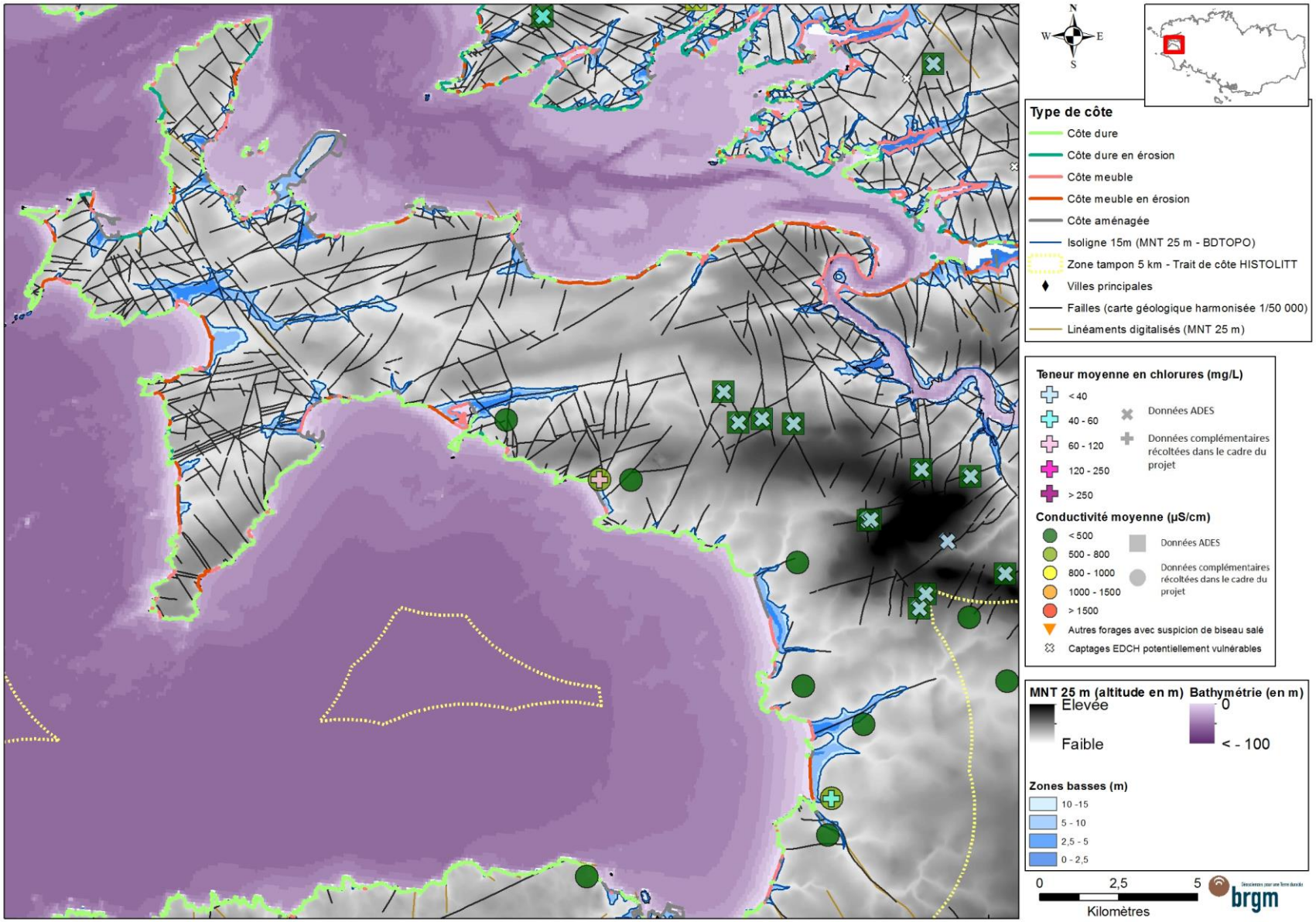

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
MORLAIX
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

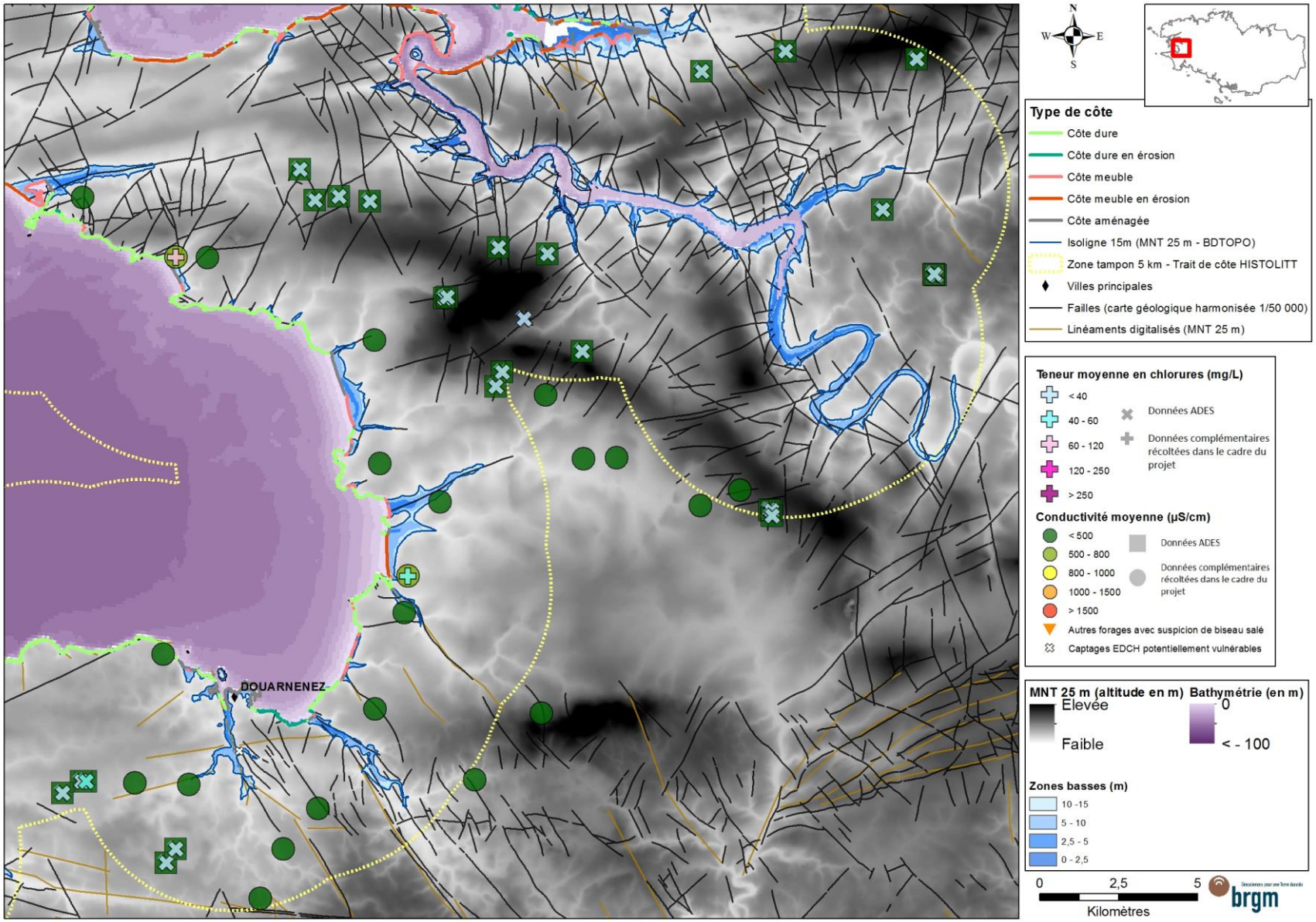

PLOUGUERNEAU
N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

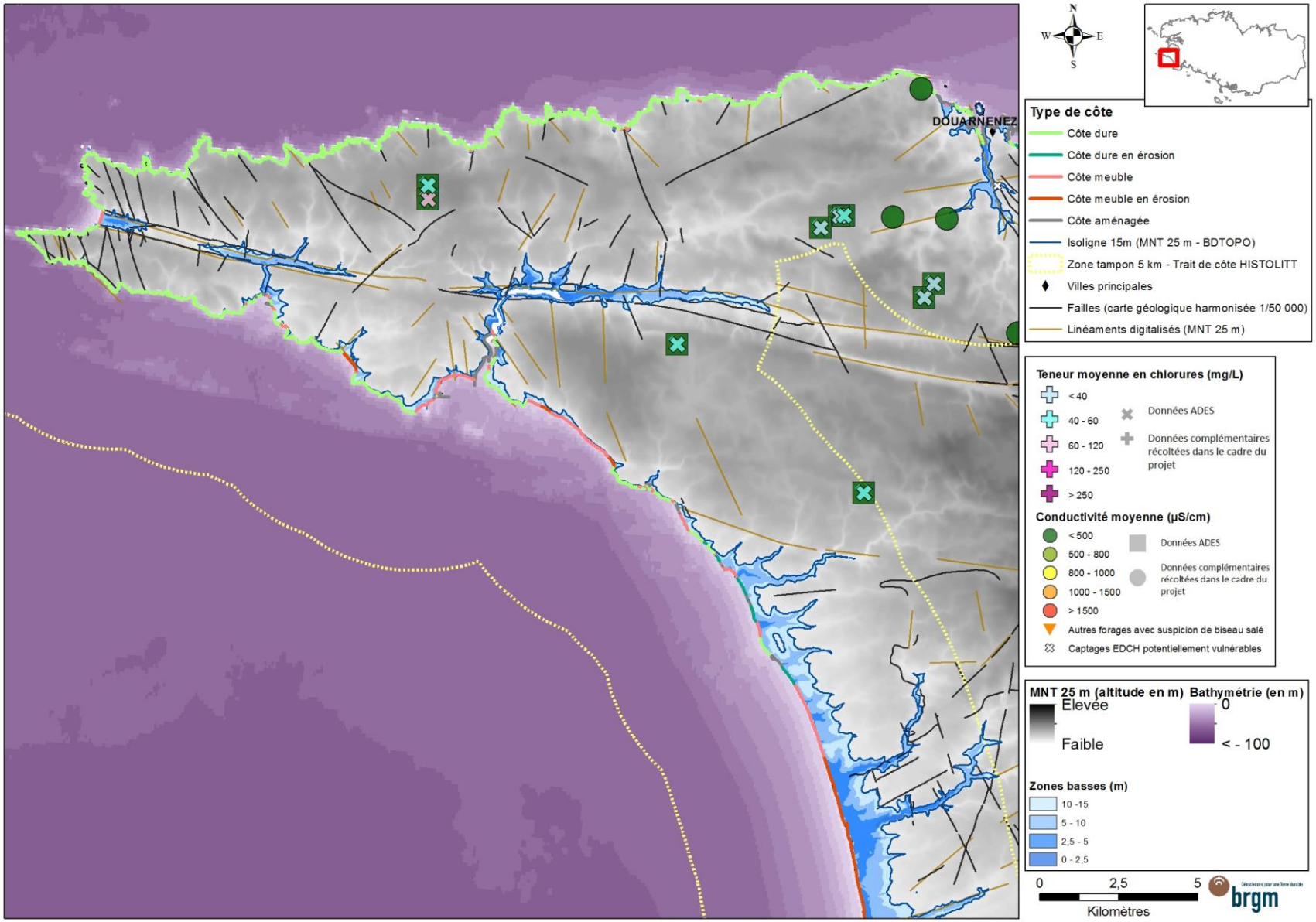

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
BREST
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

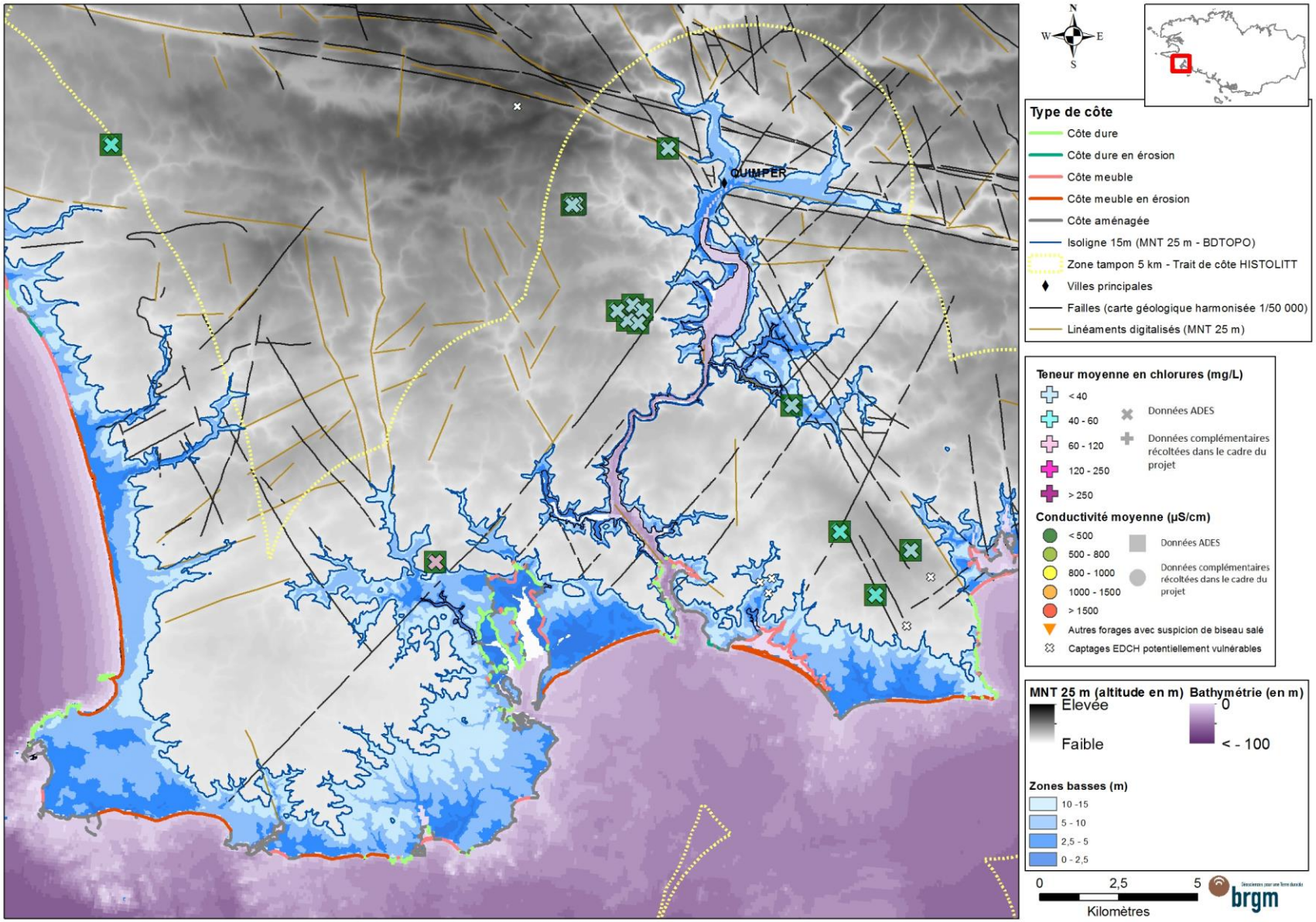

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

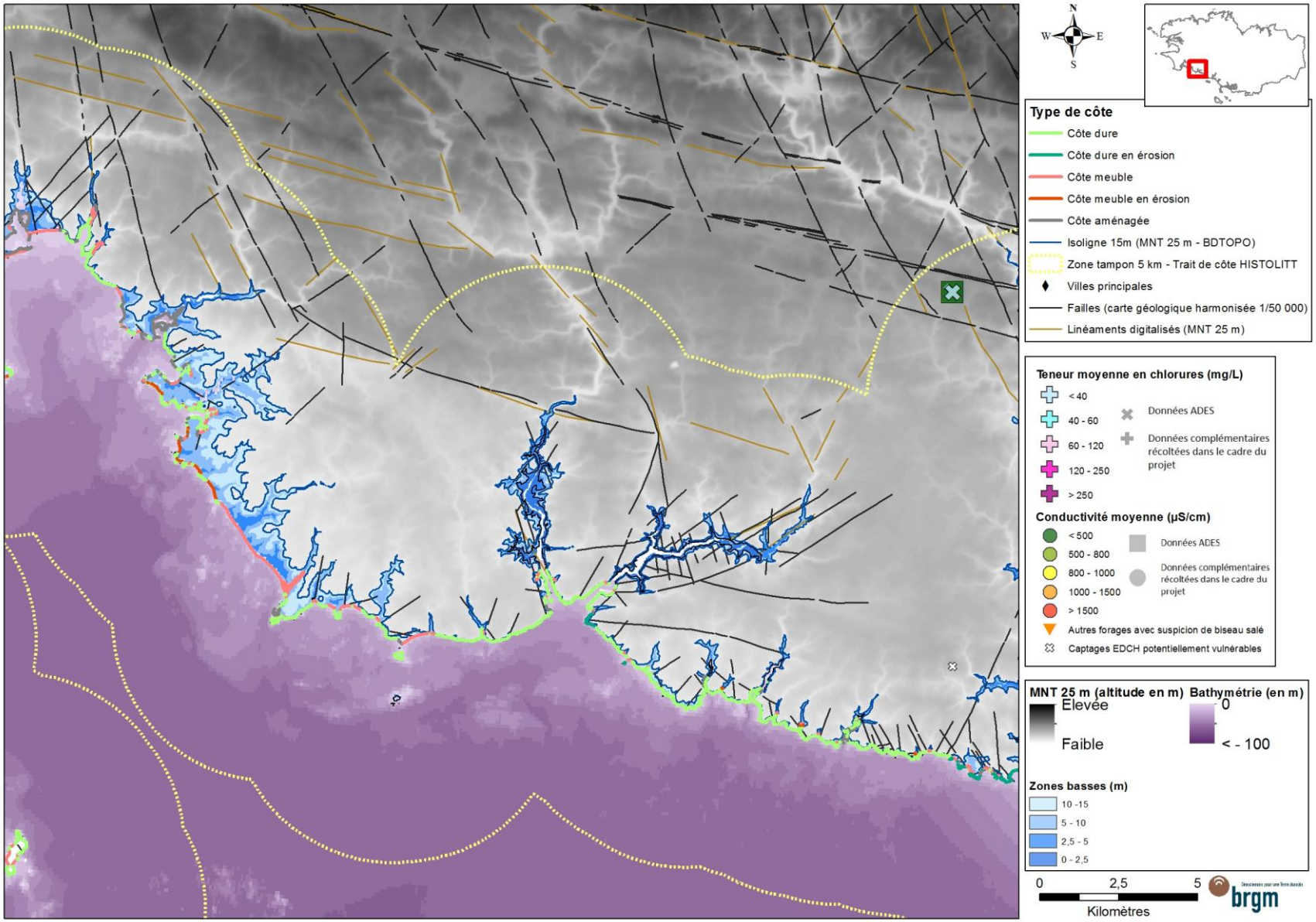

N
W
E
S
BREST
LANDERNEAU
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

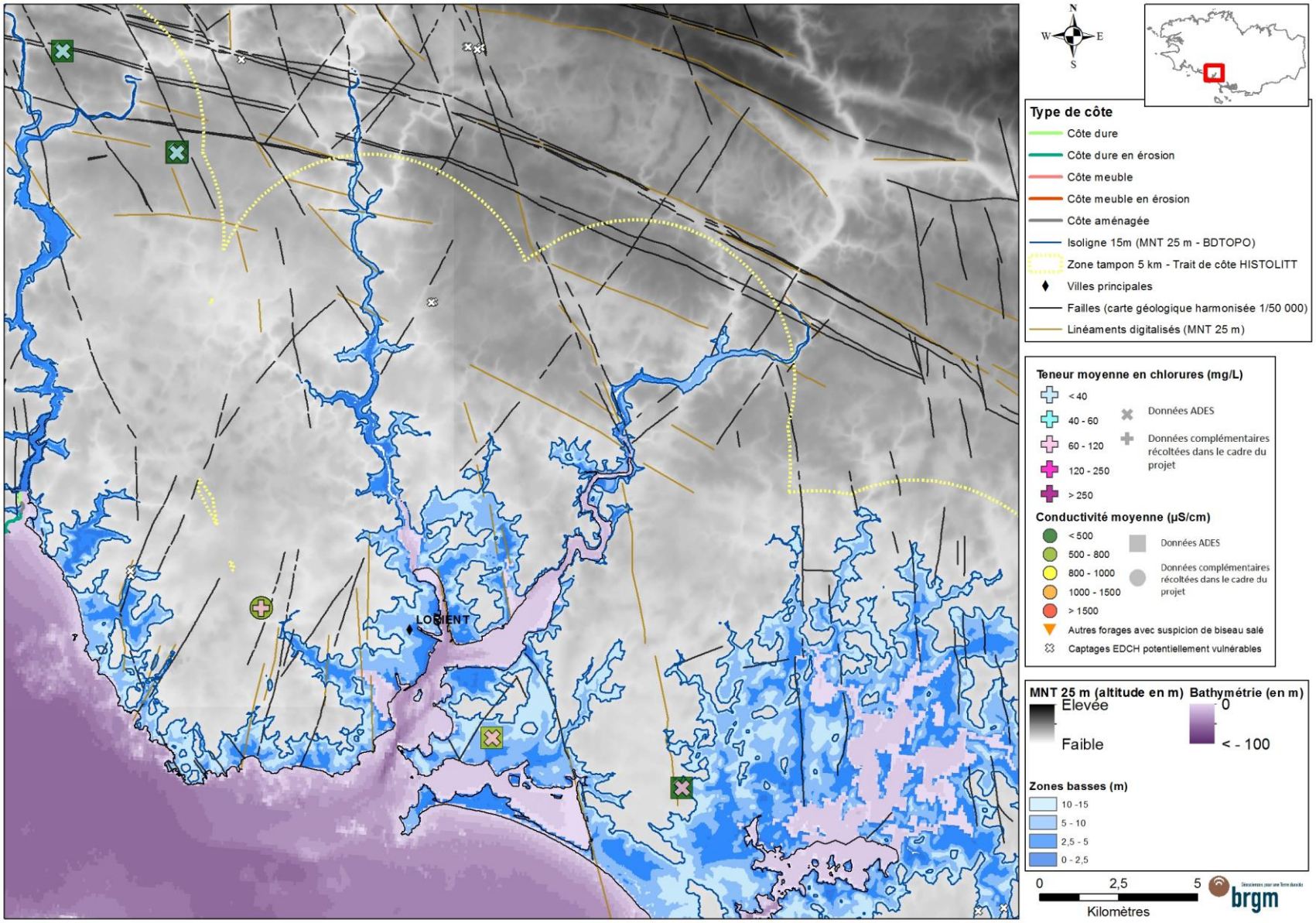

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

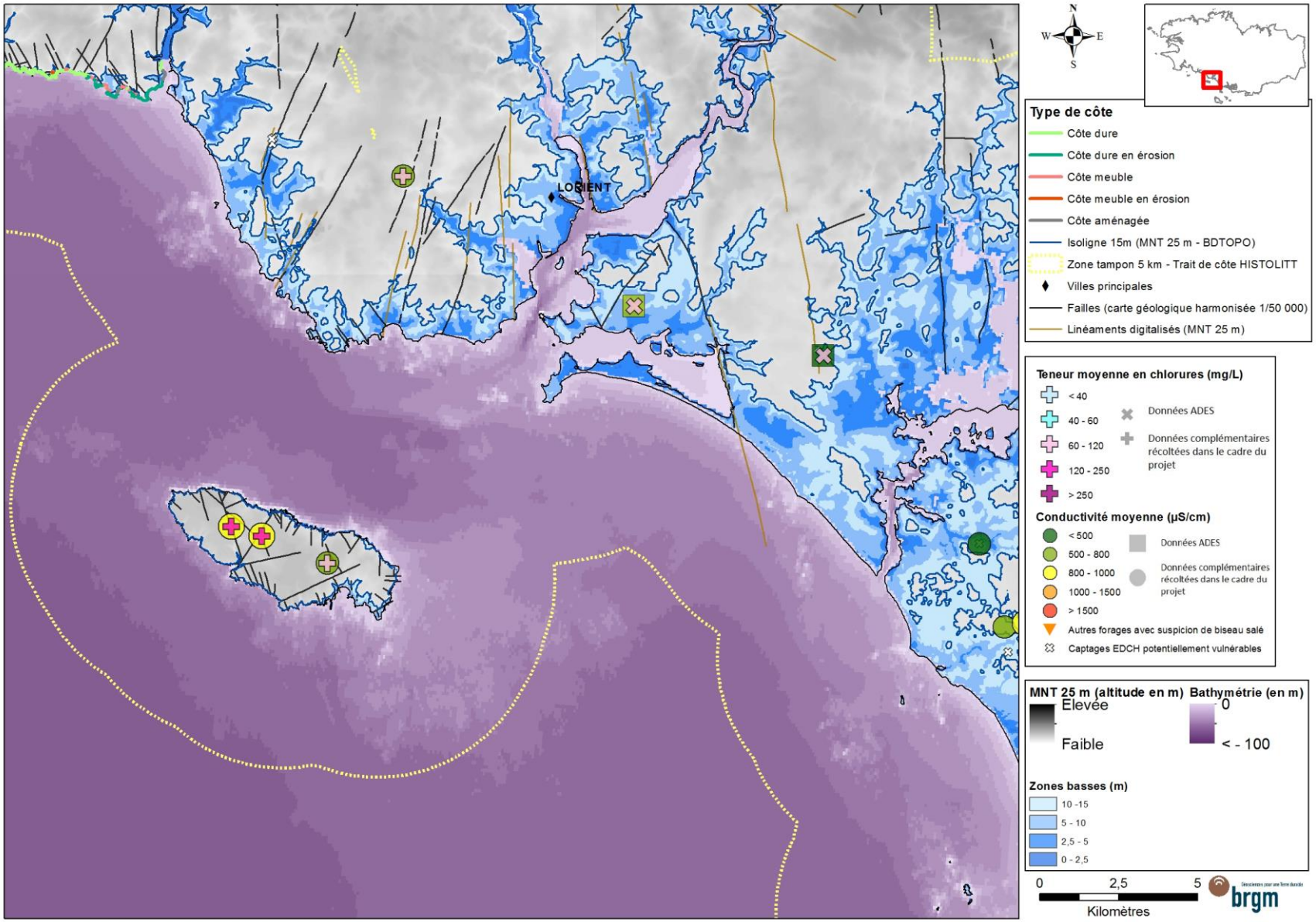

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
DOUARNENEZ

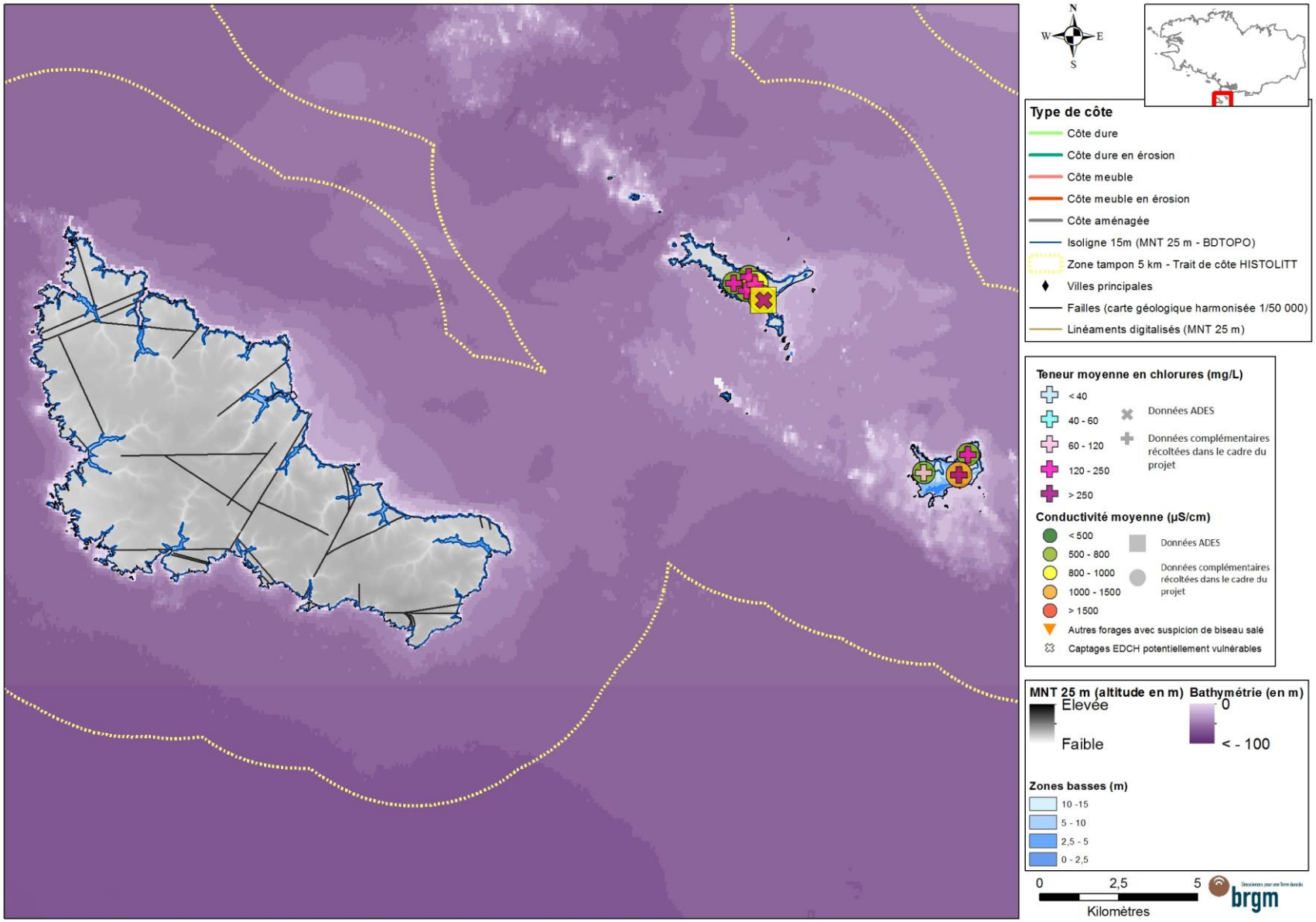

N
W
E
S
DOUARNENEZ
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

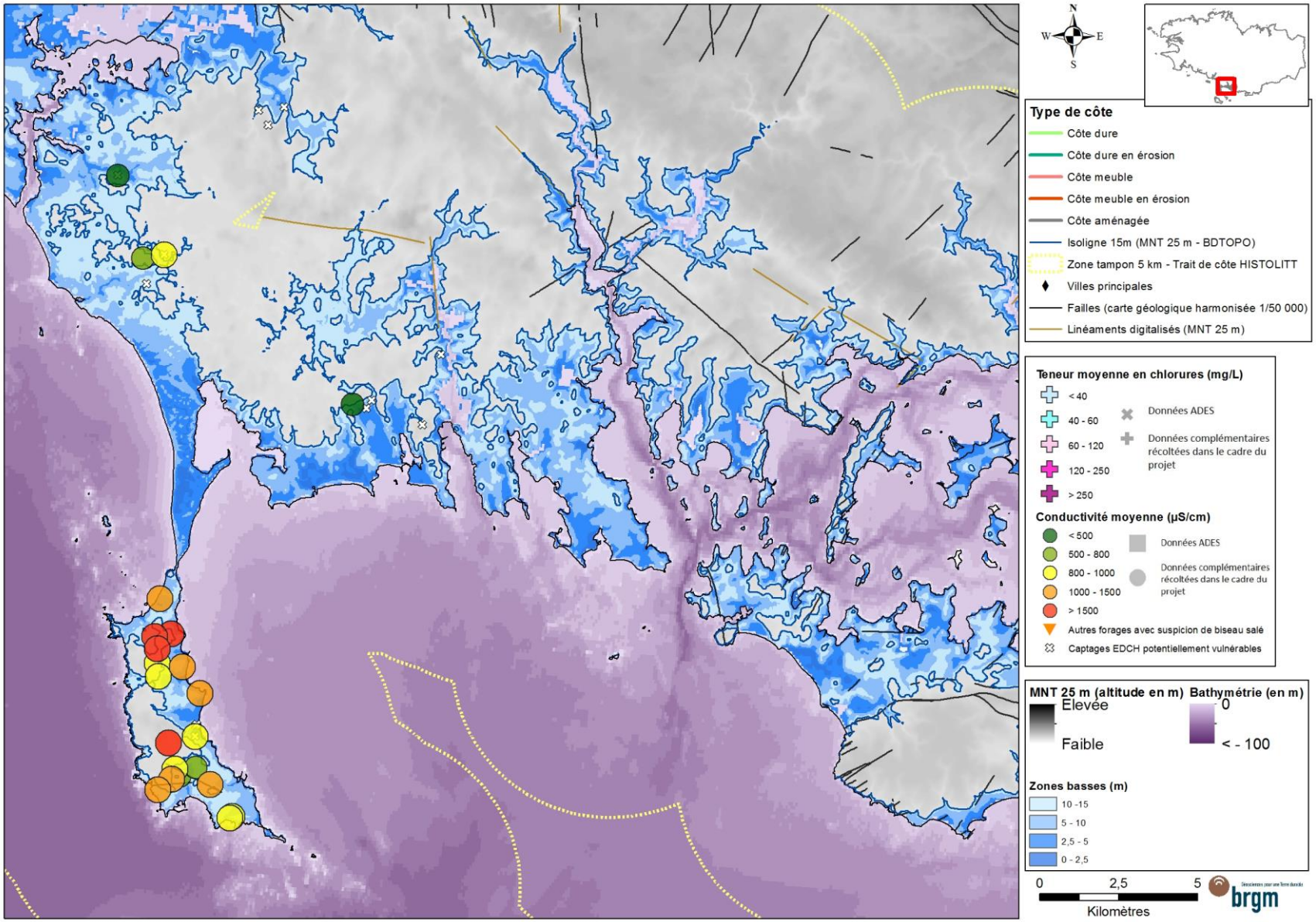

N
W
E
S
QUIMPER
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

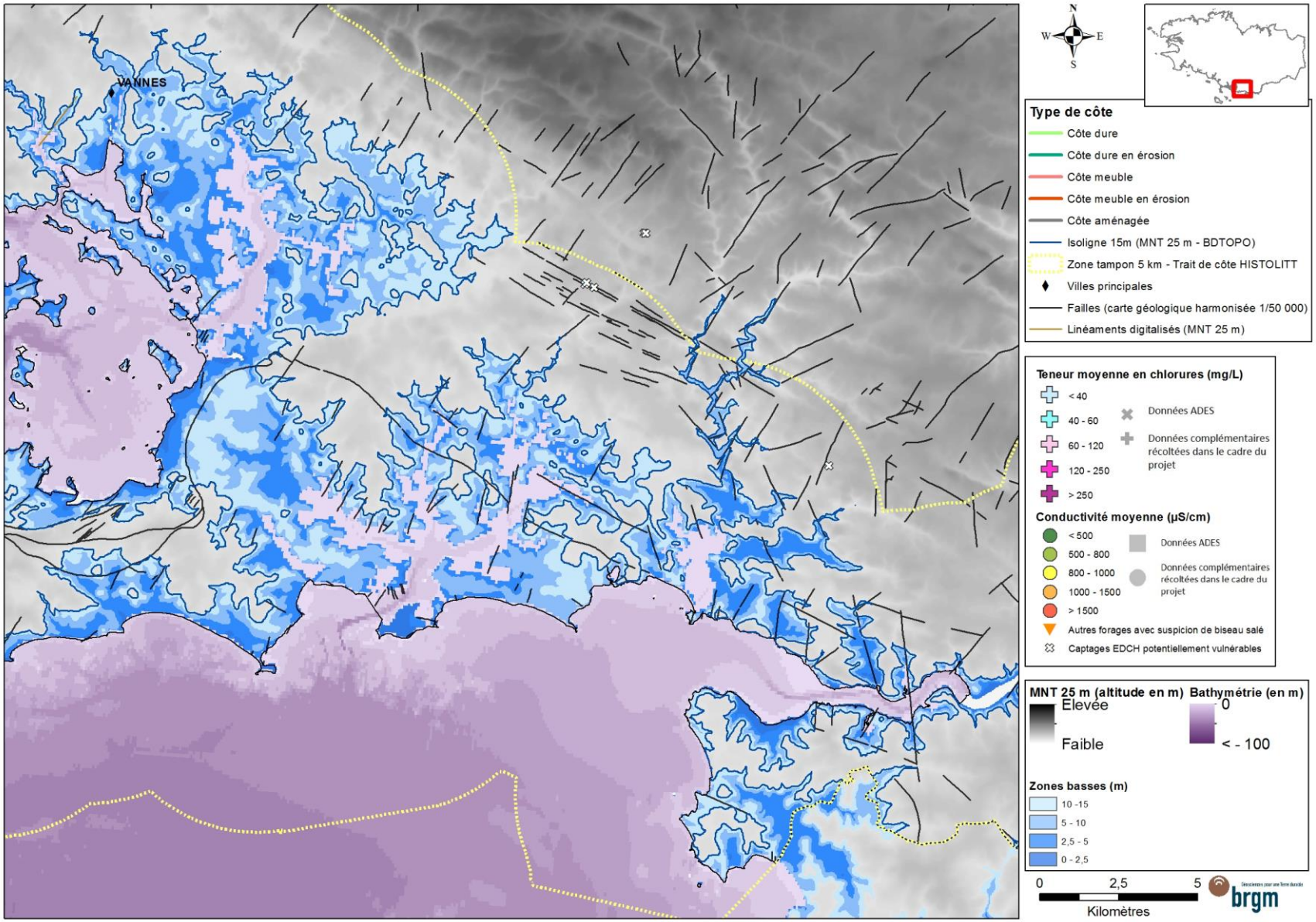

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

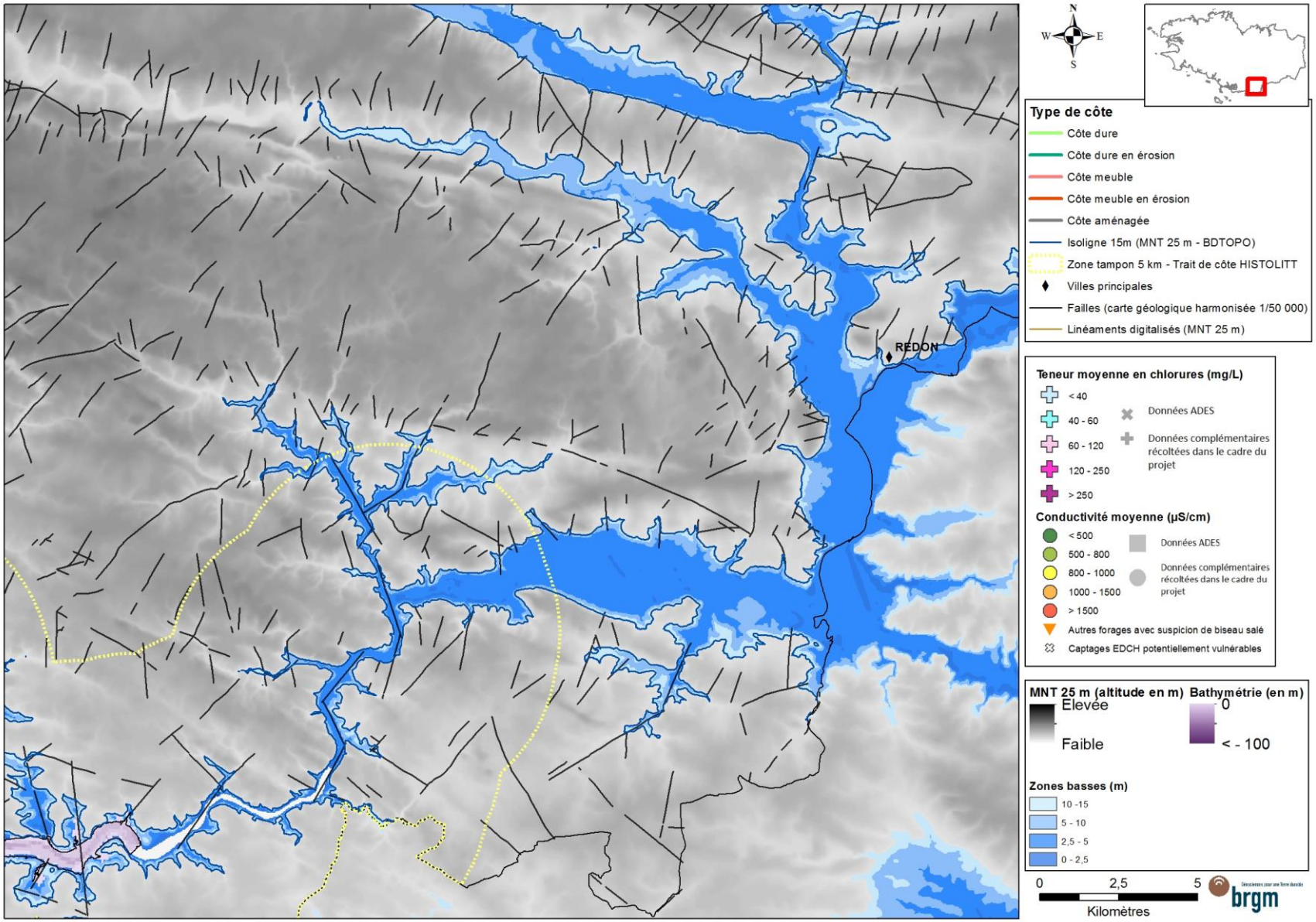

N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
LORIENT
0
2,5
5
Kilomètres
brgm

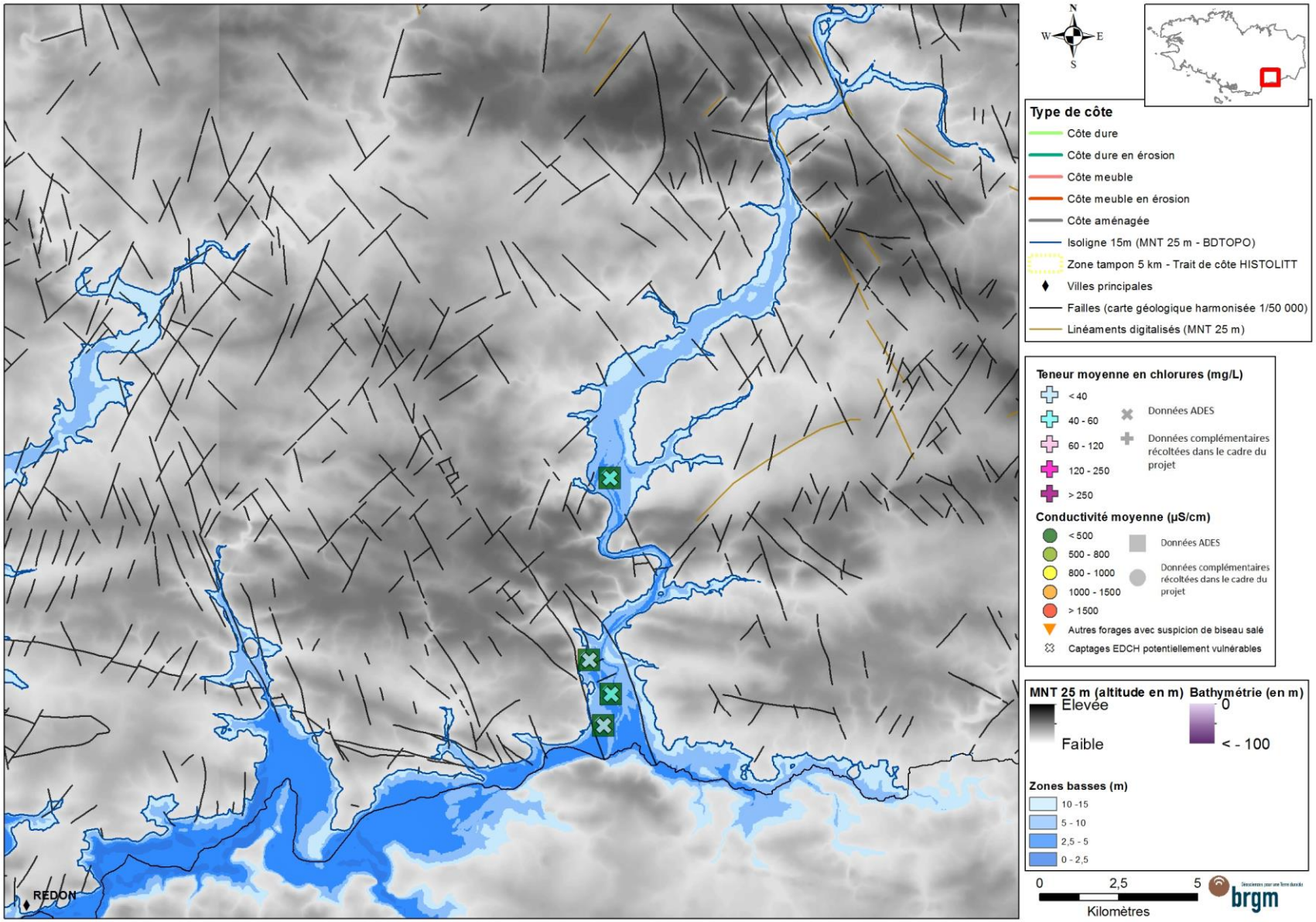

LORIENT
N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm


N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm


N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm


VANNES
N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm


N
W
E
S
REDON
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm


N
W
E
S
Type de côte
Côte dure
Côte dure en érosion
Côte meuble
Côte meuble en érosion
Côte aménagée
Isoligne 15m (MNT 25 m - BDTOPO)
Zone tampon 5 km - Trait de côte HISTOLITT
Villes principales
Failles (carte géologique harmonisée 1/50 000)
Linéaments digitalisés (MNT 25 m)
Teneur moyenne en chlorures (mg/L)
< 40
40 - 60
60 - 120
120 - 250
> 250
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Conductivité moyenne (µS/cm)
< 500
500 - 800
800 - 1000
1000 - 1500
> 1500
Données ADES
Données complémentaires récoltées dans le cadre du projet
Autres forages avec suspicion de biseau salé
Captages EDCH potentiellement vulnérables
MNT 25 m (altitude en m)
Elevée
Faible
Bathymétrie (en m)
0
< - 100
Zones basses (m)
10 -15
5 - 10
2,5 - 5
0 - 2,5
0
2,5
5
Kilomètres
brgm
REDON

Annexe 7

Principe du panneau électrique

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes « panneau électrique » ou « tomographie électrique » sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Figure 1).

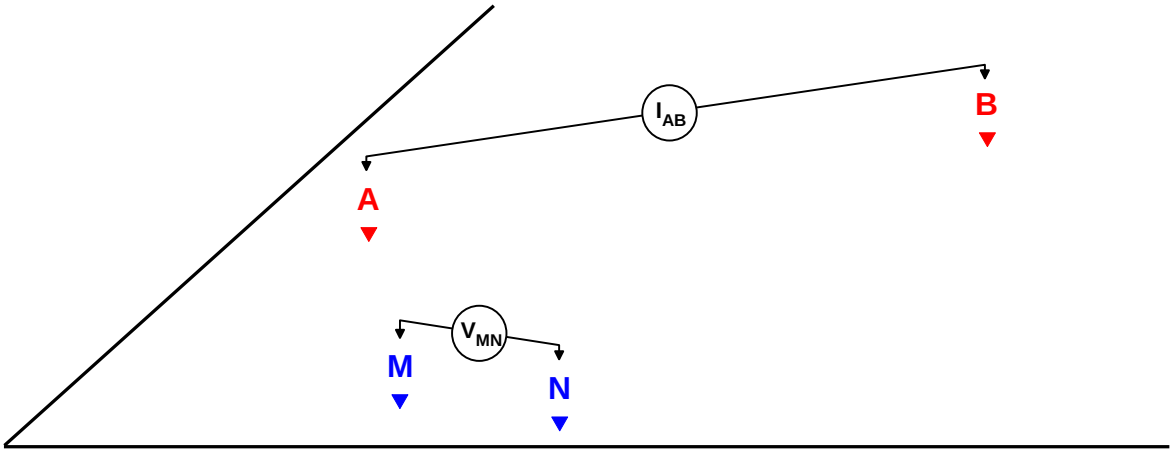


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté *I*, de la mesure de la différence de potentiel Δ*V* et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où *K* est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Figure 2) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

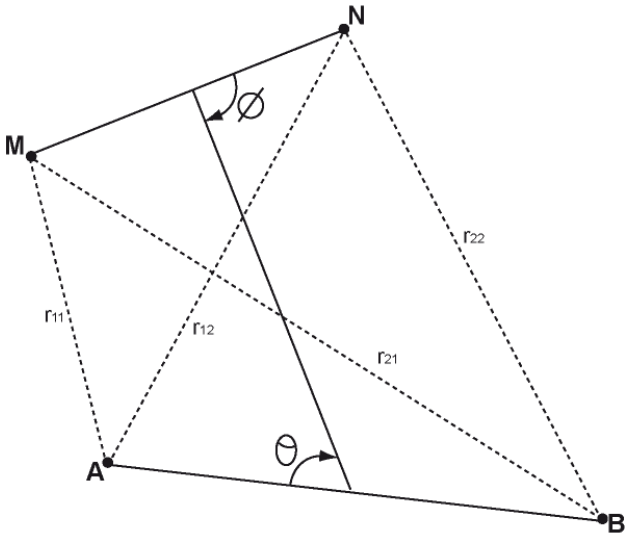


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant ; M et N les électrodes de potentiel (0 (0 < θ, Φ < π)

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure Δ*V*. Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

- **Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition**

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant.

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroit rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (Figure 3).

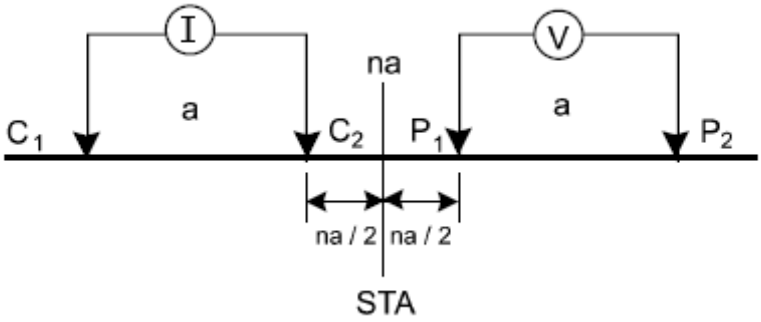


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Figure 4).

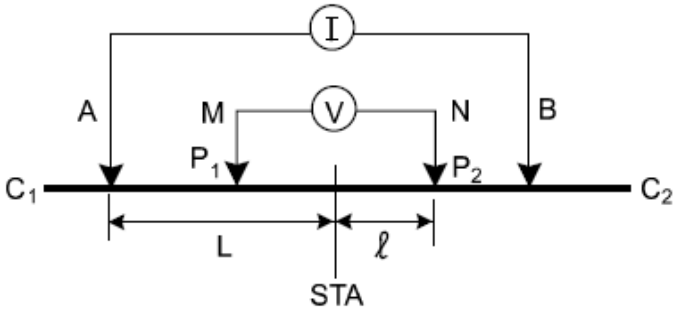


Figure 4 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Figure 5).

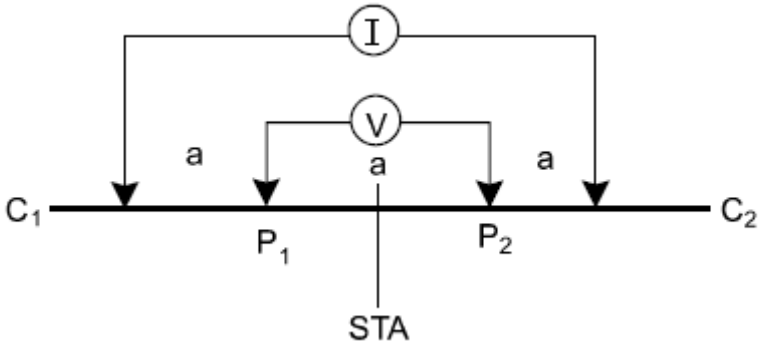


Figure 5 : Configuration de Wenner

- **Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente**

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi),

celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Figure 6).

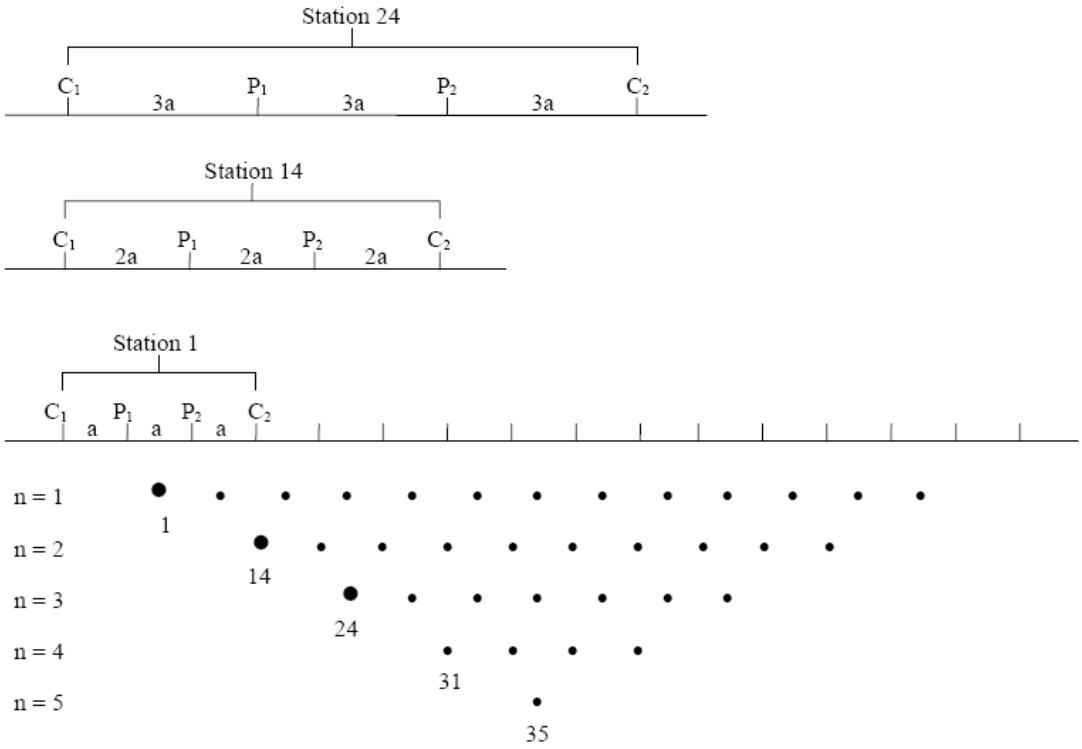


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

- **Traitement et inversion des données**

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Figure 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Figure 8).

Dans le cadre de ce projet, les inversions ont été réalisées en mode « blocky » (Loke 2001, correspond au paramètre « Robust » dans le logiciel RES2DINV) qui est particulièrement adapté pour bien résoudre les limites entre faciès de résistivités contrastées. Le mode « blocky » permet une définition plus précise des interfaces entre les compartiments de résistivités contrastés tout en offrant une régularisation bien adaptée aux niveaux de bruit élevés ou aux outliers (Loke *et al.,* 2003 ; Seaton et Burbey, 2002). Les artefacts 3D dus à la complexité du milieu sont mieux traités par l'inversion 2D en mode « blocky ».

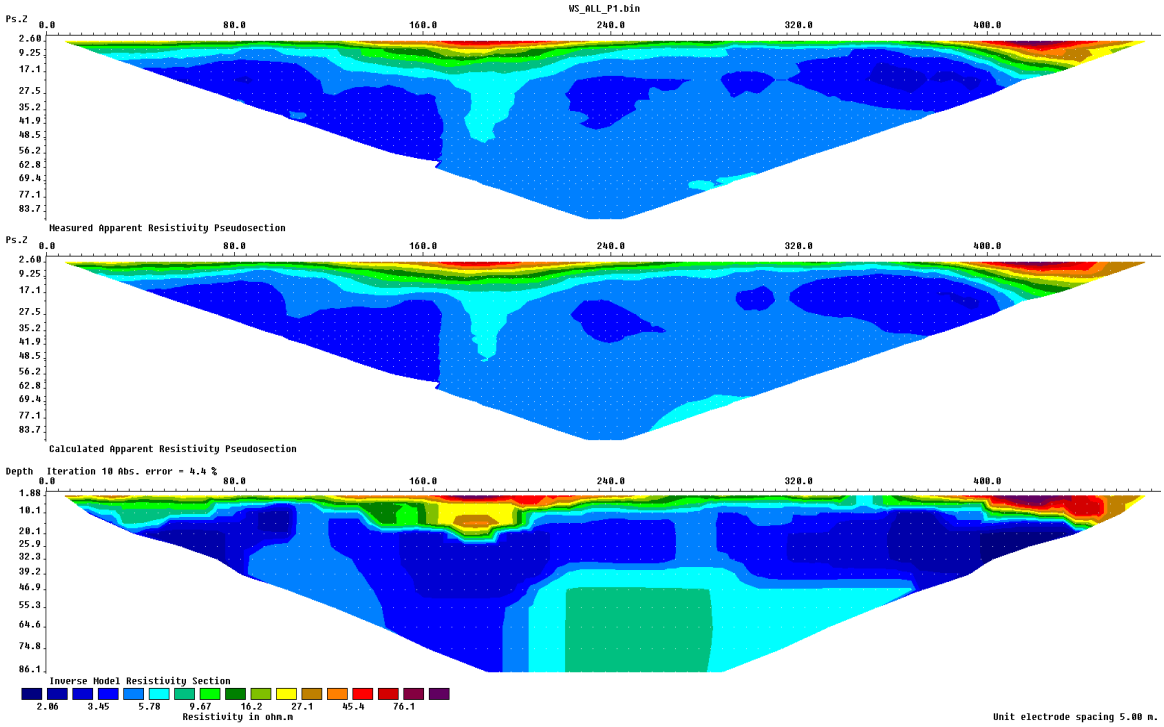


Figure 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudo-section de résistivité « vraie » (illustration du bas de la Figure 7), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (pseudo-section) semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

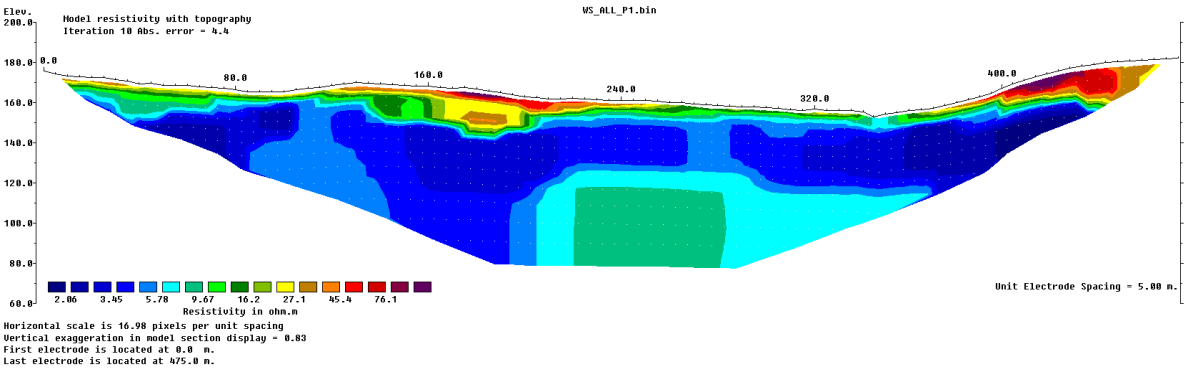


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la Figure 7 avec la topographie

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information *a priori*.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géo-électriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

- **Applications**

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- Hydrogéologie (épaisseur d'aquifère), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations

Annexe 8

Principe des sondages par Résonance Magnétique des protons (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structure ou de paramètres physiques dépendant de différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

À la différence de ces méthodes géophysiques, l'information déduite d'un sondage de résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_o (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_o (Figure 9).

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel.

Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante.

La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

La constante de temps de relaxation longitudinale, T_1, caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de T_1 correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de T_1 indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale, T_2, caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ H_0 alors que T_1 correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ H_0. Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante T_2^*.

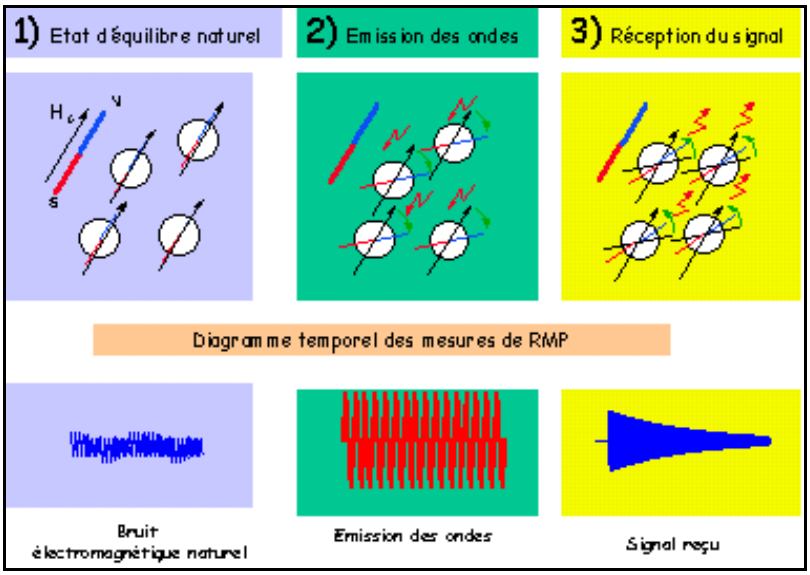


Figure 9 - Principe de mesure RMP.

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent. Ainsi T_2^* est en outre lié aux conditions géophysiques du réservoir.

Conditions et limites d'application de la méthode RMP

Les sondages RMP sont souvent utilisés en complément des mesures électriques et électromagnétiques, pour estimer les propriétés hydrodynamiques sur les zones d'intérêt révélées par ces méthodes à plus grand rendement. Les sondages RMP permettent généralement de lever les ambiguïtés de l'interprétation des résistivités électriques : distinguer, par exemple, les anomalies conductrices causées par une teneur en argile élevées et généralement non aquifères de celles causées par une teneur eau de formation conductrice potentiellement aquifères.

La méthode RMP mesure de très faibles signaux (de l'ordre du nV) et est sensible à toutes les sources de bruit électromagnétique. En conséquence, il convient de limiter les zones d'investigation aux zones rurales, à plus de 750 m des lignes électriques Haute Tension et plus de 300 m des lignes Moyenne Tension, à l'écart des clôtures électriques, des transformateurs et des pompes en fonctionnement.

Dans le contexte de nappes superposées, la réponse RMP de la nappe supérieure peut interférer avec les signaux de la nappe inférieure et augmenter l'incertitude sur les résultats.

Annexe 9

Analyse des forages présentant des moyennes élevées de chlorures et de conductivité (en orange : critères défavorables)

Code BSS	Département	Commune	Lieu-dit	Altitude (m)	Utilisation	Profondeur (m)	Altitude fond de l'ouvrage (m)	Nature	Source des données	Chlorures (moyenne - mg/L)	Conductivité (moyenne - µS/cm)	Distance à la côte (m)	Zone basse	Type de côte	Tectonique	Erosion	Configuration
01708X0035/F	22	PLOUGRESCANT	8 AR COSQUER	56	EAU-IRRIGATION.	121	-65	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03	100.0	1005.0	850		côte meuble	linéament		presqu'île
01708X0155/F	22	PLOUGRESCANT	PARC NEVEZ	67	EAU-IRRIGATION.	93	-26	FORAGE	UCPT	97.9	973.0	1400		côte meuble	linéament		presqu'île
01715X0026/F	22	PLEUBIAN	ROC'H MORVAN	17	EAU-IRRIGATION.	50	-33	FORAGE	DDTM22 + UCPT	80.9	788.0	160		côte meuble		oui	/
01716X0028/HY	22	PAIMPOL	TRAOU SCAVEN - RQ N.77	37	AEP.	3	34	SOURCE	ADES	84.0	794.3	1570			faille + linéament		presqu'île
01716X0040/F1	22	PLEUBIAN	KERHUEL	38	EAU-AGRICOLE.	91	-53	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03	150.0	1014.0	1100		côte meuble	linéament	oui	presqu'île
01717X0013/F	22	PLOUBAZLANEC	LANNEVEZ	66	EAU-CHEPTEL.	96	-30	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03	100.0	973.0	980			faille		presqu'île
01717X0024/F	22	PLOUBAZLANEC	LANNEVEZ	65	EAU-AGRICOLE.	91	-26	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1300.0	1100		côte meuble	faille		presqu'île
01717X0025/F	22	PAIMPOL	3-HENT-BREVIDIG	20	EAU-DOMESTIQUE.	85	-65	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03	100.0	994.0	260					presqu'île
02006X0001/HY	29	PLOUGUERNEAU		37	AEP.	3	34	SOURCE	ADES	100.5	558.0	1520					presqu'île
02014X0026/F1	29	SANTEC	STREAT JOLY	22	EAU-AGRICOLE.	50	-28	FORAGE	Rapport BRGM/RP-67295-FR	66.7	1018.0	1100		côte meuble			presqu'île
02016X0090/F	29	PLOUNEVEZ-LOCHRIST	Keramily	3		109	-106	FORAGE	DDTM29		1313.0	660	oui	côte meuble	faille		/
02017X0035/F1	29	TREFLAOUENAN	LA NORGUER (KERDOVEY)	47	EAU-IRRIGATION.	94	-47	FORAGE	Rapport BRGM/RP-67295-FR	52.8	820.0	4300					/
02018X0063/F	29	SAINT-POL-DE-LEON	KERAMPRAT	12	EAU-IRRIGATION.	81	-69	FORAGE	Rapport BRGM/RP-67295-FR	52.3	813.6	1400	oui		linéament		presqu'île
02043X0161/F	22	PAIMPOL	GOAS PLAT	6	EAU-INDUSTRIELLE.	22	0	FORAGE	DDTM22 + UCPT		790.0	500					/
02047X0067/FE20	22	LANLEFF	PONT CARIOU	26	AEP.	100	-74	FORAGE	ADES	80.7	676.2	4770			faille		/
02067X0109/F	22	PLEBOULLE	LE GRAND FRECHE	12	EAU-CHEPTEL.	73	-61	FORAGE	DDTM22		1100.0	650	oui		faille		/
02073X0002/F	35	SAINT-COULOMB	La Guimorais	31	EAU-COLLECTIVE-CAMPING.	162	-131	FORAGE	Camping les Chevrets	65.0	536.5	200		côte meuble		oui	presqu'île
02073X0003/F	35	SAINT-COULOMB	La Guimorais	31	EAU-COLLECTIVE-CAMPING.	156	-125	FORAGE	Camping les Chevrets	61.9	624.0	200		côte meuble		oui	presqu'île
02074X0003/89-6	35	CANCALE	HAUT VALADE, 35 CANCALE	45	EAU-AGRICOLE.	52	-7	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		845.0	460		côte dure	faille		presqu'île
02075X0069/F	35	SAINT-BRIAC-SUR-MER	7 CHEMIN DE LA SOURIS	27	EAU-COLLECTIVE-CAMPING.	58	-31	FORAGE	ARS35	94.0	616.0	650					presqu'île
02075X0109/F	35	SAINT-BRIAC-SUR-MER	BD HOULE	10	EAU-IRRIGATION.			FORAGE	BCE		1125.0	180	oui	côte meuble		oui	presqu'île
02076X0046/F	35	SAINT-MALO	31, RUE DE L'ETANG	15	EAU-DOMESTIQUE.	94	-79	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		957.0	450		côte aménagée			/
02077X0020/FB39	35	SAINT-MALO	L'ECOSSE. PARAME	26	EAU-CHEPTEL.	40	-14	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		800.0	1300					/
02077X0068/F	35	SAINT-MALO		28		55	-27	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		940.0	1000		côte aménagée	faille		/
02077X0112/F	35	SAINT-COULOMB	LES NIELLES	15				FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		922.0	190	oui	côte aménagée			/
02077X0113/F	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES	LES MASSES	44		100	-56	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		891.0	2000					/
02077X0114/F	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES	LE MENAGE	45		91	-46	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		827.0	2250					/
02077X0146/F1	35	SAINT-MALO	COMPAGNIE DES PECHES	20	EAU-INDUSTRIELLE.	133	-113	FORAGE	ARS35	90.2	803.0	2900		côte aménagée	linéament		presqu'île
02077X0164/F1	35	SAINT-MALO	9, RUE DE LA CROIX CHEMIN	16	EAU-IRRIGATION.	100	-84	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1036.0	2400					/
02078X0017/F2	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES	LES PORTES ROUGES	41	EAU-INDUSTRIELLE.	54	-13	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1251.0	1180			faille		/
02078X0018/F8	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES	LES PORTES ROUGES	46	EAU-IRRIGATION.	53	-7	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		829.0	1500			faille		/
02078X0025/F	35	CANCALE	LA VILLE HULAN	43		31	12	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		910.0	130		côte dure			presqu'île
02078X0029/F	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES		29		56	-27	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		855.0	240		côte aménagée			presqu'île
02078X0030/F	35	SAINT-MELOIR-DES-ONDES		15				FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		813.0	380		côte meuble	faille		presqu'île
02078X0037/F	35	CANCALE	AVENUE SCISSY	43	EAU-INDUSTRIELLE.	151	-108	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		814.0	1250					presqu'île
02078X0040/F	35	CANCALE	BD D,ARMOR	46	EAU-INDUSTRIELLE.	79	-33	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		855.0	1000					presqu'île
02078X0042/F	35	CANCALE	3 IMPASSE DES ┼ÄLETS	45	EAU-DOMESTIQUE.	100	-55	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1052.0	1180					presqu'île
02078X0043/F1	35	SAINT-BENOIT-DES-ONDES	LES NIELLES MAURES	6		30	-24	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1111.0	180	oui	côte aménagée			marais maritime
02085X0005/F1	35	VIVIER-SUR-MER(LE)	LE PORT	7	EAU-INDUSTRIELLE.	80	-73	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		40908.0	80	oui	côte aménagée			marais maritime
02374X0016/F1	29	PLOURIN	KERENNEUR	19	AEP.	97	-78	FORAGE	ADES	311.0	1265.3	880			faille + linéament		/
02374X0017/P1	29	LANDUNVEZ	TRAON	27	AEP.			PUITS	ADES	81.3	535.2	710			faille		/
02382X0023/F	29	LANNILIS	KEROUEN 1	18		71	-53	FORAGE	ADES	68.3	532.0	260			faille		presqu'île
02383X0010/F	29	LANNILIS		41		74	-33	FORAGE	Rapport BRGM SGR/BRE 87-02	1175.0		950					presqu'île
02383X0011/F	29	KERNILIS		35		80	-45	FORAGE	Rapport BRGM SGR/BRE 87-02	310.0		1700			faille		presqu'île
02383X0013/F	29	KERNILIS		13		52	-39	FORAGE	Rapport BRGM SGR/BRE 87-02	1000.0		2000			faille		presqu'île
02384X0047/F	29	DRENNEC(LE)		35		76	-41	FORAGE	Rapport BRGM SGR/BRE 87-02	400.0		7800			faille		/
02463X0513/F00182	35	ROZ-SUR-COUESNON	LES QUATRES SALINES	7	EAU-INDUSTRIELLE.	28	-21	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1111.0	2800	oui	côte aménagée			marais maritime
02463X0555/F	35	ROZ-SUR-COUESNON	LA BEGOSSIERE	7	EAU-INDUSTRIELLE.	142	-135	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 05.149		1480.0	4500	oui	côte aménagée			marais maritime
02731X0018/P	29	ILE-MOLENE	IMPLUVIUM	4	AEP.			PUITS	ARS29		897.0	20	oui				île
02731X0019/P	29	ILE-MOLENE	FORAGE MOLENE - IMPLUVIUM	7	AEP.			PUITS	ARS29	202.0	1080.0	50	oui	côte meuble			île
02734X0047/F	29	TREBABU	PEN AR PRAT	35	AEP.			PUITS	ADES	75.1	545.5	860					presqu'île
03094X0023/S1	29	TELGRUC-SUR-MER	FONTAINE LE CAON	18	QUALITE-EAU.			SOURCE	EPAB	64.0	579.0	300		côte aménagée	faille		/
03096X0021/P	29	GOULIEN	LANNOUREC	70	AEP.	110	-40	FORAGE	ADES	67.5	440.3	1970			linéament		presqu'île
03812X0025/S1	29	PONT-L'ABBE	FORAGE DE PONT L'ABBE	28	EAU-INDUSTRIELLE.	200	-172	FORAGE	ADES	65.3	276.9	950			faille		presqu'île
03836X0048/PE	56	PLOEMEUR	KERMADOYE	24	AEP.			FORAGE	ARS56	73.0	514.0	3600			faille		/
03838X0017/P	56	PLOUHINEC	PONT-MOUTON	12	AEP.			PUITS	ADES	70.4	358.3	2100	oui		linéament		presqu'île
03838X0022/P3	56	RIANTEC	KERDURAND PUITS 3 AEP	6	AEP.	24	-18	PUITS	ADES	82.0	704.0	740	oui				presqu'île
04152X0002/S2-1	56	GROIX	MEZ KERGATOUARN - KERMOUZOUET FORAGE	26	AEP.	52	-26	FORAGE	ARS56	106.1	796.0	850			faille		île
04152X0010/S5-1	56	GROIX	FORAGE DE KERDURAND	33	AEP.	49	-16	FORAGE	ARS56	150.7	920.0	750			faille		île
04152X0018/S9-1	56	GROIX	PRADINO	33	AEP.	52	-19	FORAGE	ARS56	151.3	838.0	850			faille		île
04162X0029/F	56	ERDEVEN	CAMPING KERZERHO	18	EAU-COLLECTIVE-CAMPING.	50	-32	FORAGE	ARS56		807.0	2800					/
04166X0005/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	LE ROCH	16		91	-75	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1568.0	280					presqu'île
04166X0007/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	LE PRADO ROUTE DE PONTIVY	14	EAU-IRRIGATION.	30	-16	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1645.0	800	oui				presqu'île
04166X0011/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	19 AVENUE DE GROIX	9	EAU-IRRIGATION.	59	-50	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1277.0	80	oui				presqu'île
04166X0012/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	ROUTE DE KERGROIX	15		83	-68	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1770.0	750					presqu'île
04472X0007/F1	56	QUIBERON	LE TRIO BD. PACO CAMPING DOMISILAMI	7	EAU-COLLECTIVE-CAMPING.	35	-28	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		860.0	200					presqu'île
04472X0016/F	56	QUIBERON	STADE	12	EAU-DOMESTIQUE.	60	-48	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1373.0	700			faille		presqu'île
04472X0025/F	56	QUIBERON		10		53	-43	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		988.0	140	oui				presqu'île
04472X0030/F	56	QUIBERON	BOURG	10		80	-70	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		947.0	80	oui				presqu'île
04472X0031/F	56	QUIBERON	KERNAVEST	25	EAU-DOMESTIQUE.	90	-65	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1598.0	830					presqu'île
04472X0037/F	56	QUIBERON	23 RUE DES 4 VENTS	15		66	-51	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1071.0	630			faille		presqu'île
04472X0040/F	56	QUIBERON	50 RUE DES SARDINIERES	13		30	-17	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1484.0	160	oui		faille		presqu'île
04472X0041/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	ROUTE DES TAMARIS	15	EAU-DOMESTIQUE.	30	-15	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		855.0	850					presqu'île
04472X0044/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	RUE DU STADE	16		35	-19	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		823.0	860					presqu'île
04472X0045/F	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON		9	EAU-DOMESTIQUE.	45	-36	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1386.0	80	oui				presqu'île
04472X0070/F	56	QUIBERON	LE CLOS DU LANDIER	13	EAU-DOMESTIQUE.	91	-78	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		826.0	850			faille		presqu'île
04472X0076/F1	56	SAINT-PIERRE-QUIBERON	122 RUE DES MENHIRS	11	EAU-IRRIGATION.	100	-89	FORAGE	Note BRGM Appui Police de l'eau 07.03		1045.0	150	oui				presqu'île
04478X0001/F	56	ILE-D'HOUAT	DANS LE BOURG	30	AEP.	52	-22	FORAGE	Eau du Morbihan	135.0	699.0	160					île
04478X0002/F	56	ILE-D'HOUAT	SALUS FORAGE	18	AEP.	58	-40	FORAGE	Eau du Morbihan	233.5	1059.0	180					île
04478X0003/P1	56	ILE-D'HOUAT	SALUS PUITS	25	AEP.	5	20	PUITS	ADES	152.0	831.0	140					île
04478X0004/F	56	ILE-D'HOUAT	BACHES	26	AEP.	55	-29	FORAGE	Eau du Morbihan	133.0	658.0	260					île
04478X0006/F	56	ILE-D'HOUAT	STADE MUNICIPAL LE BOURG	33	AEP.			FORAGE	Eau du Morbihan	156.5	861.0	450					île
04478X0008/F7	56	ILE-D'HOUAT		25	AEP.	72	-47	FORAGE	Eau du Morbihan + ARS	190.0	797.0	360					île
04485X0001/F10	56	HOEDIC		13	AEP.	76	-64	FORAGE	ARS56	130.0	590.0	200	oui				île
04774X0003/F2	56	HOEDIC		10	AEP.			FORAGE	Eau du Morbihan	115.0	660.0	160	oui				île
04781X0001/F5	56	HOEDIC		14	AEP.			FORAGE	Eau du Morbihan	280.0	1137.0	350	oui				île

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 Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2 rue de Jouanet
35700 Rennes
Tél. : 02 99 84 26 70