

Document public

Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM

Rapport «intermédiaire»

BRGM/RP-59457-FR
Janvier 2011



Document public

Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM

Rapport «intermédiaire»

BRGM/RP-59457-FR
Janvier 2011

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

N.Dörfliger, A. Dumon, B. Aunay, L. Arnaud

Vérificateur :

Nom :

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom :

Date :

Signature :

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

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

Mots clés : Aquifères côtiers, DROM/COM ; Ile de la Réunion, Guadeloupe, Martinique, changement climatique, intrusion saline, vulnérabilité, modélisation hydrodynamique, montée du niveau marin

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

Dörfiger N., Dumon A., Aunay B., Arnaud L. (2010) : Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM, Rapport intermédiaire, BRGM RP-59457-FR, 114 p., 62 ill., 2 ann.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles (en fonction de leur structure, géométrie et hétérogénéités) aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique, sur le littoral ou dans l'environnement des cours d'eau envahis par l'eau salée. Selon les scénarios du GIEC, le changement climatique aura divers impacts : modification des températures et précipitations, augmentation du niveau de la mer (entre 0.2 et 0.6 en 2100 selon les scénarios ; surcote de 1m lors de tempêtes avec période de retour de 10 ans), étiage sévère et plus long qui aurait comme conséquence de favoriser l'invasion marine dans les fleuves. Dans les zones côtières, une pression démographique pourra également conduire à une augmentation des besoins en eau. Une cartographie de la vulnérabilité de ces aquifères est importante, accompagnée de recommandations concernant leur suivi et leur gestion.

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

Après un état de l'art concernant les aquifères côtiers et l'intrusion saline en chapitre 2, un état de l'art concernant le changement climatique et la remontée du niveau marin avec la prise en compte du contexte particulier des îles des Antilles et de l'Océan Indien soumis aux cyclones est présenté au chapitre 3. Le chapitre 4 est consacré à un état des lieux/connaissances des aquifères côtiers de la Guadeloupe, de la Martinique et de l'île de la Réunion. Seul un aquifère pourra faire l'objet de simulations à l'aide d'un modèle hydrodynamique en mode diphasique, il s'agit de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe. Le chapitre 5 présente les questions d'origine de la salinité et l'interprétation des données de conductivité électrique disponibles pour certains points d'eau. Le chapitre 6 est consacré à la vulnérabilité des aquifères côtiers. Aucune synthèse concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères n'est présentée dans ce rapport, celle-ci ayant été réalisée dans le cadre de l'action N°4 (BRGM RP-59456-FR). La cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers concernant la Guadeloupe a été effectuée dans des études antérieures et ne prend pas en considération des scénarios de montée de niveau marin. Pour la Martinique, aucune cartographie détaillée n'est possible au vu de l'état de connaissances des aquifères côtiers. Au niveau de l'île de la Réunion, une première approche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de trois scénarios de montée de niveau marin a été effectuée, à partir du traitement de données d'altimétrie de type Litto3D. Cette première approche pourra être complétée en intégrant des critères relatifs aux propriétés intrinsèques des aquifères.

Les perspectives pour l'année 2011 pour cette action sont les suivantes :

- au niveau de la Guadeloupe et de la Réunion, application de la méthode de cartographie GADLIT décrite dans le rapport (BRGM RP-59456-FR), intégration des données de la Litto3D en Guadeloupe pour cartographier les zones impactées par une

remontée de niveau marin selon 2 à 3 scénarios ; comparaison de la vulnérabilité actuelle des aquifères côtiers avec celle pour des scénarios de remontée de niveau marin ;

- modélisation de l'effet de remontée du niveau marin au niveau de l'aquifère de Grande-Terre pour différents scénarios contrastés de remontée de niveau marin et de changement climatique pour la recharge, à l'aide d'un modèle maillé développé sous MARTHE (sans calage avec des données de salinité) ;

- essai de modélisation conceptuel pour un aquifère caractéristique de l'île de la Réunion, avec prise en compte de plusieurs scénarios ;

- interprétation et rédaction de recommandations de gestion des aquifères côtiers des DROM/COM.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Synthèse de l'état de l'art concernant l'intrusion saline des aquifères côtiers	16
3. Synthèse de l'état de l'art concernant la remontée du niveau marin induite par le changement climatique	22
3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ELEVATION SECULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITE REGIONALE DU NIVEAU MARIN	22
3.2. PREDICTIONS A PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODELES CLIMATIQUES	23
3.2.1. Augmentation du niveau marin dans les Caraïbes	29
3.2.2. Augmentation du niveau marin de l'océan Indien	29
3.3. INFLUENCE DES CYCLONES SUR LA SUBMERSION TEMPORAIRE	30
3.3.1. Régimes à houle et cyclones dans l'Océan Indien	31
3.3.2. Régimes cycloniques et surcote en Guadeloupe	32
3.4. CONCLUSION	33
4. Etat des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle des DROM/COM	34
4.1. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE LA GUADELOUPE	34
4.1.1. Basse-Terre	37
4.1.2. Grande -Terre	38
4.1.3. Marie-Galante	41
4.1.4. La Désirade	42
4.1.5. Les Saintes	43
4.1.6. Saint-Martin	43
4.1.7. Saint-Barthélemy	43
4.2. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE LA MARTINIQUE	44
4.2.1. Saint-Pierre (1978-1981)	46
4.2.2. Bellefontaine (1980)	47
4.2.3. Case Pilote (1973)	48
4.2.4. Plaine du Lamentin (2007)	49
4.2.5. Rivière salée (2005-2006)	51

4.2.6. Vatable, Les Trois Ilets (1978-1979)	52
4.2.7. Diamant (1979)	52
4.2.8. Calcaires de Caritan, Saint-Anne (1975-1976)	53
4.2.9. Calcaires de Puyferrat, Vauclin (1976)	54
4.2.10. Le Robert (1981)	54
4.2.11. Basse vallée de la rivière Galion, Trinité (1978).	56
4.3. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS A LA REUNION	56
4.3.1. Données des rapports BRGM (1988 et 2005).....	56
4.3.2. Données du SDAGE 2010-2015 et de la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE).....	59
5. Origine de la salinité et traitement de données de conductivité électrique	61
5.1. ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN GUADELOUPE	61
5.2. ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN MARTINIQUE ..	64
5.3. TRAITEMENT DES DONNEES DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE A LA REUNION.....	69
5.3.1. Démarche suivie	69
5.3.2. Résultats	70
5.4. CONCLUSION	74
5.4.1. Guadeloupe.....	74
5.4.2. La Martinique	75
5.4.3. L'île de la Réunion	75
6. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de la montée du niveau marin dans les DROM/COM	77
6.1. INTRODUCTION	77
6.2. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS EN GUADELOUPE	77
6.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS EN MARTINIQUE	80
6.4. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DE LA COTE OUEST DE L'ILE DE REUNION.....	81
6.4.1. Méthodologie de la cartographie.....	81
6.4.2. Présentation des cartes de vulnérabilité	83
6.4.3. Conclusions et limites des cartes de vulnérabilité.....	86

6.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES NORD ET EST DE L'ILE DE LA REUNION ...	87
6.5.1. Résultats.....	88
7. Conclusion et perspectives	89
7.1. CONCLUSION	89
7.2. PERSPECTIVES	90
8. Principales Références	91
Annexe 1	101

Liste des illustrations

illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al., 2005).	17
Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover (1959)).	18
Illustration 3: l'interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse (Werner & Simmons, 2009) : qo est la décharge de l'aquifère vers la mer par unité de longueur, W est la recharge uniforme de l'aquifère (en m/s).....	20
Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al. 2008) – en rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006) et en vert : données de Holgate et al. (2006).	22
Illustration 5 : Explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué (Source : GIEC, 2007).	23
Illustration 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave et al. 2008).....	23
Illustration 7 : Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC	24
Illustration 8: Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000)	25
Illustration 9 : Scénarios d'émissions mondiales de Gaz à effet de Serre, et du réchauffement moyen prévisible en surface (à droite) (d'après GIEC, 2007).	25
Illustration 10 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21ème siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grisées représentent les incertitudes (5% et 95%) liées à la modélisation climatique. Source : Meehl et al. 2007	26
Illustration 11: Projections de hausse du niveau marin pour la période 1990-2100, basées sur les projections de températures du GIEC pour les scénarios B1, A2 et A1FI.	

Les projections du GIEC dans leur 4ème rapport (AR4) sont indiquées par des barres en bas à droite. (Vermeer & Rahmstorf, 2009)	27
Illustration 12 : Tableau récapitulatif des scénarios envisagés pour la hausse du niveau marin d'ici 2100 par différents auteurs en utilisant les scenarii de températures du GIEC.....	28
Illustration 13 : Reconstitution de l'élévation moyenne annuelle du niveau marin entre 1950 et 2001 (Church & al, 2006). Cercle rouge : localisation approximative de l'île de la Réunion	29
Illustration 14 : Reconstitution des vitesses de variation du niveau de la mer.....	30
Illustration 15 : les zones de formation des cyclones et leurs trajectoires habituelles (Source : prim.net).....	31
Illustration 16 : Exposition des rivages réunionnais à la houle (Météo-France, 2009).....	31
Illustration 17 : Cartographie des zones basses de la Guadeloupe (Roques et al., 2010).....	33
Illustration 18 : Représentation cartographique du territoire de la Guadeloupe.....	34
Illustration 19 : Cadre géodynamique de l'arc des Petites Antilles (BRGM)	35
Illustration 20 : Ensembles volcano-structuraux de la Basse-Terre (BRGM).....	37
Illustration 21 : Découpage morpho structural de la Grande Terre (BRGM).....	39
Illustration 22 : Piézométrie de la nappe de Grande-Terre en hautes eaux (Dumon et al., 2010).....	40
Illustration 23 : Carte piézométrique de la nappe de Marie-Galante en hautes eaux (Dumon et al., 2010).....	42
Illustration 24 : Productivité potentielle des unités constitutives d'aquifères (Vittecoq et al., 2007).....	45
Illustration 25 : Localisation des secteurs où le biseau salé a été identifié en Martinique (points rouge).....	45
Illustration 26 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Saint-Pierre (Paulin, 1978).....	46
Illustration 27 : Coupe géoélectrique à Saint-Pierre (Paulin, 1978)	47
Illustration 28 : Plan de situation des sondages électriques implantés à Bellefontaine (Paulin, 1980)	47
Illustration 29 : Coupes géoélectriques à Bellefontaine (Paulin, 1980).....	48
Illustration 30 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Case Pilote (Cotteez et Thibault, 1973)	49
Illustration 31 : Implantation des panneaux électriques et extension de l'intrusion saline dans les formations superficielles au Lamentin (Vittecoq et al., 2007)	50
Illustration 32 : Coupe schématique de l'aval de la plaine du Lamentin selon l'hypothèse H2 (Vittecoq et al., 2007)	51
Illustration 33 : Investigations géophysiques mises en œuvre par ANTEA à Rivière Salée (2005)	52
Illustration 34 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Diamant (Paulin, 1979)	53

Illustration 35 : Coupe géoélectrique au Diamant (Paulin, 1979)	53
Illustration 36 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Robert (Paulin, 1981).....	55
Illustration 37 : Coupe géoélectrique C3 au Robert (Paulin, 1981)	55
Illustration 38 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Trinité (Cottez et Paulin, 1978)	56
Illustration 39 : Localisation des secteurs où une salinisation des aquifères est observée (BRGM, 1988)	57
Illustration 40 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur l'Île de La Réunion (BRGM, 2005).....	58
Illustration 41 : Diagramme de Piper – Plateaux du Nord et Plateaux de l'Est de Grande-Terre en période de carême (2000-2009)	62
Illustration 42 : Chroniques de conductivité et de niveau piézométrique à Richeval (2008-2010).....	63
Illustration 43 : Diagramme de Piper de Marie-Galante en période de carême (2008-2009)	63
Illustration 44 : Cl vs. Na (a), Cl vs.NO3 (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. Mg (d), Cl vs. SO4 (e) pour les qualitomètres du réseau de surveillance DCE de la Martinique. SP : saison des pluies, SS : saison sèche (Brenot et al., 2008)	66
Illustration 45: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. 1/Sr , SS : saison sèche, SP : saison des pluies (Brenot et al., 2008)	67
Illustration 46 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. 1/B (a), Cl vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche) (Brenot et al., 2008).....	67
Illustration 47 : Emprise théorique du biseau salé et points de surveillance présentant une salinisation de l'eau.....	68
Illustration 48 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur du Port	70
Illustration 49 : Localisation des piézomètres suivis dans le secteur de la Baie de Saint-Paul	71
Illustration 50 : Localisation des piézomètres dans le secteur de Saint-Paul Sud, Trois-Bassins.....	72
Illustration 51 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de l'Etang-Salé, Saint-Louis, Pierrefonds.....	73
Illustration 52 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de Saint-Pierre, Manapany-Les-Bains	74
Illustration 53 : Sensibilité des eaux souterraines de Grande-Terre au risque de salinisation (Bézèlques et al., 2007)	78
Illustration 54 : Risque de salinisation dans le nord de Grande-Terre (Gourdol et al., 2004)	78
Illustration 55 : Risque de salinisation dans le sud de Grande-Terre (Bézèlques et al., 2005)	79
Illustration 56 : Sensibilité des eaux souterraines de Marie Galante au risque de salinisation (Bézèlques et al., 2007)	79

Illustration 57 : Risque de salinisation à Marie-Galante (Bézèlques et al., 2006).....	80
Illustration 58 : Présentation des secteurs cartographiés : chaque cadre gris correspond à une carte des vulnérabilités aux intrusions salines, chaque dalle rouge correspond à un MNT.....	82
Illustration 59 : Surface vulnérable (en m ²) par mètre de cote, calculée pour chacun des trois critères de vulnérabilité et pour les 8 secteurs d'étude	84
Illustration 60 : Répartition et superficie totale des zones vulnérables (km ²).	84
Illustration 61 : Ouvrages d'alimentation en eau potable (eaux souterraines), proches de zones vulnérables à la hausse du niveau marin. Les croix indiquent une distance supérieure à 1km.	86
Illustration 62 : Surface vulnérable par mètre de côte de la zone littorale comprise entre Saint-Denis et Sainte-Rose.	88

Liste des annexes

Annexe 1.....	101
Annexe 2.....	111

1. Introduction

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

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

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

L'impact d'une remontée de niveau marin et des modifications des conditions de recharge sur les aquifères côtiers nécessite de procéder à un diagnostic à l'échelle des DROM/COM. Aucune analyse selon une approche systématique généralisée n'existe à ce jour, seul des cas d'études particuliers (Werner et Simmons, 2009). Ainsi, ce diagnostic passe d'une part par une mise à jour de l'état des lieux concernant les aquifères côtiers, par une recherche bibliographique, une exploitation des données existantes (par ex. conductivité électrique de points d'eau), une sélection d'aquifères disposant de modèle hydrodynamique en vue d'effectuer des simulations et une première cartographie de la vulnérabilité afin d'apprécier les conséquences d'une remontée de niveau marin. Les territoires concernés par cette étude sont la Martinique et la Guadeloupe dans les Antilles et l'île de la Réunion dans l'Océan Indien. Du fait du manque de connaissances importants des aquifères côtiers et aussi pour la Guyane de leur quasi non utilisation pour l'alimentation en eau potable, cette action n'a pas concerné la Guyane Française et Mayotte. A l'issue de cette étude, il s'agira de proposer des recommandations en termes de suivi et de gestion des aquifères les plus vulnérables, mais également en termes de solutions techniques de type gestion active, sur la base des simulations qui seront réalisés au niveau d'un aquifère au niveau de Grande Terre en Guadeloupe. Des modalités pour généraliser ces recommandations pour les différentes configurations possibles d'aquifères côtiers seront formulées.

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

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

Dans les zones littorales, les aquifères sont en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières ; l'eau douce d'une densité moindre que celle de l'eau salée « flotte » au-dessus de l'eau marine souterraine. L'eau salée d'une densité moyenne de 1.025 kg/l a ainsi tendance à pénétrer vers les terres sous l'action du gradient de densité.

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

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

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

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

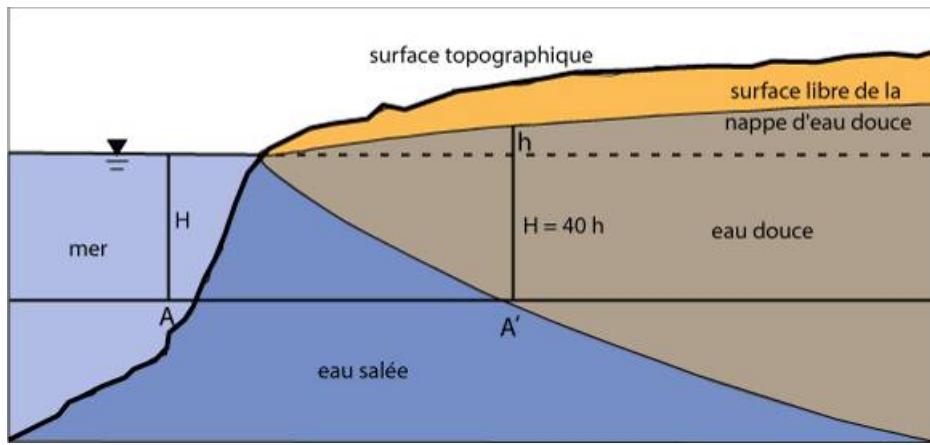


Illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al., 2005).

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

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

Avec

d_s , la masse volumique de l'eau salée ;

d la masse volumique de l'eau douce ;

h la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point A ;

H la hauteur de l'interface

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

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

et

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

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

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

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

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

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

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

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

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

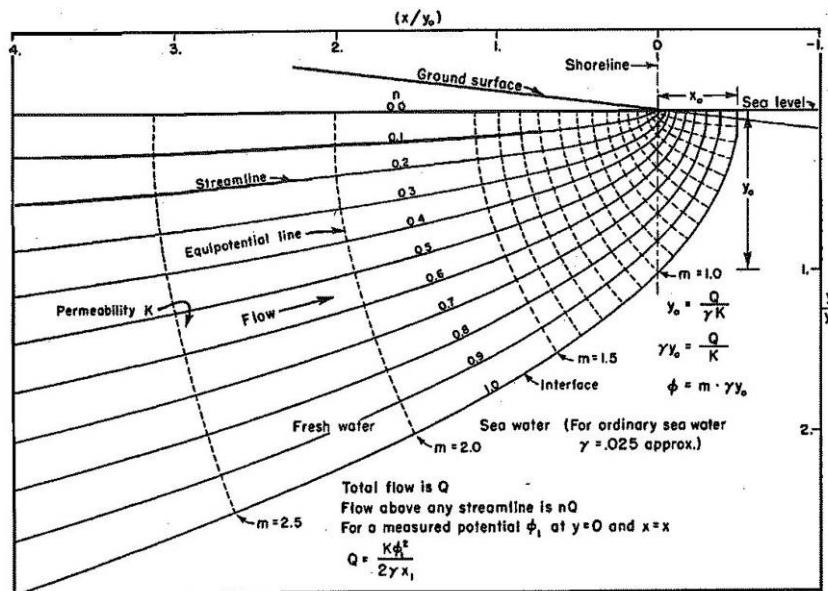


Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover (1959)).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les équations proposées font cependant appel à des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères pas toujours connues comme la perméabilité et le débit d'écoulement de la nappe. De plus, les approches de Ghyben-Herzberg et celles du type de Glover se différencient surtout à proximité du bord de mer, comme le montre Van der Veer (1977). Ce dernier montre que pour un aquifère de perméabilité de l'ordre de 10^{-4} m/s, alimenté par une pluie de 730 mm/an, la position du biseau salé donnée par la formulation de Ghyben-Herzberg est à peine 0,5% plus profonde que celle de Glover (considérée comme une solution exacte). La valeur du x_0 de l'illustration 2 obtenue est égale à 25 m.

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

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

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

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

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

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

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

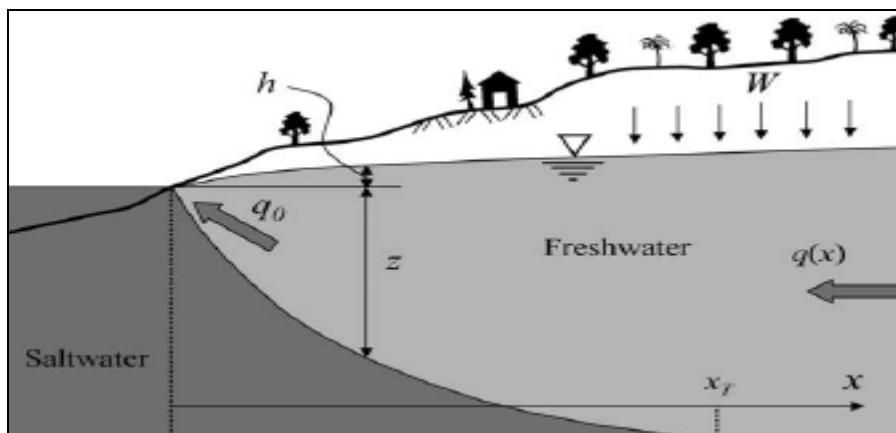


Illustration 3: l'interface eau douce-eau salée et modèle conceptuel pour l'analyse (Werner & Simmons, 2009) : q_0 est la décharge de l'aquifère vers la mer par unité de longueur, W est la recharge uniforme de l'aquifère (en m/s)

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

Dans le cas de « systèmes avec une charge hydraulique sous contrôle », l'augmentation du niveau marin est à l'origine dans ce cas, d'une diminution du gradient hydraulique vers la mer ; la migration de l'interface eau douce/eau salée serait alors de l'ordre de plusieurs centaines de mètres à 1 km pour une élévation de 1,5 m du niveau marin.

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

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

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

3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ELEVATION SECULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITE REGIONALE DU NIVEAU MARIN

Entre 1870 et 2004, le niveau marin moyen global aurait augmenté de 1,7 mm/an (+/- 0,3 mm/an). Cette tendance à l'augmentation n'est pas linéaire ; des accélérations de l'augmentation sont observées en particulier entre 1993 et 2005 avec une élévation du niveau marin moyen de 3,3 mm/an, alors qu'entre 2005 et 2008, il y a un ralentissement considérable (Cazenave & Nerem, 2004) (Illustration 4).

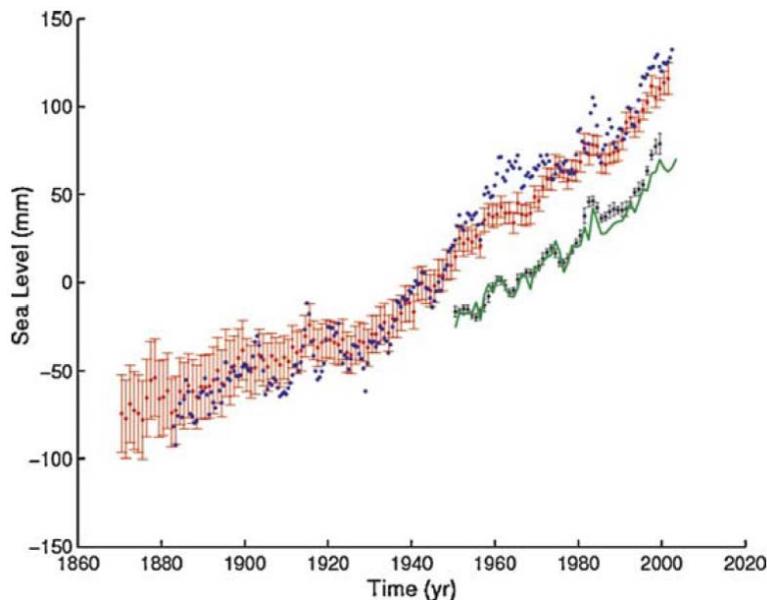


Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al. 2008) – en rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006) et en vert : données de Holgate et al. (2006).

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

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

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

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

Entre 2003 et 2008, en dépit du ralentissement de l'élévation du niveau marin moyen observée, la composante associée à la fonte des calottes polaires aurait augmenté de 80% (Rignot et al., 2008 ; Cazenave et al., 2009).

3.2. PREDICTIONS A PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODELES CLIMATIQUES

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

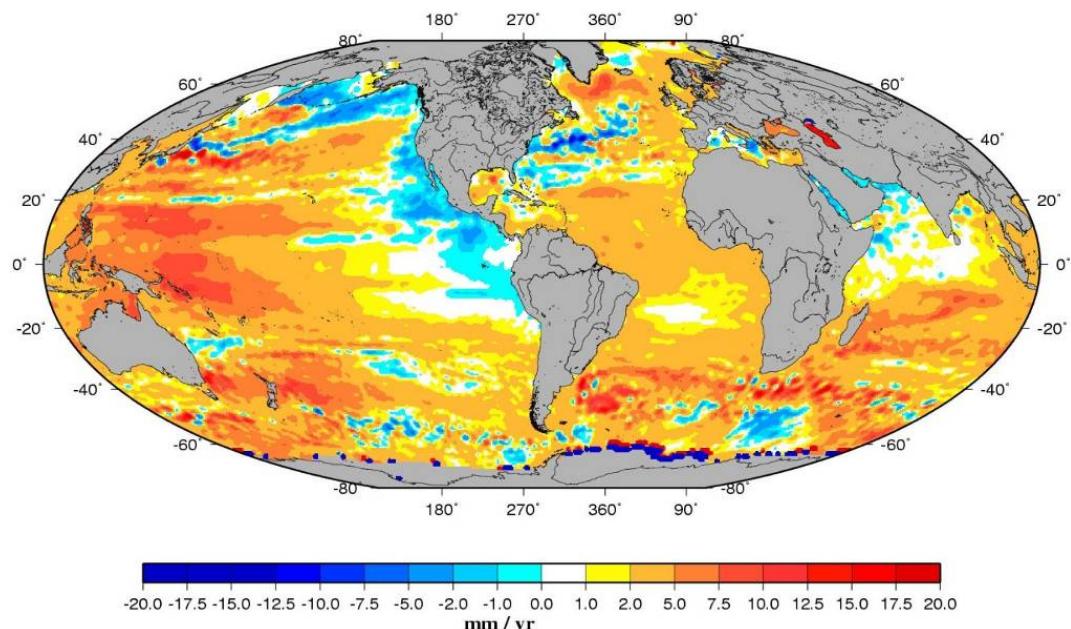


Illustration 6 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992-Janvier 2008) d'après TOPEX Poséidon et Jason-1 ; source LEGOS/GOHS ; Cazenave et al. 2008).

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

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

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

A1F1 : prédominance des combustibles fossiles ;

A1B : équilibre entre combustibles fossiles et non fossiles ;

A1T : prédominance des combustibles non fossiles.

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

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

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

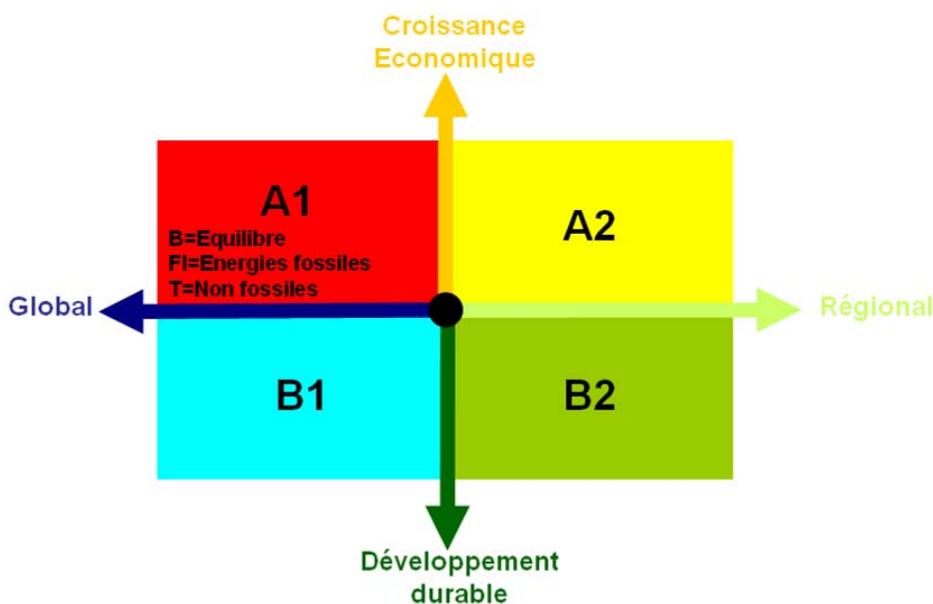


Illustration 7 : Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC.

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

Ils englobent les incertitudes concernant les paramètres naturels de la globosphère (réponse des océans et de la biosphère continentale), les caractéristiques anthropiques futures (augmentation de la teneur en CO₂, démographie, développement économique et technologique). Le GIEC précise que ces 40 scénarios ont la même probabilité de réalisation future.

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

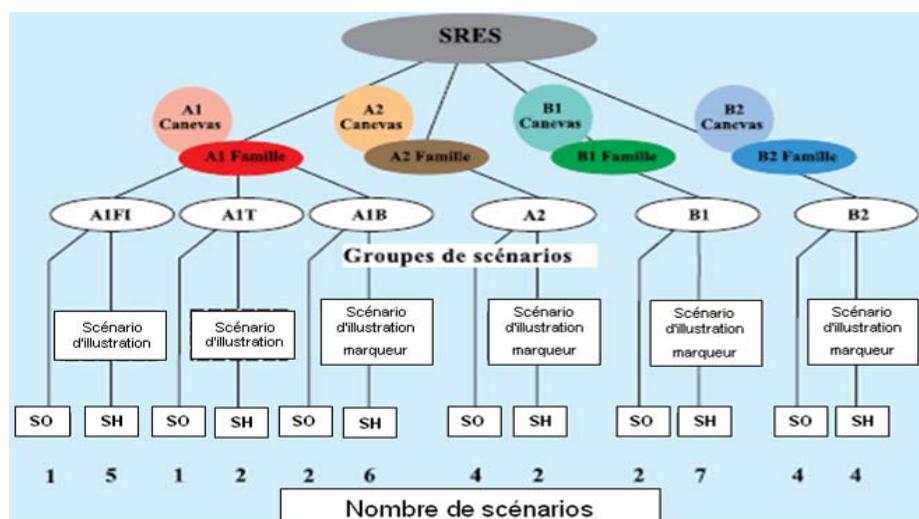


Illustration 8: Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000)

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

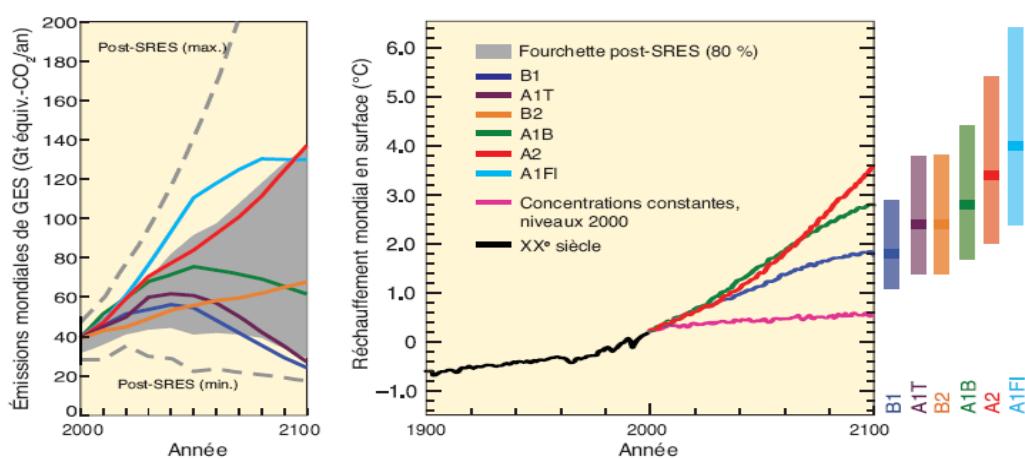


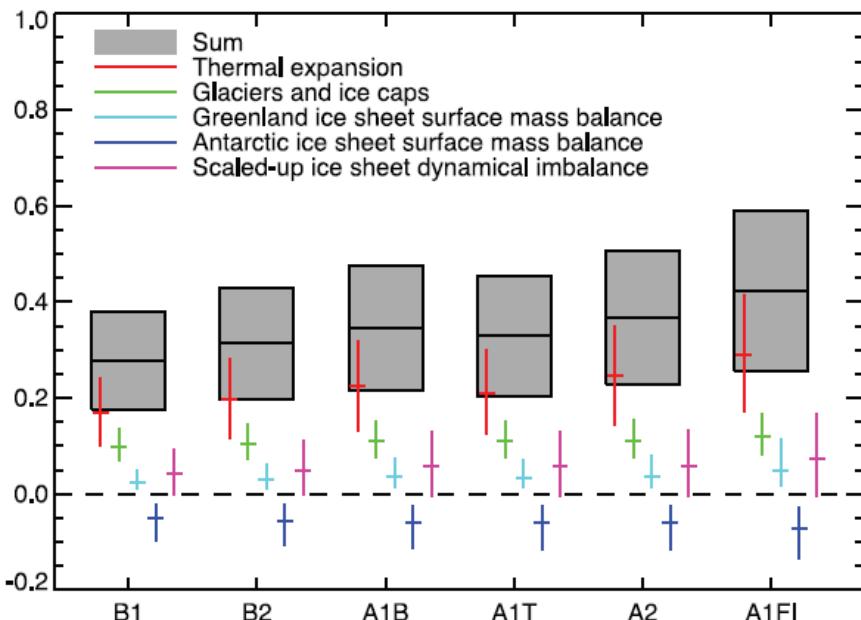
Illustration 9 : Scénarios d'émissions mondiales de Gaz à effet de Serre, et du réchauffement moyen prévisible en surface (à droite) (d'après GIEC, 2007).

Il faut noter que certains auteurs estiment qu'à l'heure actuelle (Canadell *et. al.*, 2007) les émissions de gaz à effet de serre suivent de près le scénario le plus pessimiste (A1F1).

Les différentes modélisations (précipitations, élévation du niveau marin...) effectuées dans les publications décrites dans ce rapport, utilisent ces scénarios climatiques du GIEC afin de proposer un ordre de grandeur de valeurs s'échelonnant entre le scénario le plus optimiste (B1) et le scénario le plus pessimiste (AF1).

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

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



*Illustration 10 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21ème siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grisées représentent les incertitudes (5% et 95%) liées à la modélisation climatique. Source : Meehl *et al.* 2007*

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

Ainsi, plusieurs estimations co-existent actuellement pour l’élévation du niveau marin. Les estimations basses (Meehl, 2007) vont de 0.18 à 0.59 m pour 2100. D’autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l’ordre du mètre (Rahmstorf, 2007, Grinsted, 2009) ou au-delà (Hansen, 2007). Dans tous les cas, il convient de noter que l’on passe d’un mode dans lequel le niveau marin moyen a peu évolué depuis 5000 ans à un mode dans lequel le niveau marin variera de manière plus ou moins accélérée pendant plusieurs siècles. Cette remarque conduit à recommander de prendre en compte le fait que l’élévation du niveau marin se poursuivra très probablement après 2100.

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

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

Le modèle est appliqué au 21^{ème} siècle en utilisant les projections de températures du GIEC (4^{ème} rapport). Les projections varient entre 75 et 190 cm pour la période 1990-2100, elles sont donc supérieures à celles effectuées précédemment en 2007 par Rahmstorf (Illustration 11).

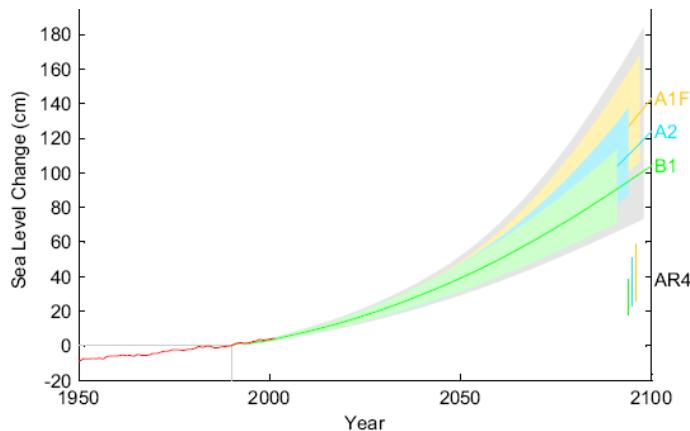


Illustration 11: Projections de hausse du niveau marin pour la période 1990-2100, basées sur les projections de températures du GIEC pour les scénarios B1, A2 et A1FI. Les projections du GIEC dans leur 4ème rapport (AR4) sont indiquées par des barres en bas à droite. (Vermeer & Rahmstorf, 2009)

Les réponses non-linéaires de l’écoulement glaciaire durant le 21^{ème} siècle seront sans-doute en augmentation : ainsi l’approche linéaire présentée ici par Vermeer et Rahmstorf (2009) sous-estime peut-être l’élévation du niveau marin.

Pfeffer *et al.* (2008) ont utilisé une approche cinématique afin de déterminer les vitesses d’écoulement des glaciers antarctiques et groenlandais nécessaires pour atteindre différents niveaux marins d’ici 2100. Suivant les conditions glaciologiques considérées (fonte plus ou moins rapide de glaciers), ils suggèrent une augmentation du niveau marin comprise entre 0,8 et 2,0m. La limite supérieure de 2 m correspondrait au cas où toutes les variables accéléreraient rapidement, et une valeur supérieure à 2 m serait, d’après leur approche, non concevable physiquement. La valeur de 80 cm qui tient déjà compte de conditions accélérées serait plus plausible.

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

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

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

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

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

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

3.2.1. Augmentation du niveau marin dans les Caraïbes

A l'échelle des Antilles et des Caraïbes, une augmentation du niveau marin moyenne de 1mm/an a été observée au cours du 20^{ème} siècle. Des variations régionales du niveau marin sont néanmoins importantes, dues à des phénomènes océanographiques de grande échelle tels que le phénomène El Niño couplé à des mouvements tectoniques le long des marges du bassin des Caraïbes. De manière identique, des variations du niveau marin sur la côte occidentale de Trinidad correspondent à une augmentation au nord avec une vitesse de 1mm/an alors qu'au Sud cette vitesse est de 4mm/an ; la différence est liée à une réponse associée à des mouvements tectoniques (Miller, 2005). Du point de vue climatique, le nombre maximum de jours consécutifs secs est en diminution, alors que le nombre d'événements de forte précipitation est en augmentation. L'influence des cyclones sur des surcotes marines est un phénomène particulier qui est à prendre en considération et qui aura un impact sur des submersions temporaires des côtes et donc potentiellement sur les aquifères côtiers. Comme on peut le voir sur l'Illustration 6 la vitesse d'élévation du niveau marin au niveau de cette région est de l'ordre de 1 à 2mm/an. Peu de références bibliographiques concernant des zooms à l'échelle de cette région n'existent cependant. Des incertitudes sont à considérer sur les données issues de modèles globaux.

3.2.2. Augmentation du niveau marin de l'océan Indien

A l'échelle de l'Océan Indien et de l'Océan Pacifique la hausse du niveau marin est présentée ci-dessous (Illustration 13).

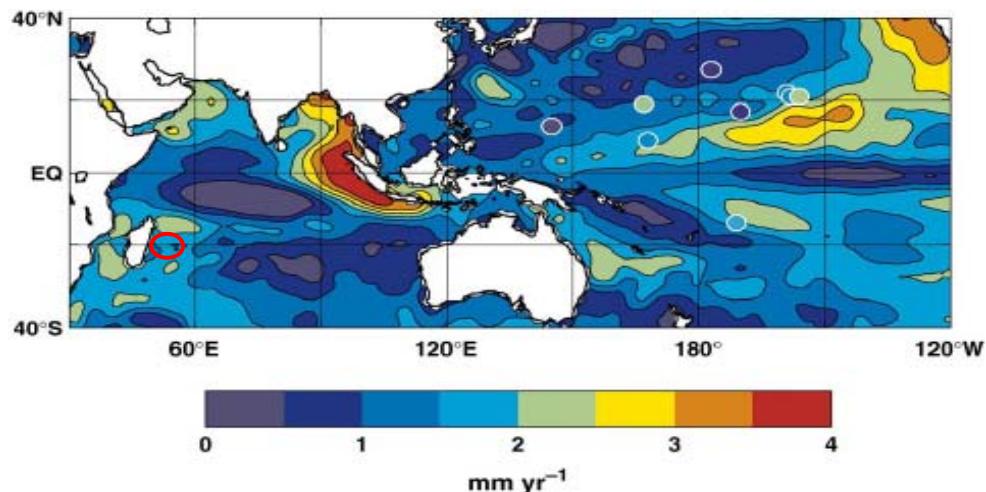


Illustration 13 : Reconstitution de l'élévation moyenne annuelle du niveau marin entre 1950 et 2001 (Church & al, 2006). Cercle rouge : localisation approximative de l'île de la Réunion

L'élévation du niveau marin n'est pas uniforme à l'échelle d'un océan. Des différences d'évolutions régionales de l'ordre de 30 cm sont observées dans l'Océan Indien (données du satellite TOPEX/POSEIDON - Illustration 14).

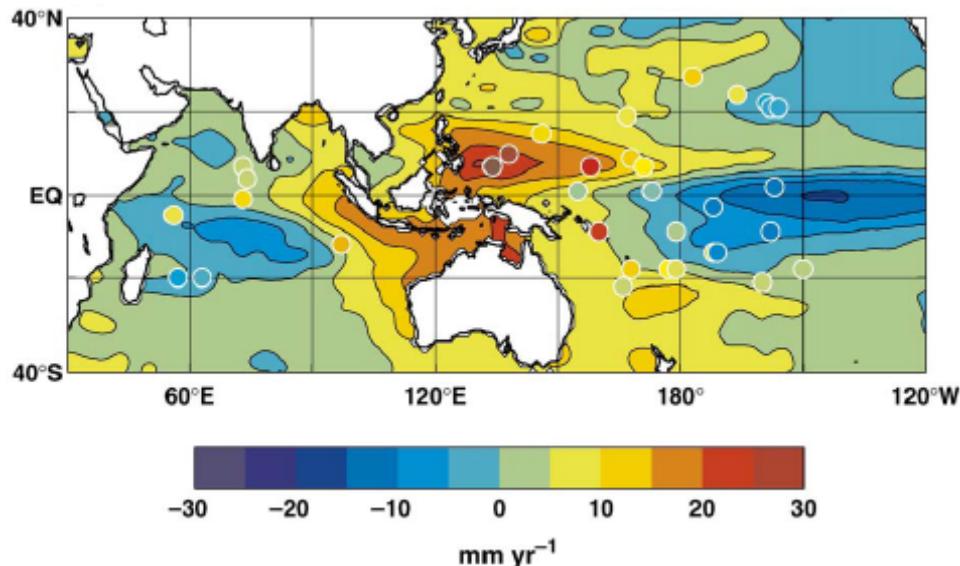


Illustration 14 : Reconstitution des vitesses de variation du niveau de la mer.

Observations dans le Pacifique et l'Océan Indien à partir des données du satellite TOPEX/POSEIDON entre 1993 et 2001 (Church & al., 2006). Les différents points correspondent aux emplacements des stations marégraphiques.

Les disparités régionales sont notables : au niveau de l'Océan Indien, on remarque une hausse moyenne de 20 mm/an à l'Est, tandis que dans le centre ouest de l'Océan Indien, jusqu'aux Mascareignes, le niveau a plutôt tendance à baisser de l'ordre de 10 mm/an. De plus, une corrélation importante existe entre l'élévation du niveau de la mer et la température de surface de l'océan, ce qui impliquerait donc que le changement du niveau marin observé ici aurait une origine stérique (Cazenave & Nerem, 2004).

On peut noter ici que l'Île de La Réunion ne se situe pas dans la zone la plus influencée par la hausse du niveau marin (mais plutôt dans un secteur où la tendance est à la baisse).

Des données marégraphiques ont été enregistrées à Port Louis (île Maurice) ainsi qu'à l'île Rodrigues. Elles indiquent respectivement une hausse du niveau marin de l'ordre de 1,5 et 1,3 mm/an en moyenne sur la période 1950-2001 (contre 1,8mm/an pour la moyenne mondiale 1961-2003), mais sur la période 1986-2000 des baisses moyennes de l'ordre de 3,7 mm/an ($\pm 1,5$) et 3,6mm/an ($\pm 1,9$) ont été observées (Church *et al.*, 2006).

Cette augmentation peu significative du niveau marin de 7,3 cm en 52 ans dans la région des Mascareignes pourrait s'expliquer par des variations décennales naturelles du niveau marin (Church *et al.*, 2006). Il n'est donc pas possible à ce jour de mettre en évidence l'impact du changement climatique sur la hausse actuelle du niveau marin dans la région des Mascareignes.

3.3. INFLUENCE DES CYCLONES SUR LA SUBMERSION TEMPORAIRE

Les régions des DROM/COM concernées par cette action sont soumises à des cyclones (Illustration 15). Certains auteurs s'accordent pour dire qu'une augmentation des cyclones tropicaux est visible dans l'Atlantique Nord, mais que la tendance générale tend à la baisse dans le reste du globe ; par ailleurs, ils affirment une légère augmentation du nombre de cyclones à forte intensité (Oouchi *et al.*, 2006).

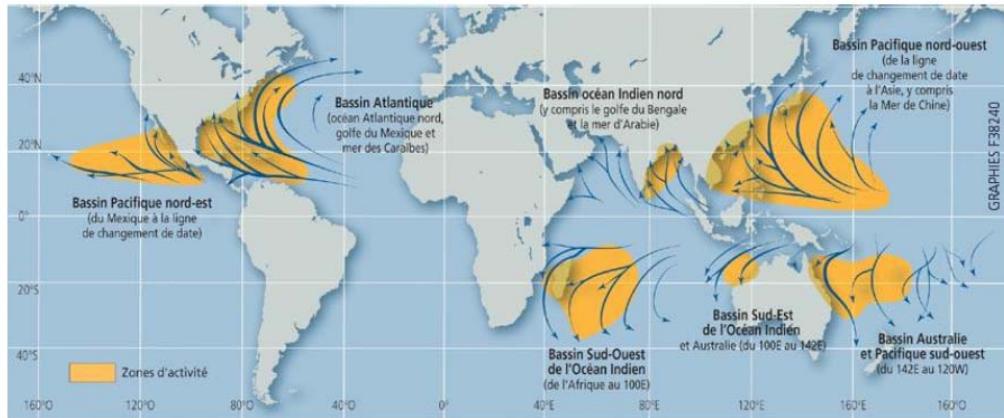


Illustration 15 : les zones de formation des cyclones et leurs trajectoires habituelles (Source : prim.net)

Ces cyclones peuvent donner lieu à des surcotes marines importantes de l'ordre du mètre voire plus, et à des submersions marines temporaires. Les phénomènes de submersions marines temporaires (inondations épisodiques de la zone côtière) ont un impact sur le niveau d'eau de manière ponctuelle mais non négligeable en termes de risque d'intrusions salines. La houle d'origine cyclonique va générer une submersion temporaire.

3.3.1. Régimes à houle et cyclones dans l'Océan Indien

Dans le cas de l'île de la Réunion, le littoral est exposé à des houles de différentes origines : régime des alizés, régime austral et cyclone. Toutes les façades de l'île de la Réunion ne sont pas exposées de la même manière à la houle et ni aux mêmes périodes de l'année (Illustration 16).

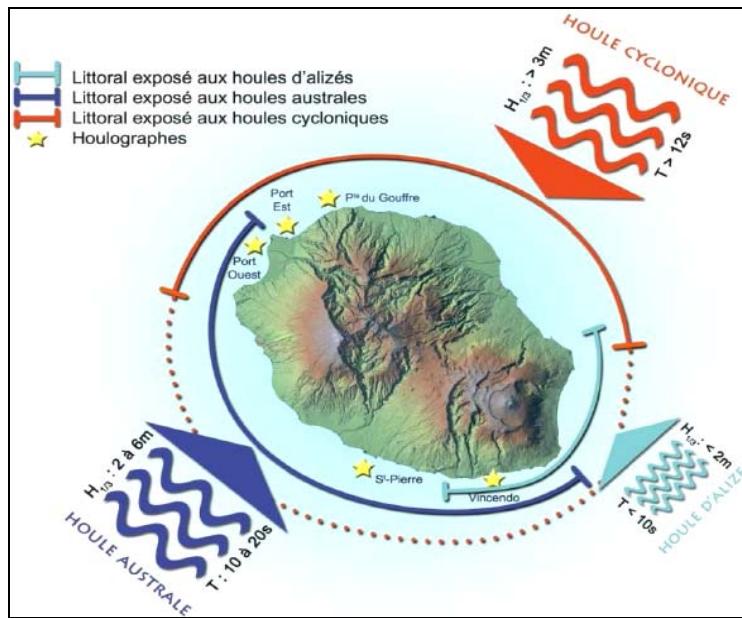


Illustration 16 : Exposition des rivages réunionnais à la houle (Météo-France, 2009)

Dans le dernier rapport du GIEC (2007), plusieurs modèles tendent à prévoir que les cyclones tropicaux deviendront plus intenses, avec une accélération des vitesses de pointe des vents et un accroissement des précipitations du fait de l'augmentation de la température à la surface des océans. Depuis 1970, l'augmentation du nombre de tempêtes intenses est très marquée dans certaines régions du monde (Atlantique Nord notamment), voire plus que les prédictions des modèles actuels. Un cyclone plus intense implique une pression plus basse en son centre, et par conséquent une surélévation du niveau d'eau : la perte de 1 hPa correspond à une élévation d'1 cm du plan d'eau et cela s'ajoute à l'effet du vent. Ainsi la surcote résultante des très basses pressions (jusqu'à 940 hPa) peut atteindre entre 0,5 m et 1 m. La surcote centennale enregistrée au Nord de La Réunion est de 85 cm (Sogreah, 1998).

3.3.2. Régimes cycloniques et surcote en Guadeloupe

Le risque de submersion est directement lié à l'élévation de la mer lors d'événement cyclonique (cas de surcote). Les secteurs les plus vulnérables au phénomène de submersion sont les zones basses. Au niveau de la Guadeloupe, ces zones sont déterminées à partir de données altimétriques (WGS-84 et niveaux marins de référence). La cartographie résultant de cette étude considère alors les zones situées en deçà de 5 m comme les zones basses (*Roques et al.*, 2010). Il faut cependant préciser que la qualité des données altimétriques ne permet pas un zonage précis de ces zones. L'utilisation de données altimétriques plus précises telle que la Litto3D, prévue en 2011, sera nécessaire pour corriger ces incertitudes.

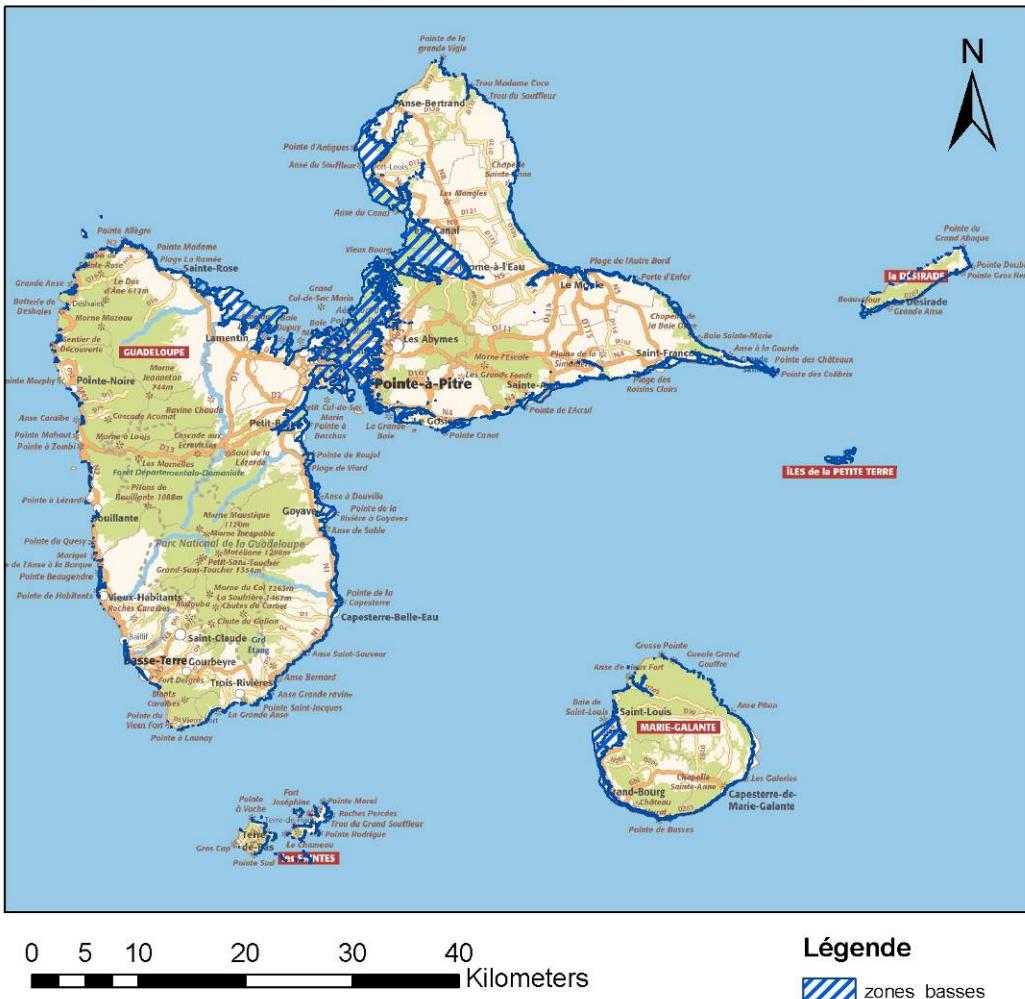
L'illustration 17 indique manifestement que les zones les plus sensibles à une submersion sont : le secteur de Grand-Cul-de-Sac-Marin, Petit-Cul-de-Sac Marin, les Mangles de Folle Anse et de St-Charles à Marie-Galante. Certaines zones étendues le long du littoral sont également considérées comme sensibles.

En général, les submersions sont principalement causées par les houles cycloniques dues aux tempêtes, ouragans ou cyclones d'orientation est – ouest ou en provenance d'ouest (cas atypique). Une des houles les plus importantes est celle du cyclone de 1928 qui a généré une montée des eaux estimée entre 3 et 4 mètres sur les îlets de la baie de Pointe-à-Pitre (Petit-Cul-de-Sac-Marin).

La dernière houle cyclonique en date est celle de l'ouragan Dean qui a eu lieu en octobre 2007. La forte houle de sud – est émanant de cet ouragan a eu des impacts conséquents sur le littoral guadeloupéen et plus particulièrement : les côtes sud et est de la Grande-Terre, la Côte-au-Vent de la Basse-Terre, et certaines dépendances dont La Désirade, Marie-Galante et l'archipel des Saintes. Les bouées météorologiques et les houlographes ont relevé des hauteurs de vagues de 7 à 8 mètres en pleine mer à l'approche des côtes exposées.

Cet épisode a fait l'objet d'une modélisation de la houle en pleine mer et de sa propagation au rivage (Pedreros et al., 2008). Les résultats du modèle ont montré que la houle au large vient de l'Est avec des vagues supérieures à 8 m à une vingtaine de kilomètres de La Désirade au moment du pic de l'ouragan. Ceux-ci ont également mis en évidence une haute exposition à la houle avec des vagues atteignant 6 m (côte nord-est de Grande-Terre), ceci étant bien entendu variable en fonction du secteur. Par ailleurs, La Désirade, Marie-Galante et les Saintes atténuent les vagues avant de frapper la Guadeloupe.

D'après le modèle, les côtes les plus exposées à la houle sont : (i) le Sud de La Désirade ; (ii) l'Est et le Sud de Marie-Galante ; (iii) l'Est et le Sud des Saintes ; (iv) la Côte-au-Vent et (v) le Nord-Est et le Sud de Grande-Terre.



Données: SRTM; Fond topographique Géosignal

Illustration 17 : Cartographie des zones basses de la Guadeloupe (Roques et al., 2010)

3.4. CONCLUSION

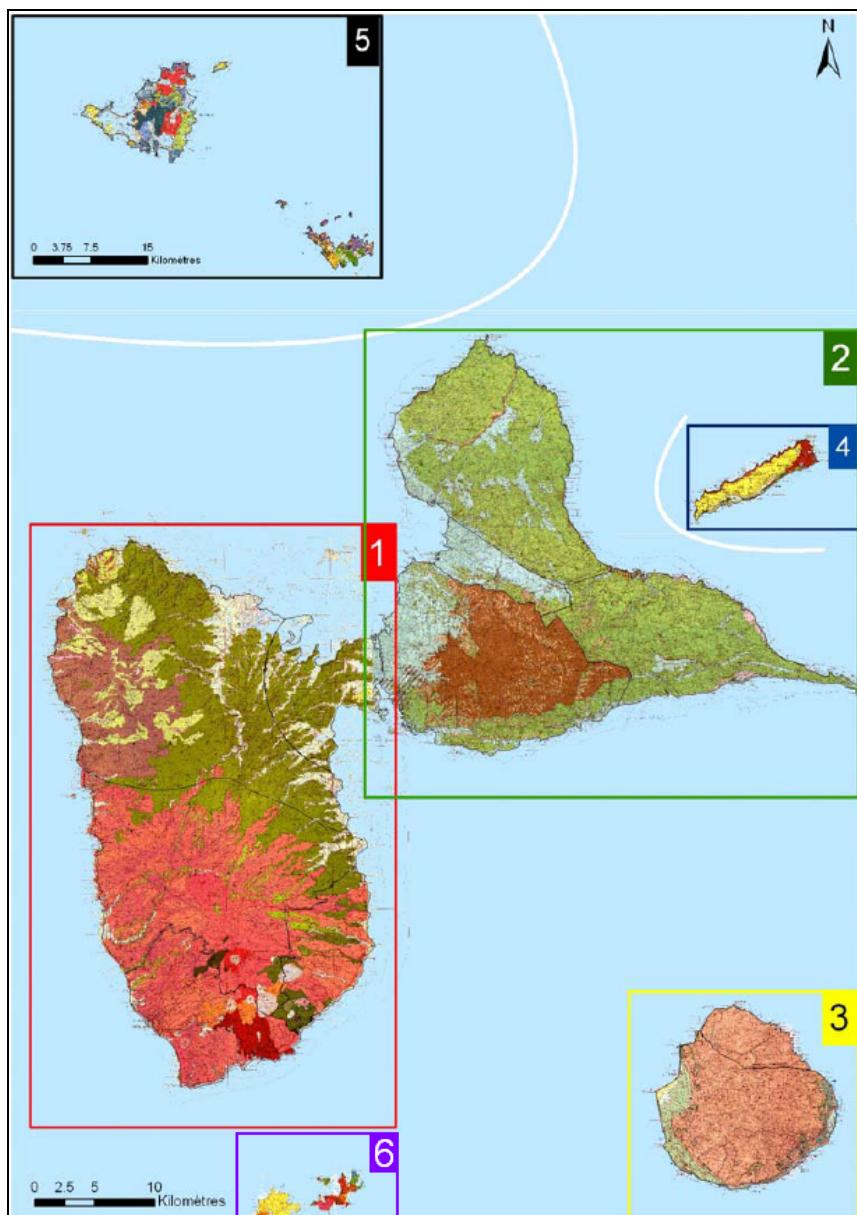
Au vu des données des travaux du GIECC et des travaux des différents auteurs, les valeurs de scénarios de remontée de niveau marin pourraient être celles valables au niveau mondial, soit 0,6 m à 1m.

Considérant les variabilités régionales concernant les vitesses de niveau marin dans les régions des Caraïbes et de l'Océan Indien, issues des observations et/ou des modèles climato-océanographiques, mais également les incertitudes, il n'est pas possible de proposer des valeurs régionales différentes. Cependant, au vu de l'influence des îles à la houle d'origine cyclonique, il apparaît raisonnable de prendre en considération une valeur haute plus importante à savoir 2m pour les scénarios de remontée de niveau marin.

4. Etat des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle des DROM/COM

4.1. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE LA GUADELOUPE

Le périmètre d'étude concerne les sept îles de l'archipel guadeloupéen, à savoir : Basse-Terre, Grande-Terre, Marie-Galante, La Désirade, Les Saintes, Saint-Martin et Saint-Barthélemy.



Fond cartographique : carte géologique numérisée. 1-Basse-Terre ; 2-Grande-Terre ; 3-Marie-Galante ; 4-La Désirade ; 5-Saint-Martin, Saint-Barthélemy ; 6-Les Saintes (Brenot et al., 2008)

Illustration 18 : Représentation cartographique du territoire de la Guadeloupe

L'archipel guadeloupéen appartient à l'arc insulaire des Petites Antilles mis en place au niveau de la marge active associée à la subduction de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe. Deux arcs insulaires se distinguent alors (Illustration 19) :

- L'arc externe ancien ayant fonctionné de l'Eocène à l'Oligocène, à l'origine d'un substratum volcanique sur lequel se serait déposée une sédimentation carbonatée Pliocène au Pléistocène ;
- L'arc interne plus récent, siège d'un volcanisme actif du Miocène à l'actuel sur lequel n'apparaissent pas d'indices de sédimentation carbonatée ancienne.

Les unités hydrogéologiques de ces îles, mises en place du Mésozoïque au Quaternaire, sont constituées de deux grands types de formations géologiques : volcanique et sédimentaire.

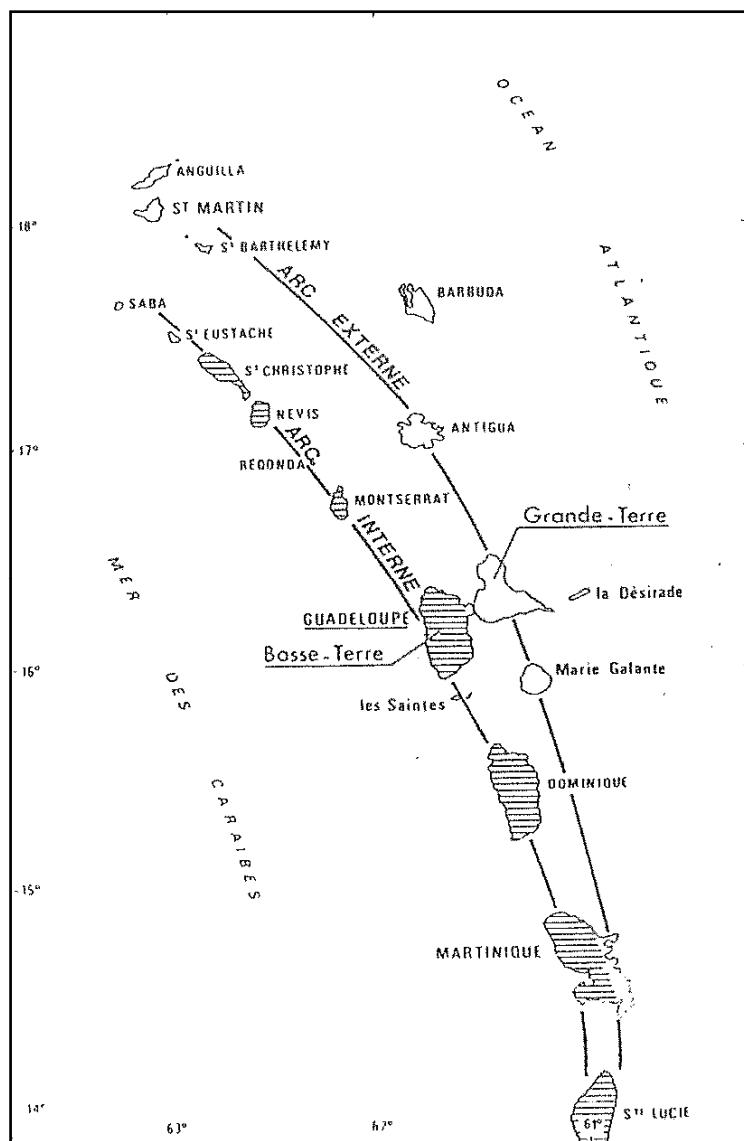


Illustration 19 : Cadre géodynamique de l'arc des Petites Antilles (BRGM)

L'archipel guadeloupéen est soumis à des aléas climatiques fréquents (tempêtes, ouragans, cyclones...). La montée du niveau de la mer et les surcotes éventuelles pourront avoir un impact non négligeable sur la salinisation de ces aquifères en contexte insulaire.

Un état des lieux de la salinisation des différents systèmes aquifères de Guadeloupe a été réalisé à partir des données existantes. Il s'agit d'une part des éléments disponibles en bibliographie (fond géochimique, prospections géophysiques, réseaux qualité, modèles,...), et d'autre part de la valorisation des données chimiques des réseaux qualité (contrôle sanitaire, contrôle de surveillance au titre de la DCE), et des chroniques de niveaux d'eau et de conductivité du réseau piézométrique du BRGM. Actuellement, l'état des connaissances des aquifères de la Guadeloupe est assez inégal selon les îles. Il subsiste dans tous les cas de fortes lacunes de connaissance sur la position de l'interface eau douce – eau salée.

4.1.1. Basse-Terre

L'île de Basse-Terre (850 km²) se situe sur l'arc insulaire interne des petites Antilles qui est le siège d'un volcanisme récent du Miocène à l'actuel (Illustration 18). La Basse-Terre est donc l'une des îles les plus récentes des Antilles ; aucune formation antérieure au Pliocène n'y a été reconnue (Illustration 20).

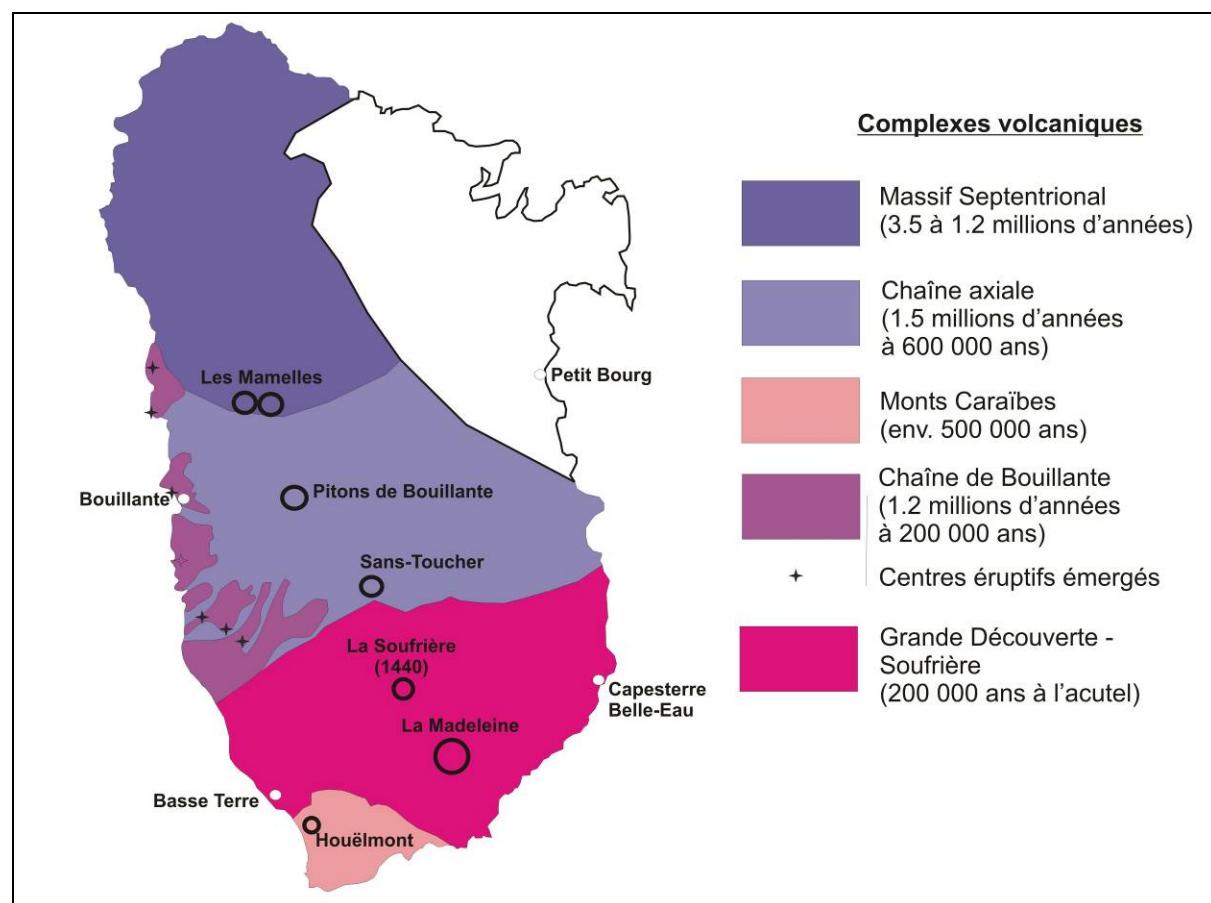


Illustration 20 : Ensembles volcano-structuraux de la Basse-Terre (BRGM)

Le fonctionnement hydrogéologique de l'île de Basse-Terre est mal connu du fait de sa complexité géologique. Son système hydrogéologique résulte d'un ensemble de sous-systèmes imbriqués les uns aux autres. Leurs interactions hydrogéologiques ne sont que peu connus à ce jour. Les informations disponibles pour la Basse-Terre sont souvent d'intérêt très ponctuel. La description du fonctionnement hydrogéologique global de l'île n'a jamais été réalisée, et il n'est pas possible de délimiter en l'état actuel des connaissances des systèmes aquifères indépendants.

L'île de Basse-Terre présente un fond géochimique élevé en calcium, magnésium et sodium. Les concentrations en chlorures et sulfates sont importantes à proximité du dôme (jusqu'à 443 et 901 mg/l respectivement). Quant aux éléments traces tels que le fer, le manganèse et le fluor, ceux-ci impliquent des fonds géochimiques élevés dans certaines zones localisées (*Brenot et al.*, 2008).

Très peu d'études géophysiques ont été réalisées sur la Basse-Terre, mais il semblerait que le biseau salé soit rarement repéré et présente localement une position redressée due au bon hydrodynamisme de la nappe. En effet, des sondages électriques réalisés en bordure de mer ont recoupé le biseau salé, mais les sondages exécutés à 150 mètres de la mer n'ont pas recoupés l'interface eau douce/eau salée (*Paulin et al.*, 1984).

Les eaux souterraines de la Basse-Terre sont exploitées pour l'alimentation en eau potable, uniquement au niveau de captages de sources. Il existe par ailleurs une exploitation par forages et captages de sources pour la production d'eau embouteillée (usines de Capès et de Matouba), principalement dans le Sud de l'île. La ressource souterraine du secteur de Bouillante est exploitée par forages profonds (entre 800 et 2 500 m) pour la production d'énergie d'origine géothermique.

Il n'existe pas de suivi piézométrique des nappes de la Basse-Terre. Par ailleurs, l'état actuel des connaissances hydrogéologiques de la Basse-Terre ne permet pas le développement d'outils de gestion de la ressource (modèles et cartes de vulnérabilité notamment).

4.1.2. Grande -Terre

L'île de Grande-Terre, d'une superficie de 750 km², se situe sur l'arc insulaire externe ancien des Petites Antilles ayant fonctionné de l'Eocène à l'Oligocène (Illustration 18) ; ce fonctionnement tectono-volcanique est à l'origine d'un socle volcanique ancien recouvert de plateaux calcaires.

La Grande-Terre correspond à une plate-forme carbonatée d'âge plio-pléistocène qui a été affectée par différents épisodes tectoniques conduisant au plissement et à la fracturation des formations. Ces contraintes sont à l'origine de la compartimentation de l'île en plusieurs unités morpho-structurales bien distinctes. Ces ensembles morpho structuraux sont assimilés à des sous-systèmes hydrogéologiques en relation les uns avec les autres : les Plateaux du Nord, la Plaine de Gripon, les Grands-Fonds et les Plateaux de l'Est (Illustration 21).

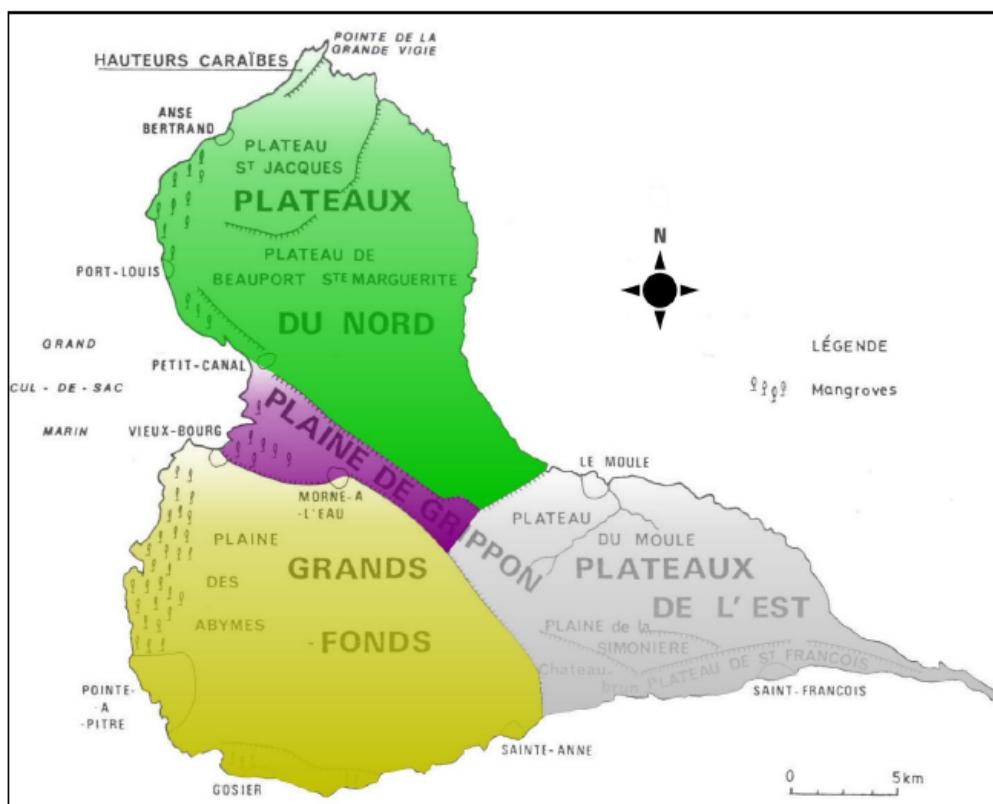


Illustration 21 : Découpage morpho structural de la Grande Terre (BRGM)

La Grande-Terre renferme une nappe s'étendant sur l'ensemble du territoire. L'aquifère de Grande-Terre est un système carbonaté continu où deux ensembles calcaires superposés (calcaires dits « inférieurs » et « supérieurs » séparés par un « niveau volcano-sédimentaire « supérieur ») forment un seul réservoir de type poreux et fissuré. Ces séries carbonatées sont séparées par des niveaux volcano-sédimentaires peu perméables qui constituent une limite étanche ou semi-étanche jouant le rôle de toit de la nappe ou d'écran réduisant ainsi les échanges entre les unités calcaires et les eaux marines sous-jacentes.

Sur l'ensemble de la Grande Terre, le substratum imperméable n'a pas été identifié. L'interface eau douce - eau salée semble être systématiquement en position supérieure vis-à-vis de ce substratum ; il est assimilé à la limite inférieure du système.

Des indices de karstification existent en surface alors qu'en profondeur, l'extension de cette karstification n'est pas du tout avérée tout comme leur rôle dans les écoulements souterrains.

Les eaux souterraines de Grande-Terre sont exploitées par forages et puits principalement pour l'AEP, mais également pour des usages agricoles et industriels. Il existe un réseau piézométrique suivi par le BRGM depuis les années 1970 (Illustration 22).

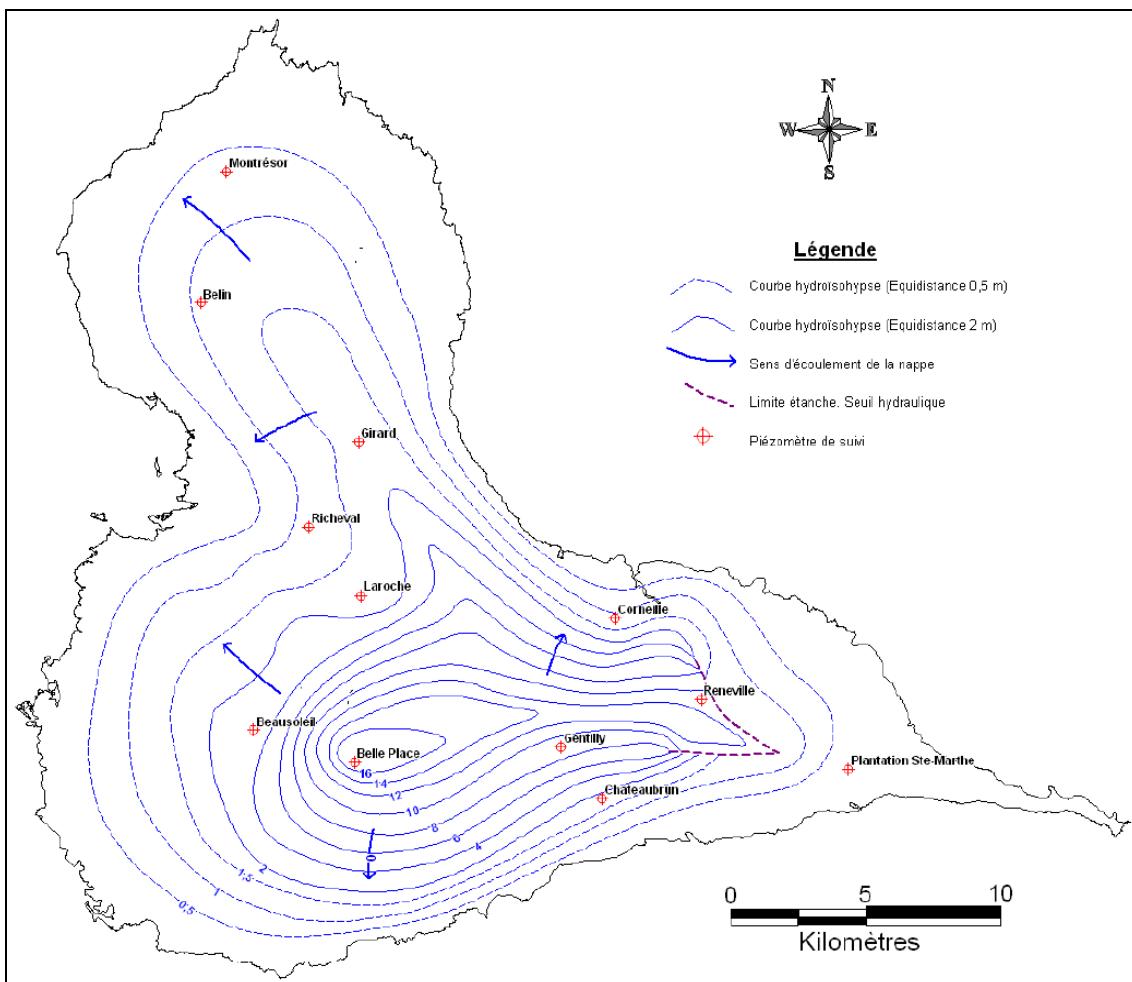


Illustration 22 : Piézométrie de la nappe de Grande-Terre en hautes eaux (Dumon et al., 2010)

La Grande-Terre présente un risque de fond géochimique élevé en sodium et en chlorures au niveau des côtes et des zones à faible piézométrie à l'intérieur des terres (Brenot et al., 2008). En dehors des points à proximité des côtes partiellement atteints par les eaux salines, les valeurs mesurées sont conformes à celles des aquifères carbonatés. Des concentrations élevées en sodium et chlorures sont toutefois observées même à l'intérieur des terres, concentrations qui sont significativement supérieures à celles attendues pour des eaux interagissant avec des roches carbonatées.

Des prospections géophysiques portant sur certaines zones localisées ont été réalisées en 1972 (Plateaux du Nord, Plaine des Grippons, ouest des Grands-Fonds). Au niveau des Grands-Fonds (Raizet à l'ouest de Morne-à-l'Eau), un « niveau conducteur de base » a été interprété comme une interface eau douce-eau salée située en moyenne à -60 m NGG. Concernant les Plateaux du Nord, en bordure des côtes, l'interface eau douce/eau salée est inférieure à -50 m mais peut descendre jusqu'à -100 m (Cottez, 1972). De plus, selon un rapport de 1962 de la Compagnie Générale de Géophysique (CGG), le substratum est très conducteur, ce qui correspondrait à des formations salées à profondeur variable. Les données graphiques récupérées sur le rapport CGG/CPGF de 1962 sont des données interprétatives. Elles ne paraissent pas complètement fiables et les données brutes ont malheureusement disparues. Il serait nécessaire d'acquérir de nouvelles données géophysiques sur ces secteurs, afin d'actualiser ces données et d'évaluer l'évolution de l'interface eau douce-eau salée depuis 1972.

Plusieurs modèles ont été réalisés sur la Grande-Terre (en 1987, 1989 et 2007). Le modèle numérique le plus récent a été réalisé en régime transitoire et en mode diphasique afin de tenir compte du contexte insulaire où la nappe d'eau douce repose sur les eaux marines (Hamm *et al.*, 2007). Ce modèle a été établi à l'aide du code de calcul MARTHE ; il a été calé sur une période de 20 ans. Plusieurs hypothèses ont été posées en raison de certaines lacunes de données hydrogéologiques disponibles notamment concernant la position de l'interface eau douce - eau salée. En raison du manque de fiabilité des travaux de Cottez (1972), le calage du modèle a été effectué à l'aide de cartes de position de l'interface obtenues par calcul. L'approche multiphasique utilisée pour représenter les relations entre eau douce et eau salée nécessite certaines conditions :

- les deux fluides sont non miscibles ;
- l'interface entre zone d'eau douce et zone d'eau salée est abrupte ;
- les pressions des deux phases sont reliées par une loi analogue à une loi de rétention.

La position du biseau salé est alors déduite de relations hydrostatiques et de calculs de charges pour chaque maille. C'est une approche simplificatrice qui permet une utilisation plus souple du modèle par rapport à un modèle 3D à densité variable. Ce modèle a permis de calculer des bilans hydrodynamiques et d'analyser la réaction de l'aquifère aux différentes sollicitations externes (infiltration, prélèvements, débordements par cours d'eau, débits entrants et sortants par les limites du modèle). Le processus de calage s'est avéré très favorable à la restitution des fluctuations piézométriques. Concernant l'interface eau douce-eau salée, deux types de comportement ont été constatés sur la Grande-Terre :

- les variations de l'interface sont atténuées par rapport à celles de la piézométrie dans les zones à forte densité de fractures, le système est alors fortement inertiel ;
- l'interface évolue inversement à la piézométrie avec une forte amplitude, à proximité du pourtour littoral (ou dans des zones à faible densité de fractures).

4.1.3. Marie-Galante

L'île de Marie-Galante, d'une superficie de 160 km², se situe sur l'arc insulaire externe ancien des Petites Antilles (Illustration 18). L'île est constituée des mêmes formations carbonatées mis en place du Pliocène au Pléistocène que sur la Grande-Terre. Le substratum volcano-sédimentaire des séries carbonatées sur Marie-Galante a été recoupé au niveau de trois forages ; des prospections géophysiques l'ont reconnu comme « formation électriquement résistante » en plusieurs points de l'île. Globalement, sa position retenue est de -250 m par rapport à la surface du sol (Mauboussin, 1987). Ce substratum est alors considéré comme une limite étanche ou semi-étanche correspondant au mur de la nappe dans la partie centrale du système des Hauts et y réduisant les possibilités d'échanges verticaux entre celle-ci et les eaux marines sous-jacentes.

L'île de Marie-Galante a subi d'importantes contraintes structurales qui ont conduit au basculement général vers l'Ouest ainsi qu'à la compartimentation en unités surélevées ou effondrées les unes par rapport aux autres et le long de grands traits structuraux (failles majeures). Il en résulte alors l'individualisation de deux ensembles morpho-structuraux : les Hauts et les Bas, hydrauliquement indépendants et séparés par une limite hydraulique étanche : la faille Anse-Piton – Vieux Fort, appelée également « Barre de l'île ». La nappe de Marie-Galante constitue un système aquifère continu de type poreux et fissuré avec des écoulements à surface libre.

Les eaux souterraines de Marie-Galante sont exploitées par forages et puits principalement pour l'AEP, mais également pour des usages agricoles et industriels. Il existe un réseau piézométrique suivi par le BRGM depuis les années 1970 (Illustration 23).

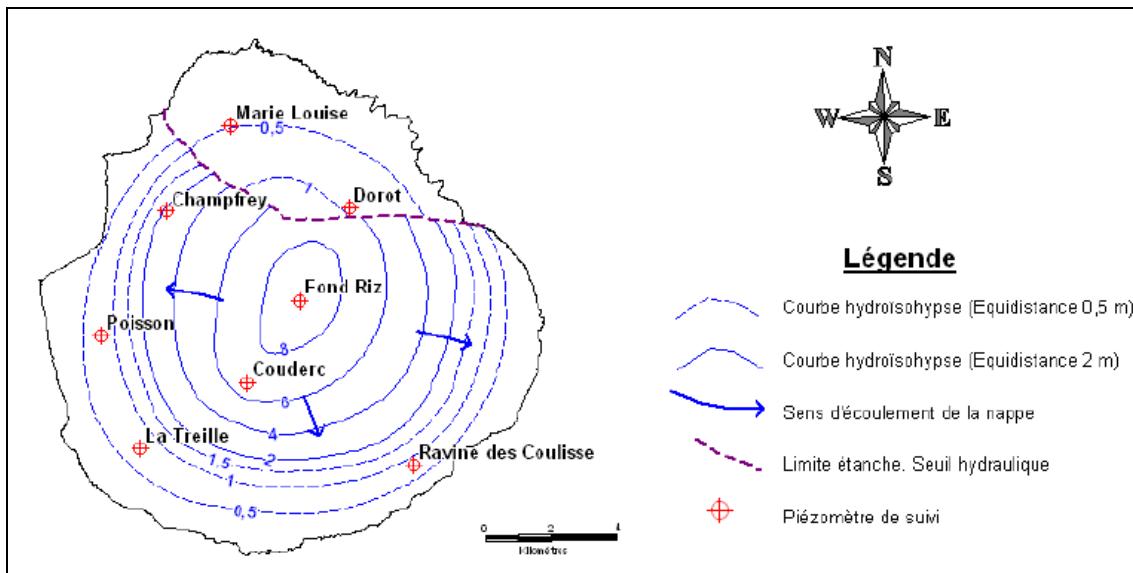


Illustration 23 : Carte piézométrique de la nappe de Marie-Galante en hautes eaux (Dumon et al., 2010)

Pour Marie-Galante, la géométrie de l'interface eau douce - eau salée est connue sur toute l'île (prospections géophysiques anciennes de 1961 à 1982). La géométrie du biseau salé est variable sur l'ensemble de l'île : de -10 m à -75 m NGG (Paulin et al., 1982). Sa position varie en fonction des variations du niveau marin et des variations piézométriques. Au nord de l'île, l'interface se situe à environ -25 m / -30 m de profondeur. Au sud de la faille Anse-Piton – Vieux Fort, cette interface s'approfondit quand les altitudes s'élèvent, à l'exception de la plaine côtière où elle est également située à -25 m / -30 m de profondeur. Les épaisseurs calcaires à eau douce sont alors de plus en plus importantes vers le centre de l'unité (plus de 100 m).

Plusieurs modèles hydrodynamiques (1983, 1989 et 2003) ont été réalisés sur Marie-Galante. Le modèle numérique le plus récent (Bézègues et al., 2003) a été réalisé en régime transitoire à l'aide du code de calcul MARTHE. La position de l'interface eau douce-eau salée a été appréhendée à l'aide d'interprétations des campagnes géophysiques de 1961, 1974, 1980, 1981. Une zone non influencée a été définie en corrélant la position de l'interface et celle du substratum.

4.1.4. La Désirade

L'île de la Désirade (25 km^2) se situe sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 18). Elle est caractérisée par des plateaux calcaires reposant sur un socle volcanique ancien (145 millions d'années) affleurant sur l'ensemble de l'île. De manière générale, les études réalisées sur cette île ont toujours été localisées et rarement portées sur le fonctionnement hydrogéologique global des systèmes aquifères. La géométrie et l'organisation spatiale des formations aquifères sont donc mal connues. Seule la présence de plusieurs sources laisse supposer un potentiel hydrogéologique non négligeable.

Un suivi piézométrique sur deux puits de l'île a été mis en place en 2008 par le BRGM. Les données sont en l'état actuel, insuffisantes pour réaliser des outils de gestion (modèles et cartes de vulnérabilité).

Par ailleurs, l'usage des eaux souterraines est limité à des fins agricoles et l'approvisionnement en eau potable se fait via une canalisation sous – marine depuis la Grande-Terre.

L'interface eau douce –eau salé a pu être ponctuellement localisée par géophysique (secteur de Beauséjour, sud-ouest de l'île). Cependant aucune étude ne renseigne sur sa géométrie ou sa position sur l'ensemble de l'aquifère.

Les données chimiques trouvées dans la bibliographie indiquent une forte salinisation des eaux ($[Na^+]$ jusqu'à 1600 mg/l et $[Cl^-]$ jusqu'à 1560 mg/l !) (Brenot *et al.*, 2008).

4.1.5. Les Saintes

L'archipel des Saintes (15 km²) se situe sur l'arc interne des Petites Antilles (Illustration 18) ; il est constitué de deux îles qui sont des édifices volcaniques mis en place probablement à la même époque que la chaîne septentrionale de la Basse Terre (3,5 à 1,2 millions d'années). Aucune étude hydrogéologique n'a été menée sur l'archipel. La ressource en eau souterraine n'est pas connue et semble limitée. Les formations volcaniques des îles semblent avoir été imperméabilisées suite à l'altération de la roche.

L'approvisionnement en eau potable de l'île s'effectue par l'intermédiaire d'une conduite sous-marine depuis Basse-Terre.

4.1.6. Saint-Martin

L'île de Saint-Martin, d'une superficie de 55 km², est située à environ 200 km au nord de la Guadeloupe. Elle se trouve sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 18). La géométrie des aquifères est peu connue ; elle a été pour le moment abordée localement uniquement à partir de prospections géophysiques. Le fonctionnement hydrodynamique global de Saint-Martin reste mal connu.

Les eaux souterraines de Saint-Martin ne sont pas exploitées, l'île est approvisionnée en eau potable par dessalement d'eau de mer. Il existe cependant des puits domestiques et un forage a été exploité jusqu'en 2003 pour l'eau embouteillée (usine Fond'Or). Il n'existe pas de suivi piézométrique des nappes de Saint-Martin. Par ailleurs, l'état actuel des connaissances ne permettent pas le développement d'outils de gestion de la ressource (modèles et cartes de vulnérabilité notamment).

Des prospections géophysiques ont été effectuées sur Saint-Martin en 1989 et 1990. Ces études indiquent que le biseau salé a été repéré en trois points (Saint-Jean, Marigot, Grand-Case), mais semblent avoir une extension limitée à l'intérieur des terres. La charge hydraulique de la nappe empêche la pénétration des eaux salées. De plus, les eaux en périphérie sont fortement minéralisées et possèdent des teneurs en chlorures et sodium importantes (jusqu'à 2270 et 1060 mg/l respectivement) (V.Petit, 1990).

Par ailleurs, les eaux des forages de l'usine d'embouteillage « Fond'or » ont un faciès chloruré-sodique avec des concentrations élevées en sodium et chlorures pouvant atteindre 705 et 1309 mg/l respectivement. Ces eaux faisaient l'objet jusqu'en 2003 d'un traitement de désalinisation avant embouteillage.

4.1.7. Saint-Barthélemy

L'île de Saint-Barthélemy, d'une superficie de 25 km², est située à environ 200 km au nord de la Guadeloupe. Elle se trouve sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 18). Aucune étude hydrogéologique n'a été réalisée, mais l'existence de nappes limitées est

envisagée. Le contexte géologique de l'île est comparable à celui de Saint-Martin et laisse supposer le même type d'aquifère.

L'approvisionnement en eau potable de l'île s'effectue, comme pour Saint-Martin, par dessalement d'eau de mer. D'anciens puits et forages captent de petites nappes de fond de vallées. Il n'existe aucun suivi piézométrique sur l'île.

4.2. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE LA MARTINIQUE

Les aquifères de Martinique résultent quasi exclusivement (à l'exception de quelques formations sédimentaires) d'un volcanisme de type andésitique mis en place en contexte insulaire. Les connaissances de ces aquifères volcaniques restent encore très partielles, en ce qui concerne la compréhension de leur structure, mais aussi et surtout leur fonctionnement hydrogéologique.

Dans le cadre du SIESMAR (Système d'Information des Eaux Souterraines de Martinique), le concept d'UCA, « Unité Constitutive d'Aquifère », a été défini dans le but de délimiter des unités homogènes sur les plans géologique et hydrogéologique à partir de la carte géologique au 1/50.000 de la Martinique (Vittecoq et al., 2007). Cinq niveaux de superposition ont été identifiés. La grande majorité des 123 UCA définies, de l'ordre de 70 %, possèdent au moins une limite côtière. Ce découpage sera précisé par le Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA à paraître début 2011 pour la Martinique.

A chaque UCA a été attribuée une fourchette de « débit potentiel instantané » (Illustration 24). Ce débit correspond au débit que pourrait fournir la formation aquifère au cours d'un pompage de quelques heures, réalisé au sein d'un forage productif, c'est-à-dire implanté au sein d'un secteur perméable de la formation aquifère, recoupant celle-ci sur une hauteur mouillée significative (plusieurs mètres au moins) et ayant été réalisé selon les règles de l'art. Il ne s'agit pas d'un débit d'exploitation à long terme.

Il ressort clairement des cartographies résultantes que les potentiels aquifères les plus intéressants concernent la moitié Nord de l'île.

En Martinique, l'identification du biseau salé a principalement été approchée par le BRGM lors de campagnes de recherche en eau souterraine dans les années 70 et 80. Deux études plus récentes sur le sujet sont cependant à noter : sur la Plaine du Lamentin (BRGM, 2007) et à Rivière Salée (ANTEA, 2006).

Les investigations ont toujours classiquement été menées en deux étapes principales : (1) acquisition de mesures géophysiques et (2) réalisation de sondages de reconnaissance.

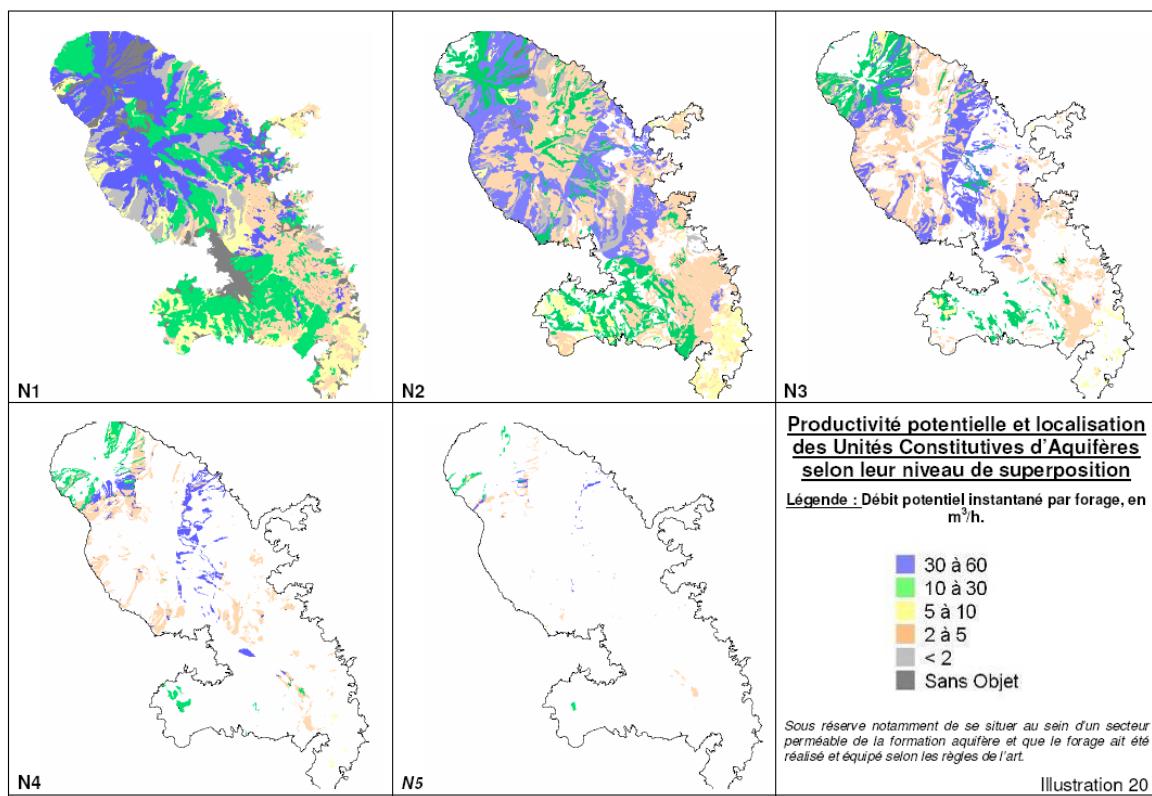


Illustration 24 : Productivité potentielle des unités constitutives d'aquifères (Vittecoq et al., 2007)

La carte de l'Illustration 25 permet de localiser les secteurs où le biseau salé a été mis en évidence par les campagnes géophysiques (sondages électriques) et/ou les forages de reconnaissance.

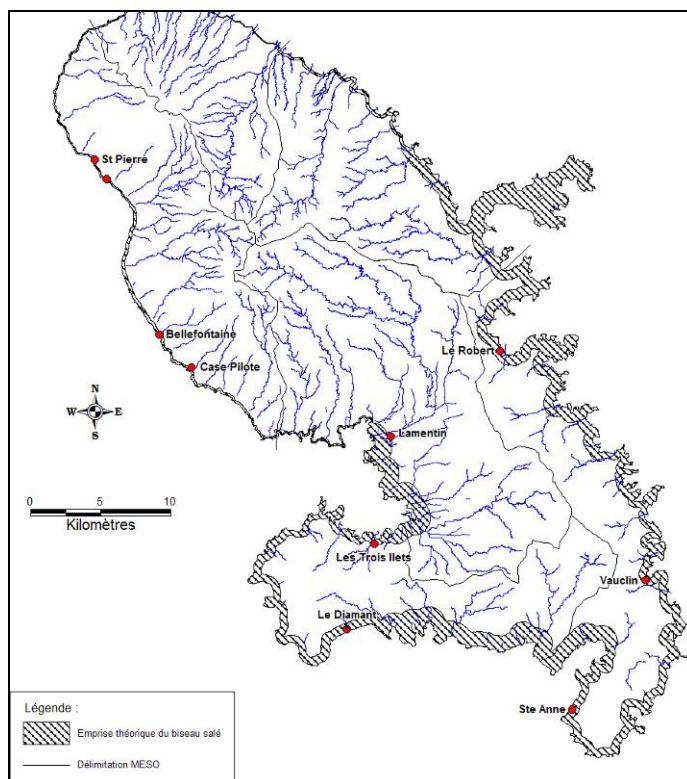
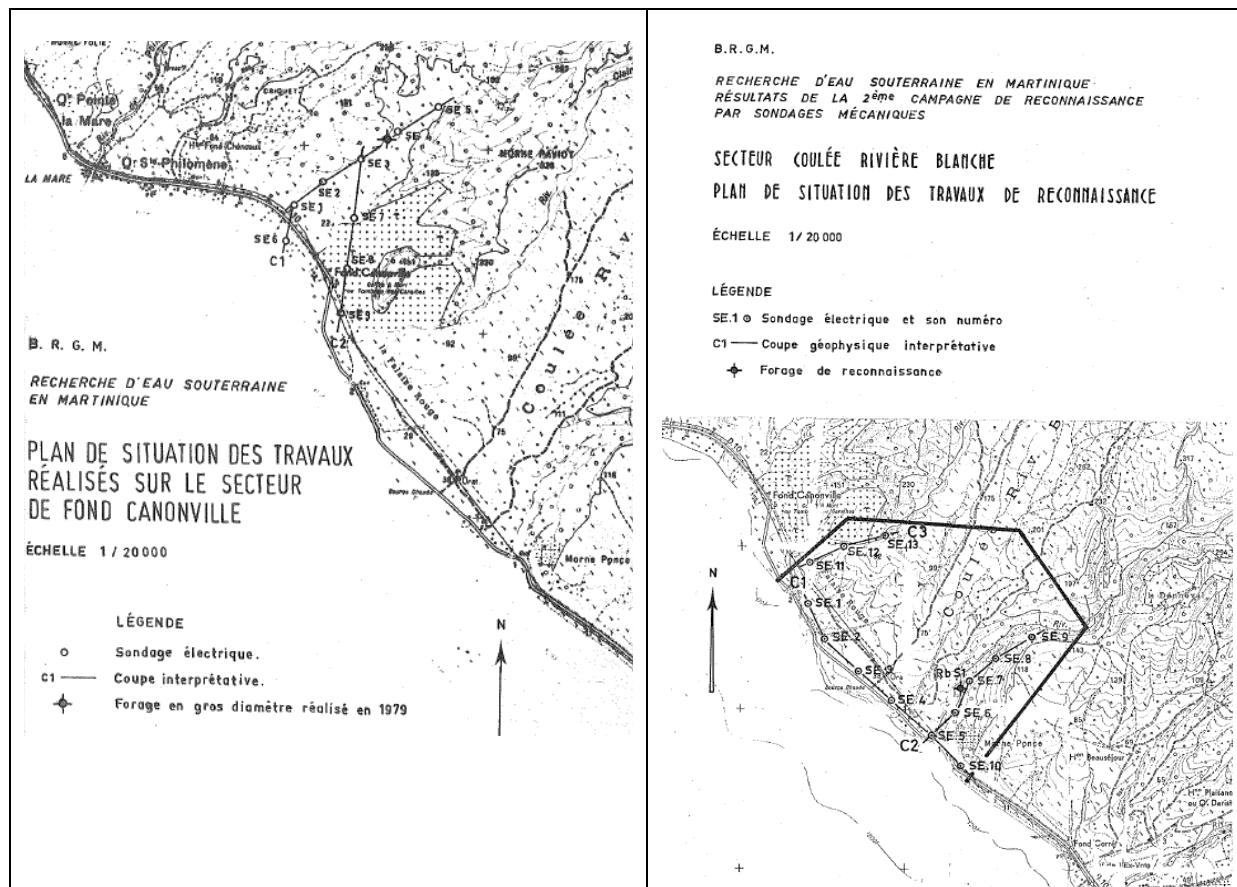


Illustration 25 : Localisation des secteurs où le biseau salé a été identifié en Martinique (points rouge)

Une synthèse de l'état des connaissances des principaux aquifères de la Martinique concernant la mise en évidence d'un biseau salé est présentée ci-après. Ces données sont issues d'études anciennes datant des années 1970-1980 essentiellement.

4.2.1. Saint-Pierre (1978-1981)

Deux campagnes géophysiques ont été menées en 1978 aux lieux-dits Fond Canonville et Coulée Rivière Blanche (Illustration 26), suivies de la réalisation d'un forage de reconnaissance sur chacun des sites. Des limites du biseau salé (courbe de conductibilité à 1 ohm.m) et de la zone de diffusion (courbe à 5 ohm.m) sont précisées sur les coupes géoelectriques interprétées par le BRGM (Illustration 27). Les analyses faites en fin de pompages d'essai ($55 \text{ m}^3/\text{h}$ pendant 20h pour Fond Canonville et $9 \text{ m}^3/\text{h}$ pendant 6h pour Coulée rivière Blanche) ne montrent aucun indice d'intrusion saline. A noter que les forages ont cependant été implantés à plus de 500 m de la côte.



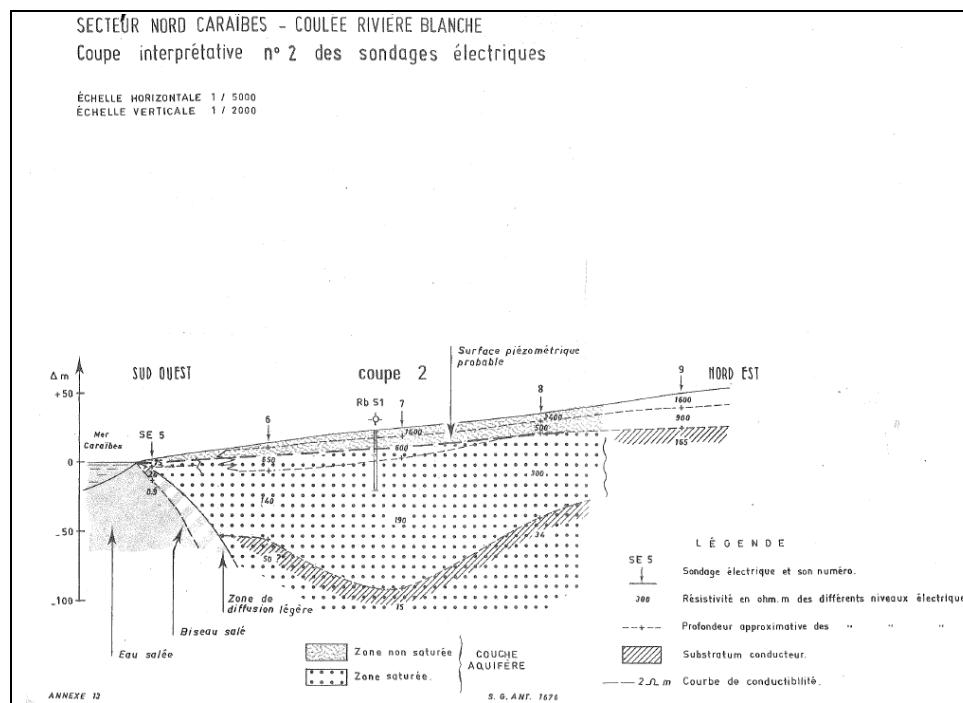


Illustration 27 : Coupe géoélectrique à Saint-Pierre (Paulin, 1978)

4.2.2. Bellefontaine (1980)

Deux coupes géoélectriques ont été proposées par le BRGM à partir de 8 sondages électriques implantés perpendiculairement à la côte, entre la RN2 et l'embouchure de la rivière Fond Laillet (Illustration 28). Dans leur ensemble, les coupes interprétables sont homogènes et montrent une diminution de la résistivité à l'approche de la mer.

Les acquisitions géophysiques ont mis en évidence une pénétration réduite du biseau salé (Illustration 29). En effet, seul le sondage électrique SE2, le plus proche de la mer, semble avoir recoupé l'interface eau douce-eau salée à la cote - 30m NGM.

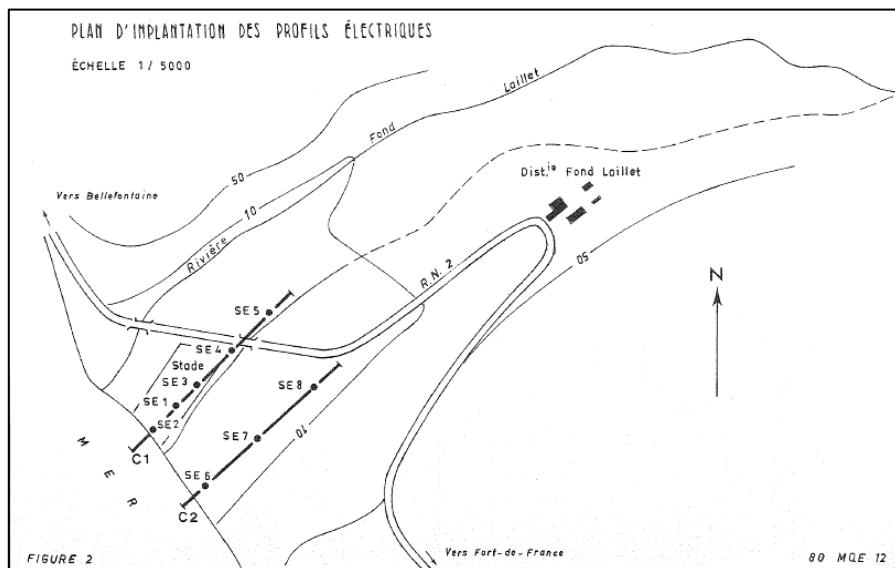


Illustration 28 : Plan de situation des sondages électriques implantés à Bellefontaine (Paulin, 1980)

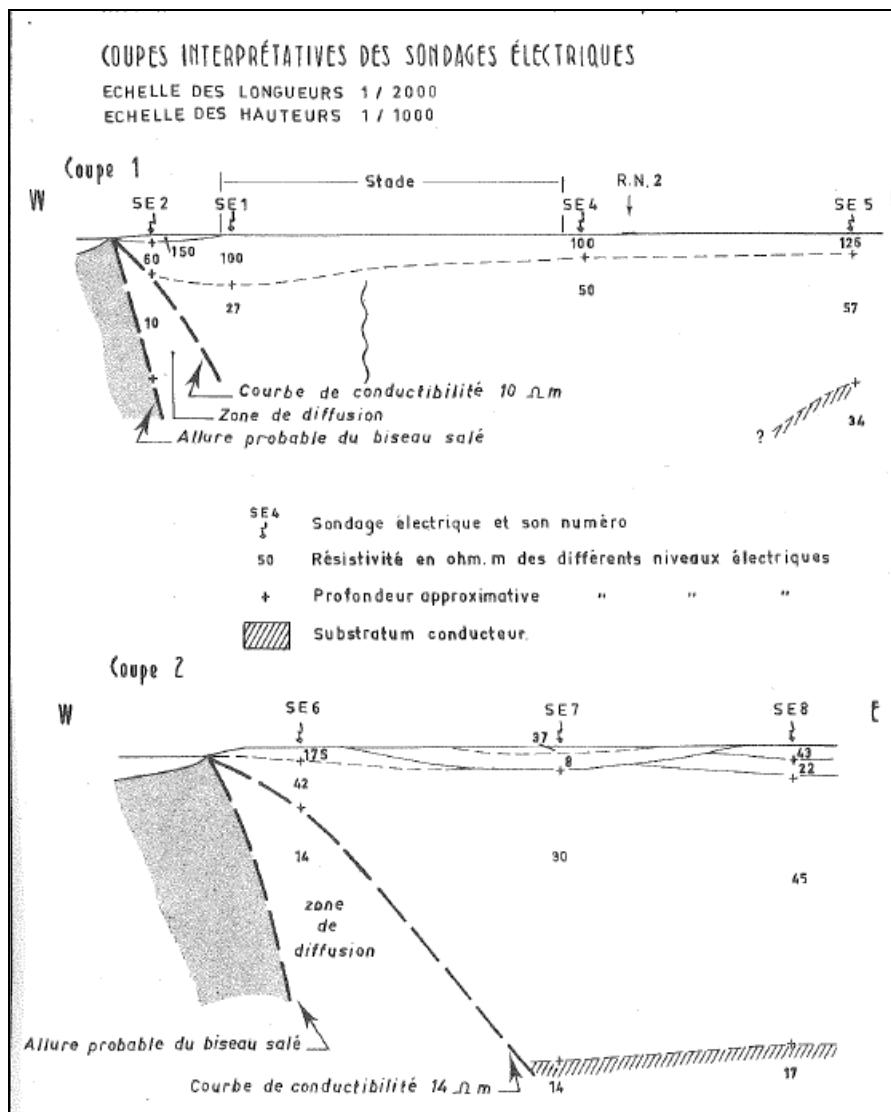
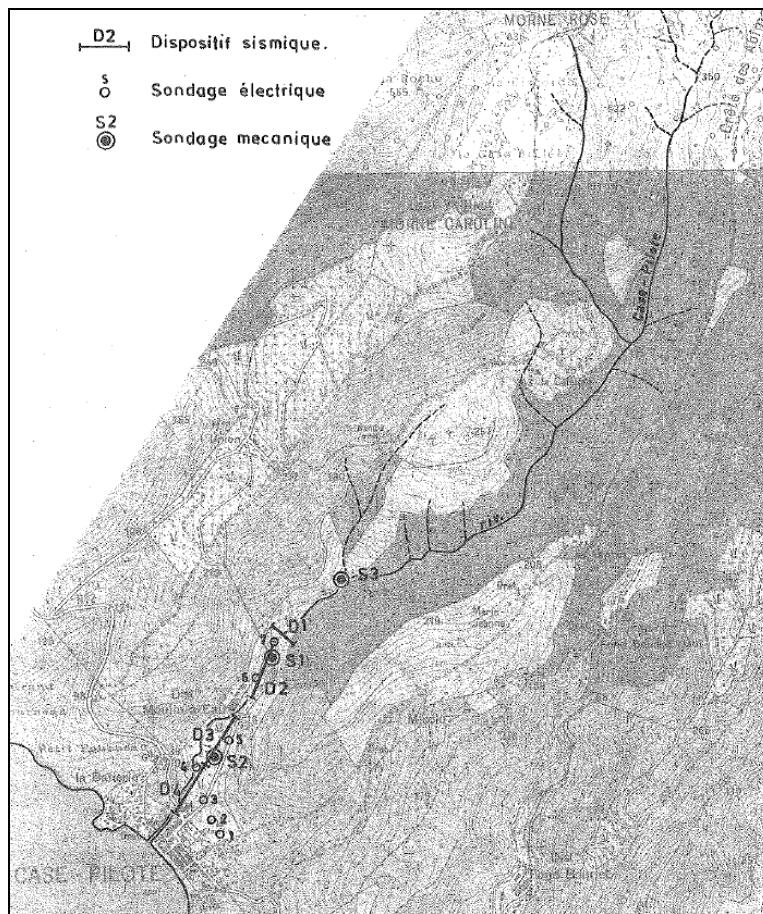


Illustration 29 : Coupes géoélectriques à Bellefontaine (Paulin, 1980)

4.2.3. Case Pilote (1973)

Lors de la prospection géophysique menée par la CPGF en 1973, le biseau salé n'a été suspecté qu'au droit du sondage électrique S4 où un horizon conducteur est détecté vers la cote - 22 m NGM (sondage le plus à l'aval en fond de vallée, Illustration 30). Sur les autres sondages électriques, le substratum est caractérisé par une remontée de la résistivité et l'interface eau douce / eau salée n'a pas été atteinte.

La chimie des eaux pompées sur les forages de reconnaissance S2 et S3 montre une certaine salinisation de l'eau vers l'aval. Elle reste cependant dans des limites acceptables avec une concentration en NaCl inférieure à 250 mg/l sur S2 (forage aval).



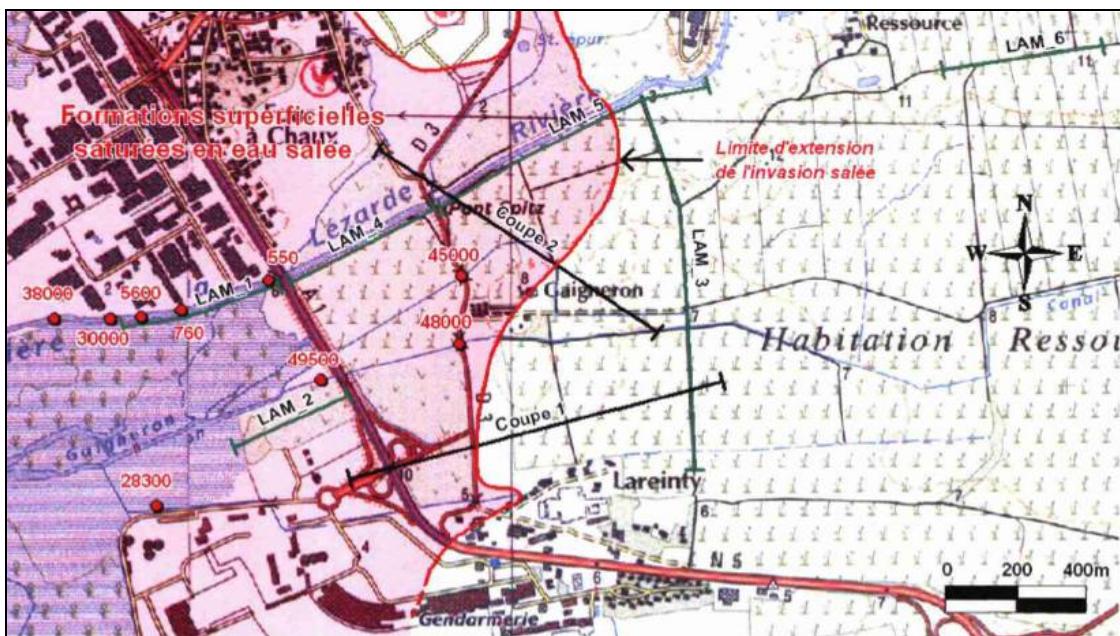


Illustration 31 : Implantation des panneaux électriques et extension de l'intrusion saline dans les formations superficielles au Lamentin (Vittecoq et al., 2007)

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- intrusion saline au sein des formations superficielles à proximité immédiate du littoral et des cours d'eau (alluvions sablo-argileuse et frange altérée du substratum volcanique à dominante argileuse avec des résistivités inférieures à 2 ohm.m) ;
- intrusion saline dans les couches superficielles plus importante au niveau des canaux (courant d'eau douce faible) et de la rivière Lézarde ;
- aucune intrusion saline détectée au sein des formations volcaniques profondes, potentiellement aquifères (résistivités de 15 à 20 ohm.m sur toutes les coupes géophysiques).

Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer ces résultats :

- les formations profondes résistantes présenteraient une perméabilité et une porosité efficace très faibles (possible saturation en eau salée, mais l'eau salée ne circulerait pas) ;
- la profondeur de l'interface eau douce / eau salée au sein des formations du substratum serait plus importante que celle investiguée par géophysique (Illustration 32).

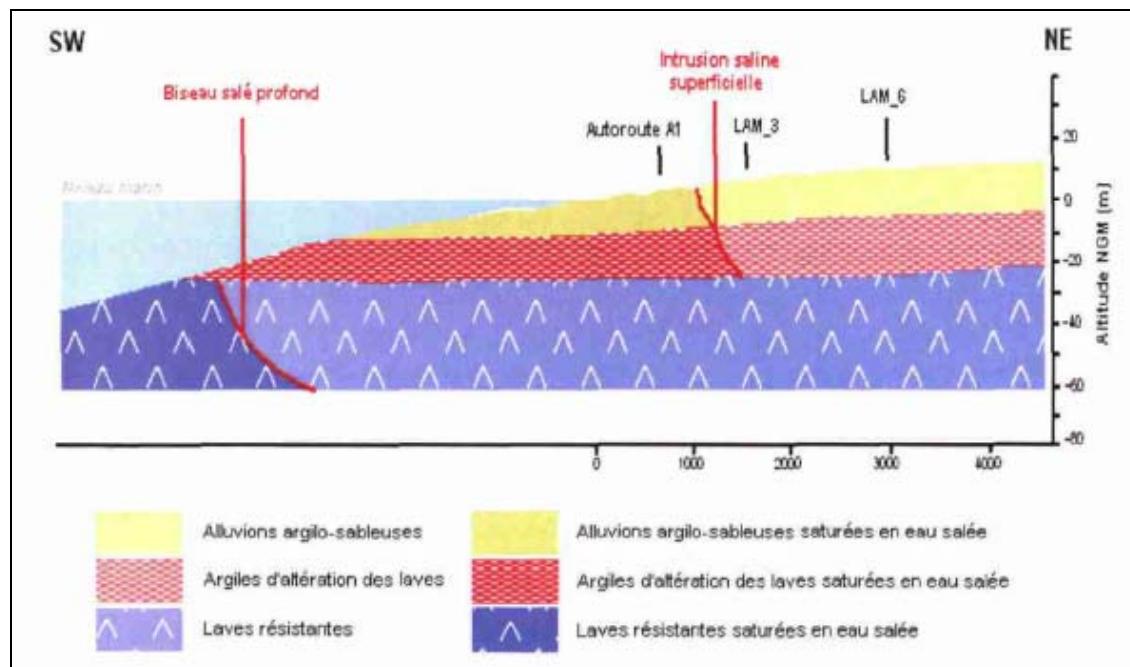


Illustration 32 : Coupe schématique de l'aval de la plaine du Lamentin selon l'hypothèse H2 (Vittecoq et al., 2007)

4.2.5. Rivière salée (2005-2006)

Des recherches en eaux ont été réalisées au lieu-dit Nouvelle Citée dans le but de pallier à la disponibilité insuffisante en eaux, durant la période de carême, pour les terres agricoles du secteur. A ce titre, le bureau d'études ANTEA a été chargé de la mise en œuvre d'une campagne géophysique et du suivi des forages de reconnaissance (Illustration 33).

Les prospections géophysiques (panneaux électriques) ne semblent pas avoir mis en évidence un horizon très conducteur pouvant correspondre au biseau salé.

Concernant les eaux prélevées sur le forage de reconnaissance, les ions chlorures et sodium sont en concentrations supérieures aux critères de potabilité, mais très nettement inférieure aux valeurs d'eaux de mer (35g/l de sel). Deux hypothèses ont été avancées par ANTEA pour expliquer ces valeurs :

- d'une part, la salinité observée pourrait témoigner de la présence d'un biseau salé et donc d'une origine partiellement marine des eaux de la nappe (non mis en évidence par la géophysique). Dans ces conditions, il est possible que l'exploitation du forage conduise à aggraver le phénomène, en favorisant la réalimentation par les eaux marines au détriment des arrivées d'eau douce. La cote piézométrique observée, correspondant approximativement au zéro NGM, ainsi que la profondeur des venues d'eau renforcent cette hypothèse ;
- d'autre part, le facies de l'eau pourrait témoigner d'une activité de type hydrothermale, avec une minéralisation d'origine terrestre et donc *a priori* plus stable. Cette hypothèse est renforcée par une teneur en magnésium forte (38mg/l) et par la température sensiblement anormale observée (30°C)).

Dans le cas de Rivière Salée, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure à la présence du biseau salé.

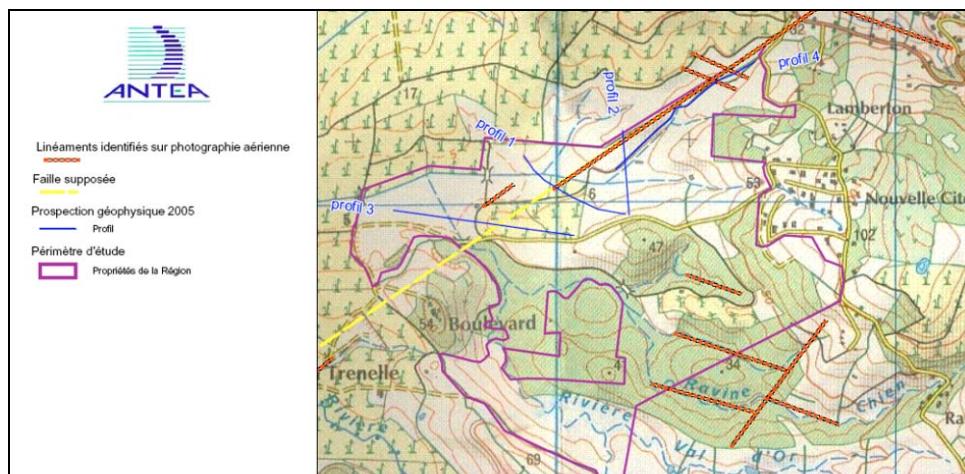


Illustration 33 : Investigations géophysiques mises en œuvre par ANTEA à Rivière Salée (2005)

4.2.6. Vatable, Les Trois Illets (1978-1979)

Au lieu-dit Vatable, le BRGM a mis en œuvre une campagne géophysique en 1978, suivie en 1979 de la réalisation de deux forages de reconnaissance (VATABLE 1 et VATABLE 2). La faible résistivité de l'horizon intermédiaire au droit du sondage électrique 1 (2,7 ohm.m) est présentée comme la conséquence de la diffusion de l'eau salée. Une zone d'influence du biseau salé est ainsi reportée sur la coupe géoélectrique C2. Pour les deux forages VATABLE 1 et 2, l'eau prélevée en cours de pompage d'essai présente une qualité médiocre à mauvaise, notamment en raison d'une forte teneur en chlorures, avec respectivement 410 et 1 200 mg/l.

4.2.7. Diamant (1979)

Au Diamant, l'étude du BRGM s'est déroulée en 2 phases : investigations géophysiques dans le but de délimiter l'emprise du biseau salé et réalisation d'un sondage de reconnaissance, DS2 à 300 m de la mer, visant les formations pyroclastites du Diamant au-delà du biseau salé (Illustration 34).

La zone de résistivité inférieure à 1 ohm.m a été interprétée comme le biseau salé et la courbe de conductibilité à 3 ohm.m comme la zone de diffusion des ions Na^+ et Cl^- (Illustration 35). Une intrusion saline au sein des formations pyroclastites semble ainsi bien démontrée. Le sondage DS2 a atteint un horizon conducteur attribué au mur de l'aquifère (andésites argilisées) et non au biseau salé (Illustration 35).

Les concentrations en ions Cl^- et Na^+ ont quasiment doublé pendant les 72 h du pompage d'essai tout en semblant se stabiliser sur la fin. Cela semble indiquer l'existence d'une zone de diffusion saline proche. En fin de pompage, la concentration en Cl^- est très largement supérieure à la norme française de potabilité (941 mg/l contre 250 mg/l).

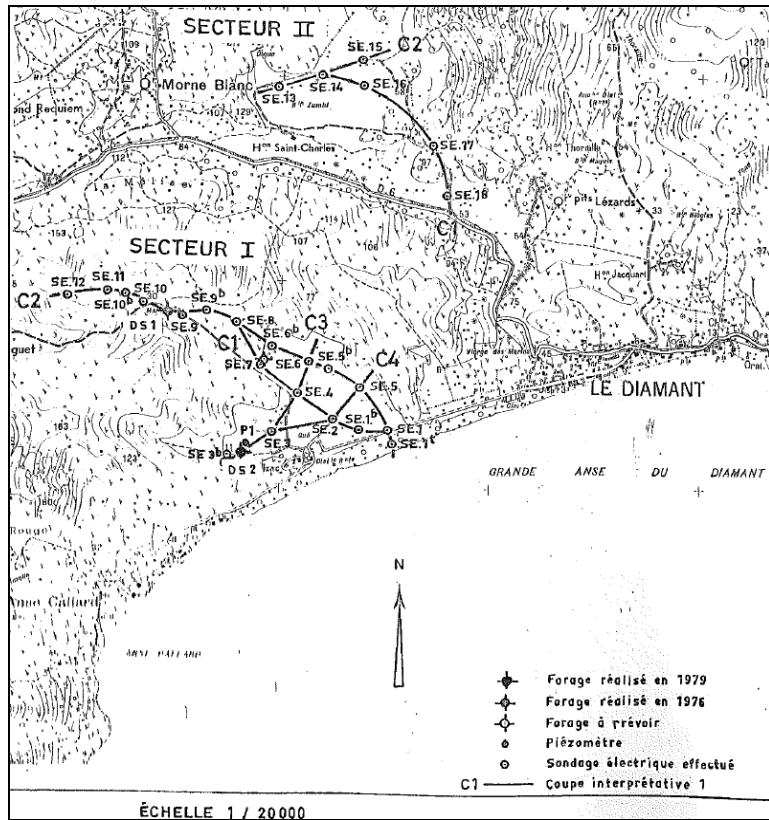


Illustration 34 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Diamant (Paulin, 1979)

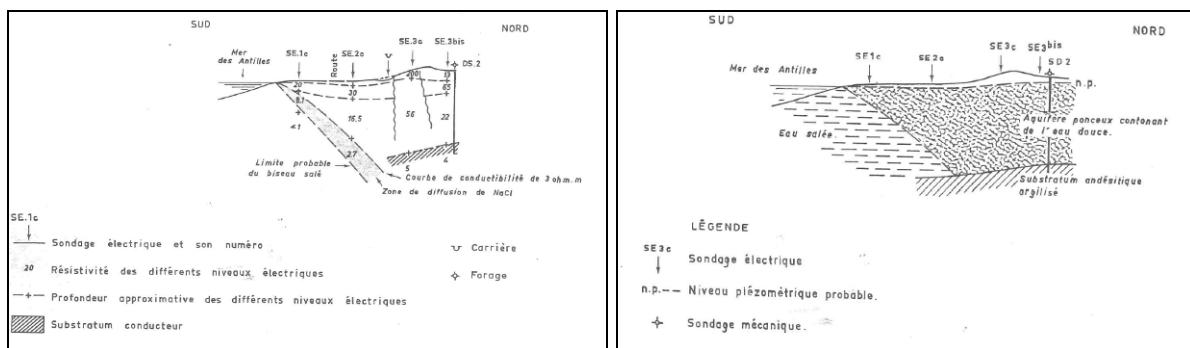


Illustration 35 : Coupe géoélectrique au Diamant (Paulin, 1979)

Par la suite, deux forages de reconnaissance DF1 et DF2 ont été réalisés plus en amont (au niveau des sondages électriques SE5b et SE7) (Paulin, 1981). Et contrairement à DS1 et DS2, les eaux pompées ne montraient aucune augmentation des concentrations des ions Na^+ et Cl^- et semblaient donc hors de l'influence du biseau salé.

4.2.8. Calcaires de Caritan, Saint-Anne (1975-1976)

En novembre 1975, la Compagnie de Prospection Géophysique Française a réalisé une étude sismique (dispositif de 360 m) et électrique (12 sondages électriques) à l'Anse Caritan, dans le but de déterminer la profondeur approximative du biseau salé au sein du massif calcaire et d'identifier les horizons les plus perméables.

A partir des coupes interprétatives, trois zones distinctes ont été mises en évidence :

- une première zone à l'Ouest, où le biseau salé a été reconnu à une profondeur inférieure à 20 m ;
- au Nord-Est, où le biseau salé n'apparaît pas sous les calcaires de surface (terrains volcaniques en profondeur) ;
- entre les 2 premières zones : au-dessus de 0 m NGM, un calcaire non saturé, en dessous de 0 m NGM, un calcaire saturé et non salé (résistivité entre 20 et 80 ohm.m), et en dessous un calcaire saturé et salé (résistivité < 6 ohm.m).

Deux sondages de reconnaissance ont ensuite été réalisés par le BRGM (Allard, 1976 ; Cottez et Mouret, 1976), S1 et S2. S1 a entièrement traversé la formation des calcaires de Caritan (25 m d'épaisseur) qui s'est avérée sèche. S2 s'est révélé productif (pompage d'essai à 4 m³/h) mais présentait une salinité élevée (jusqu'à 135 meq/l en Cl en pompage). Une exploitation prudente et contrôlée semblait cependant envisageable (débit de pompage proposé entre 2.5 et 3 m³/h).

4.2.9. Calcaires de Puyferrat, Vauclin (1976)

Avant de se jeter à la mer à la Grande Anse Macabou, la rivière Massel traverse une plaine où émergent des collines formées de calcaires. La campagne géophysique menée par la CPGF en décembre 1975 visait à déterminer l'épaisseur de l'horizon présumé calcaire et l'extension du biseau salé. Le biseau salé est nettement mis en évidence aux sondages 125, 307, 501, 503, 401. Au sondage 307, on voit l'envahissement par l'eau saumâtre au sein des deux horizons superficiels (présumés calcaires), moins dans le troisième horizon plus profond. Le sondage 505 n'est pas influencé par le biseau salé, il est comparable au sondage 303 plus qu'aux 503 et 501.

4.2.10. Le Robert (1981)

L'illustration 36 répertorie l'ensemble des investigations hydrogéologiques réalisées sur la commune du Robert.

Sur une des coupes géoélectriques (C3), les limites du biseau salé et de la zone de diffusion sont précisées (Illustration 37).

L'eau pompée au forage CFPA (proche de la coupe C3) semble fortement polluée par des venues d'eau de mer, contrairement au forage Fond Cacao d'excellente qualité chimique et sans variation de la concentration en chlorures pendant le pompage. L'eau prélevée sur le forage CFPA présente une concentration en chlorures de 1 600 mg/l.

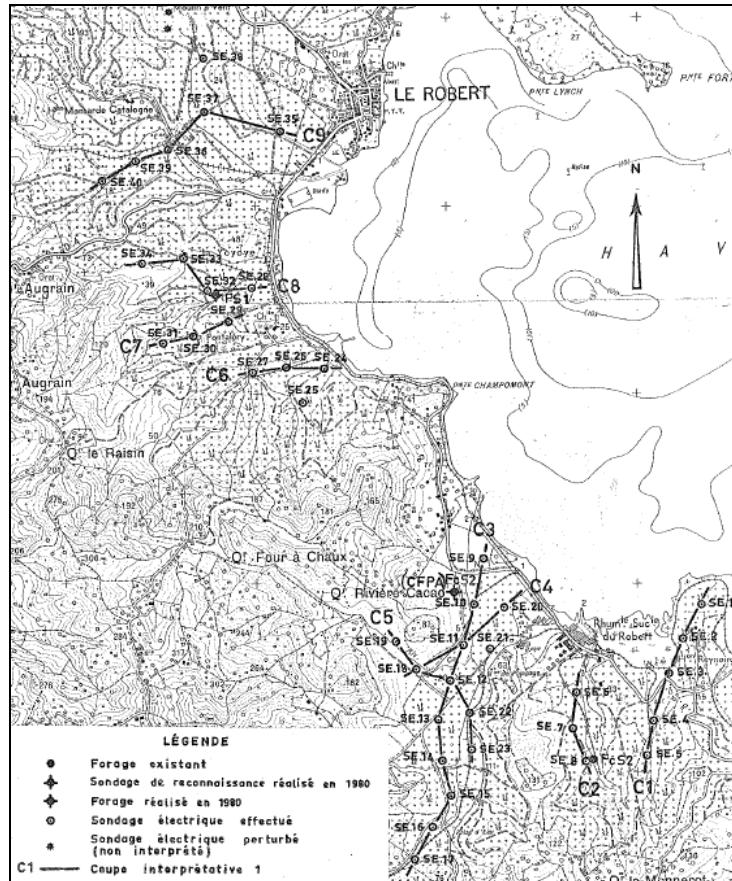


Illustration 36 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Robert (Paulin, 1981)

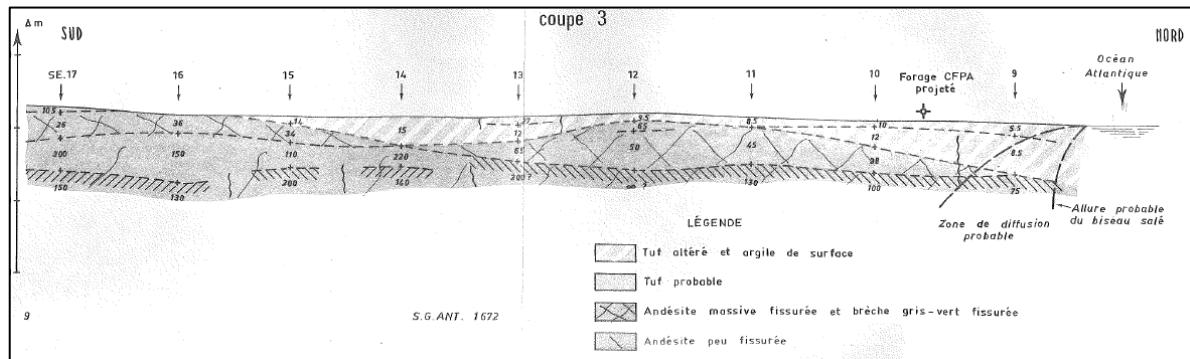


Illustration 37 : Coupe géoélectrique C3 au Robert (Paulin, 1981)

4.2.11. Basse vallée de la rivière Galion, Trinité (1978)

Les investigations géophysiques ne semblent pas avoir mis en évidence le biseau salé. En revanche, la chimie de l'eau et plus particulièrement l'équilibre entre calcium et sodium semble indiquer l'influence d'une interface eau douce – eau de mer.

Durant le pompage d'essai, un accroissement des teneurs en chlorures et en sodium a été observé : de 35,4 à 58,9 mg/l pour [Na] et de 42,6 à 48,9 mg/l pour [Cl].

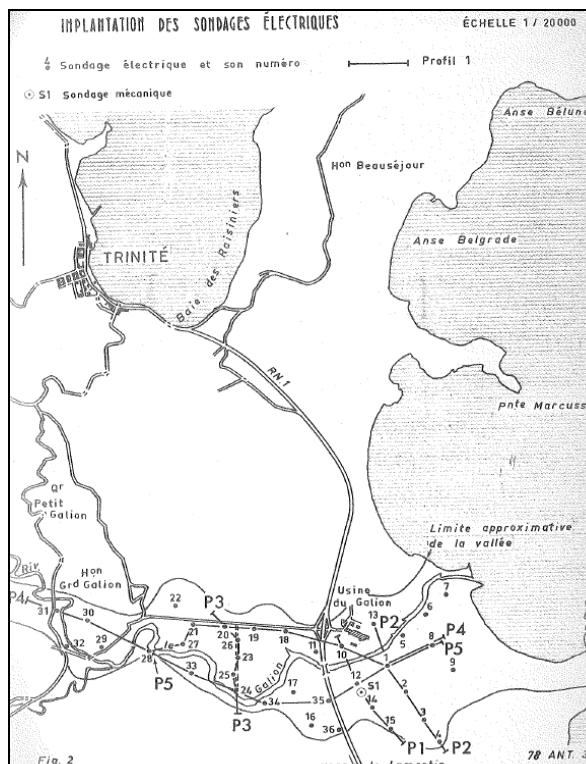


Illustration 38 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Trinité (Cottez et Paulin, 1978)

4.3. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS A LA REUNION

4.3.1. Données des rapports BRGM (1988 et 2005)

Sur le littoral Ouest, une représentation cartographique des courbes d'isorésistivité a été réalisée en 1988 par le BRGM. Cette cartographie repose sur des mesures directes (logs de conductivités) et indirectes (sondages électriques).

Les principales « intrusions » observées en 1988, localisées sur la carte de l'Illustration 39, se situent :

- Dans le secteur de l'Etang de Saint-Paul (milieu sédimentaire fluvio-marin, résistivité de 800 $\Omega\cdot\text{cm}$).
- Dans le secteur du Cap de la Houssaye.

- Dans le secteur de La Saline Les Bains une zone d'eau saumâtre très développée est présente au **Nord de l'Hermitage-Les-Bains** (des valeurs de l'ordre de 200 Ωcm sur la côte).
- Dans le secteur de Piton St Leu (entre Stella et Le Portail) l'extension des eaux saumâtres est plus marquée (petit bassin versant).
- Dans le secteur **d'Etang Salé Les Bains** des eaux saumâtres sont présentes mais l'eau devient plus douce vers l'Est (apports par les Basaltes).

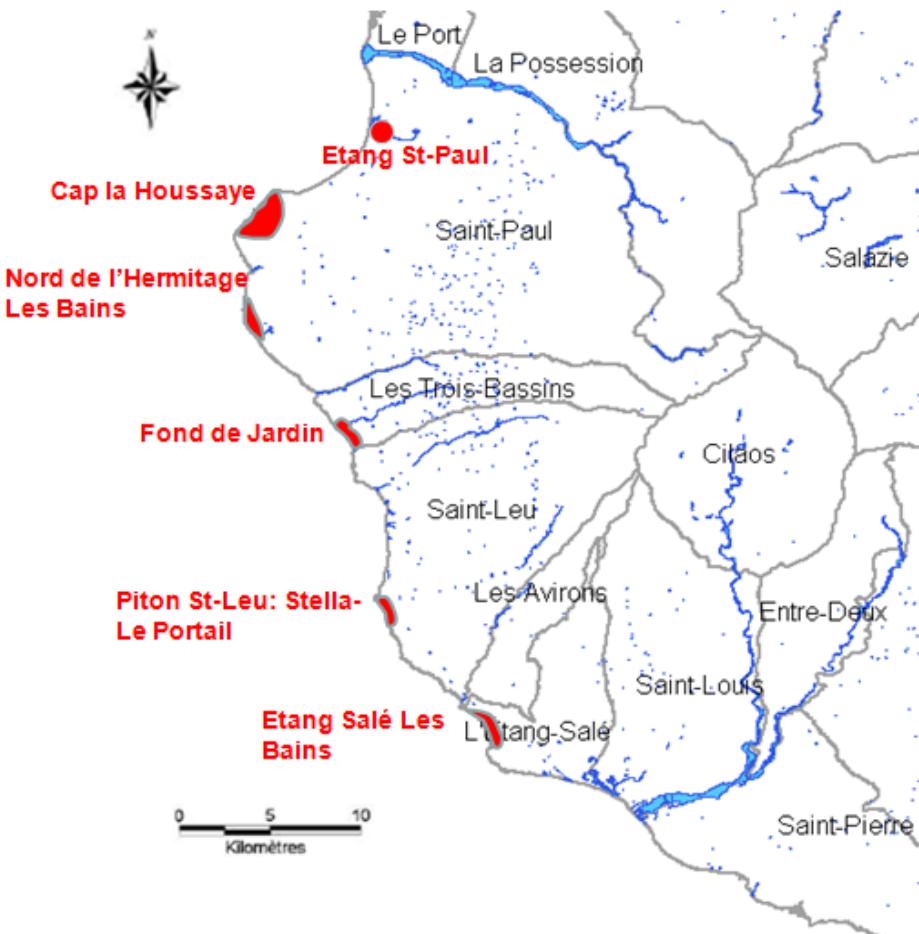


Illustration 39 : Localisation des secteurs où une salinisation des aquifères est observée (BRGM, 1988)

Le plus récent rapport de 2005 du BRGM sur les intrusions salines à La Réunion a permis d'identifier les ouvrages contaminés à partir d'une classification des ouvrages à risques en trois catégories :

- les ouvrages dont l'eau a une conductivité électrique supérieure à 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont identifiés comme « recoupant l'interface eau douce/eau salée » ou du moins la zone de transition¹,
- pour une conductivité électrique supérieure à 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ les ouvrages sont « soupçonnés d'être influencés par les intrusions salines » et enfin,
- une troisième catégorie correspond aux ouvrages pour lesquels une influence de l'intrusion saline est possible » pour des valeurs entre 80 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

¹ La conductivité de l'eau de mer est comprise entre 52 et 54 mS/cm .
BRGM/RP-59457-FR – Rapport intermédiaire

Ce sont là aussi les communes de la façade Ouest qui sont les plus soumises à l'aléa salinisation comme le montre la carte de l'illustration 40 extraite du rapport de 2005.

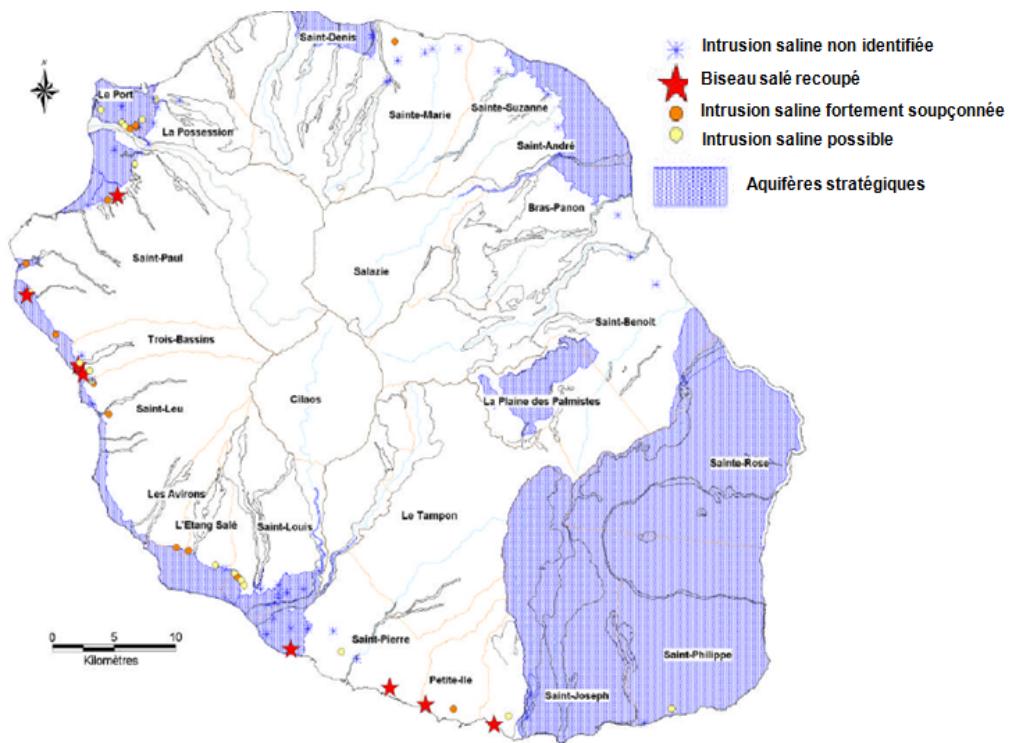


Illustration 40 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur l'Île de La Réunion (BRGM, 2005)

-**La commune du Port** connaît des problèmes d'intrusions salines qui résultent surtout de la présence d'eau naturellement saumâtre dans la nappe inférieure, qui remonte suite à l'exploitation de la nappe moyenne.

-Sur **la commune de Saint Paul**, l'interface eau douce/ eau salée est rencontrée par deux ouvrages (conductivité supérieure à 10 000 µS/cm), notamment à l'Ermitage à la profondeur de -25m.

-A **Trois Bassins**, l'eau salée (conductivité supérieure à 10 000 µS/cm) est rencontrée par deux piézomètres : à -20m à Fond de Jardin et -33m à Grande Ravine.

-Sur **la commune de Saint-Louis** des intrusions salines ont été soupçonnées sur plusieurs ouvrages,

-A **Saint-Pierre** l'interface eau douce-eau salée est rencontrée à -22m NGR au piézomètre Syndicat.

-Sur **le secteur de Petite-Ile**, l'interface a été recoupée par trois ouvrages.

On peut donc noter la présence de zones contaminées nouvellement identifiées entre 1988 et 2005 dans le sud de l'île entre St-Pierre et St-Joseph.

4.3.2. Données du SDAGE 2010-2015 et de la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE)

Le paramètre « intrusion saline » est la cause du Risque de Non atteinte du Bon état de l'Eau d'ici 2015 (RNABE 2015) sur les aquifères suivants :

- L'aquifère de Petite-Ile, Saint-Pierre, Le Tampon
- L'aquifère d'Etang-Salé, Saint-Louis
- L'aquifère de Trois Bassins
- L'aquifère de Saint-Paul
- L'aquifère du Port, La Possession

Ces résultats recoupent ceux des rapports BRGM de 1988 et 2005.

5. Origine de la salinité et traitement de données de conductivité électrique

5.1. ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN GUADELOUPE

Au regard de l'état des lieux présentés dans le chapitre précédent, certaines zones des aquifères Guadeloupéens sensibles aux intrusions d'eau salée ont été ciblées en vue de déterminer l'origine de la salinisation (naturelle et/ou anthropique). Les zones ciblées sont les suivantes :

- les Plateaux du Nord et l'est des Plateaux de l'Est de l'aquifère de Grande-Terre pour lesquelles certains captages AEP présentent des indices de salinisation ;
- l'aquifère de Marie-Galante dans son intégralité du fait que les eaux souterraines représentent l'unique ressource en eau potable de l'île.

Les données disponibles sont issues :

- pour la chimie des eaux : du réseau de suivi qualité de la DIREN, du réseau de surveillance de l'état chimique des eaux souterraines au titre de la DCE et du contrôle sanitaire de la DSDS ;
- pour la pluviométrie : des stations météorologiques de Météo France ;
- pour les prélèvements AEP : de la Générale des Eaux exploitant les captages ;
- pour les données piézométriques et de conductivité : du réseau patrimonial du BRGM et du réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines au titre de la DCE.

La valorisation des données disponibles pour les zones ciblées ont permis de déterminer les faciès chimiques des eaux souterraines et d'apprécier une éventuelle intrusion d'eau salée. Par ailleurs des corrélations entre éléments majeurs ont été recherchées, ainsi que l'influence de la pluviométrie et des prélèvements sur la salinité des aquifères.

Concernant la Grande-Terre, les faciès chimiques des eaux souterraines ont été établis à partir d'un diagramme de Piper pour trois forages AEP dans les Plateaux du Nord (Pelletan, Beauplan et Charropin) et deux forages AEP dans les Plateaux de l'Est (Celcourt et Duchassaing) pour la période de carême (Illustration 41). Le carême est représentatif de la période de basses eaux, les forages sont alors plus sensibles à une salinisation en raison de la faible pluviométrie, couplée à des prélèvements plus importants.

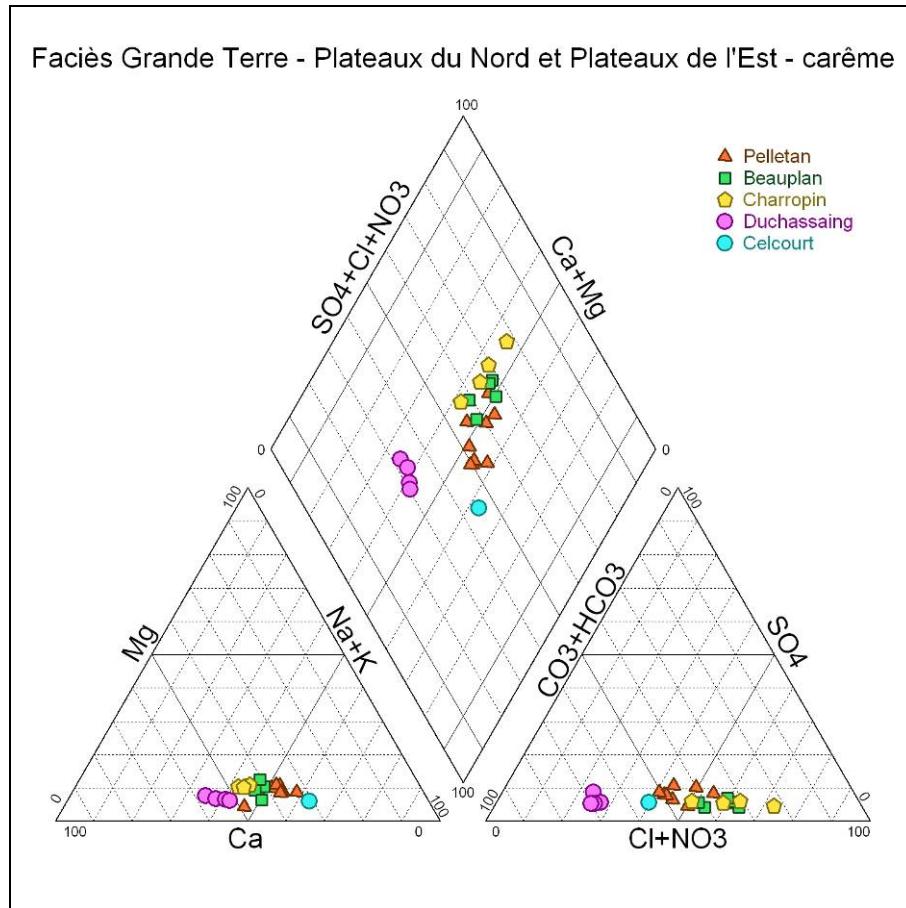


Illustration 41 : Diagramme de Piper – Plateaux du Nord et Plateaux de l'Est de Grande-Terre en période de carême (2000-2009)

Le secteur le plus sensible est le nord de la Grande-Terre où le faciès des eaux souterraines est chloruré sodique ; une certaine disparité subsiste cependant en fonction des années pour ce secteur en période de carême. Concernant les Plateaux de l'Est, le forage de Duchassaing présente un faciès bicarbonaté calcique, alors que le forage de Celcourt tend vers un faciès chloruré sodique. La salinité des eaux souterraines de ce secteur est vraisemblablement due à une intrusion marine. Dans l'ensemble, la pluviométrie permet de compenser l'impact des prélèvements.

Au regard des différentes études déjà réalisées sur le secteur, certaines limites subsistent quant à l'interprétation des données chimiques. Les analyses chimiques disponibles sur les captages AEP (une à deux par an) ne permettent pas de distinguer les phénomènes interannuels des phénomènes saisonniers. De plus, l'analyse des puits exploités pour l'alimentation en eau potable ne constitue qu'une fraction de l'étude d'un réseau de qualité. Des analyses doivent également être effectuées sur des points non exploités (non perturbés) afin d'avoir une image spatiale de la salinité et de distinguer les phénomènes de salinisation très localisés ou accidentels des phénomènes impactant plus largement l'aquifère.

Les données issues du réseau de suivi piézométrique du BRGM (niveaux d'eau et conductivité) ont permis de mettre en évidence des variations de conductivité liées aux fluctuations piézométriques (Illustration 42).

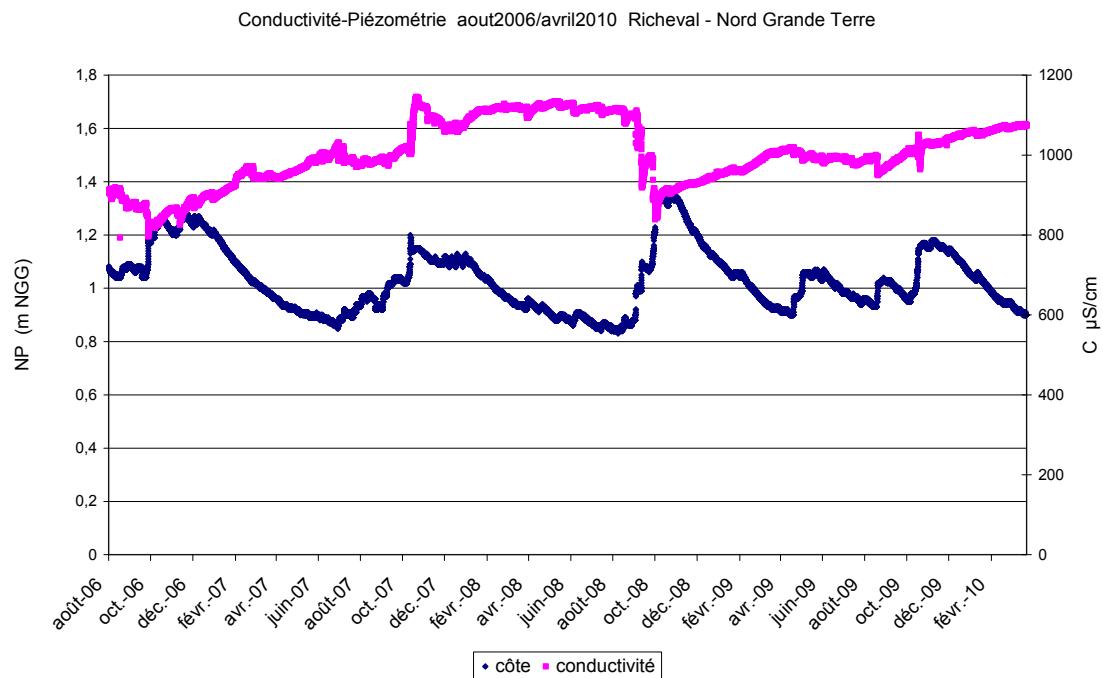


Illustration 42 : Chroniques de conductivité et de niveau piézométrique à Richeval (2008-2010)

Les eaux souterraines de Marie-Galante présentent un faciès bicarbonaté calcique en carême (Illustration 43). Il n'y a pas de tendance évolutive vers un faciès chloruré sodique.

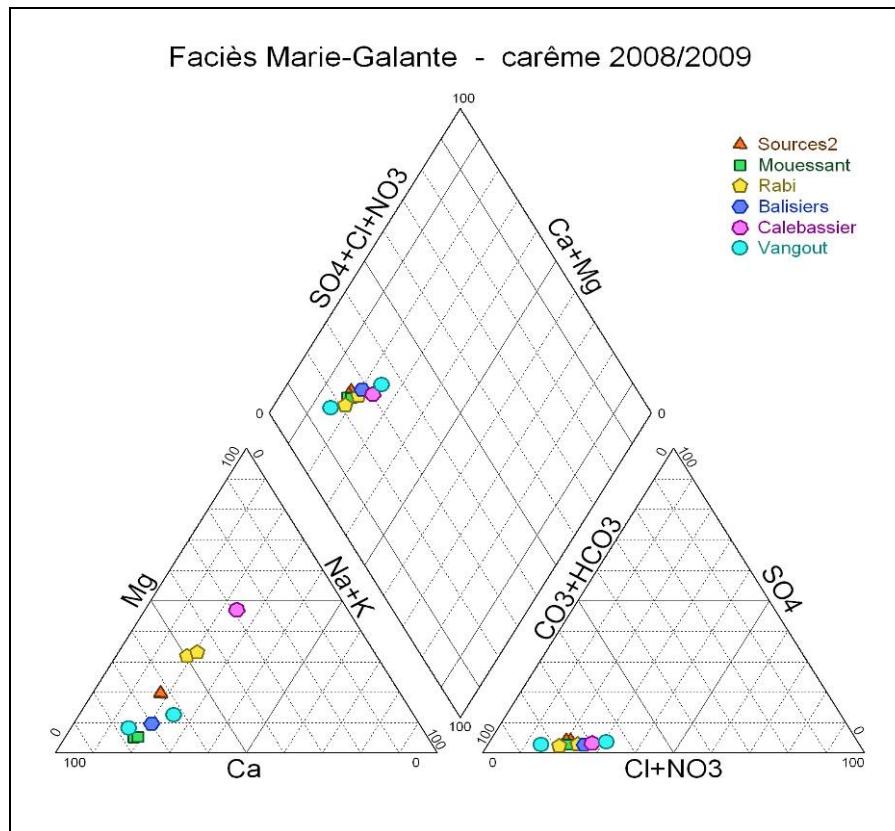


Illustration 43 : Diagramme de Piper de Marie-Galante en période de carême (2008-2009)

De manière générale, les eaux souterraines de l'unité des Hauts présentent des teneurs en chlorures et une conductivité inférieures aux normes de qualité AEP qui sont respectivement de 200 mg/l et 1100 µS/cm. En effet, la concentration maximale en chlorures enregistrée sur les sept forages des Hauts est de 112 mg/l (Calebassier et Etang Noir); quant à la conductivité, celle-ci n'excède pas 980 µS/cm (Calebassier). Ces constats peuvent s'expliquer par la présence du substratum volcano-sédimentaire au centre du système des eaux et qui joue un rôle de protection vis-à-vis des remontées verticales d'eau salée.

De manière générale, les teneurs en chlorures et la conductivité sont assez variables dans le temps, alors que les prélèvements sont en augmentation depuis 1999 (*Dumon et al.*, 2009). Globalement, sur une échelle de temps de plusieurs années, il n'a pas été possible de faire ressortir une tendance d'évolution pour les chlorures et la conductivité en corrélation avec les prélèvements. Les données exploitées proviennent de différents producteurs et sont très hétérogènes. En effet, certains prélèvements sont réalisés à des périodes irrégulières et à une fréquence peu représentative des variations saisonnières (une fois par an ou tous les deux ans). Afin de caractériser une situation représentative de la réalité à l'échelle locale ou globale, il est indispensable d'acquérir des données à des pas de temps réguliers sur les forages concernés et à une fréquence représentative à minima des variations saisonnières (en carême et en hivernage).

5.2. ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN MARTINIQUE

L'étude du fond géochimique des eaux souterraines de la Martinique a permis de caractériser les principales sources d'éléments dissous : l'eau de pluie, la lithologie et l'eau de mer (via l'interaction avec de l'eau de mer fossile et/ou le biseau salé) (*Brenot et al.*, 2008 ; *Lions et al.*, 2008). Pour ce faire, une analyse couplée de la géochimie élémentaire avec une approche isotopique (isotopes H et O de l'eau, du Sr et du B) a été réalisée.

Dans le but de proposer une première photographie de la salinité des eaux souterraines à l'échelle de la Martinique, les principaux résultats obtenus à partir des qualimètres du réseau de surveillance DCE sont rapportés ci-après.

Les concentrations en Na et Cl (Illustration 44), les signatures isotopiques en Sr (Illustration 45) et en B (Illustration 46) permettent de mettre en évidence les points pour lesquels le contrôle de l'eau salée sur la géochimie des eaux souterraines est le plus marqué. Cela ne signifie pas nécessairement que ces forages captent l'interface entre les eaux souterraines et l'eau de mer, mais uniquement que les eaux souterraines ont intégré des éléments dissous provenant d'eau salée :

- les points Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) et Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) présentent à la fois des concentrations élevées en Na ($>3,8 \text{ mmol.L}^{-1}$), Cl ($>3 \text{ mmol.L}^{-1}$), B ($>6,3 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$) et Sr ($>3 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$), des signatures isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0,70576$) et en B ($\delta^{11}\text{B} > 31\text{\textperthousand}$) compatibles avec une contribution d'eau de mer ;
- les points Le Galion (Indice BSS : 1175ZZ0154, Trinité) et Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024, Prêcheur) présentent des signatures isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70722$ et $0,70677$ respectivement) et des concentrations en Sr ($>1,1 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$) compatibles avec une contribution d'eau de mer malgré des concentrations peu élevées en B ($<5 \text{ mmol.L}^{-1}$), pour ces deux points, et en Na ($< 1,3 \text{ mmol.L}^{-1}$), et Cl ($< 0,7 \text{ mmol.L}^{-1}$), pour le point du Galion.

D'autres points se démarquent dans une moindre mesure : Anse Charpentier (1169ZZ0006, Marigot), Fond Laillet (1173ZZ0082, Bellefontaine), La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, François), Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François), Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert), Vatable (1181ZZ0132, Trois Illets), Nouvelle cité (Indice BSS : 1182ZZ0160, Rivière Salée), La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote), Puyferrat (Indice BSS : 1183ZZ0026, Vauclin), Fougainville (Indice BSS : 1183ZZ0052, Rivière Pilote), Habitation Dizac (Indice BSS : 1184ZZ0001 et 1184ZZ0016, Diamant), Stade communal (1185ZZ0120, Sainte Luce), et Cap Macré (Indice BSS : 1186ZZ0119, Marin).

Afin de tester la possible contribution d'éléments dissous provenant du biseau salé, une carte représentant l'emprise supposée du biseau salé a été proposée par Brenot et al. (2008) (Illustration 47). L'approche simplifiée sur laquelle s'appuie la réalisation de cette carte repose sur le principe suivant : le risque de salinisation des eaux souterraines par de l'eau de mer est maximal lorsque la différence de niveau piézométrique entre ces deux réservoirs est inférieure à 2 m. Pour chaque aquifère côtier, une pente moyenne fictive de la nappe a ainsi été calculée à partir des données de forages disponibles (Vittecoq et al, 2007).

Au regard de ces résultats, le biseau salé n'est pas toujours pertinent pour expliquer la géochimie des eaux souterraines. D'autres hypothèses ont été avancées pour la majorité des points :

- une première hypothèse est celle de la remobilisation d'eau de mer fossile, capturée dans les formations lithologiques et qui aurait une signature isotopique en Sr proche de l'eau de mer actuelle. Cette hypothèse pourrait expliquer les compositions géochimiques observées pour Nouvelle cité (Indice BSS : 1182ZZ0160, Rivière Salée), Fougainville (Indice BSS : 1183ZZ0052, Rivière Pilote), La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, François), Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François) et Cap Macré (Indice BSS : 1186ZZ0119, Marin). En effet ces points se trouvent dans des formations géologiques qui se sont soit mises en place en contexte sous-marin, soit ont vu a posteriori des invasions marines ;
- une autre hypothèse, déjà formulée par Baran et al. (2006), est celle de l'altération de rares formations calcaires. Ces formations sont très faiblement représentées sur la Martinique mais peuvent contrôler ponctuellement la géochimie des eaux souterraines de certains points de prélèvement. En effet les coupes des forages Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) et La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote) mettent en évidence la présence de formations calcaires. La signature isotopique en Sr attendue pour ces formations calcaires d'âge Miocène est de l'ordre de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,7090$ (De Paolo, 1986), proche de la signature de l'eau de mer actuelle ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70919$, Sanjuan et al., 2003). De plus, les concentrations en Ca mesurées pour ces points plaident bien en la faveur de la dissolution de roches carbonatées ;
- une dernière hypothèse est celle de l'apport d'éléments dissous et notamment de Ca via les apports de poussières continentales par les pluies (issues de source(s) locale(s)) et/ou à une circulation de particules carbonatées plus générale à l'échelle de l'atmosphère comme l'ont envisagé Négrel et al. (1997).

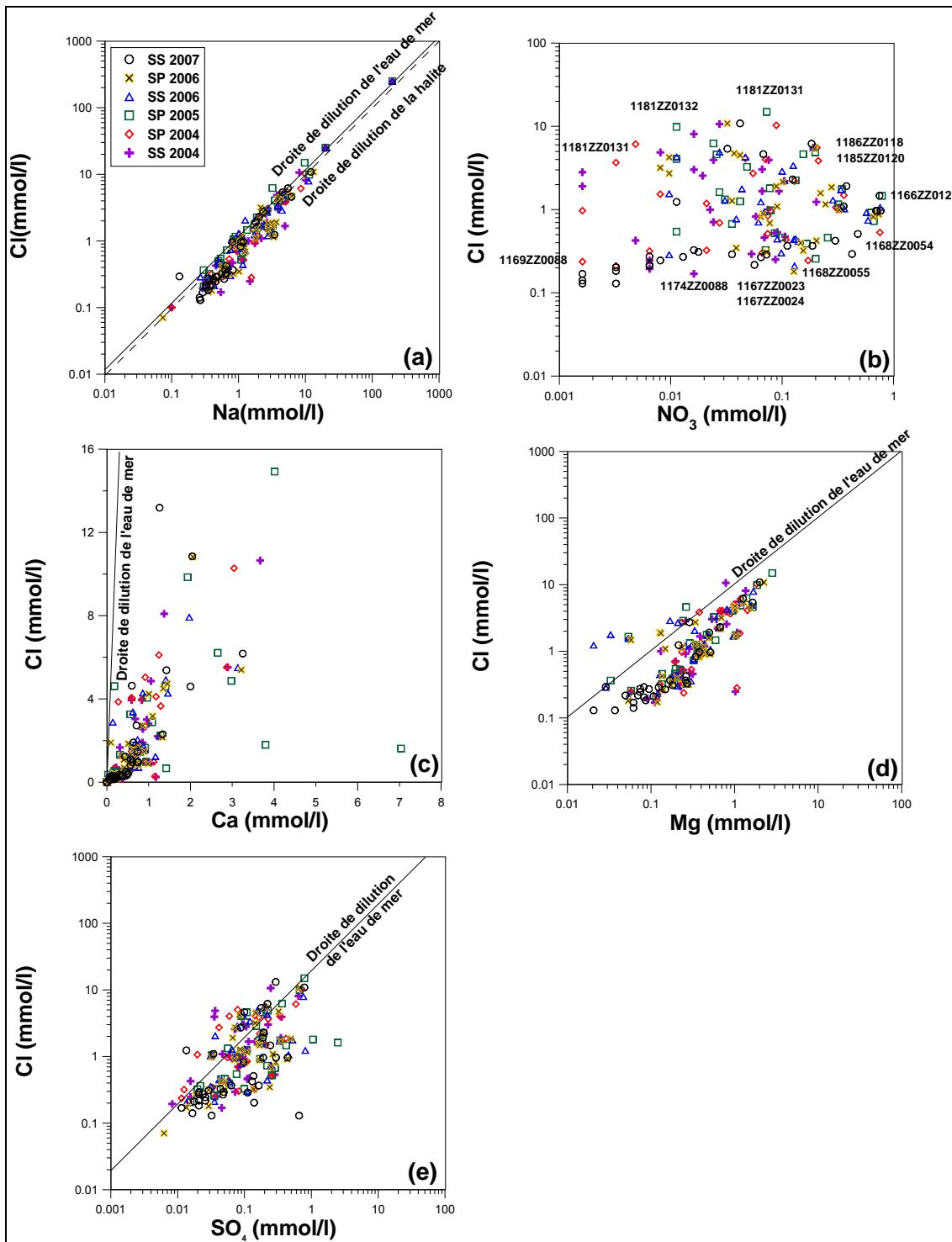


Illustration 44 : Cl vs. Na (a), Cl vs. NO_3 (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. Mg (d), Cl vs. SO_4 (e) pour les qualitomètres du réseau de surveillance DCE de la Martinique. SP : saison des pluies, SS : saison sèche (Brenot et al., 2008)

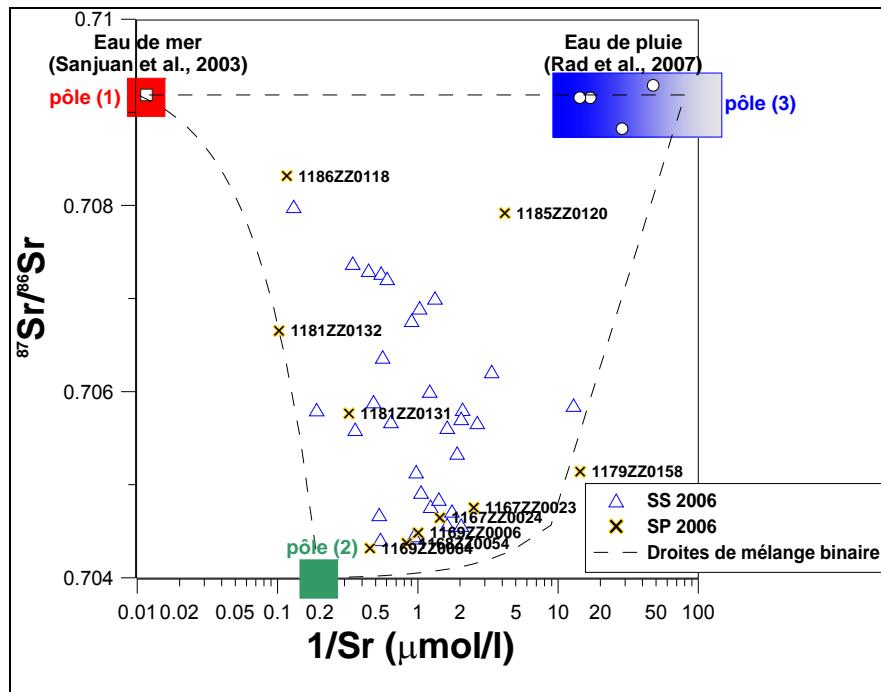


Illustration 45: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$, SS : saison sèche, SP : saison des pluies (Brenot et al., 2008)

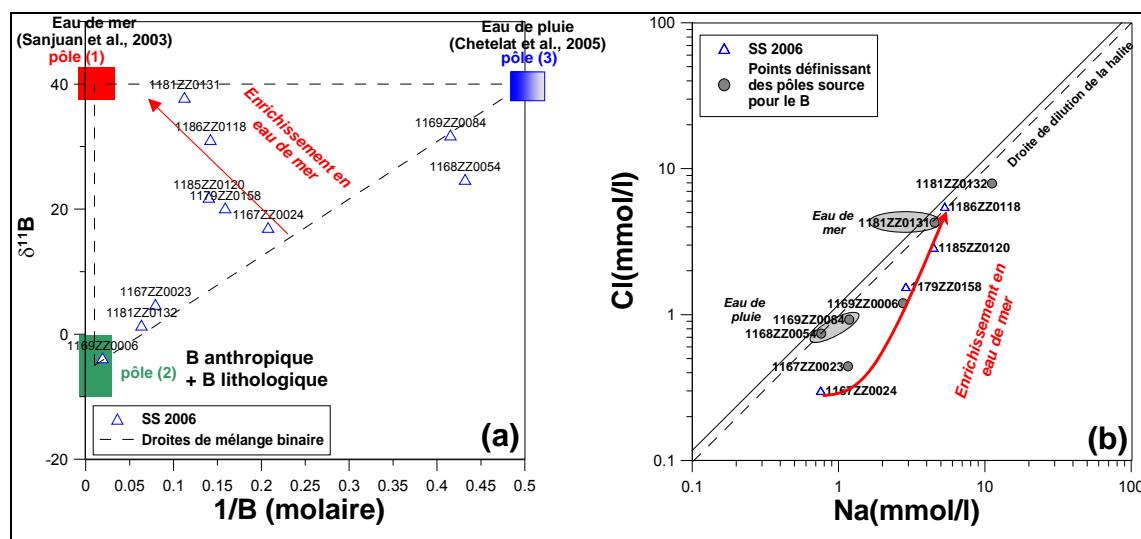


Illustration 46 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/\text{B}$ (a), Cl vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche) (Brenot et al., 2008)

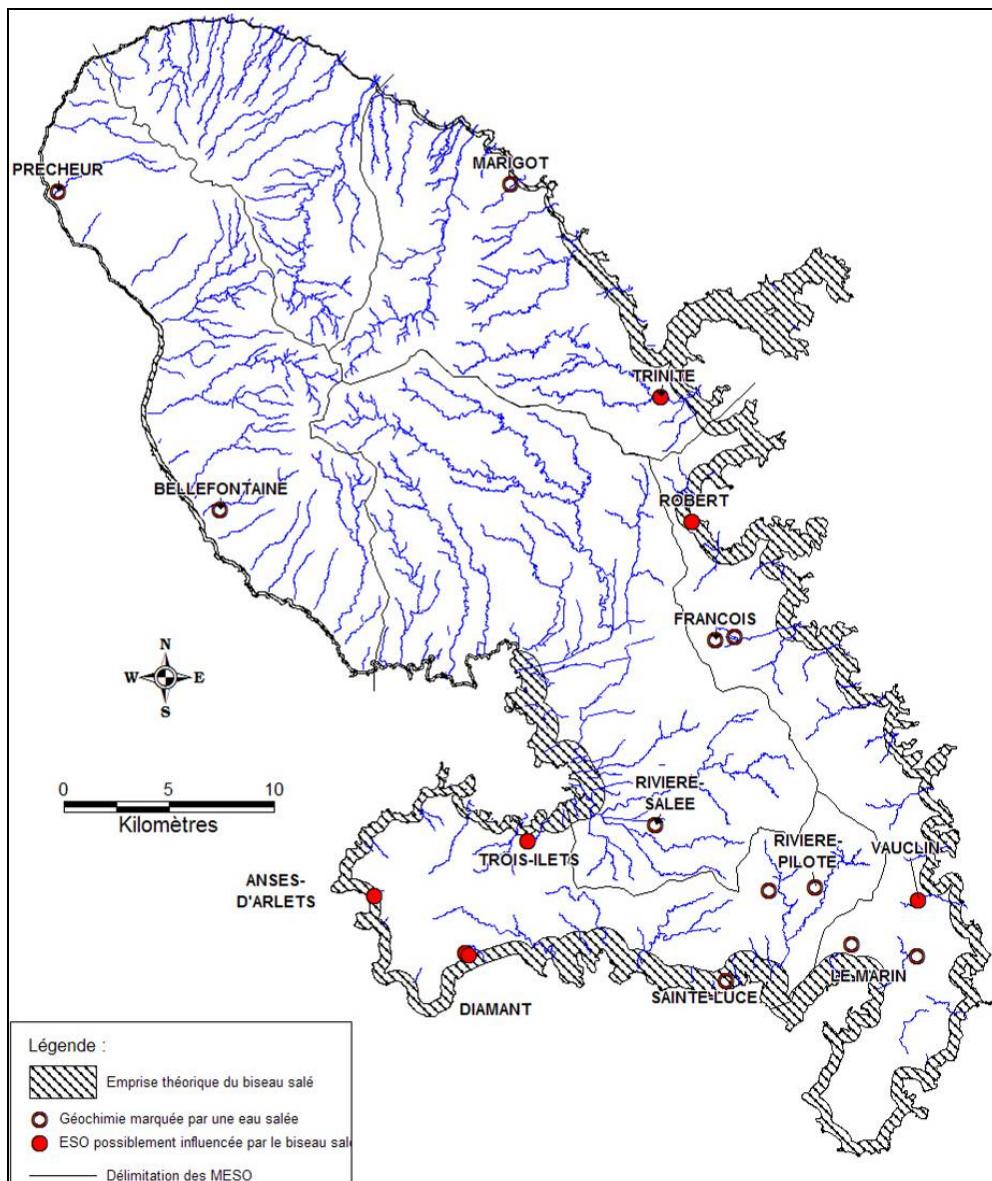


Illustration 47 : Emprise théorique du biseau salé et points de surveillance présentant une salinisation de l'eau

En définitive, l'apport d'éléments dissous provenant du biseau salé pourrait éventuellement être suspecté pour : Le Galion (Indice BSS : 1175ZZ0154, Trinité), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois Ilets), Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet), Habitation Dizac (Indice BSS : 1184 ZZ0001 et 1184ZZ0016, Diamant), Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert) et Puyferrat (Indice BSS : 1183ZZ0026, Vauclin) (Cf. Illustration 47).

5.3. TRAITEMENT DES DONNEES DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE A LA REUNION

L'objectif est d'interpréter les données de logs de conductivités de l'Office de l'eau afin de repérer les secteurs où une salinisation est constatée, où l'interface est recoupée et de corrélér les fluctuations de la conductivité avec d'autres paramètres. Cette exercice permet en appréhendant au mieux les caractéristiques des zones de transition eau douce/eau salée des aquifères de la côte Ouest de La Réunion de préparer une éventuelle phase de modélisation.

5.3.1. Démarche suivie

Les données de l'Office de l'eau de La Réunion sont constituées, entre autres, par des logs de conductivité réalisés sur différents piézomètres de la zone littorale de La Réunion. Il s'agit de logs réalisés en condition naturelles (sans pompage). Certains logs sont réalisés depuis 1986 jusqu'à aujourd'hui, mais tous les piézomètres n'ont pas été suivis avec la même régularité. Les logs réalisés pour des piézomètres de la partie Nord de l'île (Saint-Denis et Bras Panon) ont été écartés : ils ne montrent pas des valeurs de conductivité élevées et sont situés dans des secteurs à forte pluviométrie (supérieure à 1 000 mm par an).

Ces données permettent de suivre l'évolution de la conductivité au fil des années et suivant la profondeur et ainsi de surveiller une éventuelle contamination marine dans la zone littorale.

Pour pouvoir identifier une salinisation, des valeurs de conductivité de référence doivent être connues :

- L'eau de mer a une conductivité moyenne de 52 000 à 54 000 µS /cm
- Les eaux souterraines réunionnaises sont en moyenne peu minéralisées (hors eaux thermales) : on peut donc supposer que des conductivités supérieures à 300 µS/cm dans les aquifères côtiers ont soit pour origine une pollution aux nitrates ou aux sulfates, soit une contamination par de l'eau salée (et cela, quel que soit le processus : embrun, eau marine « fossile », flux descendant...).

Les piézomètres étudiés sont tous situés en zone littorale : on peut donc émettre l'hypothèse que les fortes augmentations de la conductivité sont notamment corrélées avec celles de la concentration en chlorures.

Les fortes valeurs de conductivité (supérieures à 1 000 µS/cm) pourront être assimilées à une contamination par de l'eau salée.

Les valeurs de conductivité enregistrées en dehors de la zone crépinée sont considérées comme aberrantes (notamment à cause de l'accumulation d'éléments denses en fond de puits) et seront écartées.

Afin de comprendre l'origine de ces très fortes valeurs de conductivités observées sur certains forages, il est nécessaire de considérer différents paramètres qui pourraient être corrélés avec les variations de la conductivité : le niveau piézométrique, la marée, l'exploitation des ouvrages AEP à proximité, la géologie de l'aquifère...

5.3.2. Résultats

La minéralisation ponctuelle des piézomètres suivis par l'Office de l'eau est représentée sur les illustrations suivantes (illustrations 48 à 52).

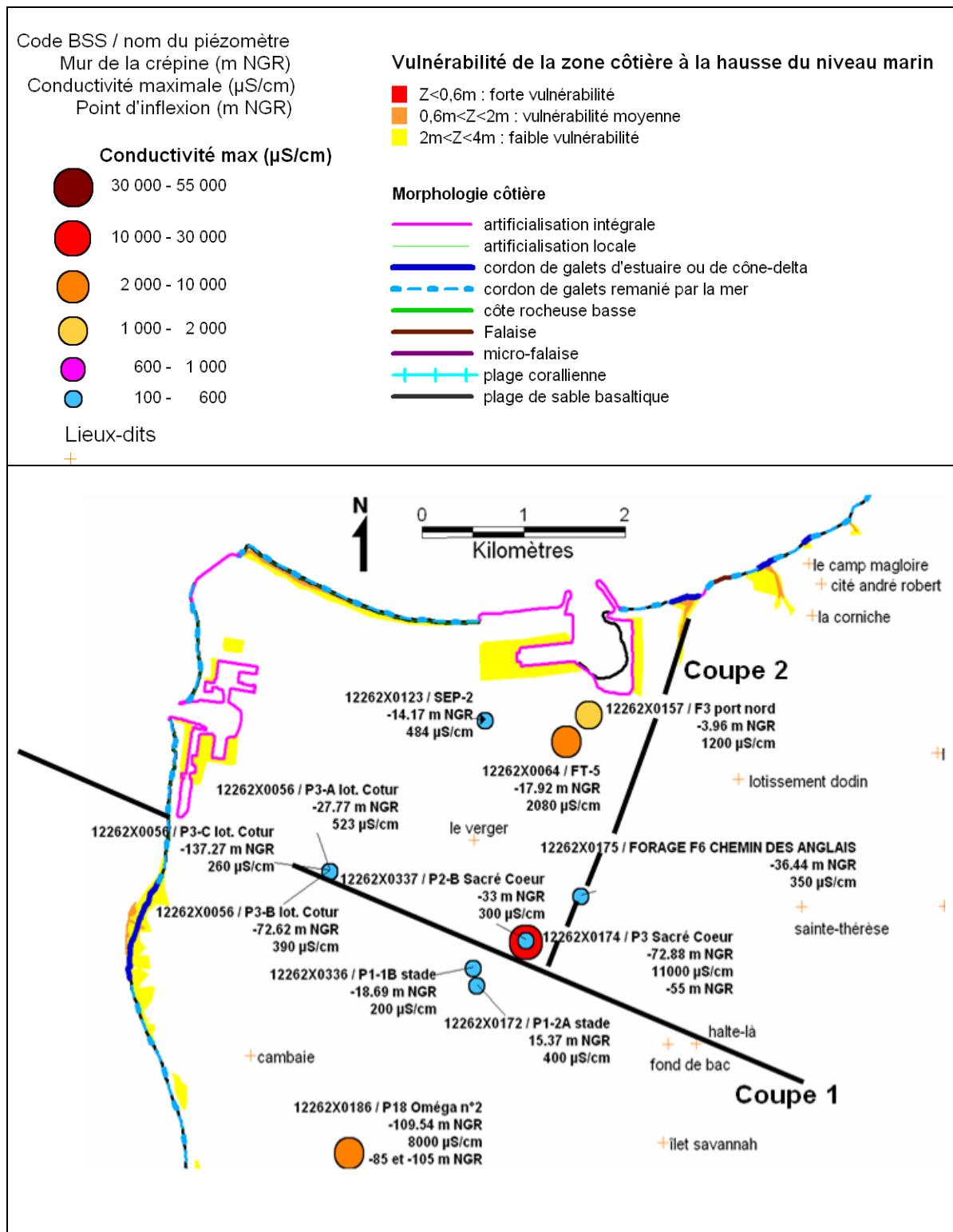


Illustration 48 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur du Port

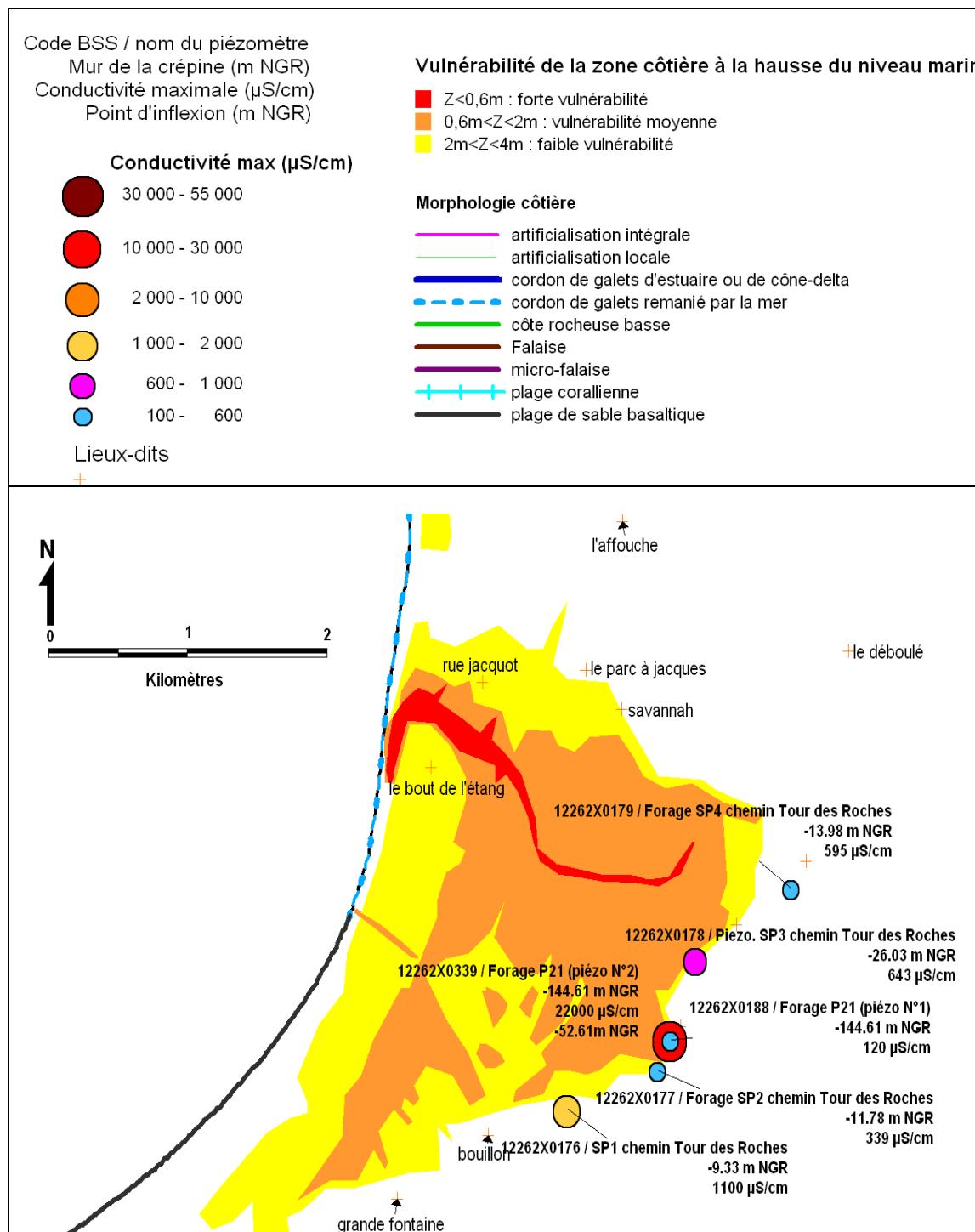


Illustration 49 : Localisation des piézomètres suivis dans le secteur de la Baie de Saint-Paul

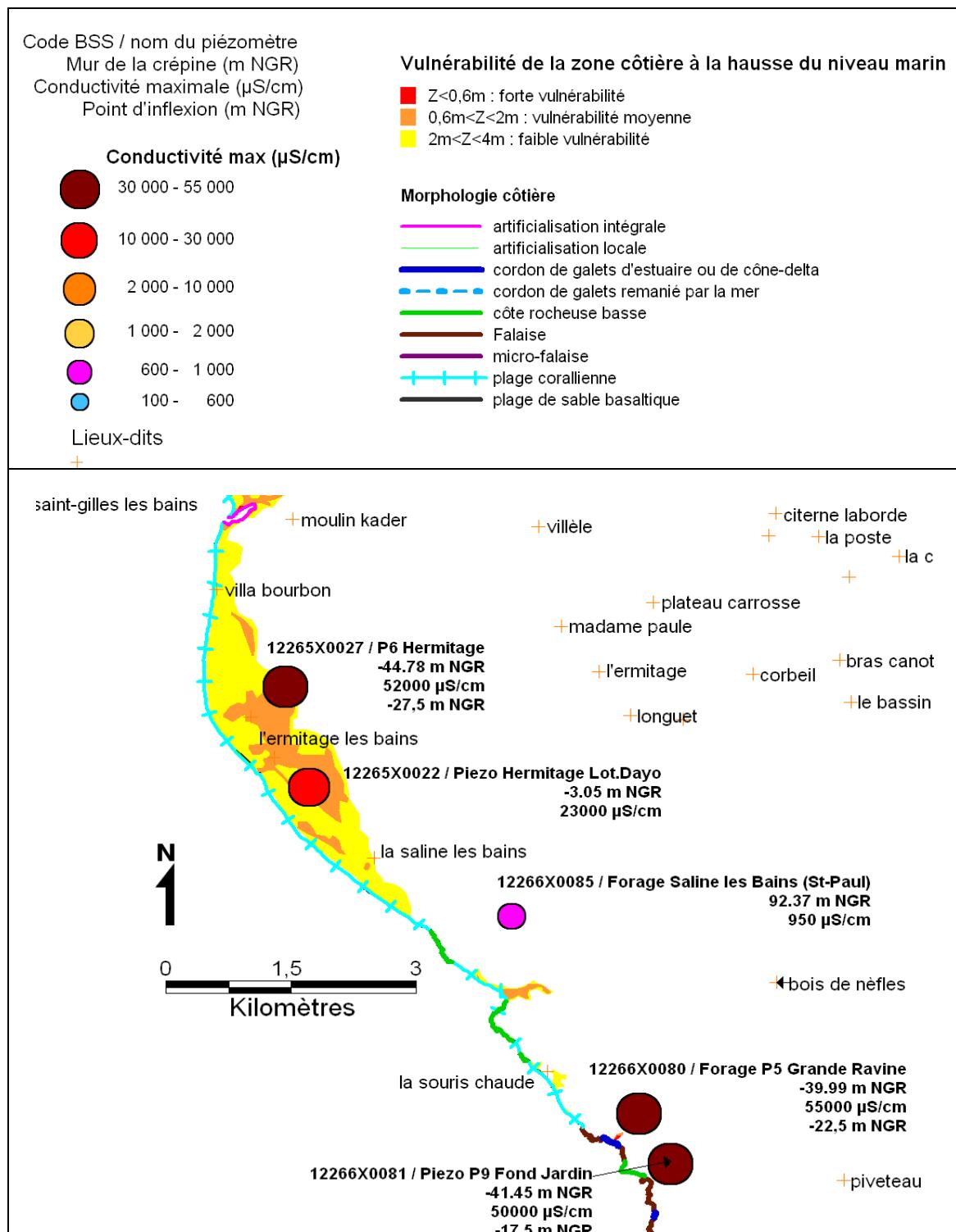


Illustration 50 : Localisation des piézomètres dans le secteur de Saint-Paul Sud, Trois-Bassins

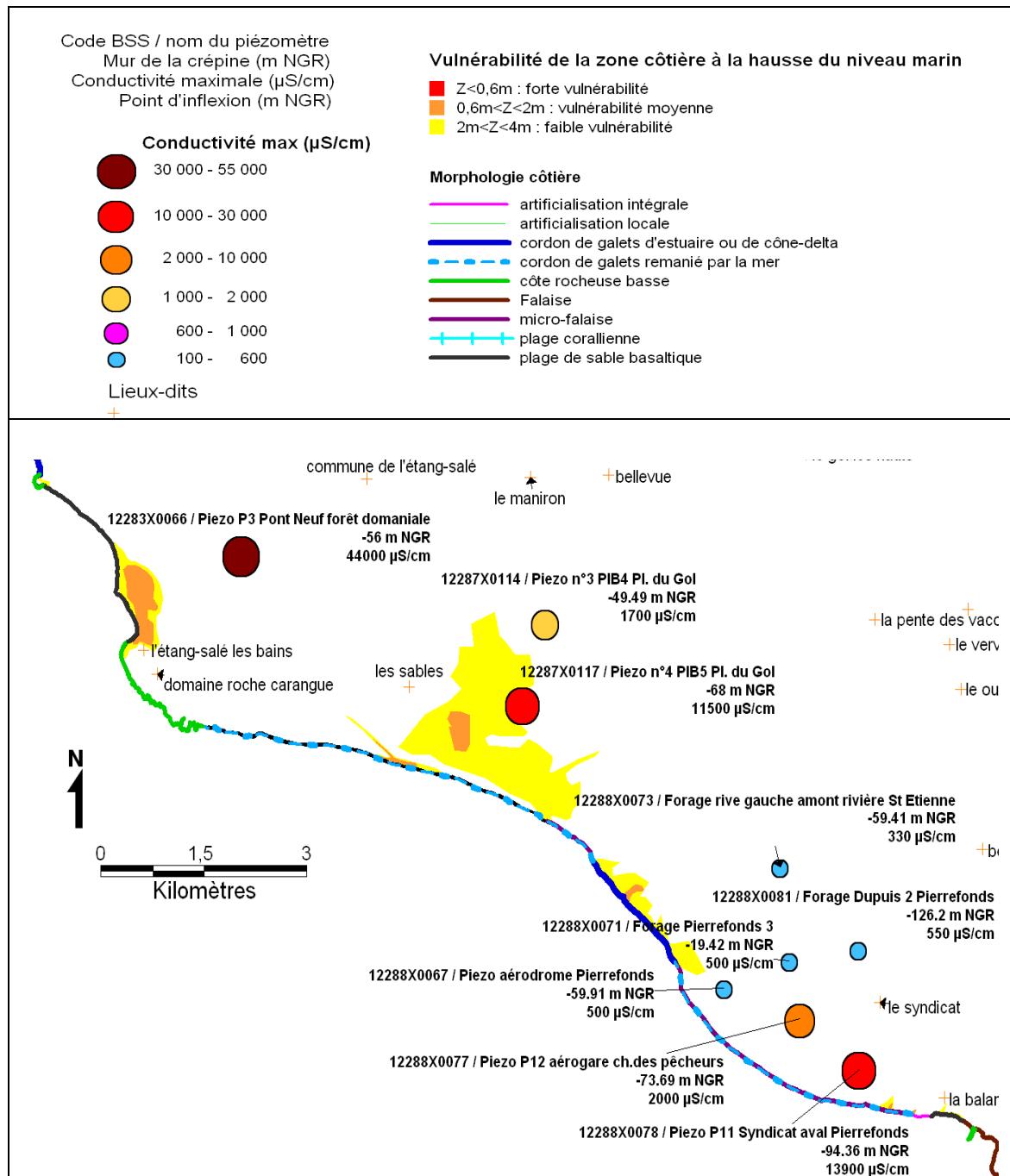


Illustration 51 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de l'Etang-Salé, Saint-Louis, Pierrefonds

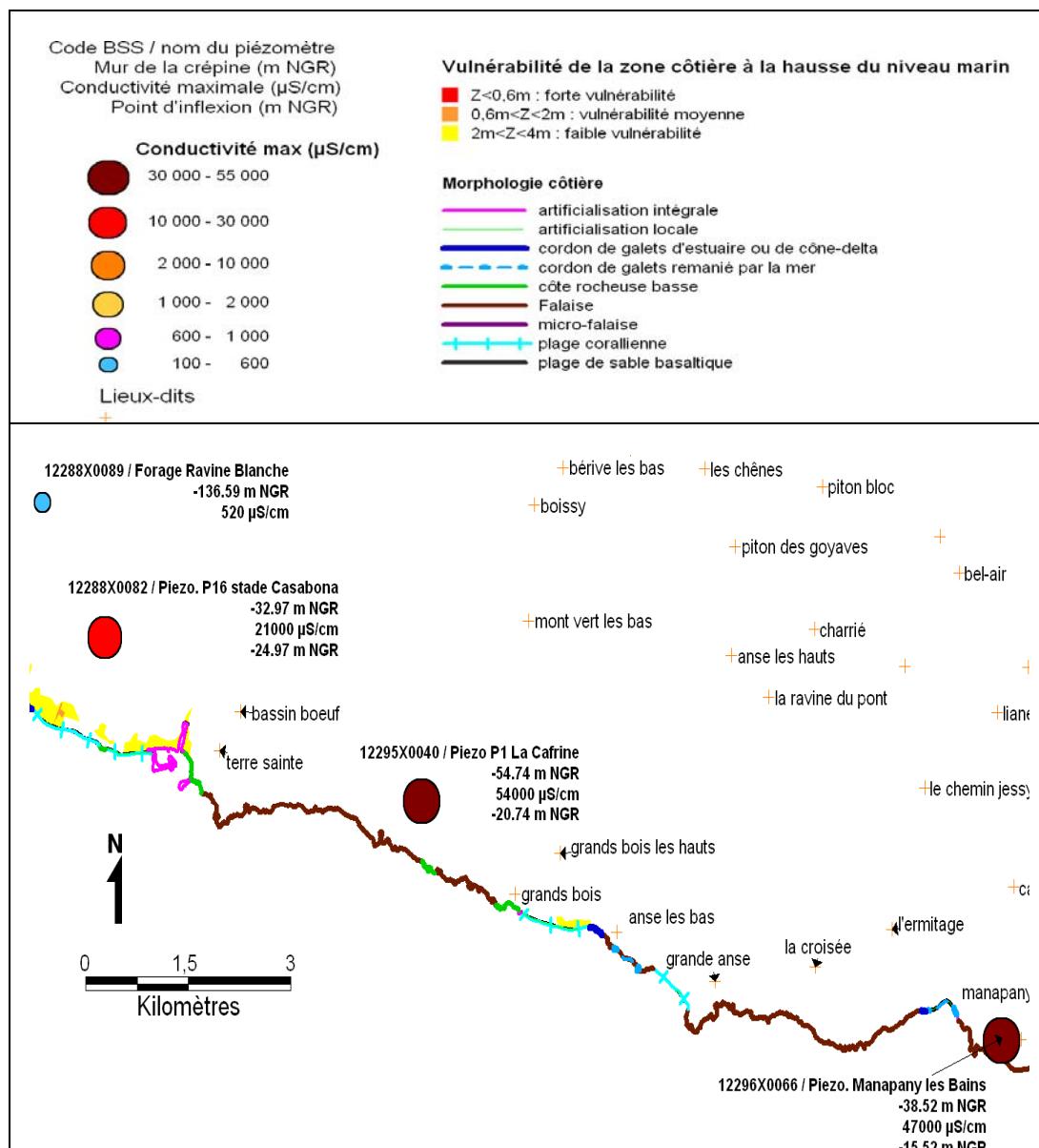


Illustration 52 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de Saint-Pierre, Manapany-Les-Bains

5.4. CONCLUSION

5.4.1. Guadeloupe

L'exploitation des données chimiques, issues du contrôle sanitaire de la DSDS et du réseau de surveillance au titre de la DCE, a montré que seules les eaux des Plateaux du Nord et un forage dans les Plateaux de l'Est de Grande-Terre présentent un faciès à tendance chloruré sodique du principalement à la proximité de la mer.

Les chroniques de conductivité et de piézométrie du réseau de surveillance quantitative indiquent que les intrusions salines avérées sur les différentes unités hydrogéologiques ne sont que locales et ne présentent pas d'extension généralisée à l'ensemble de la nappe. Seuls deux points (un sur les Plateaux du Nord, l'autre dans l'unité des Bas à Marie-Galante) sont sujets à une avancée latérale du biseau salé.

Cependant, le traitement des données chimiques et piézométriques dans le cadre de cette étude ont mis en évidence la difficulté à dégager des tendances concernant la salinisation des aquifères et à déterminer l'origine de cette salinisation. Cette difficulté d'interprétation est liée à l'irrégularité des mesures, à la diversité des producteurs de données, au problème de validité de certaines données, et dans une moindre mesure à des problèmes techniques d'acquisition.

Il est alors indispensable d'améliorer l'acquisition des données tant d'un point de vue spatial que temporelle. Les points de surveillance doivent se situer à des endroits stratégiques pour une meilleure vision globale en cas d'intrusion marine, et notamment dans les zones les plus sensibles. D'un point de vu temporel, il faut prévoir une fréquence d'acquisition suffisante pour mettre en évidence les variations saisonnières (a minima en carême et en hivernage). Il serait par ailleurs intéressant de mettre en place un réseau dédié au suivi du biseau salé en bordure littorale avec un suivi en continu de la conductivité et des analyses en éléments majeurs (en particulier des chlorures) à une fréquence mensuelle. Un tel réseau permettrait de mieux appréhender les mécanismes de salinisation des aquifères et d'alerter en cas de risque de salinisation.

5.4.2. La Martinique

La salinité des eaux des différents points d'eau n'est pas toute associée à l'existence d'un biseau salé. La minéralisation peut être expliquée par la présence d'eaux marines anciennes, d'altération de minéraux carbonatés ou d'apports par les aérosols des précipitations. Les connaissances sont parcellaires. Il est difficile au vu de ces connaissances, d'établir une corrélation entre minéralisation et existence d'un biseau salé pour les aquifères côtiers de la Martinique.

5.4.3. L'île de la Réunion

Le traitement des données de logs de conductivité de l'Office de l'Eau a donc permis de mettre en évidence une salinisation sur de nombreux piézomètres de la côte Ouest entre Le Port et Manapany Les Bains : la morphologie de cette zone de salinisation a donc été caractérisée et des corrélations ont été testées afin de comprendre les fortes valeurs de conductivité observées. La morphologie de la zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée diffère d'un piézomètre à l'autre et une classification a permis de mettre en évidence trois différents types de zones de mélange :

- une zone d'interface nette entre l'eau douce et l'eau salée avec une valeur maximale de conductivité proche de celle de l'eau de mer pour quatre piézomètres.
- une zone d'interface visible mais sans valeur maximale de conductivité atteinte pour quatre autres piézomètres.
- une zone de salinisation plus complexe sans interface est observée sur quatre piézomètres.

Plusieurs corrélations ont été testées afin de comprendre l'évolution des fortes valeurs de conductivité et la forme de l'interface eau douce / eau salée :

- La forme de l'interface eau douce / eau salée ne semble pas influencée par la nature des formations géologiques (alluvionnaires, détritiques ou basaltiques) : cependant la zone de transition a le plus souvent été rencontrée dans des formations basaltiques.
- La profondeur d'une salinisation observée diminue avec la distance au rivage, ce qui justifie le fait que les ouvrages proches de la mer sont les plus vulnérables.
- Lorsqu'elle existe la corrélation entre le niveau piézométrique et la conductivité est plus marquée à la surface des piézomètres car l'influence de la dilution par les précipitations y est plus rapide et marquée (faible temps de transfert mis en évidence, compris entre 0 et 3 jours).
- Au niveau de plusieurs piézomètres une influence de la marée sur le niveau piézométrique a été mise en évidence, mais la corrélation avec les variations de la conductivité ne sont visibles que pour deux piézomètres de la côte Sud : Manapany Les Bains et P1 La Cafrine.

L'influence de l'augmentation de l'exploitation des eaux souterraines sur les variations de la conductivité a été mise en évidence pour deux piézomètres à Trois-Bassins (Forage P5 Grande Ravine et P9 Fond Jardin), soupçonnée à Saint Pierre sur les piézomètres P12 Aérogare Chemin des Pêcheurs et P16 Stade Casabona et au Port à P3 Sacré Cœur : cependant il n'apparaît pas qu'elle modifie la forme de l'interface et son épaisseur. Ce phénomène apparaît comme étant réversible.

Les piézomètres localisés dans la zone côtière (de faible altitude) vulnérable à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques (cartographiée et présentée dans le chapitre 6) sont tous contaminés par l'eau salée.

6. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de la montée du niveau marin dans les DROM/COM

6.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacrée à la cartographie des zones de vulnérabilité des aquifères côtiers. Concernant la Guadeloupe, la cartographie présentée est basée sur des travaux antérieurs et ne prend pas en compte des scénarios de montée de niveau marin. Pour la Martinique, au vu des connaissances des aquifères, seule un commentaire d'une carte générale de sensibilité aux intrusions marines pour les conditions actuelles est discutée. Finalement, une première approche de cartographie de la vulnérabilité a été effectuée dans le cadre de cette action pour l'île de la Réunion. Cette approche est basée sur la cartographie des zones de différentes altitudes sur les côtes en fonction de trois scénarios de montée de niveau marin. Elle ne prend pas en compte les propriétés intrinsèques des aquifères côtiers. Ces cartes constituent des premiers éléments de présentation de la sensibilité des aquifères à l'intrusion saline.

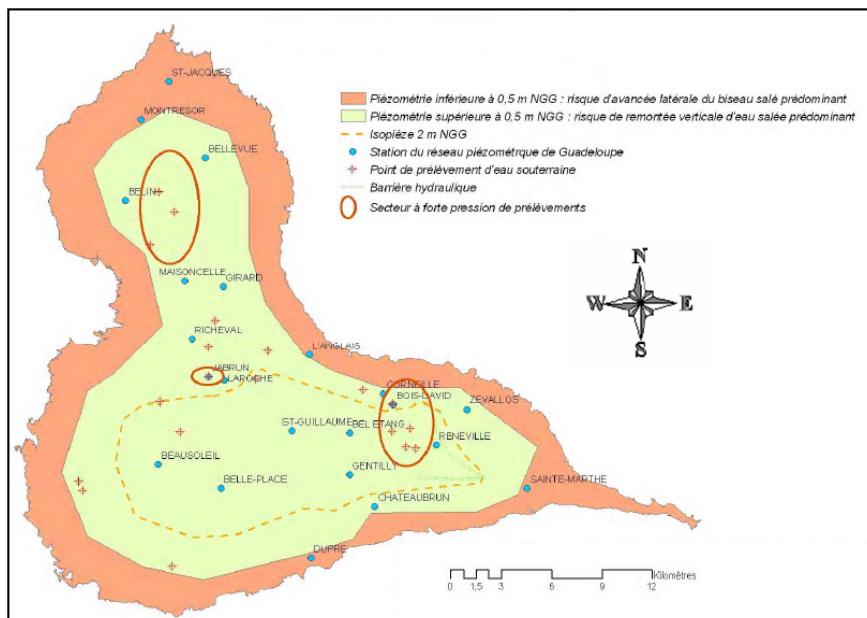
6.2. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS EN GUADELOUPE

Le risque de salinisation peut être établi à partir de la piézométrie moyenne et la géométrie de la nappe. Une exploitation excessive de la nappe provoquant un rabattement tel que le niveau piézométrique atteigne la côte 0 m NGG entraînerait la rupture de l'équilibre entre l'eau douce et l'eau salée et l'intrusion d'eau de mer dans la nappe. Une telle contamination est très difficilement réversible. Pour cette raison, un secteur est considéré comme sensible à partir du moment où la côte piézométrique de la nappe y atteint 0,5 m NGG.

Les zones sensibles aux fluctuations piézométriques sont classées en deux catégories :

- les zones du pourtour littoral où la piézométrie est extrêmement basse (< 0,5 m NGG) : ces secteurs sont en proie à une avancée latérale du biseau salé en cas de surexploitation de la ressource ou de baisse naturelle du niveau piézométrique ;
- les zones où la piézométrie est faible (entre 0,5 et 2 m NGG) : l'eau douce étant en équilibre hydrostatique avec l'eau salée, une surexploitation conduirait à une remontée locale du biseau salé.

La répartition de la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis du risque de salinisation (*Bézègues et al., 2007*) est présentée à l'illustration 53. Il apparaît sur cette carte que la partie centrale des Plateaux du Nord et le nord des Plateaux de l'Est sont particulièrement sensibles aux pressions anthropiques.



*Illustration 53 : Sensibilité des eaux souterraines de Grande-Terre au risque de salinisation
(Bézèlgues et al., 2007)*

La cartographie de la vulnérabilité de la nappe de Grande-Terre a été réalisée en 2004 (Gourdol et al.) et 2005 (Bézèlgues et al.). Le risque de salinisation y a été cartographié sur la base des hydro-isohypes 0,5 m NGG et 2 m NGG. Les zones à risque fort de salinisation concernées sont : tout le pourtour littoral de Grande-Terre, l'est des Plateaux de l'Est et les Plateaux du Nord (Illustration 54 et Illustration 55).

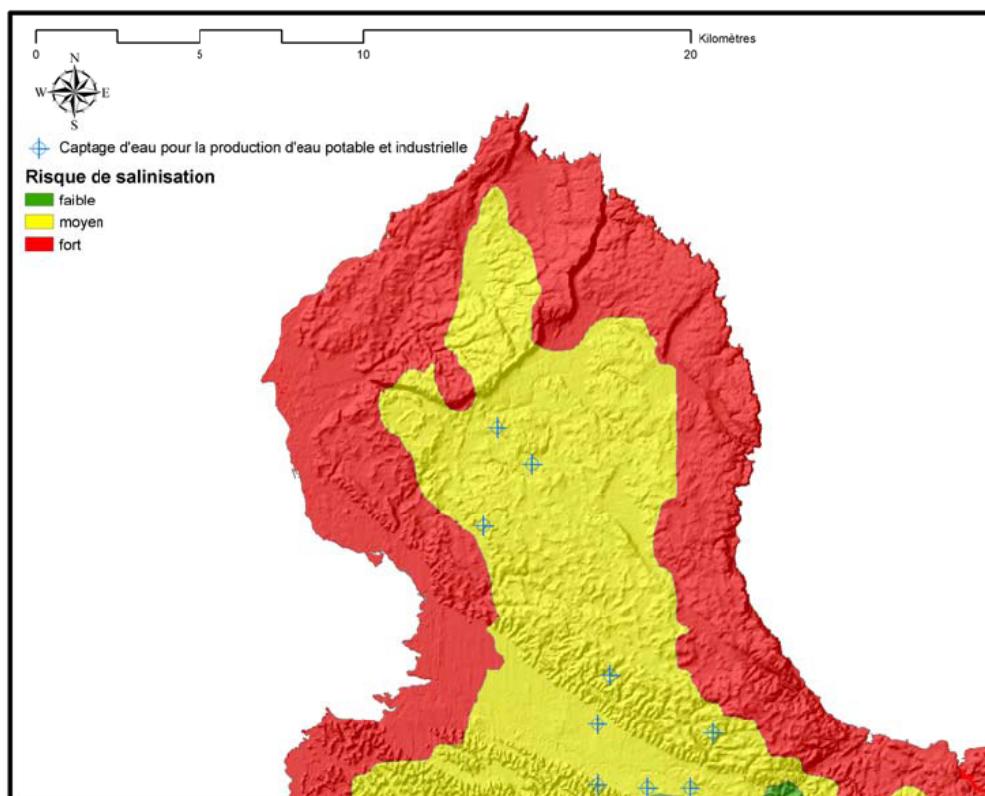


Illustration 54 : Risque de salinisation dans le nord de Grande-Terre (Gourdol et al., 2004)

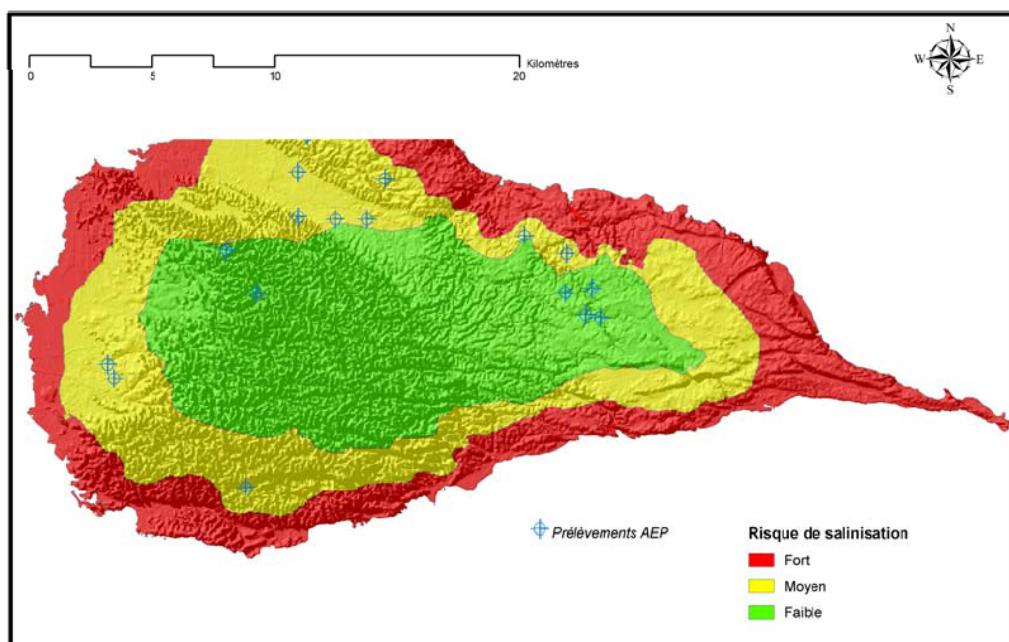


Illustration 55 : Risque de salinisation dans le sud de Grande-Terre (Bézèlgues et al., 2005)

En se basant sur la limite de risque de salinisation fixée à un niveau piézométrique de 0,5 m NGG, les zones sensibles de Marie-Galante se situent sur tout le pourtour littoral de l'île (Illustration 56). Le système des Bas (partie Nord de l'île) présente une forte sensibilité au risque de salinisation. L'exploitation de l'eau souterraine n'est employée qu'à des fins agricoles, puisque aucune exploitation AEP n'est possible ici. L'unité des Hauts constitue un réservoir primordial puisqu'il est le seul à fournir l'eau potable sur l'ensemble de l'île.

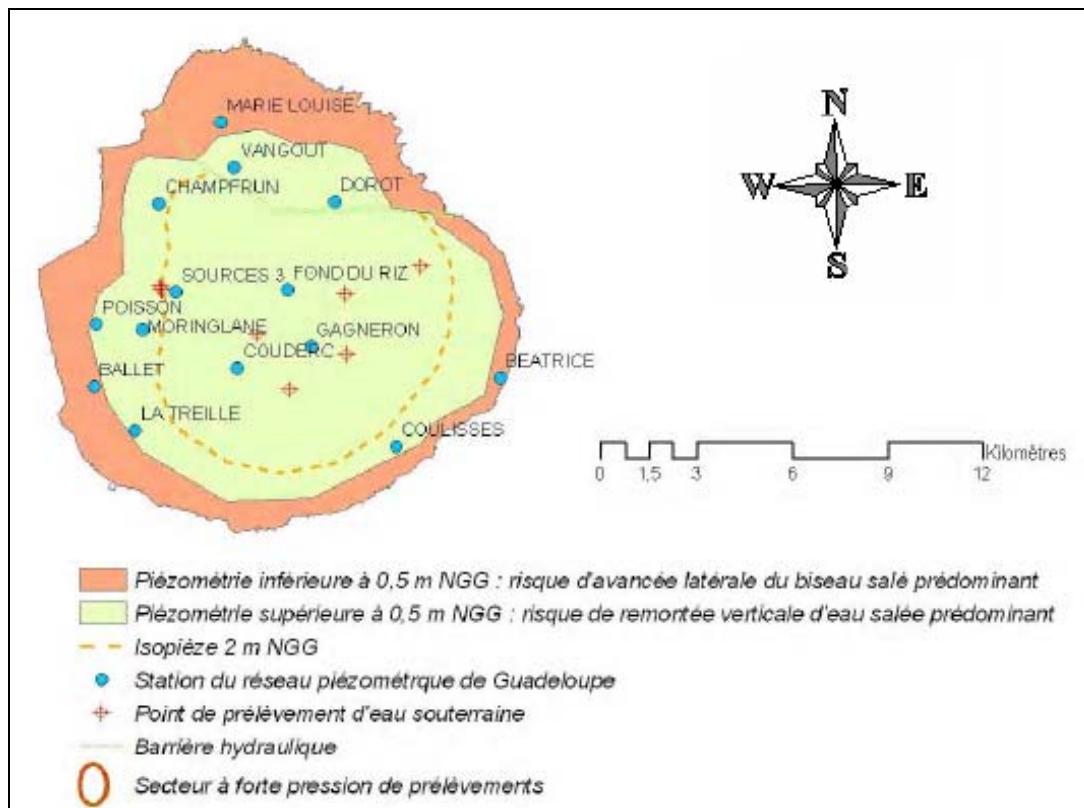
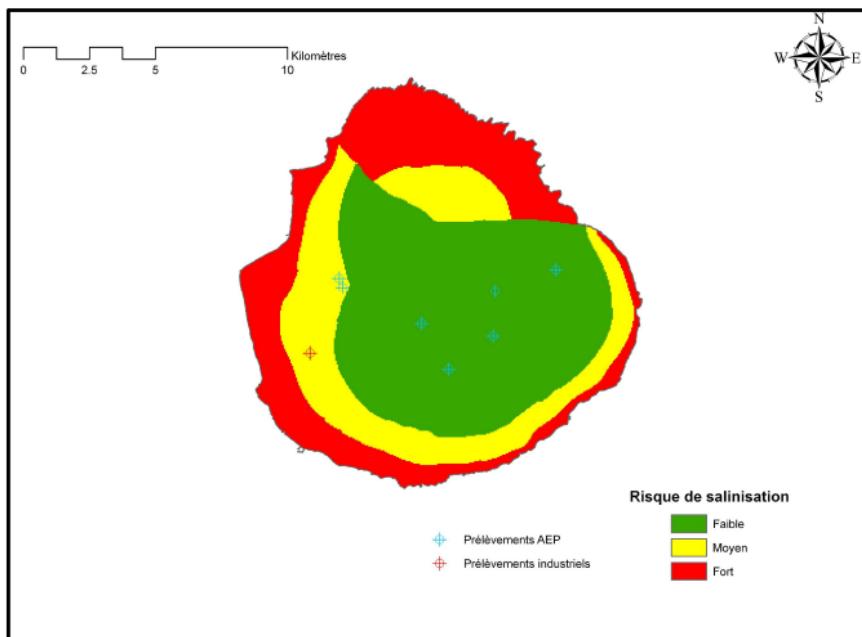


Illustration 56 : Sensibilité des eaux souterraines de Marie Galante au risque de salinisation (Bézèlgues et al., 2007)

La cartographie de la vulnérabilité de la nappe de Marie-Galante a été réalisée en 2006 (*Bézègues et al.*). Le risque de salinisation y a été cartographié sur la base des hydro-isohyps 0,5 m NGG et 2 m NGG. Les zones à risque fort de salinisation concernées sont : tout le pourtour littoral et la quasi-totalité des Bas (Illustration 57).



6.3. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS EN MARTINIQUE

Les données relatives à la pénétration du biseau salé en Martinique sont rares et très ponctuelles. Exceptée pour la Plaine du Lamentin, aucune étude spécifique approfondie n'a été menée récemment, principalement en raison de l'absence actuelle d'enjeu AEP. En effet, aucun forage AEP n'est pour le moment exploité sur la frange littorale.

Sur les côtes Nord Caraïbes, Nord et Nord Atlantique, la pénétration du biseau salé apparaît très limitée (Illustration 47). En outre, les programmes de reconnaissance en souterraine en cours visent des implantations de forage sur les hauteurs dans le but de s'affranchir des pollutions agricoles.

La pénétration du biseau salé semble plus importante dans la baie de Fort-de-France et sur les côtes Sud Caraïbes et Sud Atlantique (Illustration 47). Pour la partie Sud, les aquifères côtiers présentent de faibles potentiels et ne sont pour l'instant pas exploités. En revanche, un vaste programme de reconnaissance des eaux souterraines du Centre et du Sud de la Martinique a débuté fin 2010. L'objectif pour le SICSM (Syndicat Intercommunal du Centre et du Sud de la Martinique) est de disposer d'une ressource complémentaire mobilisable en situation de crise : étiage sévère pendant le Carême et/ou post catastrophe naturelle (cyclone, séisme). Des investigations géophysiques (panneaux électriques) sont prévues en 2011 et des forages de reconnaissance en 2012. Ces travaux de reconnaissance permettront d'évaluer précisément le potentiel hydrogéologique des aquifères côtiers du Sud de la Martinique et éventuellement de préciser la pénétration du biseau salé dans certains secteurs. En fonction des résultats obtenus et des décisions prises par le SICSM, il pourra devenir pertinent de surveiller l'intrusion saline.

6.4. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE VULNERABILITE DE LA COTE OUEST DE L'ILE DE REUNION

La cartographie des zones de vulnérabilité concerne les ressources en eau par rapport à l’élévation du niveau marin et aux submersions marines épisodiques à partir de critères d’altitude.

6.4.1. Méthodologie de la cartographie

Détermination de critères de vulnérabilité

Sur la base des observations réalisées dans les rapports de 1988 et 2005 du BRGM sur la salinisation des aquifères côtiers, la cartographie a concerné le littoral entre La Possession et Saint-Joseph ainsi que la partie Nord et Est entre Saint-Denis et Sainte-Rose.

La cartographie des zones vulnérables aux intrusions salines s’appuie sur un critère d’altitude : les zones de faibles altitudes sont plus exposées à la hausse du niveau marin ainsi qu’aux submersions marines épisodiques et donc à une salinisation de leurs ressources en eau.

Trois critères de vulnérabilité des ressources en eau aux intrusions salines sont déterminés à partir des scénarios de hausse du niveau marin résumés dans la première partie du rapport :

- **Pour une altitude<60cm** : très forte vulnérabilité, cela correspond au scénario le plus pessimiste du GIEC mais également au plus optimiste de nombreuses publications postérieures au rapport du GIEC : ce scénario a donc une forte probabilité de se réaliser d’ici 2100.
- **Pour 0,6m<altitude<2m** : vulnérabilité moyenne, la valeur de 2m correspond à une valeur maximale de hausse du niveau marin d’ici 2100 proposée par (Pfeffer et al, 2008). Cet intervalle de hausse du niveau marin est assez large mais recoupe beaucoup des scénarios des publications les plus récentes (2007-2010). Sa probabilité de réalisation d’ici 2100 est donc moyenne.
- **Pour 2m<altitude<4m** : vulnérabilité faible. Cet intervalle prend en plus compte des phénomènes de submersions marines épisodiques : forte houle, surcote atmosphérique². La portion étudiée ici correspond à la côte ouest, qui n'est donc pas la plus concernée par les très fortes houles (houle cyclonique), mais surtout par les houles australes. Une petite portion seulement du littoral de cette zone d'étude, entre le Cap la Houssaye et La Possession, est concernée par les houles cycloniques. La probabilité de réalisation est faible, puisqu'une montée du niveau marin de 2m constitue un maximum et les 2m supplémentaires correspondent à la prise en compte d'épisodes de submersion marine.

² Pour plus de rigueur, le calcul de la submersion devrait considérer d’autres facteurs tels que la morphologie de la côte, son exposition, les caractéristiques du récif corallien... Un intervalle assez large a donc été considéré puisque la considération de tous ces critères nécessiterait la réalisation d'une étude supplémentaire.

Outils de travail pour la cartographie et sélection du secteur d'étude

La cartographie des secteurs vulnérables est réalisée à l'aide de l'outil informatique MapInfo. On dispose pour cela des données Litto3D type LIDAR (télédétection par laser aéroporté) : il s'agit de Modèles Numériques de Terrain (MNT) d'une résolution planimétrique de 2m et altimétrique de 30 cm au niveau de la zone côtière de La Réunion. Pour des questions de volumes de données numériques, le littoral réunionnais a été divisé en 825 dalles de 1km². La taille de chacun de ces MNT atteint 5 à 7 mégaoctets, ce qui rend complexe les traitements numériques associés à l'utilisation de ces dalles.

Il s'agit donc de sélectionner les dalles côtières sur lesquelles la cartographie sera effectuée. La sélection est réalisée en deux étapes :

- Uniquement les dalles côtières situées entre La Possession et Saint Joseph sont considérées : cela correspond globalement à la zone côtière où des problèmes de salinisation ont été constatés entre 1988 et 2005.
- Une sélection des dalles côtières entre La Possession et Saint-Joseph contenant des points d'une altitude inférieure à 4m est réalisée sur MapInfo.

Suite à ces sélections, on regroupe ainsi 106 dalles côtières dont la cartographie sera réalisée. Ces dalles sont regroupées en différents secteurs : chacun d'entre eux correspondra par la suite à une carte des vulnérabilités des ressources en eau aux intrusions salines (Illustration 58).

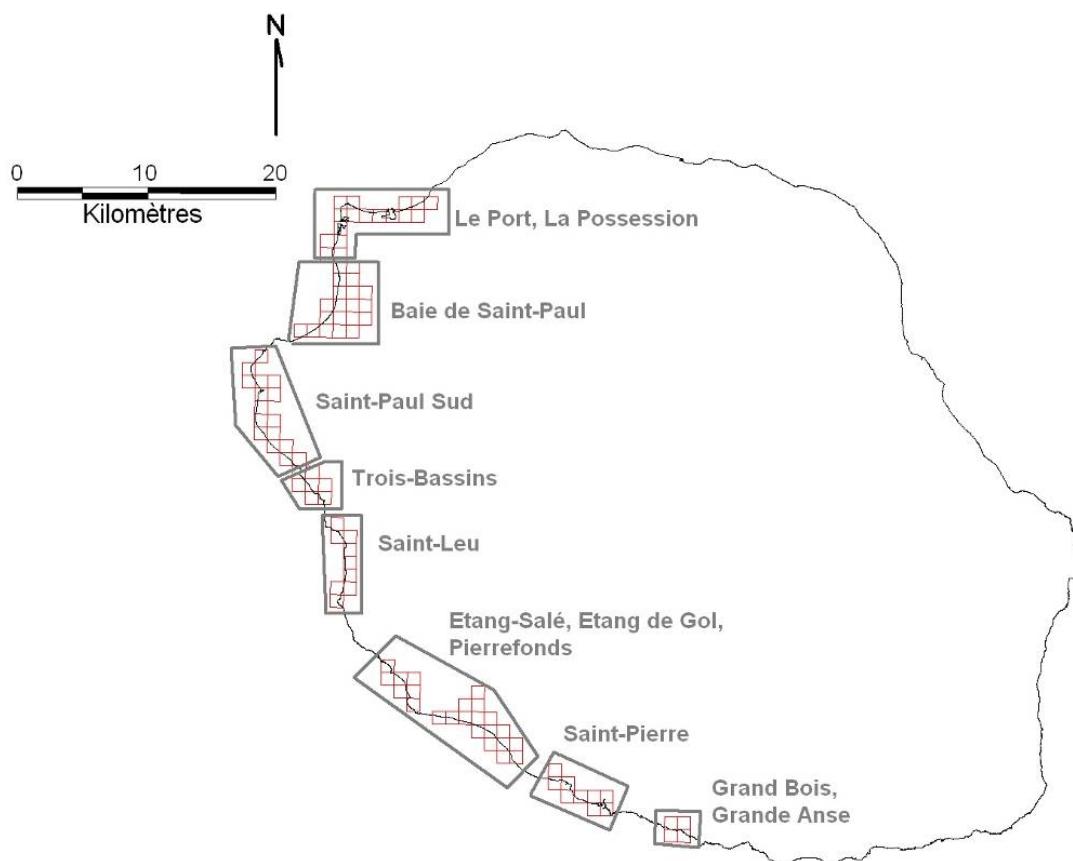


Illustration 58 : Présentation des secteurs cartographiés : chaque cadre gris correspond à une carte des vulnérabilités aux intrusions salines, chaque dalle rouge correspond à un MNT.

La réalisation des cartes de vulnérabilité

Le travail de cartographie consiste donc à représenter les trois zones de vulnérabilité à l'aide des données MNT.

Pour cela il est possible de travailler sur les données « Vecteurs » ou « Raster » :

- Les données « vecteurs » correspondent aux tables de points auxquels une altitude est associée, chaque dalle de 1km² contient en moyenne plus de 500 000 données d'altitude : il est donc nécessaire de lancer une requête sur Map-Info afin de créer trois nouvelles tables correspondant aux critères d'altitude : Z<60cm, 60cm<Z<2m et 2m<Z<4m. Il est alors possible de cartographier ces trois zones de vulnérabilité en affichant alternativement ces trois tables beaucoup moins lourdes que la table originale.
- Les données Raster (images), moins volumineuses peuvent aussi être utilisées. Les fichiers « ascii (*.asc) » sont ouverts à partir de l'extension « Vertical Mapper » afin d'être convertis en fichiers « grid image (*.grd) » : il est alors possible de définir les contours d'altitude correspondant aux critères définis précédemment : on obtient ainsi directement les trois zones de vulnérabilité.

Ces deux méthodes ont été testées, la deuxième permet de gagner du temps en définissant directement les contours d'altitudes, tandis que la première plus fastidieuse nécessite le tracé des polygones à la main mais permet du coup un meilleur contrôle des zones cartées.

6.4.2. Présentation des cartes de vulnérabilité

Données affichées sur les cartes

Huit cartes présentant les secteurs ou les ressources en eau sont vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques ont donc été réalisées en utilisant la méthodologie présentée précédemment. Ces cartes sont présentées en annexe 1.

Pour chacune d'elle, la morphologie côtière est affichée afin de constater une éventuelle corrélation avec les critères de vulnérabilité.

Les ouvrages d'alimentation en eau potable (eau souterraine ou eau superficielle) sont affichés sur les cartes (nom de l'ouvrage et débit réglementaire) : ces données proviennent de l'ARS (Agence Régionale de Santé - Océan Indien), cela permet de localiser les ouvrages les plus vulnérables (par leur proximité des zones vulnérables).

Sur chaque carte figure un diagramme montrant la répartition des zones vulnérables et la superficie de chacune d'entre elle en km².

Une surface de référence (grisée) est également affichée : elle a une largeur de 2,8km qui correspond à la distance la plus importante d'une zone vulnérable (secteur de la baie de Saint-Paul) de la côte. Elle englobe ainsi toutes les zones vulnérables, ce qui permet d'en faire une surface de référence utile pour comparer les données de chaque carte.

Approche statistique des zones vulnérables

Afin de comparer les valeurs des superficies vulnérables suivant les secteurs deux approches sont possibles :

- On peut calculer pour chaque secteur la superficie de la zone de référence afin d'obtenir un pourcentage de la zone de référence qui est vulnérable : ces pourcentages pourront être comparés d'un secteur à l'autre ;
- Une autre méthode consiste à calculer la longueur de côte sur le secteur considéré (on utilise le trait de côte de la carte IGN au 1/25 000). On peut donc calculer une superficie vulnérable par mètre de côte, ce qui correspond approximativement à la largeur moyenne de la bande côtière vulnérable.

En utilisant la seconde méthode le graphique de l'Illustration 59 permet de réaliser une approximation des secteurs les plus vulnérables de la côte Ouest.

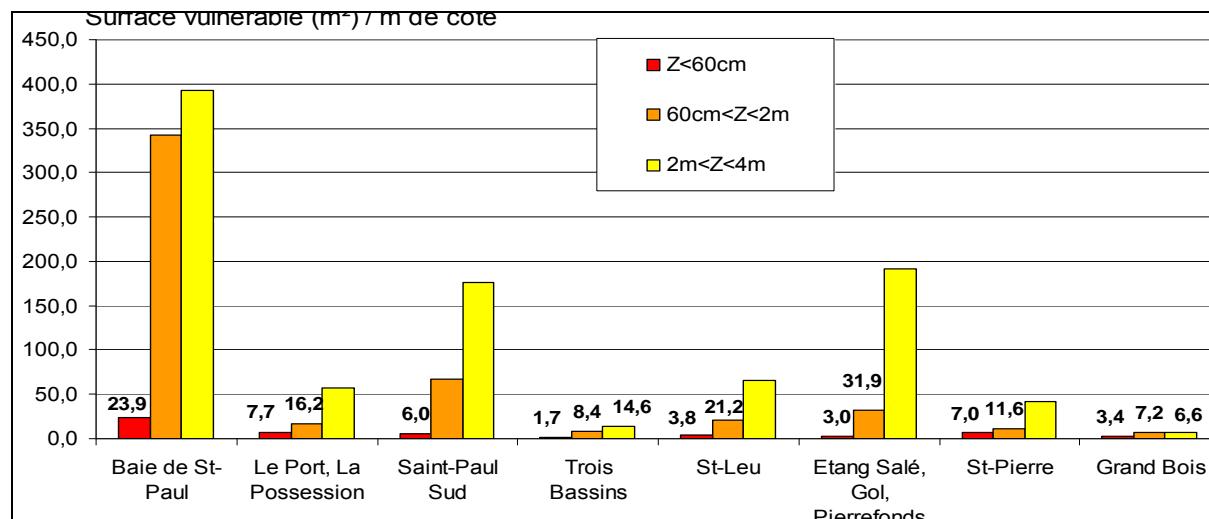


Illustration 59 : Surface vulnérable (en m^2) par mètre de côte, calculée pour chacun des trois critères de vulnérabilité et pour les 8 secteurs d'étude

Le graphique de l'Illustration 60 indique la superficie totale en km^2 des 3 zones de vulnérabilité.

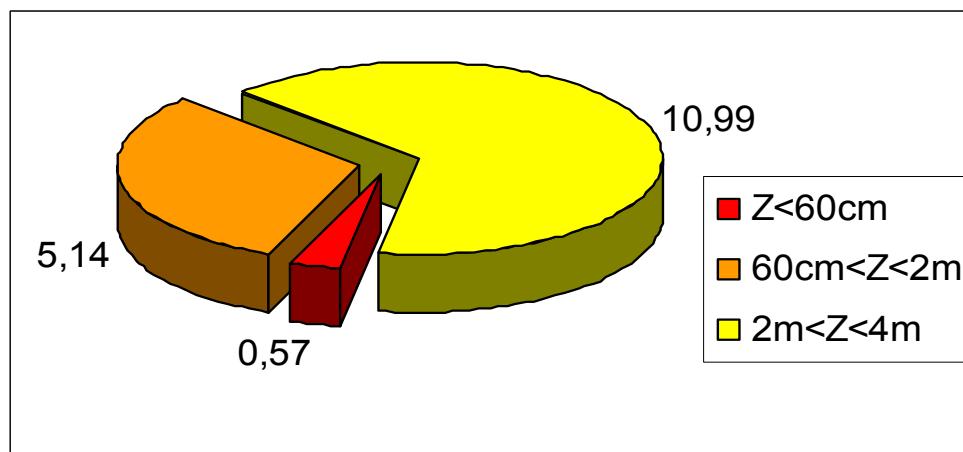


Illustration 60 : Répartition et superficie totale des zones vulnérables (km^2).

Ouvrages d'Alimentation en Eau Potable proches de zones vulnérables

Les ouvrages potentiellement vulnérables à une salinisation des ressources en eau d'ici 2100 sont listés dans l'

Illustration 61 ci-dessous. Le critère de vulnérabilité considère uniquement la distance à la zone vulnérable et de la faible altitude du forage.

Nom de l'ouvrage, débit réglementaire (m³/jour)	Carte correspondante	Commune alimentée	Distance de l'ouvrage à la zone :	
			Faiblement vulnérable	Moyennement vulnérable
Forage Renaud (5000)	Baie de Saint Paul	Saint Paul	30m	70m
Puits Bouillon (4500)	Baie de Saint Paul	Saint Paul	30m	100m
Puits Grande Fontaine (3900)	Baie de Saint Paul	Saint Paul	60m	100m
Forage FRH13 (1900)	Baie de Saint-Paul	Saint Paul	400m	700m
Puits du Gol A (Saphir / St-Louis) (1190)	Etang Salé, Gol, Pierrefonds	Saint Louis	400m	x
Puits du Gol B (Saphir / St-Louis) (788)	Etang Salé, Gol, Pierrefonds	Saint Louis	400m	x
Puits du Gol C (Saphir / St-Louis) (766)	Etang Salé, Gol, Pierrefonds	Saint Louis	500m	x
Forages Marengo (2429)	Etang Salé, Gol, Pierrefonds	Etang Salé	800m	x
Forage Filaos-Ermitage (1000)	Saint Paul Sud	Saint Paul	250m	300m

Illustration 61 : Ouvrages d'alimentation en eau potable (eaux souterraines), proches de zones vulnérables à la hausse du niveau marin. Les croix indiquent une distance supérieure à 1km.

Localisation des zones vulnérables et relation avec la morphologie côtière

- **La zone de forte vulnérabilité** ne constitue que 0,57 km², et ne concerne en général qu'une fine bande côtière (large en moyenne de 7 m et localisée sur les zones de plage : plage de sable basaltique, plage corallienne, plage de galets), l'embouchure immédiate des ravines, autour de ravines et de canaux (Ravine Tête Dure dans la baie de St-Paul, Ravine du Grand Etang à St-Leu, La Grande Ravine à Trois Bassins), autour des zones portuaires (Port de Saint-Gilles, Port de Saint-Pierre).
- **Les zones de moyennes et faibles vulnérabilités** (respectivement 5,14 et 11 km²) concernent elles-aussi la zone de plage, les embouchures de ravines et leurs berges, les canaux et le contour des zones portuaires. Les distances maximales moyennes à la côte de ces zones sont respectivement de 63 et 118 m.

Les zones côtières humides, comme l'Etang Saint-Paul, l'Etang de Gol sont aussi situées en zones moyennement et faiblement vulnérables.

Les cartes de vulnérabilité révèlent que les **plaines côtières bordées par un récif corallien** sont systématiquement classées en zone de moyenne et faible vulnérabilité : c'est le cas au Sud de St-Paul entre Boucan Canot et La Ravine des Trois-Bassins, à Saint Leu entre La Pointe des Châteaux et La Pointe au Sel, à l'Etang-Salé Les Bains et à Saint-Pierre. Ce sont des secteurs très exposés à la hausse du niveau marin du fait de leur faible altitude mais la barrière corallienne peut dissiper une partie de l'énergie de la houle et donc réduire le risque lié aux submersions marines.

Les zones côtières bordées de plages de cordons de galets d'estuaire ou de cône-delta sont des zones vulnérables au niveau des embouchures et des lits des ravines : ces embouchures constituent en effet des zones de faible altitude par lesquelles la mer peut facilement s'engouffrer, en particulier lors d'épisodes de fortes houles australes qui peuvent survenir en période d'étiage (hiver austral). Le rôle des marées associé à une hausse du niveau marin est également non négligeable dans les zones d'embouchure des ravines.

Les zones côtières bordées de microfalaises (plus de 2m) et de falaises (plus de 5m) ne constituent pas des zones considérées comme vulnérables selon la méthodologie retenue dans le cadre de la présente étude. Toutefois, une approche de type modélisation numérique permettrait d'analyser le degré de vulnérabilité de ces secteurs.

6.4.3. Conclusions et limites des cartes de vulnérabilité

La réalisation de ces cartes de vulnérabilité reposant sur une approche du critère d'altitude, a donc permis de cibler et quantifier en détails les secteurs de la côte Ouest de La Réunion dont les ressources en eau sont potentiellement vulnérables à une intrusion saline liée à la hausse du niveau marin et aux submersions marines d'ici 2100. Cependant, le critère d'altitude ne suffit pas à déterminer toutes les zones où les ressources en eau sont vulnérables dans l'avenir. Certains secteurs, comme Le Port, sont d'ores et déjà victimes d'une contamination des ressources en eau par des intrusions salines mais ne figurent pas sur cette carte.

Le critère d'altitude constitue une première approche, mais il est nécessaire de s'intéresser aux propriétés hydrodynamiques intrinsèques et extrinsèques des aquifères ainsi qu'à

l'étendue de la zone non saturée et la nature du sol (ce qui n'est pas encore traité dans ce présent rapport). Finalement, l'approche proposée ici constitue une précision accrue des conditions aux limites dans le cadre d'une modélisation numérique future.

6.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES NORD ET EST DE L'ILE DE LA REUNION

Cette partie du littoral de l'Île de La Réunion n'est pas affectée par une salinisation des ressources en eaux souterraine, les précipitations y sont importantes, en particulier entre Sainte-Marie et Sainte-Rose, et les risques d'intrusions salines sont moins préoccupants pour l'horizon 2100. Cependant certaines portions sont vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques, qui peuvent être plus importantes qu'à l'Ouest en raison de l'exposition à la houle cyclonique.

Les critères de forte et moyenne vulnérabilité sont les mêmes que ceux considérés pour la côte Ouest : $Z<0,6\text{m}$ et $Z<2\text{m}$. Le critère de faible vulnérabilité correspondant aux submersions marines épisodiques est différent de celui considéré pour la côte Ouest : on considère cette fois-ci un critère d'altitude de 6m en tenant compte de l'effet de la houle cyclonique plus présent sur cette partie de l'île et de l'absence de barrière corallienne pour dissiper l'effet de la houle. Ces cartes sont présentées en annexe 2.

6.5.1. Résultats

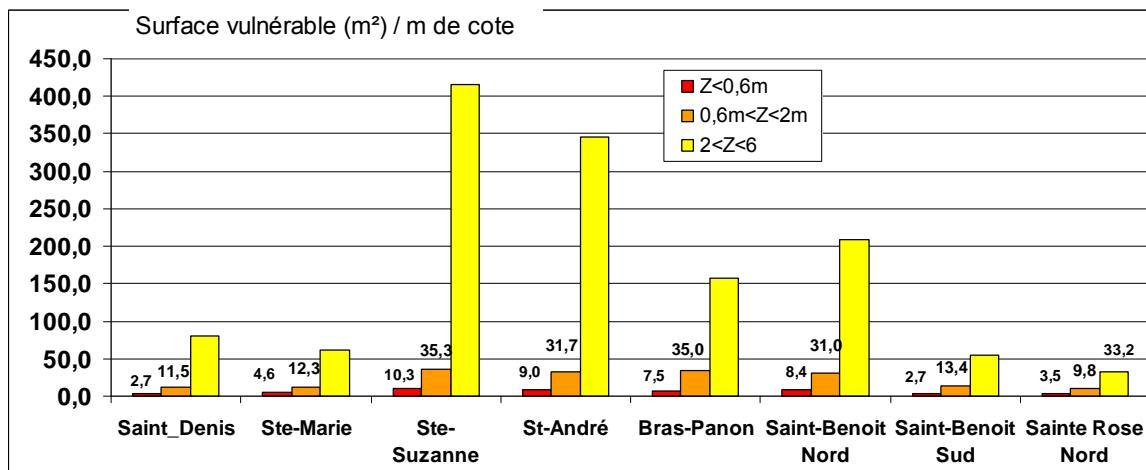


Illustration 62 : Surface vulnérable par mètre de côte de la zone littorale comprise entre Saint-Denis et Sainte-Rose.

C'est la zone côtière comprise entre Sainte-Suzanne et Saint-Benoît Nord (Ravine Sèche) qui est la plus exposée à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques : cela correspond aux plages de Galets (cordons de Galets face aux ravines et Galets remaniés par la mer).

Les embouchures de Ravines sont les zones les plus exposées avec plusieurs secteurs qui le sont particulièrement : l'embouchure de la Rivière du Mât et de la Rivière des Roches, le secteur de l'embouchure de la Grande Rivière Saint-Jean (Saint-André) et de la Rivière Sainte-Suzanne, l'embouchure de la Ravine Sèche (Saint-Benoît).

7. Conclusion et perspectives

7.1. CONCLUSION

L'état des connaissances concernant les aquifères côtiers de l'archipel de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion est contrasté, tout comme les données disponibles permettant de procéder à une cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une montée de niveau marin.

Seul un aquifère permettra de réaliser des simulations numériques dans le cadre de cette action au cours de l'année 2011 ; il s'agit de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe.

Au regard des différentes études réalisées depuis 1960 sur l'archipel guadeloupéen, les zones les plus sensibles à une intrusion d'eau salée sont les secteurs dont le niveau piézométrique de la nappe est inférieur à 2 m NGG, et où le gradient hydraulique est faible. Trois secteurs ont ainsi été définis : les Plateaux du Nord et l'est des Plateaux de l'Est de l'île de Grande-Terre, et le littoral de l'île de Marie-Galante.

Les scénarios actuels de remontée du niveau marin induit par le changement climatique sont d'ordre généralisé sur l'ensemble des océans. L'interpolation au niveau régional est encore peu fiable puisque celle-ci s'avère particulièrement compliquée à mettre en œuvre. A l'échelle de la Guadeloupe, il faudra tenir compte des estimations faites sur l'augmentation du niveau moyen global des océans. Par corrélation avec le trait de côte et le modèle de l'ouragan Dean, il est possible de dire que les zones risquant une forte salinisation en cas de surcote sont le sud et sud-est de Marie-Galante, le sud et le nord-est de la Grande-Terre (côte est des Plateaux du Nord) ; et ce en raison des houles cycloniques d'orientation générale est/sud-est ou sud/sud-est.

Au niveau de la Martinique, au vu des données disponibles et des connaissances concernant les aquifères côtiers, il sera difficilement possible de poursuivre l'exercice et d'appliquer une approche de cartographie de la vulnérabilité de manière détaillée. Si la Plaine du Lamentin est le secteur le mieux connu vis-à-vis du risque d'intrusion saline, aucun réseau de surveillance n'existe à ce jour. Cet aquifère a été largement étudié par le passé, une modélisation hydrodynamique pourrait être envisagée dans le futur.

Pour l'île de la Réunion, les cartes de vulnérabilité mettent en évidence que les plaines côtières bordées d'un récif corallien sont de vulnérabilité moyenne à faible. Ce sont des secteurs très exposés à la hausse du niveau marin du fait de leur faible altitude mais la barrière corallienne peut dissiper une partie de l'énergie de la houle et donc réduire le risque lié aux submersions marines. Les zones côtières bordées de plages de cordons de galets d'estuaire ou de cône-delta sont des zones vulnérables au niveau

des embouchures et des lits des rivières. Les zones côtières bordées de microfalaises (plus de 2m) et de falaises (plus de 5m) ne constituent pas des zones considérées comme vulnérables selon la méthodologie retenue.

7.2. PERSPECTIVES

Les perspectives de cette action en 2011 sont les suivantes :

- au niveau de la Guadeloupe et de la Réunion, application de la méthode de cartographie GADLIT décrite dans le rapport (BRGM RP-59456-FR), intégration des données de la Litto3D en Guadeloupe pour cartographier les zones impactées par une remontée de niveau marin selon 2 à 3 scénarios ; comparaison de la vulnérabilité actuelle des aquifères côtiers avec celle pour des scénarios de remontée de niveau marin ;
- modélisation de l'effet de remontée du niveau marin au niveau de l'aquifère de Grande-Terre pour différents scénarios contrastés de remontée de niveau marin et de changement climatique pour la recharge, à l'aide d'un modèle maillé développé sous MARTHE (sans calage avec des données de salinité) ;
- essai de modélisation conceptuel pour un aquifère caractéristique de l'île de la Réunion, avec prise en compte de plusieurs scénarios ;
- interprétation et rédaction de recommandations de gestion des aquifères côtiers des DROM/COM.

8. Principales Références

Allard J.-F. (1976) – Etude hydrogéologique des calcaires de Caritan : Commune de Sainte-Anne (Martinique). Résultats du sondage n°1. Rapport BRGM 76 ANT 8

ANTEA (2005) – Recherche en eau souterraine au quartier Nouvelle Citée - Eau Agricole - Commune de Rivière Salée - Martinique. Phase I : Prospection géophysique. Rapport n° A 37599 version 1

ANTEA (2006) – Recherche en eau souterraine au quartier Nouvelle Citée - Eau Agricole - Commune de Rivière Salée - Martinique. Phase II : Suivi des travaux de forages de reconnaissance. Rapport n° A 44716 version B

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

Beretta M. (1988). Evolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux produites par les forages du Nord Grande-Terre (Guadeloupe) entre 1976 et 1987. Rapport BRGM 88.GLP.097.

Bézèlgues S, Petit V., Gourdol L., coll. Thiery D. (2003). Modélisation des écoulements souterrains de Marie-Galante en régime transitoire (Guadeloupe). Rapport BRGM/RP-52675-FR.

Bézèlgues S. avec la collaboration de Gravier A. et Mardhel V. (2005). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe) – Phase 3. Rapport BRGM/RP-53456-FR.

Bézèlgues S. avec la collaboration de Gravier A. et Mardhel V. (2006). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe) – Phase 4. Rapport BRGM/RP-54339-FR.

Bézèlgues S. et Amraoui N., avec la collaboration de Le Nindre Y.M. (2006). Collecte et préparation des données en vue de la modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains en Grande Terre. Rapport BRGM/RP-54709-FR.

Bézèlgues S. et Gourdol L., avec la collaboration de Comte J.P. (2003) – Réorganisation du réseau piézométrique de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Rapport BRGM/RP-51784-FR.

Bézèlgues-Courtade S. et Péricat J. (2007). Surveillance piézométrique des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe) – Année 2006. Rapport BRGM/RP-54903-FR.

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

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

Brenot A., Allier D. et Dumon A. (2008) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Guadeloupe. Rapport BRGM/RP-55709-FR.

Brenot A., Vittecoq B., Mardhel V. (2008) – Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique. Caractérisation physico-chimique naturelle des eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-56266-FR

Canadell JG, Corinne Le Quéré, Michael R. Raupach, Christopher B. Field, Erik T. Buitenhuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, RA. Houghton, Gregg Marland (2007) : Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity carbon intensity and efficiency of natural sinks. Proceedings of the National Academy of Science.

Carlier P., Paulin Ch., Petit V., Pointet T. (1989). Alimentation artificielle de la nappe de Grande-Terre. Conditions hydrogéologiques, essais d'injection, modélisation et simulation. Rapport BRGM 89GLP104.

Carlier P., Petit V. (1989). Gestion de la nappe de Marie-Galante – Modélisation hydrodynamique. Rapport BRGM 89GLP108.

Casanova J., Béchu E., Bouzit M., Leroy Ph., Maton L, Pettenati M. (2008). Appui au projet de Recharge artificielle et Gestion Active des nappes Littorales (REGAL). Rapport intermédiaire BRGM/RP-56836-FR.

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

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

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

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

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

Compagnie de Prospection Géophysique Française (1973) – Prospection géophysique à Rivière Case Pilote. Etude 1106

Compagnie de Prospection Géophysique Française (1975) – Caritan. Prospection géophysique. Etude 1446

Compagnie de Prospection Géophysique Française (1975) – Rivière Massel. Cap Chevalier. Prospection géophysique. Etude 1450

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

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

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

Cottee S. (1972). Etude des ressources en eau souterraines de la Grande-Terre – Guadeloupe. Rapport de synthèse des résultats acquis entre 1969 et 1972 par le BRGM et atlas des eaux souterraines de la Grande-Terre. Rapport BRGM 72 ANT 36.

Cottee S. et Mouret C. (1976) – Etude hydrogéologique des calcaires de Caritan : Commune de Sainte-Anne (Martinique). Résultats du sondage n°2 et conclusions sur la campagne. Rapport BRGM 76 ANT 16

Cottee S. et Mouret C. (1976) – Reconnaissance hydrogéologique des calcaires de Puyferrat. Rapport BRGM 76 ANT 27

Cottee S. et Paulin C. (1978) – Reconnaissance hydrogéologique dans la basse vallée de la rivière Galion. Rapport BRGM 78 ANT 35

Cottee S. et Thibaut P. M. (1973) – Recherche d'eau souterraine dans le bassin de la rivière de Case-Pilote. Rapport BRGM 73 ANT13

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

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

DAUM J.R., avec la collaboration de BAKALOWICZ M., CHERY L., LONGIN G., (1996) – Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rap. BRGM R 38847, 77p., 27 fig., 5 tabl. (Rapport BRGM)

De Montét V. (2008). Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque – cas de la Camargue. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

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

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

Direction Générale de l'Energie et du Climat/Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. Synthèse n°2. Février 2010

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

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

Dumon A., Mardhel V. (2009). Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF – Version 2. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Guadeloupe. BRGM/RP-56953-FR.

Dumon A., Roques C. (2010). Surveillance quantitative des masses d'eau souterraine de Guadeloupe – Année 2009. Rapport BRGM/RP-58102-FR.

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

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

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

Frissant N., René-Corail C., coll Bonnier J. et De La Torre Y. (2005). Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR.

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

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

GIEC de 2007

GIEC, (2007) : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse.

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

Gourdol L., Bézèlgues S., avec la collaboration de Mardhel V., Schomburgk S. et Gravier A. (2004). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe) – Phase 2. Rapport BRGM/RP-52677-FR.

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

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

Hamm V. (2010) – Détermination du débit d'exploitation des forages d'eau de Duchassaing, Blanchard, et Celcourt destinés à l'AEP à l'aide du modèle hydrodynamique des écoulements souterrains de Grande-Terre. Rapport BRGM/RP-57988-FR.

Hamm V., Thiery D., Amraoui N., Bézèlgues-Courtade S. (2007). Modélisation hydrodynamique diphasique des écoulements souterrains de Grande-Terre. Rapport BRGM/RP-55039-FR.

Hansen J. E., Scientific reticence and sea level rise, Environmental research letter 2, April June 2007, http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7_2_024002.html

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

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

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

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

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

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

Lacouture L. (1996) Faisabilité d'un modèle hydrogéologique sur la bordure sud du Marais Poitevin (17 – 79) – Bilan des connaissances. 51 pages, 16 illustrations, 10 annexes. (Rapport BRGM)

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

Lenôtre N, Le Cozannet G, Dörfiger N. (2010). Contribution du BRGM au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral. Rapport BRGM/RP-58289-FR.

Lenôtre N, Pedreros R. (2006). Impact du changement climatique sur le littoral, Géosciences - La revue du BRGM pour une terre durable, N° 3, p. 36-43

Lesage Ph., (1990). Reconnaissance géophysique dans le cadre d'une prospection hydrogéologique sur le territoire de la commune de Saint-Martin (Ile de Saint-Martin, Antilles). Note technique BRGM 90 GPH 006, janvier 1990.

Lesage Ph., Petit V. (1989). Prospection géophysique pour la recherche d'eau souterraine au futur golf de St-Jean – Ile de St Martin. Rapport BRGM R 30162 ANT 4S 89.

Lions J., Allier D., Pinson S., Vittecoq B. (2008) – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Martinique. Rapport BRGM/RP-56748-FR

Lobo-Ferreira, J.P, Chachadi, A.G., Diamantino, C., & Henriques, M.J. (2005b), Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. IAHS and LNEC, Proceedings

of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

Lombard A., Garric G., Penduff T., Molines J.M. (2008): Regional variability of sea level change using a global ocean model at $\frac{1}{4}^\circ$ resolution, Ocean Dyn.

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

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

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

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

Paulin C. (1978) – Recherche d'eau souterraine en Martinique. Résultats de la campagne géophysique 1978. Rapport BRGM 78 ANT 45

Paulin C. (1979) – Recherche d'eau souterraine en Martinique : pompage d'essai réalisé sur le forage DS2 au Diamant. Compte-rendu et interprétation. Rapport BRGM 79 ANT 36

Paulin C. (1979) – Recherche d'eau souterraine en Martinique. Résultats de la campagne de reconnaissance par sondages mécaniques. Rapport BRGM 79 ANT 20

Paulin C. (1980) – Reconnaissance par méthode des résistivités de l'allure du biseau salé à l'embouchure de la rivière Fond Laillet (Bellefontaine, Martinique). Note BRGM 80 MTQ 12

Paulin C. (1981) – Recherche d'eau souterraine au Diamant Habitation Dizac. Compte rendu et interprétation des pompages d'essai réalisés sur les forages DF1 et DF2. Rapport BRGM 81 ANT 024

Paulin C. (1981) – Recherche d'eau souterraine en Martinique. Résultats de la deuxième campagne de reconnaissance par sondages mécaniques. Rapport BRGM 81 ANT 04

Paulin Ch., coll Valentin J., (1982). Etude géophysique par sondages électriques de la nappe d'eau dans e secteur de la Plaine des Galets – Marie-Galante. Note BRGM 82 GPE 01.

Paulin Ch., Valentin J., coll Louarti D. (1982). Etude hydrogéologique de l'île de Marie-Galante. Résultats de la campagne géophysique de 1981 et de la réinterprétation des sondages électriques anciens. Rapport BRGM 82 ANT 029.

Pedreros R. et Lecacheux S. (2008). Caractérisation des impacts de la houle sur le littoral de la Guadeloupe au passage de l'ouragan Dean – Phase III : modélisation de la houle. Rapport BRGM/RP-56174-FR.

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

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

Pointet T., Schwartz J. (1983). Ile de Marie-Galante – Bilan des écoulements souterrains – Simulation en régime permanent. Rapport BRGM 83 SGN 493 EAU.

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

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

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

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

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

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

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

Roques C., Bengoubou-Valerius M., Le Cozant G. (2010). Evolution et dynamique du trait de côte de l'archipel guadeloupéen. Etude de 1956 à 2004. Rapport BRGM/RP-58750-FR.

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

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

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

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

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

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

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

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

Vilmen F., Gourdol L., Bézèlgues S., Comte JP. (2003). Synthèse des connaissances hydrogéologiques de Guadeloupe. Rapport BRGM/RP-51785-FR.

Vittecoq B., Brugeron A., Lachassagne P., Mathieu F. (2007) – Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin. Apport de la méthode géophysique par panneau électrique. Rapport BRGM/RP-55554-FR

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

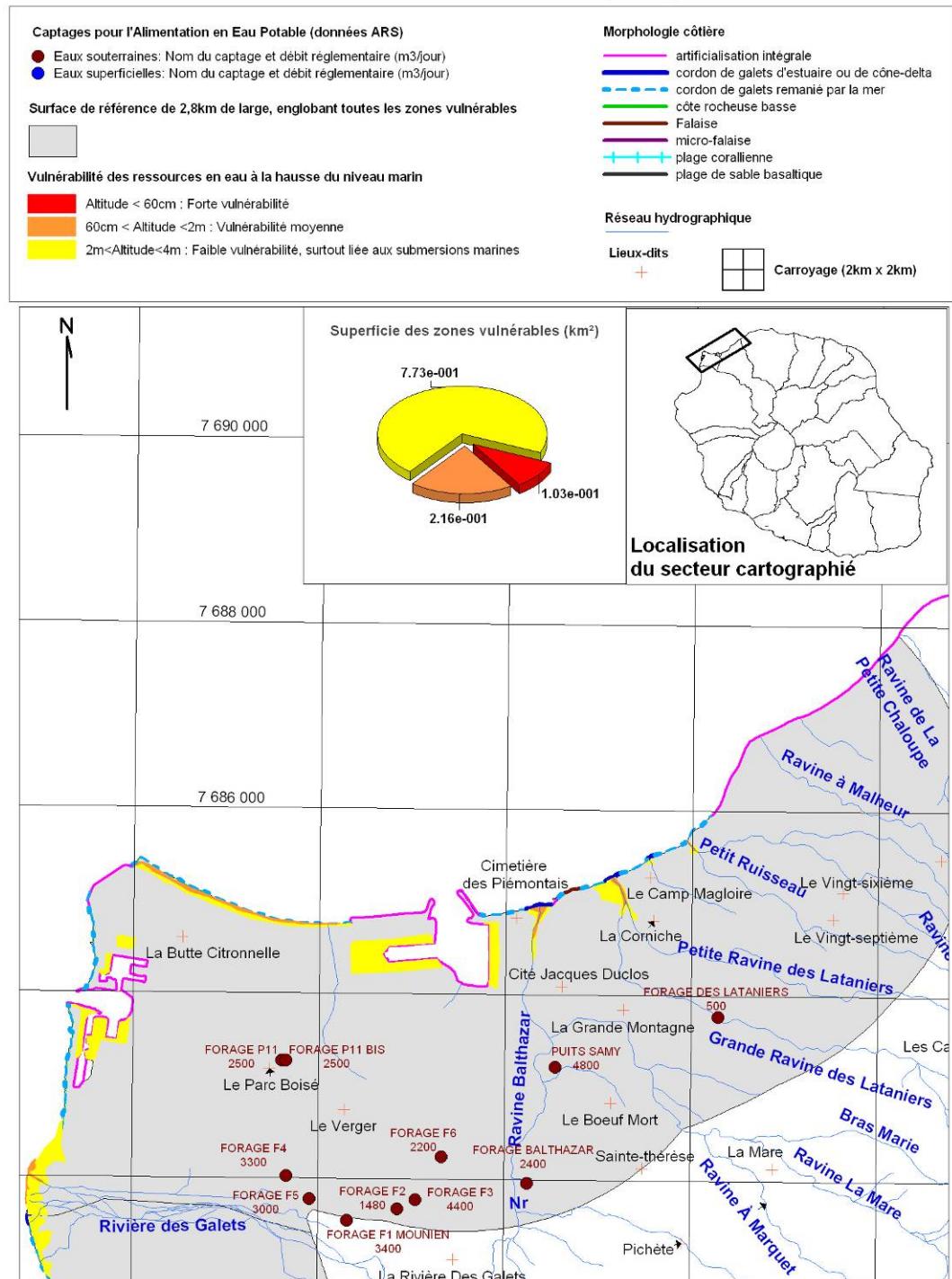
Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009, Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers. Ground Water 47(2) : 197-204.

Wuillemer A ; Seguin J.J. (2008). Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final. BRGM/RP-55063-FR.

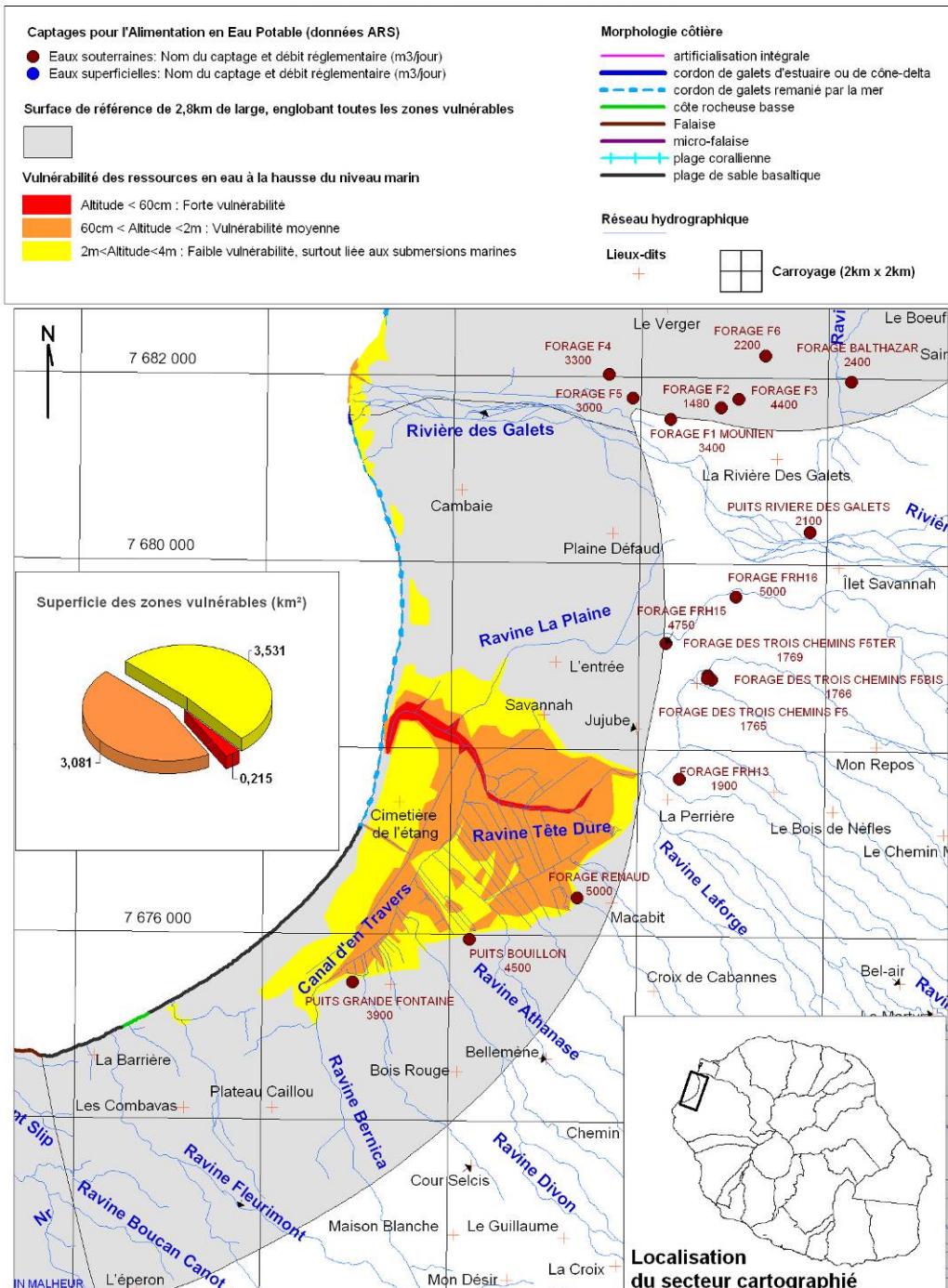
Annexe 1

Cartes de vulnérabilité des ressources en eau à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques de la côte Ouest

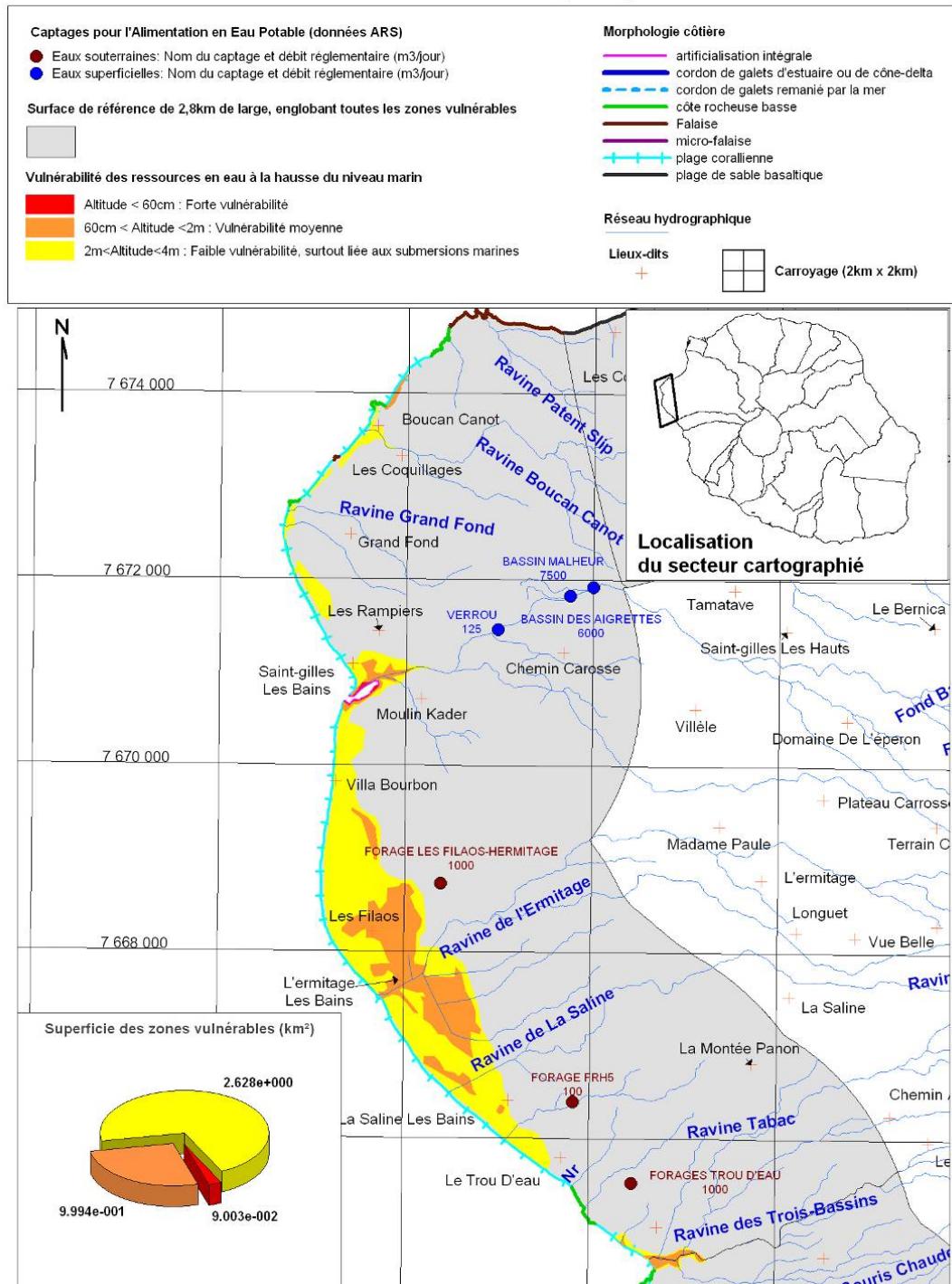
Le Port et La Possession: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



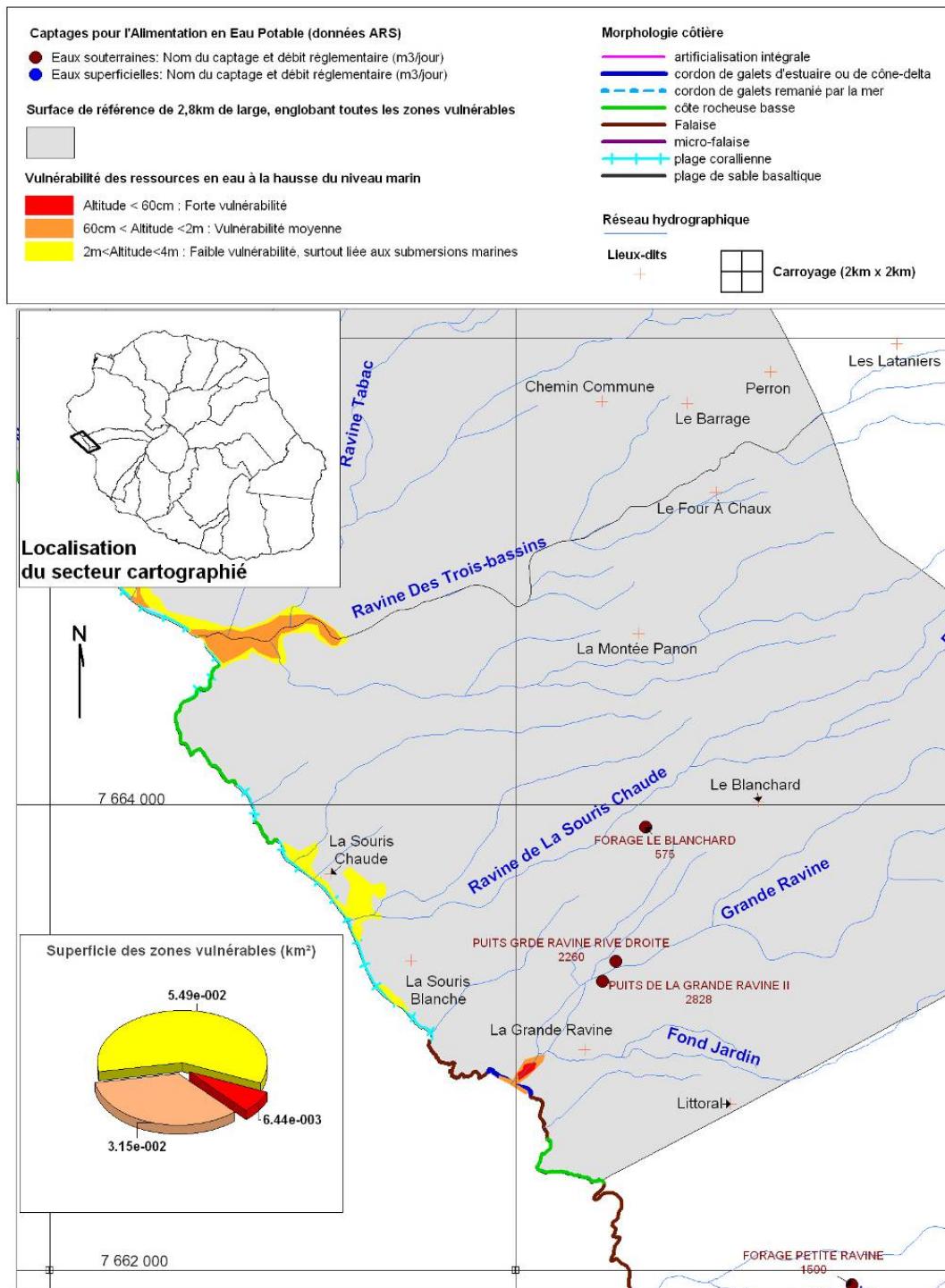
Baie de Saint-Paul: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



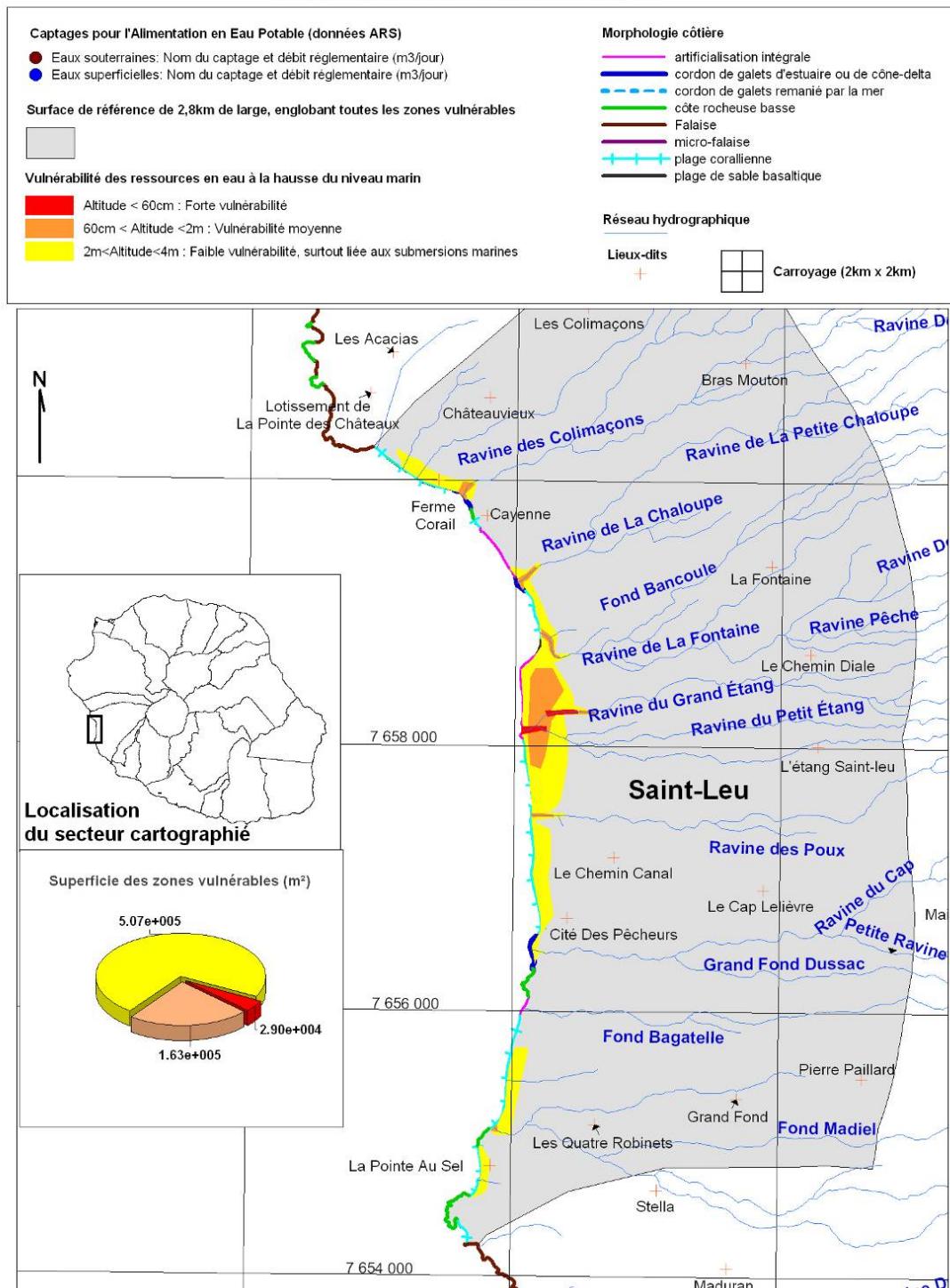
Saint-Paul Sud: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



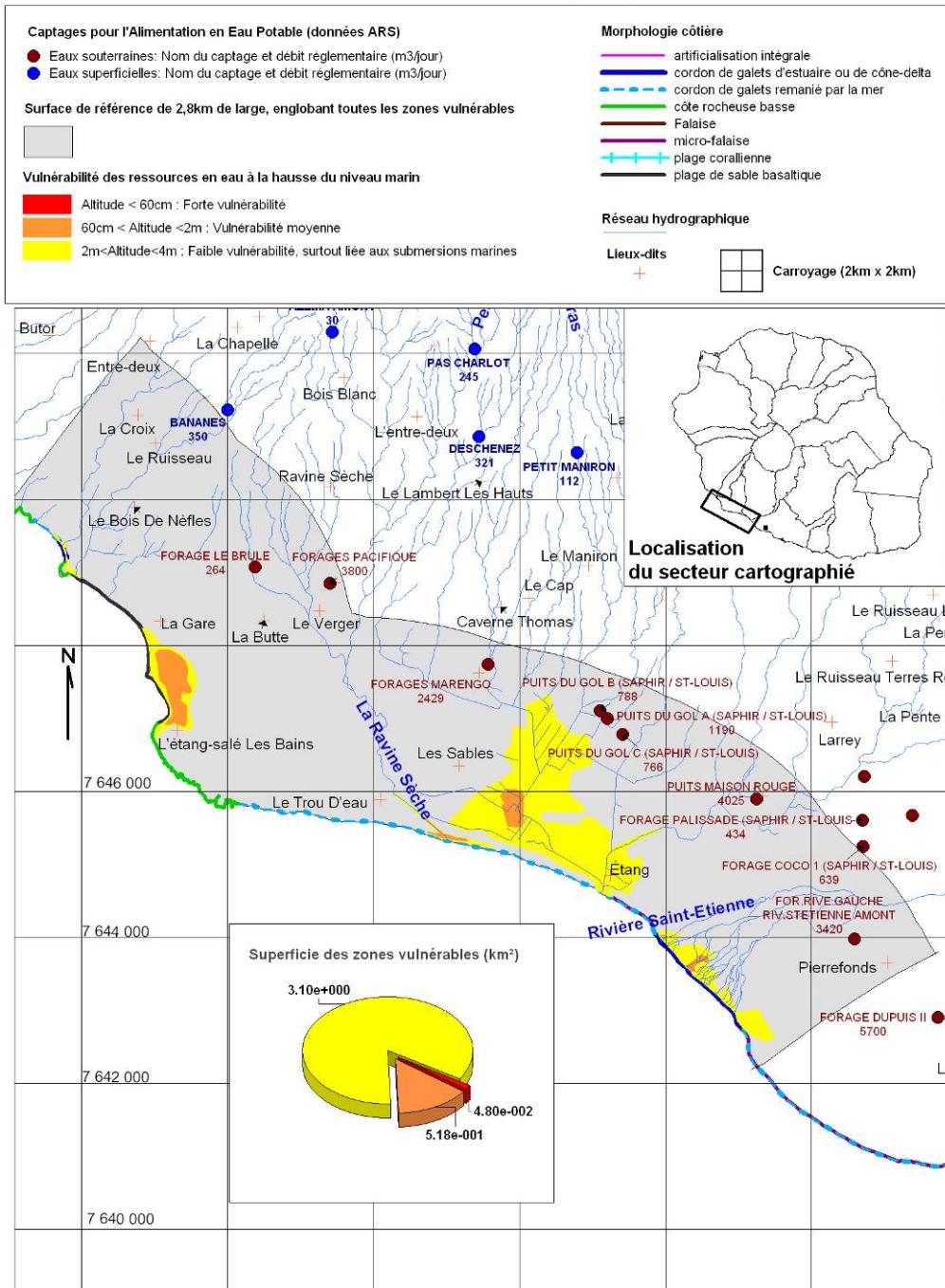
Trois-Bassins: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



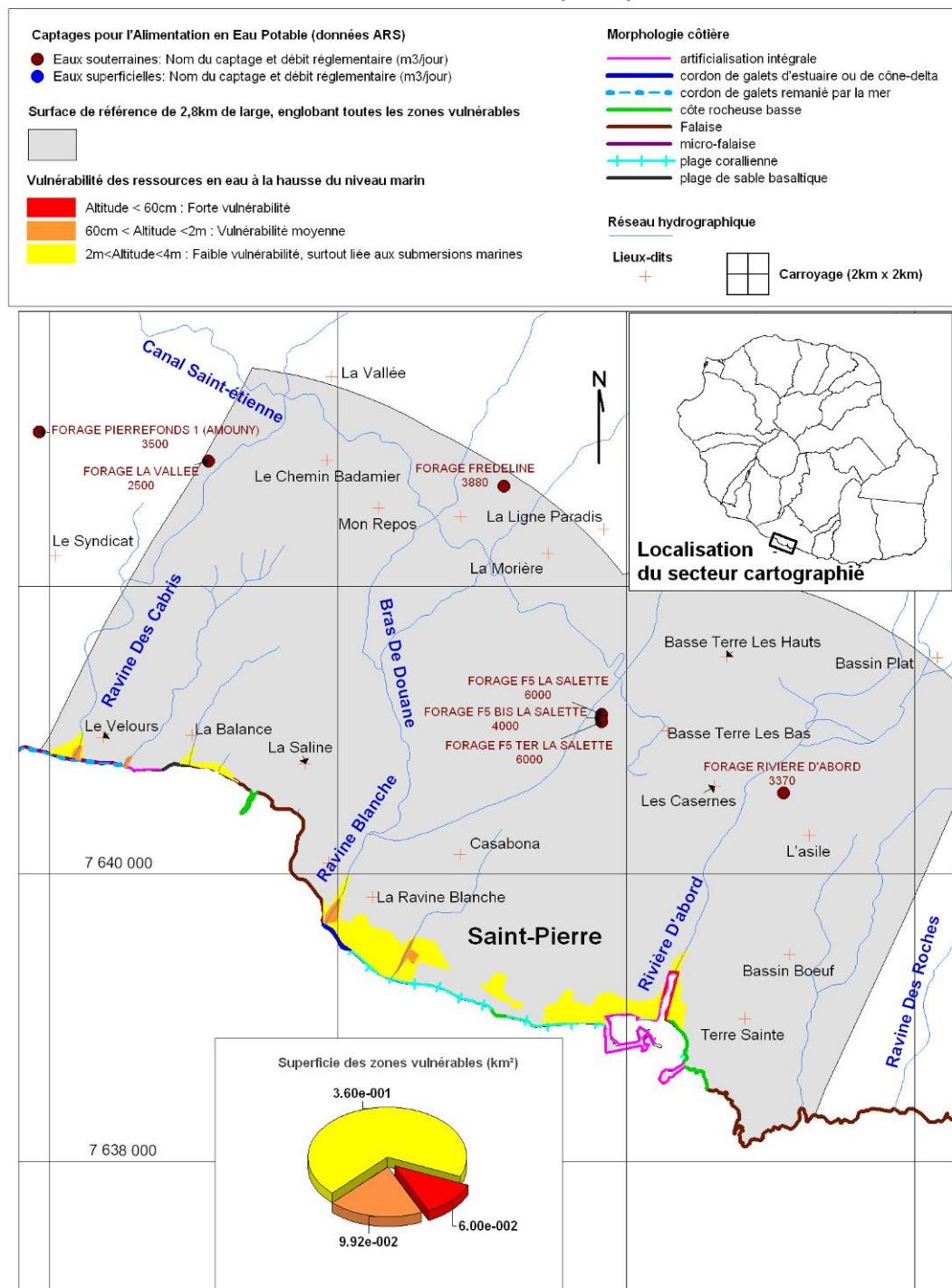
Saint-Leu: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



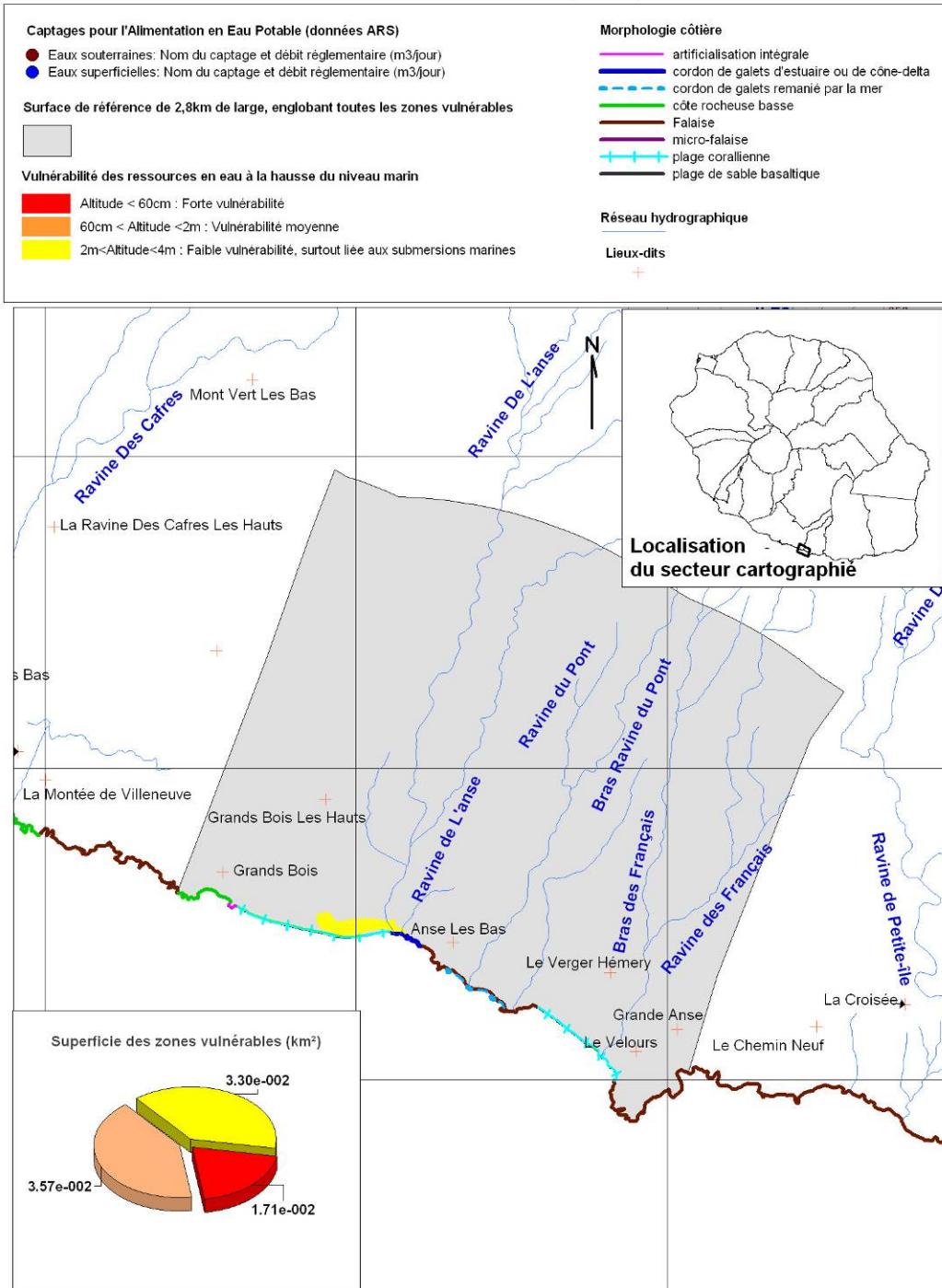
Etang Salé, Etang de Gol, Pierrefonds: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



Saint Pierre: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



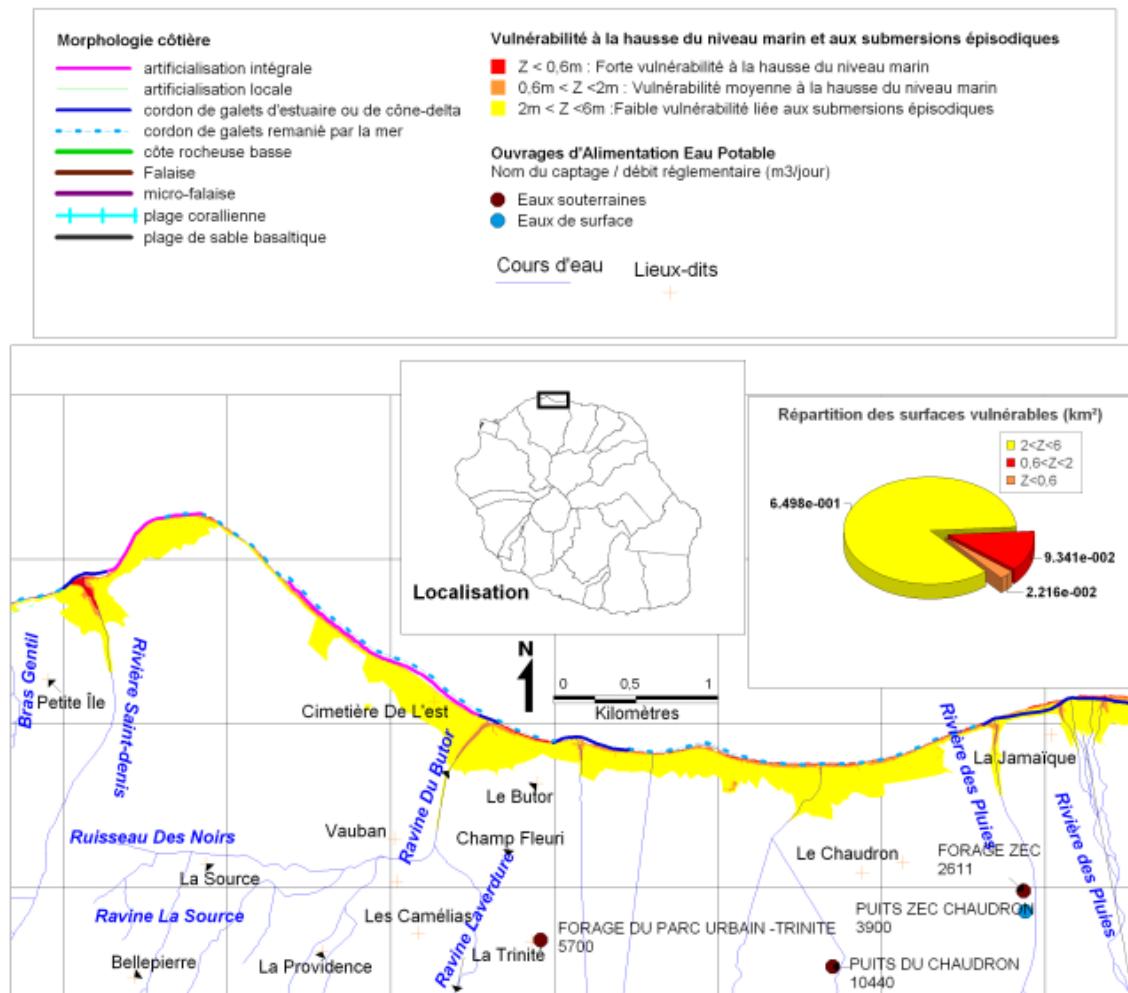
Secteur entre Grand Bois et Grande Anse: cartographie des zones de vulnérabilité des ressources en eau à une remontée du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



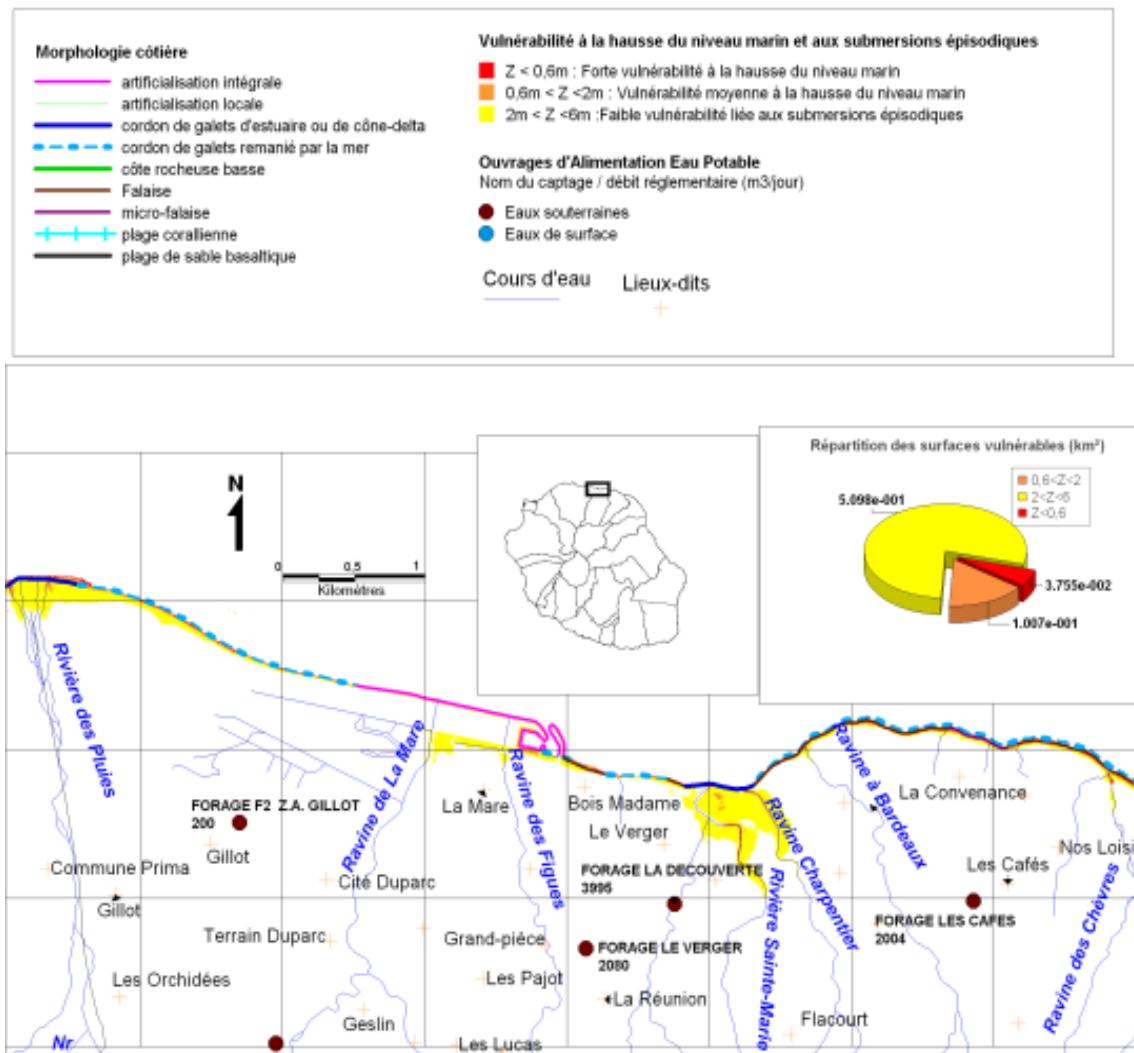
Annexe 2

Cartes de vulnérabilité à la hausse du niveau marin et aux submersions épisodiques des côtes Nord et Est de La Réunion

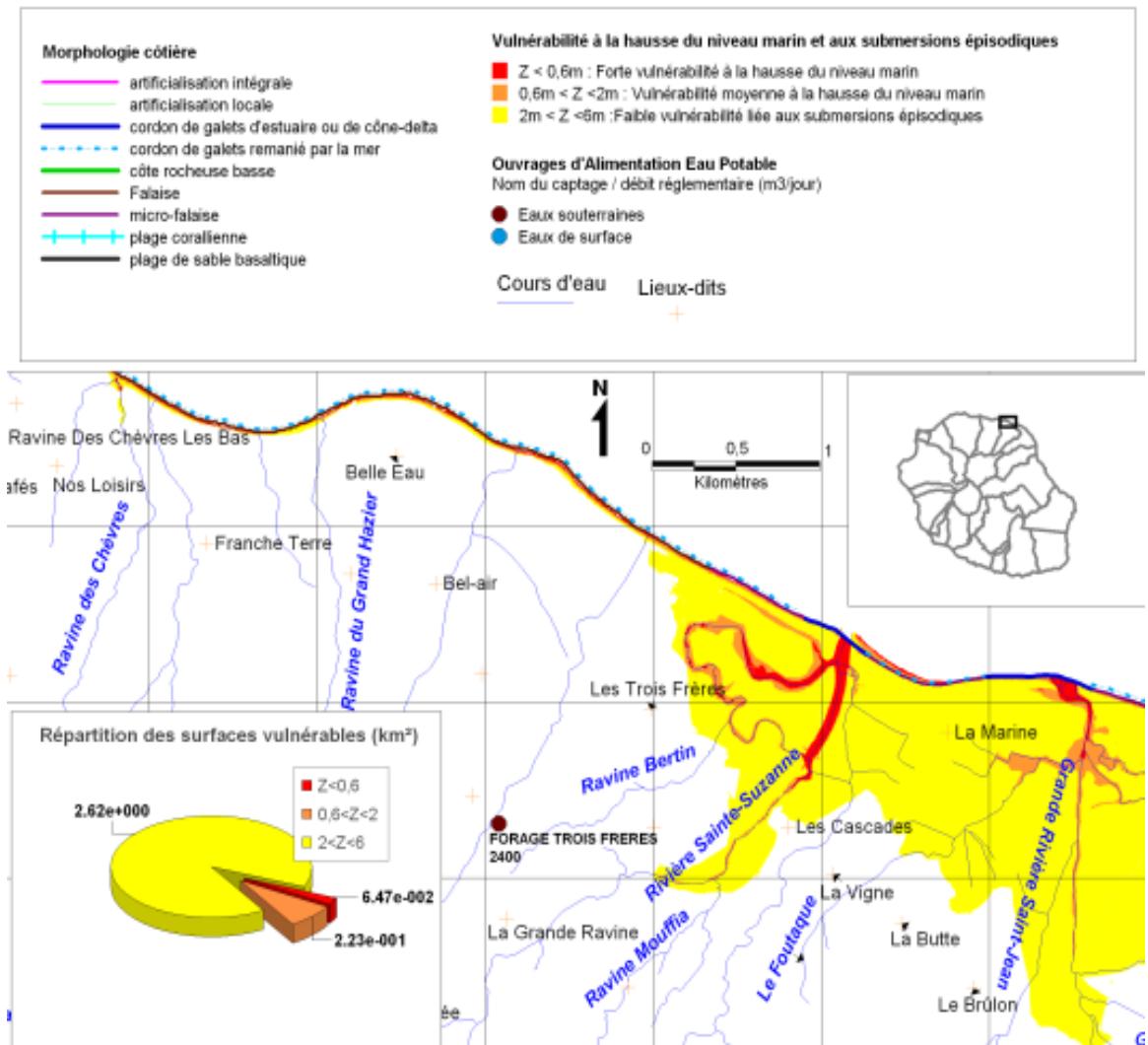
Cartographie des zones côtières de la Commune de Saint-Denis vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



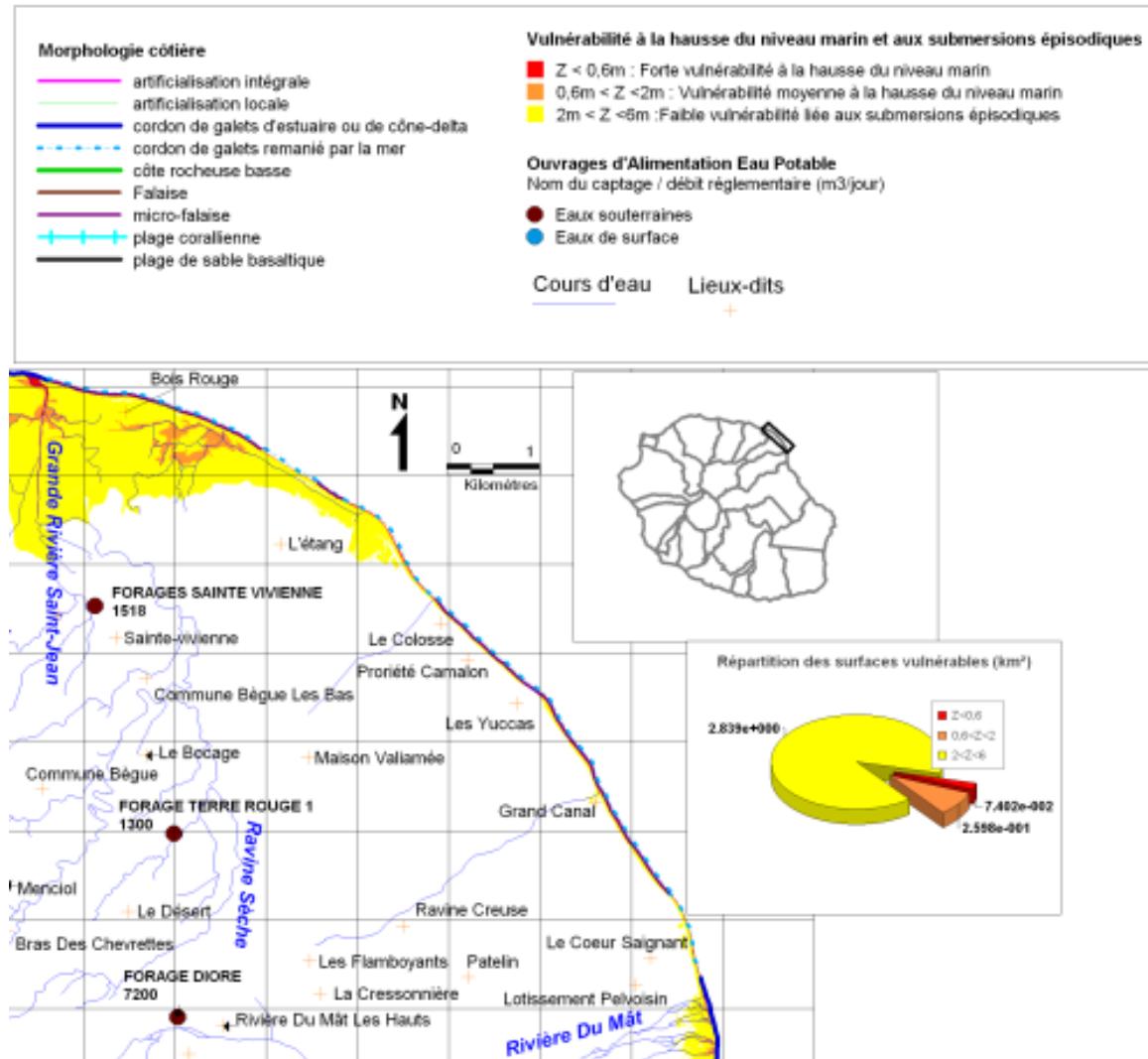
Cartographie des zones côtières de la Commune de Sainte-Marie vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



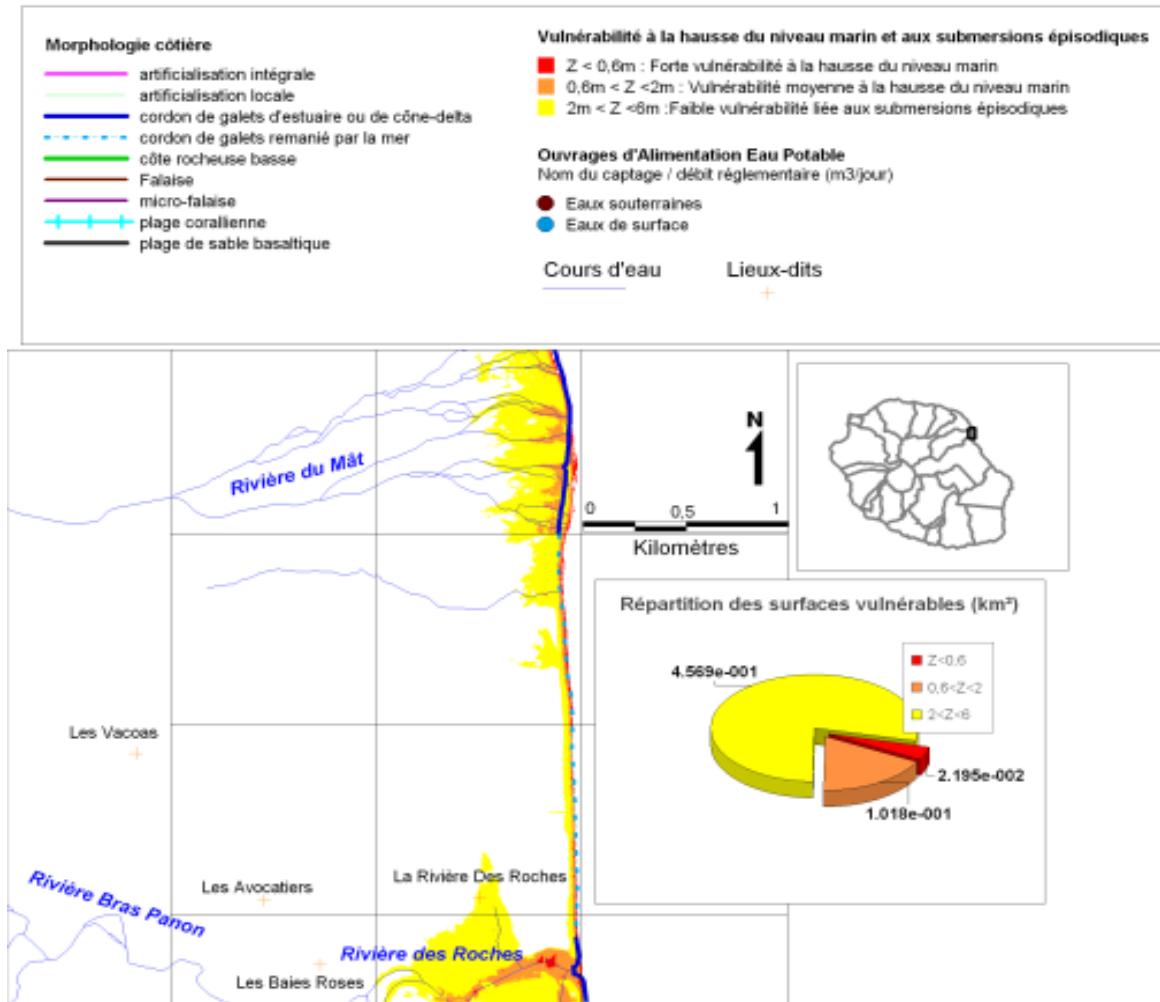
Cartographie des zones côtières de la Commune de Sainte-Suzanne vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



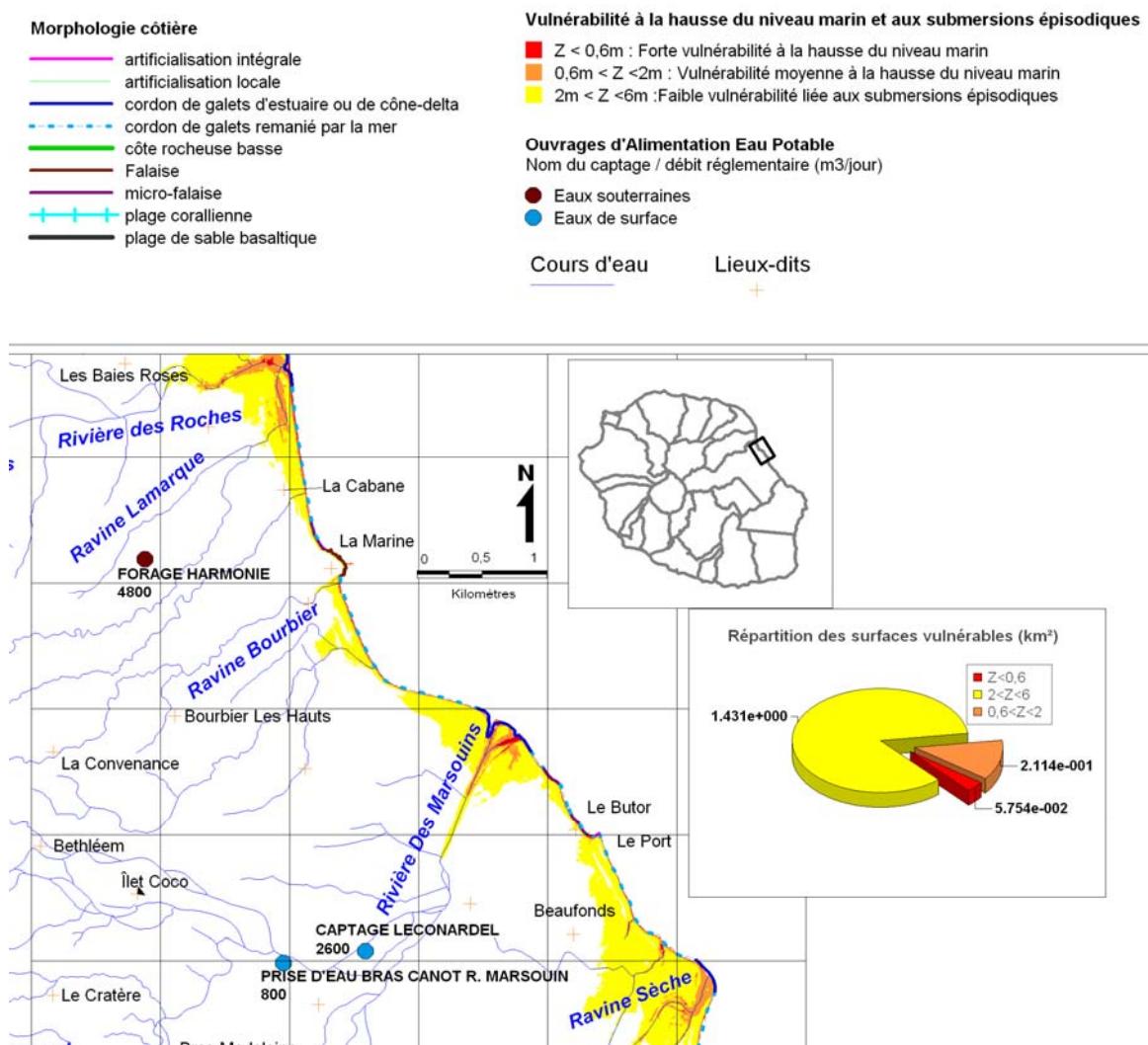
Cartographie des zones côtières de la Commune de Saint-André vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



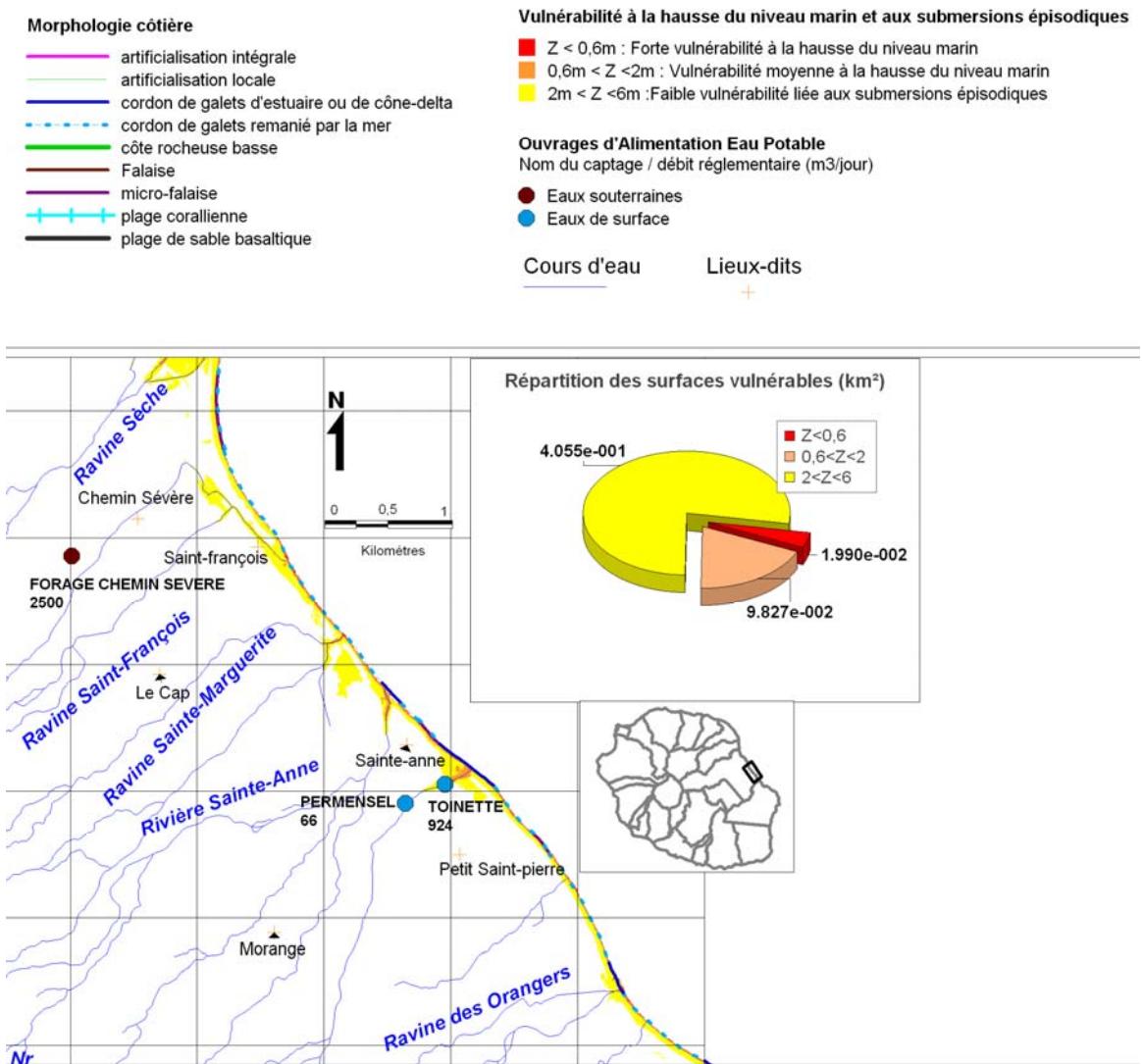
Cartographie des zones côtières de la Commune de Bras-Panon vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



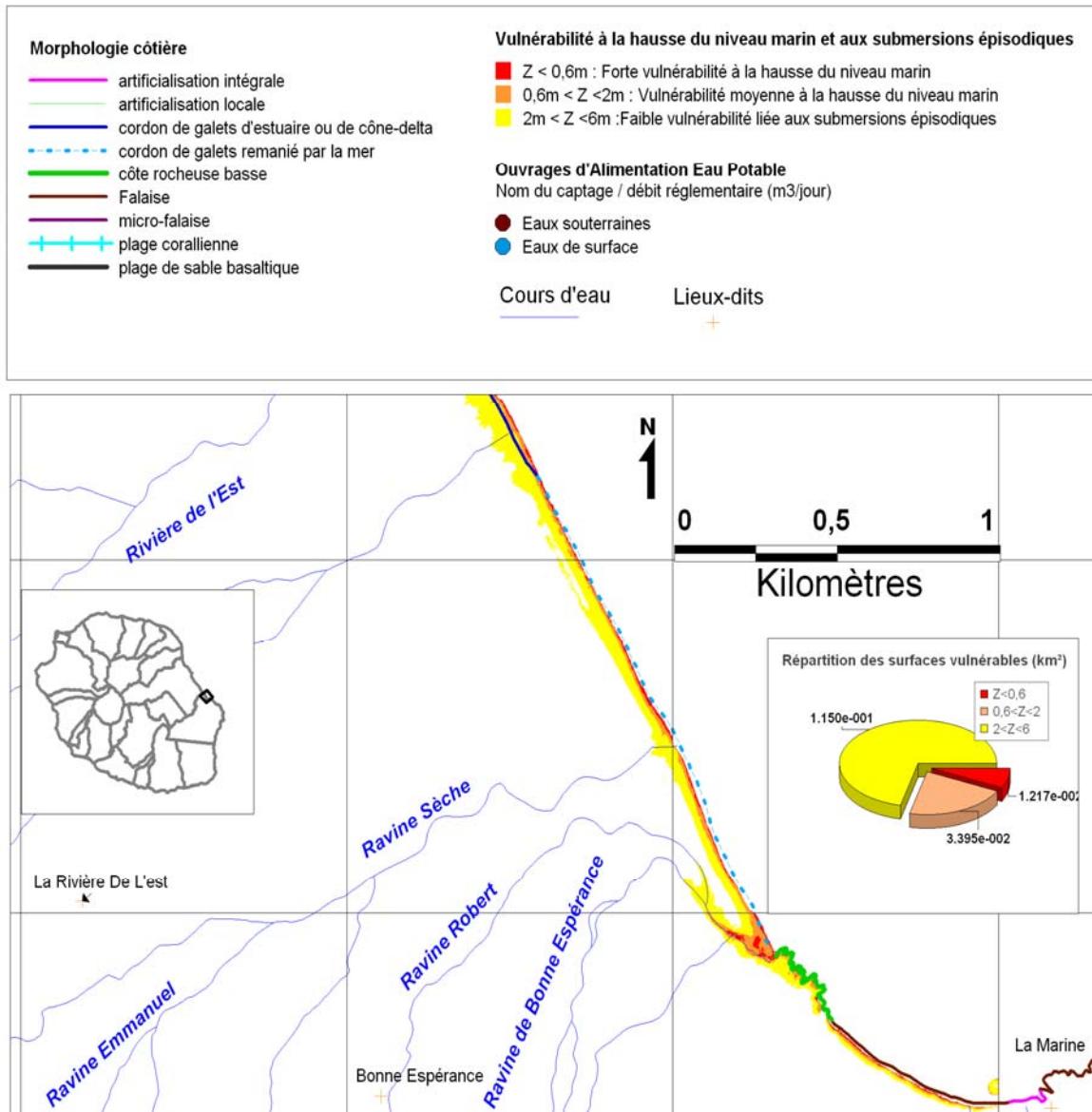
Cartographie des zones côtières du Nord de la Commune de Saint-Benoît vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



Cartographie des zones côtières du Sud de la Commune de Saint-Benoît vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques



Cartographie des zones côtières du Nord de la commune de Sainte-Rose vulnérables à la hausse du niveau marin et aux submersions marines épisodiques





Service EAU, Unité EAU/NRE
1039 rue de Pinville

34000 - Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 90