Partenariat 2011 - EAU- Action Nº23



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

Statut du document [Rapport final]

N.Dörfliger, A. Dumon, B. Aunay, G. Picot avec la collaboration de Claire Moynot et de Marine Bollard (BRGM)

Décembre 2011





#### Contexte de programmation et de réalisation

Dans le cadre de l'action N°23 « Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM» de la convention ONEMA-BRGM 2011, la finalisation des actions menées au cours des années 2010 et 2011 a été réalisée et fait ainsi l'objet de ce rapport final.

#### Les auteurs

Nathalie Dörfliger Hydrogéologue <u>n.dorfliger@brgm.fr</u> Service EAU, EAU/DIR, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 – France

Amandine Dumon Hydrogéologue <u>a.dumon@brgm.fr</u> brgm Guadeloupe, Morne Houëlmont, Route de l'Observatoire, 97113 Gourbeyre

Bertrand Aunay Hydrogéologue <u>b.aunay@brgm.fr</u> brgm Languedoc Roussillon, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier

Géraldine Picot Hydrogéologue <u>g.picot@brgm.fr</u> Service EAU, EAU/GDR, 3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 – France

#### Les correspondants

<u>Onema</u> : Pascal Maugis, Direction de l'Action Scientifique et Technique Chargé de mission en Hydrologie, pascal.maugis@onema.fr Référence du document : Fiche Action BRGM ONEMA N°23 2011

Droits d'usage :	accès libre
Couverture géographique :	Antilles et Océan Indien – Ile de la Réunion
Niveau géographique [un seul choix] :	
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	Professionnels, experts
Nature de la ressource [plusieurs choix possibles] :	Rapport, tableau de données, couche information géographique,



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

d7-h1a

.89 3740,46 -625.5

Document public

Rapport «final»

BRGM/RP-60828-FR Décembre 2011

de-hia

hit





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

Rapport «intermédiaire»

## BRGM/RP-60828-FR

Décembre 2011

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

N.Dörfliger, A. Dumon, B. Aunay, G. Picot avec la collaboration de Claire Moynot et de Marine Bollard

,	V	é	ri	fi	са	te	ur	2
		_						

Nom : Allier Delphine

Date : 24 mars 2012

Signature :

#### Approbateur :

Nom : Lallier S.

Date : 10 décembre 2012

Signature :

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

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





**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 :

Dörfliger N., Dumon A., Aunay B., Picot G., avec la collaboration de Claire Moynot et de Marine Bollard (2011) : Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM, Rapport final, BRGM RP-60828-FR, 285 p., 125 ill., 23 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.

Ce rapport fait la synthèse des résultats des études menées dans le cadre des actions N°26 et N° 23 « Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM» des conventions ONEMA-BRGM 2010 et 2011.

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.

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 sont de deux types, les premières basées sur des sectorisations par altitude et les deuxièmes selon la méthode GADLIT pour le niveau marin actuel ; les premières 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 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.

D'après la méthode de cartographie multicritère GALDIT, les paramètres hydrogéologiques qui présentent la plus grande vulnérabilité intrinsèque par rapport à la montée du niveau marin sont la conductivité hydraulique (paramètre A) et la puissance de l'aquifère (paramètre T).

Cette présente étude a permis de mettre en évidence les zones de vulnérabilité des aquifères de Grande-Terre, de Marie-Galante et de la zone littorale de l'île de la Réunion, par le biais de la méthode de cartographie multicritère GALDIT. La méthode GALDIT est simple d'utilisation et nécessite peu de données. Cependant le manque de données que ce soit de type piézométrie détaillée sur la côte ou de concentrations en chlorures ou de conductivités électriques, donne lieu à des approximations. Si les résultats sont globalement cohérents, certaines zones sont affectées d'une valeur de vulnérabilité trop faible.

Montée du niveau marin - conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

En termes de recommandations, la mise en place d'un réseau dédié au suivi quantitatif et qualitatif est nécessaire. Il est en partie existant avec le réseau piézométrique DCE. Concernant les données de salinité, la mise en œuvre de profils verticaux permettrait d'obtenir des données indispensables pour améliorer la cartographie de la vulnérabilité ou le cas échéant d'effectuer des simulations numériques. Les données actuelles à l'exception de la Réunion sont essentiellement ponctuelles, ne reflétant pas la réalité de la position du biseau salé. Pour la Guadeloupe, les zones de forte vulnérabilité ne font pas l'objet d'exploitation actuellement ; les points de prélèvement sont situés au niveau des zones de faible vulnérabilité ou au niveau de l'interface zones de vulnérabilité moyenne et zones de vulnérabilité faible. Pour l'île de la Réunion, les zones de vulnérabilité fortes et movennes sont pour la partie occidentale de l'île déjà affectées par des intrusions salines, comme en témoignent les fortes conductivités électriques au niveau des aguifères du Port, de St Paul bas, des Trois bassins bas, du Gol, de Petite ile et de St Pierre ouest. Un suivi existe déjà ; il n'est pas nécessaire de procéder à son renforcement. Néanmoins des solutions de gestion active basées sur le recyclage des eaux usées traitées pour effectuer une recharge artificielle et créer une barrière hydraulique sont à envisager, afin de limiter ces phénomènes.

# Sommaire

1.	Introduction 1	9
2.	Synthèse de l'état de l'art concernant l'intrusion saline des aquifères côtiers2	:1
3.	Synthèse de l'état de l'art concernant la remontée du niveau marin induite par le changement climatique	nt ?7
	3.1. OBSERVATIONS ACTUELLES, CAUSES DE L'ELEVATION SECULAIRE DU NIVEAU MARIN MOYEN ET VARIABILITE REGIONALE DU NIVEAU MARIN	J ?7
	3.2. PREDICTIONS A PARTIR DES OBSERVATIONS ACTUELLES ET DES MODELES	Q
	3.2.1. Augmentation du niveau marin dans les Caraïbes	5 5
	<ul> <li>3.3. INFLUENCE DES CYCLONES SUR LA SUBMERSION TEMPORAIRE</li></ul>	6 7 9
	3.4. CONCLUSION	1
4.	Etat des connaissances des aquifères côtiers à l'échelle des DROM/COM 4	.2
	4.1. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE LA GUADELOUPE	A .2 .5 .6 .9 .1
	4.1.6. Saint-Martin	1 52
	4.2. DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS DE L/         MARTINIQUE       5         4.2.1. Saint-Pierre (1978-1981)       5         4.2.2. Bellefontaine (1980)       5         4.2.3. Case Pilote (1973)       5         4.2.4. Plaine du Lamentin (2007)       5         4.2.5. Rivière salée (2005-2006)       6         4.2.6. Vatable, Les Trois Ilets (1978-1979)       6         4.2.7. Diamant (1979)       6         4.2.8. Calcaires de Caritan, Saint-Anne (1975-1976)       6         4.2.9. Calcaires de Puyferrat, Vauclin (1976)       6         4.2.10.Le Robert (1981)       6         4.2.11 Basse vallée de la rivière Galion, Trinité (1978)       6	A 2 4 6 7 8 0 1 1 3 3 3 5
		5

Montée du niveau marin - conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

	4.3.	DONNEES EXISTANTES SUR LA SALINISATION DES AQUIFERES COTIERS A LA	A 65
		A 3.1 Données des rannorts BPCM (1988 et 2005)	. 00 65
			. 00
5.	Orig	jine de la salinité et traitement de données de conductivité électrique	. 69
	5.1.	ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN GUADELOUPE	. 69
	5.2.	ORIGINE DE LA SALINITE DES AQUIFERES COTIERS EN MARTINIQUE	. 73
	5.3.	TRAITEMENT DES DONNEES DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE A LA REUNION	. 78
		5.3.1. Démarche suivie	. 78
		5.3.2. Résultats	. 79
	51	CONCLUSION	84
	5.4.		. 04 84
		5.4.2 La Martinique	85
		5.4.3. L'île de la Réunion	. 85
6.	Cart les [	tographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de la montée du niveau ma DROM/COM	rin dans . 87
	6.1.		. 87
	6.2.	ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES ZONES DE VULNERABILITE EN MARTIN	IIQUE
			. 87
	6.2		00
	0.3.	LA METHODE GALDIT	. 00
		6.3.2 Les paramètres de la méthode GALDIT	. 00 80
			. 03
	6.4.	APPLICATION DE LA METHODE GALDIT SUR GRANDE-TERRE ET MARIE-GALA 92	NTE
		6.4.1. Paramètre G : Type de nappe	. 92
		6.4.2. Paramètre A : paramètres hydrodynamiques	. 95
		6.4.3. Paramètre L : côtes piézométriques	. 99
		6.4.4. Paramètre D : distance à la côte	100
		6.4.5. Paramètre I : état des lieux de la salinisation	103
		6.4.6. Paramètre 1 : épaisseur saturée de l'aquifère	112
	6.5.	LA CARTOGRAPHIE MULTICRITERE	115
		6.5.1. Choix cartographiques	115
		6.5.2. Résultats de la cartographie multicritère sur Grande-Terre et Marie-Galante	116
	66	LA CARTOGRAPHIE DE LA SUBMERSION A PARTIR DU MNT 10	119
	0.0.	6 6 1 Les résultats de la cartographie de la submersion	119
		6.6.2. Réserves sur la cartographie de la submersion du littoral de Grande-Terre et M	larie-
		Galante	122
	67		= 1 A
	0.7.	REUNION	= LA 124
		6.7.1. Cartographie du Critère G	124
		6.7.2. Cartographie du paramètre A	126
		6.7.3. Cartographie du paramètre L	131
		6.7.4. Cartographie du paramètre D	137
		6.7.5. Cartographie du paramètre I	140
10		BRGM/RP-60828-FR – Rapport fina	al

Montée du niveau marin – conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

	6.7.6. Cartographie du paramètre T	145
	6.7.7. Classement numérique multicritère de la vulnérabilité : superposition pondéré cartes des différents paramètres	e des 148
	6.7.8. Conclusions concernant la cartographie de la vulnérabilité des 6 paramètres o méthode GALDIT	le la 157
7.	Modélisation de l'impact du niveau marin sur Grande Terre (Guadeloupe) et cartographie vulnérabilité pour trois scénarios de remontée du niveau marin	e de la 161
	7.1. SIMULATION DES PIEZOMETRIES POUR DIFFERENTS SCENARII DE REMONT NIVEAU MARIN	EE DU 161
	7.1.1. Le principe des simulations	161
	7.1.2. Les résultats des simulations	162
	7.1.3. Les limites de la simulation	164
	7.2. INTEGRATION DES PIEZOMETRIES SIMULEES A LA METHODE GALDIT	164
8.	Conclusion et perspectives	173
	8.1. CONCLUSION	173
	8.2. RECOMMANDATIONS POUR LE SUIVI ET LA GESTION DES AQUIFERES COTIL DROM COM	ERS DES 174
9.	Principales Références	177

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (extrait de Frissant et al, 2005)	22
Illustration 2 : Schématisation de la forme du biseau salé pour une nappe libre avec un écoulement vers la mer (extrait de Glover (1959))	23
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)	25
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 : donées de Holgate et al. (2006).	י 27
Illustration 5 : Explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué (Source : GIEC, 2007)	28
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).	29
Illustration 7 : Présentation des 4 canevas A1(A1B, A1FI, A1T), A2, B1, B2 du GIEC	30
Illustration 8: Schéma de l'arborescence aboutissant au 40 scénarios SRES (GIEC, 2000) 3	31
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)	31
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	

BRGM/RP-60828-FR – Rapport final

Montée du niveau marin – conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

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
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)
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 34
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 35
Illustration 14 : Reconstitution des vitesses de variation du niveau de la mer
Illustration 15 : les zones de formation des cyclones et leurs trajectoires habituelles (Source : prim.net)
Illustration 16 : Exposition des rivages réunionnais à la houle (Météo-France, 2009) 39
Illustration 17: Zone de formation es cyclones dans l'Océan Atlantique et leur trajectoires préférentielles (http://tropics.hamweather.net)
Illustration 18 : Cartographie des zones basses de la Guadeloupe (Roques et al., 2010) 41
Illustration 19 : Représentation cartographique du territoire de la Guadeloupe
Illustration 20 : Cadre géodynamique de l'arc des Petites Antilles (BRGM) [figurés rayés arc interne et en blanc arc externe]
Illustration 21 : Ensembles volcano-structuraux de la Basse-Terre (BRGM)
Illustration 22 : Découpage morpho structural de la Grande Terre (BRGM) 47
Illustration 23 : Piézométrie de la nappe de Grande-Terre en hautes eaux (Dumon et al., 2010)
Illustration 24 : Carte piézométrique de la nappe de Marie-Galante en hautes eaux (Dumon et al., 2010)
Illustration 25 : Productivité potentielle des unités constitutives d'aquifères (Vittecoq et al., 2007)
Illustration 26 : Localisation des secteurs où le biseau salé a été identifié en Martinique (points rouge)
Illustration 27 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Saint-Pierre (Paulin, 1978)
Illustration 28 : Coupe géoélectrique à Saint-Pierre (Paulin, 1978)
Illustration 29 : Plan de situation des sondages électriques implantés à Bellefontaine (Paulin, 1980)
Illustration 30 : Coupes géoélectriques à Bellefontaine (Paulin, 1980) 57
Illustration 31 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Case Pilote (Cottez et Thibault, 1973)
Illustration 32 : Implantation des panneaux électriques et extension de l'intrusion saline dans les formations superficielles au Lamentin (Vittecoq et al., 2007)
Illustration 33 : Coupe schématique de l'aval de la plaine du Lamentin selon l'hypothèse H2 (Vittecoq et al., 2007)
Illustration 34 : Investigations géophysiques mises en œuvre par ANTEA à Rivière Salée (2005)
Illustration 35 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Diamant (Paulin, 1979)
Illustration 36 : Coupe géoélectrique au Diamant (Paulin, 1979)62

Illustration 37 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Robert (Paulin, 1981)
Illustration 38 : Coupe géoélectrique C3 au Robert (Paulin, 1981)
Illustration 39 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Trinité (Cottez et Paulin, 1978)
Illustration 40 : Localisation des secteurs où une salinisation des aquifères est observée (BRGM, 1988)
Illustration 41 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur l'Ile de La Réunion (BRGM, 2005)
Illustration 42 : Diagramme de Piper – Plateaux du Nord et Plateaux de l'Est de Grande-Terre en période de carême (2000-2009)
Illustration 43 : Chroniques de conductivité et de niveau piézométrique à Richeval (2008- 2010)
Illustration 44 : Diagramme de Piper de Marie-Galante en période de carême (2008-2009) 72
Illustration 45: <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr vs. 1/Sr , SS : saison sèche, SP : saison des pluies (Brenot et al., 2008)
Illustration 46 : CI vs. Na (a), CI vs.NO3 (b), CI vs. Ca (c), CI vs. Mg (d), CI 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)
lllustration 47 : δ <sup>11</sup> B vs. 1/B (a), Cl vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche) (Brenot et al., 2008)
Illustration 48 : Emprise théorique du biseau salé et points de surveillance présentant une salinisation de l'eau
illustration 49 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur du Port
illustration 50 : Localisation des piézomètres suivis dans le secteur de la Baie de Saint-Paul 81
illustration 51 : Localisation des piézomètres dans le secteur de Saint-Paul Sud, Trois-Bassins82
illustration 52 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de l'Etang-Salé, Saint- Louis, Pierrefonds
illustration 53 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de Saint-Pierre, Manapany-Les-Bains
illustration 54 : Zone de captivité de la nappe de Grande-Terre, selon S. Bézelgues et N. Amraoui, 2006
illustration 55 : Carte de répartiation des notations GALDIT pour le paramètre G sur Grande Terre (Guadeloupe)
illustration 56 : Carte de répartiation des notations GALDIT pour le paramètre G sur Marie- Galante (Guadeloupe)
Illustration 57: Répartition des perméabilités (en m/s) simulées de Grande-Terre (V. Hamm, D. Thiery, N. Amraoui, S. Bézelgues-Courtade, juin 2007)
Illustration 58: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A sur Grande- Terre
Illustration 59: Répartition des valeurs de perméabilité sur Marie-Galante (T. Mauboussin, 1987)
Illustration 60: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A sur Marie- Galante
Illustration 61: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètres L sur Grande- Terre
Illustration 62: Carte de répartition des notations GALDIT pour la paramètre L sur Marie- Galante
Illustration 63: Répartition des notation GALDIT pour la paramètre D sur Grande-Terre 102 BRGM/RP-60828-FR – Rapport final 13

Montée du niveau marin - conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

Illustration 64: Répartition des notations GALDIT pour la paramètre D sur Marie-Galante 102
Illustration 65: Points d'eau concernés par le suivi qualité DCE du BRGM depuis 2008 104
Illustration 66: Réseaux d'analyse qualité répertoriées dans ADES pour Grande-Terre et Marie-Galante
Illustration 67: Mesure ponctuelle de conductivité sur la source de Poucet au Gosier (Weng P. et Dumon A., 2008)
Illustration 68: Définition des rangs GALDIT pour les valeurs de conductivité
Illustration 69: Définition des rangs GALDIT pour les valeurs de teneurs en chlorures 108
Illustration 70: Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorure sur Grande-Terre. Approche 2: état des lieux extrême de la salinisation
Illustration 71: Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorure sur Marie-Galante. Approche 2: état des lieux extrême de la salinisation
Illustration 72: Carte de répartition ddes notations GALDIT pour la paramètre T sur Grande- Terre
Illustration 73: Position du substratum, selon T. Mauboussin, 1987
Illustration 74: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T sur Marie- Galante
Illustration 75: Bilan des cartes superposables pour la cartographie GALDIT multicritère 115
Illustration 76: Caractéristiques des trois zones de vulnérabilité sur les cartes multicritères 116
Illustration 77: Comparaison des répartition de zones de vulnérabilité sur la carte multicritère de Grande-Terre pour les situations moyenne et pessimiste
Illustration 78: Comparaison des répartition de zones de vulnérabilité sur la carte multicritère de Marie-Galante pour les situations moyenne et pessimiste
Illustration 79: Cartographie de l'impact de la submersion du littoral lors de la remontée du niveau marin sur la Grande-Terre
Illustration 80: Cartographie de l'impact de la submersion du littoral lors de la remontée du niveau marin sur Marie-Galante
Illustration 81: Carte de vulnérabilité de Grande-Terre selon la méthode GALDIT ; Approche 2 : Situation extrême
Illustration 82: Carte de vulnérabilité de Marie-Galante selon la méthode GALDIT Approche 2 : Situation extrême
illustration 83 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre G
illustration 84 : Carte du paramètre G pour l'île de la Réunion 126
illustration 85 : Corrélation entre les 68 valeurs de transmissivité obtenues par pompages d'essai et les profondeurs des ouvrages associés
illustration 86 : Histogramme de distribution des données de transmissivités obtenues grâce à l'étude de 68 ouvrages de La Réunion et détail de cette distribution pour les valeurs inférieures à 0,01 m2/s
illustration 87 : Légende et répartition des données du paramètre A pour l'île de la Réunion . 129
illustration 88 : Carte du paramètre A selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion 130
illustration 89 : Répartition des niveaux piézométriques minimum toutes stations confondues selon le mois
illustration 90 : Distribution données de niveau piézométrique minimum toutes stations confondues selon les années de 1985 à 2011
illustration 91 : Distribution et fréquence des niveaux piézométriques et corrélation avec l'altitude des stations
illustration 92 : Corrélation observée entre les niveaux piézomériques et l'altitude des ouvrages étudiés
14 BRGM/RP-60828-FR – Rapport final

illustration 93 : Corrélation entre les niveaux piézométriques de novembre 2009 et la distance au rivage mettant en évidence les principaux gradients hydrauliques
illustration 94 : Valeurs moyennes des gradients hydrauliques par secteur géographique 135
illustration 95 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre L pour les aquifères côtiers de l'île de la Réunion
illustration 96 : Carte du paramètre L selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion 136
illustration 97 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre D selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion
illustration 98 : Tableau de la répartion des différentes classes des paramètres D et L pour l'île de la Réunion
illustration 99 : Carte du paramètre D selon la méthode GADLIT pour l'île de la Réunion 139
illustration 100 : Graphique de corrélation entre les deux types de données permettant l'étude du paramètre I : teneur en chlorures et conductivité électrique
illustration 101 : Légende et répartition des données de la carte finale de la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à la montée du niveau marin selon le paramètre I
illustration 102 : Carte du paramètre I pour l'île de la Réunion 143
illustration 103 : Carte du paramètre I à partir des teneurs en chlorures pour l'île de la Réunion
illustration 104 : Histogramme de distribution des données de puissances des aquifères obtenues grâce à l'étude de 132 ouvrages de La Réunion146
illustration 105 : Corrélation entre le paramètre T et la profondeur des ouvrages étudiés 147
illustration 106 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre T selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion147
illustration 107 : Carte du paramètre T selon la méthode GADLIT pour l'île de la Réunion 148
illustration 108 : Répartition des indices GLADIT avant le reclassement des données par vulnérabilité pour l'île de la Réunion
illustration 109 : Carte finale des indices GALDIT avant le reclassement selon trois classes de vulnérabilité
illustration 110 : Légende et répartition des données de la carte des zones de vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en fonction des indnces GALDIT finaux 150
illustration 111 : Carte des zones de vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en fonction des indices GALDIT pour l'île de la Réunion
illustration 112 : Corrélation entre les conductivités électriques maximales (issues des logs de l'Office de l'eau) et les niveaux piézométriques à une date fix (novembre 2009)
illustration 113 : Corrélation entre les conductivités électriques maximales (issues des mesures de paramètres chimiques de l'Office de l'eau) et les niveaux piézométriques par secteur
illustration 114 : Corrélation entre l'altitude d'augmentation de la salinité et les distances au rivage (d'après le rapport BRGM RP-59049-FR)
illustration 115 :Carte finale des zones de vulnérabilité et nature du littoral
illustration 116 : Légende de la carte finale des zones de vulnérabilité et des données de référence de l'année 1 du projet ONEMA (BRGM RP-57955-FR)
illustration 117 : Carte finale des zones de vulnérabilité et des données de référence de l'année 1 du projet ONEMA (BRGM RP-57955-FR)
illustration 118 Carte des zones d'activité et des captages AEP en lien avec les fortes conductivités électriques observées (Ile de la Réunion)
illustration 119 : Saturation de l'aquifère en eau salée pour la situation de référence 163

Montée du niveau marin - conséquences sur les aquifères côtiers des DROM/COM

illustration 120 : Saturation en eau salée de l'aquifère simulée pour une élévation du niveu marin de 1 m NGG	3
Illustration 121: Charges interpolées à partir des données quantitatives du réseau DCE et révélatrices d'une piézométrie minimale sur les cinq dernières années (approche 2 : situation extrême)	7
Illustration 122: Tableau de comparaison des surfaces occupées pour chacune des zones de vulnérabilité GALDIT pour des remontées du niveau marin de 0.5, 1 et 2 mNGG	9
Illustration 123: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 0.5 m	0
Illustration 124: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 1 m.	0
Illustration 125: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 2 m	1

## Liste des annexes

Annexe 17 : Contamination saline liée à la pérennité des rivières selon l'esquisse de l'invasion de J. L. Join, 1991 du Nord au Sud de la côte Ouest de l'île de la Réunion
Annexe 18 : Invasion marine dans la nappe de base, d'après Daesslé et Join 1988 269
Annexe 19 : Evolution des teneurs moyennes en chlorures des stations suivies par l'Office de l'Eau (Ile de la Réunion)
Annexe 20 : Cartes des charges de reférence et des charges simulées sur Grande-Terre pour différents scénarii de remontée du niveau marin
Annexe 21 : Carte de vulnérabilité unicritères pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 0,5 m
Annexe 22 : Cartes de vulnérabilité unicritères de Grande-Terre pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 1 m
Annexe 23: Cartes de vulnérabilité unicritères de Grande-Terre pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 2 m

## 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 et constituent également des secteurs fortement convoités pour le maraîchage, l'arboriculture. Les aquifères y représentent très souvent des ressources en eau importantes. Les enjeux de développement économique sont importants sur ces territoires.

Une augmentation du niveau marin associée aux changements climatiques (modification de la pression atmosphérique, expansion des océans et mers lors de leur réchauffement, et fonte des calottes glaciaires et des glaciers) constitue un des processus significatifs qui va jouer en particulier un rôle sur l'intrusion saline (Werner et Simmons, 2009). Ainsi selon les travaux du GIECC, 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, température, modifications du niveau marin (augmentation du niveau marin, avec recul de la ligne de rivage et réduction de la surface émergée)] 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 existent 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) et d'autre part par une sélection d'aquifères disposant de modèle hydrodynamique en vue d'effectuer des simulations et une 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 important des aquifères côtiers et de leur quasi non-utilisation pour l'alimentation en eau potable en Guyane, cette action n'a pas concerné la Guyane Française et Mayotte. A l'issue de cette étude, 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 ont été réalisées au niveau de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe et des cartes de vulnérabilité sont proposées. Des modalités pour généraliser ces recommandations pour les différentes configurations possibles d'aquifères côtiers sont aussi formulées.

Des travaux de synthèse de la connaissance des aquifères littoraux des Antilles et de la Réunion ont été menés, suivis de la mise en œuvre de la cartographie de la vulnérabilité des

aquifères côtiers vis-à-vis d'une remontée du niveau marin selon la méthode GALDIT ainsi que des simulations numériques au niveau de Grande Terre en Guadeloupe. Ce présent rapport fait la synthèse des travaux menés dans le cadre des actions 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 et N°23 de la convention ONEMA-BRGM 2011 portant sur le même sujet.

Ce rapport est organisé en huit chapitres. Après cette introduction, et 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, il s'agit de l'aquifère de Grande Terre en Guadeloupe pour simuler la piézométrie pour les différents scénarios de remontée du niveau marin. 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 cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers selon la méthode GALDIT. Aucune synthèse concernant les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères n'est présentée dans ce rapport, celle-ci avant été réalisée dans le cadre de l'action N°4 (BRGM RP-59456-FR) en 2010. Le chapitre 7 traite de la simulation des niveaux piézométriques pour différents scénarios de remontée de niveau marin pour Grande Terre en Guadeloupe. Le chapitre 8 est dédié à la conclusion et aux recommandations.

# 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 l'existence d'une forte anisotropie et la présence d'écoulements à composante dominante verticale. Les écoulements d'eau souterraine sont orientés en direction de la mer ; l'eau douce repose ou « flotte » sur l'eau marine souterraine. L'intrusion d'eau salée a de manière générale la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, d'où son appellation commune de « biseau salé ». Ce contact entre ces eaux de densité différentes va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique mais également suivant l'exploitation de l'aquifère et sa recharge par les précipitations. Ce contact ne constitue par une interface nette : du fait de la miscibilité des fluides de densité différente. Une zone de transition va prendre place.

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

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

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



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

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

$$H \cdot d_s = (H+h) \cdot d$$
 Eq. 1

Avec

 $d_{\rm s}$ , 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 :

$$H \cdot (d_s - 1) = h$$
 Eq. 2

et

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

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 :

$$H = \frac{h}{0,025} = 40h$$
 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  $\Phi$  d'écoulement dans la nappe :

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

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

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

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

$$x_0 = \frac{Q}{2K\left(\frac{d_s - d_d}{d_d}\right)}$$
 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<sub>0</sub> 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.

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<sup>-4</sup> m/s) et le taux de décharge de l'aquifère vers la mer.

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

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

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



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

Dans le cas des « systèmes à flux contrôlé », la valeur maximum de  $x_T$ , distance maximale de pénétration saline (Illustration 3), est de 45 m pour une élévation du niveau marin de 1,5m, avec des valeurs de recharge comprise entre 40 et 120 mm/an, une conductivité hydraulique de 1,16.10<sup>-4</sup> m/s et une profondeur d'aquifère (30 et 50 m).

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

La simulation de deux cas à partir d'une modèle conceptuel permet ainsi de montrer qu'une faible remontée du niveau marin, peut entraîner une progression significative de l'interface eau douce/eau salée, sans prendre en compte une influence anthropique. L'évaluation des hétérogénéités spatiales et temporelles des paramètres des aquifères côtiers vis-à-vis d'une augmentation du niveau marin n'a pas été envisagée selon cette approche. Si ces analyses sont intéressantes conceptuellement, de par leur analyse de sensibilité, elles ne permettent pas de proposer une méthode facilement généralisable et applicable à l'échelle 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, « Contribution au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral » pour le compte du MEEDDM en 2010, une synthèse concernant l'évaluation du niveau marin en contexte actuel et dans un contexte de changement climatique a été rédigée. Cette synthèse sert de base de rédaction de ce chapitre. De plus, les travaux du GIEC (2000 et 2007) ont été consultés.

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

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



Illustration 4 : Reconstruction du niveau moyen marin (source Cazenave et al. 2008) – en rouge : données de Church & White (2006), en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006) et en vert : donées 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). De plus, les récents travaux de Wada et al. 2010, à l'échelle des zones arides à semi-arides, ont permis d'estimer la contribution des eaux souterraines liés à leur exploitation, à l'augmentation du niveau marin. Une partie des océans, par ruissellement, mais aussi principalement via l'évaporation et les précipitations ; la contribution à l'augmentation du niveau des océans est estimée à 0,8 (±0,1) mm par an, ce qui correspond à 25 (±3)% de l'augmentation totale des océans (3,1 mm/an).

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

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



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

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

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

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

A1FI : prédominance des combustibles fossiles ;

A1B : équilibre entre combustibles fossiles et non fossiles ;

A1T : prédominance des combustibles non fossiles.

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

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

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



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

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

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

Parmi tous ces scénarios, certains sont dits harmonisés (mention SH) : ils partagent des hypothèses harmonisées sur la population mondiale, le produit mondial brut et l'énergie finale. L'indication SO signifie que ces scénarios sont basés sur des incertitudes dans les forces motrices, au-delà de celles harmonisées. Pour chacun des 6 groupes de scénarios, un scénario d'illustration (toujours harmonisé) est fourni. Il y a enfin, pour chacune des 4 familles de scénarios un « scénario d'illustration 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 (A1FI).

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

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.

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, pendant 1000 ans à priori d'après AR5.

Vermeer et Rahmstorf, (2009) présentent une amélioration de leurs modélisations, afin d'obtenir des valeurs révisées de hausse du niveau marin d'ici 2100. Etant donné que certaines composantes du niveau marin s'ajustent rapidement au changement de

température, ils proposent d'étendre leur méthode semi-empirique avec un terme supplémentaire caractérisant la réponse rapide.

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

Le modèle est appliqué au 21<sup>ème</sup> siècle en utilisant les projections de températures du GIEC (4<sup>ème</sup> rapport). Les projections varient entre 75 et 190 cm pour la période 1990-2100, elles sont donc supérieures à celles effectuées précédemment en 2007 par Rahmstorf (Illustration 11). A noter une grande différence entre les projections résultantes des deux exercices (2007 et GIEC (4<sup>ème</sup> rapport). Une incertitude sur les valeurs issues des modèles persiste ; ces valeurs pourront être différentes suite aux prochains travaux du GIEC avec les nouveaux scénarios qui seront disponibles en 2013.



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

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

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

Certains auteurs mentionnent également un impact possible de la surexploitation des aquifères dans les régions arides sur la hausse du niveau marin. Domingues & al, (2008)

estiment une contribution possible de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm/an soit d'un peu plus de 3 cm d'ici 2100 et Wada et al. (2010) 0,8 mm /an soit 25% de l'augmentation globale du niveau marin.

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 emballement des écoulements glaciaires.

Les estimations les plus récentes (2008, 2009) sont assez concordantes entre elles et considèrent en moyenne une limite inférieure (suivant un scénario optimiste des émissions futures de gaz à effets de serre) de l'ordre de 0,8m et une limite supérieure de 1,8m (scénario A1FI : le plus pessimiste). Il faut également souligner qu'à l'heure actuelle les émissions de gaz à effet de serre suivent le scénario le plus pessimiste du GIEC (A1FI). Cependant les incertitudes sont encore très nombreuses (temps de réponse des océans, rétroactions, phénomènes d'emballement des écoulements glaciaires, élévation non homogène à l'échelle de la planète, etc....).

Auteurs	Fourchette de la hausse du niveau marin envisagée d'ici 2100 par l'auteur	Commentaires sur la méthode, et incertitudes
GIEC, 2007	0,2 à 0,60m (0,6m n'est pas une limite supérieure)	<ul> <li>-Processus linéaires.</li> <li>-Ne prend pas en compte : incertitudes des rétroactions du cycle du carbone ni les modifications futures des écoulements glaciaires.</li> </ul>
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 décade. 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 scenarii 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<sup>ème</sup> 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 6 à 10 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 dû uniquement à la dilatation thermique et aux changements de salinité (Cazenave & Nerem, 2004).

On peut noter ici que l'Ile 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), cependant 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 décadaires 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 australe 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 (GIEC, 2007). 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'événements cycloniques (cas de surcote) dus aux tempêtes, aux ouragans et aux cyclones d'orientation EW. Ces cyclones sont en général formés à proximité de la corne de l'Afrique et traversent l'Atlantique vers les Antilles (Illustration 17).

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.



Illustration 17: Zone de formation es cyclones dans l'Océan Atlantique et leur trajectoires préférentielles (http://tropics.hamweather.net)

Par exemple, le cyclone dévastateur de 1928 avait entrainé une submersion de 3 à 4 m sur les ilets de Pointe-à-Pitre.

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. 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 la Grande-Terre.

Cependant, les dégâts peuvent aussi être étroitement liés à d'autres phénomènes comme les grandes précipitations et les surcotes atmosphériques. A l'échelle de la plage, l'estimation des dégâts liés la submersion ne tient pas compte des caractéristiques du littoral (zones, basses, falaises) et de la vulnérabilité aux vagues.

Dans le cadre de l'étude sur l'évolution du trait de côte de Guadeloupe (Roques et al., 2010), les zones sensibles à la submersion avaient été cartographiées et correspondaient par hypothèse aux zones dont l'altitude est inférieure à 5 m NGG. A l'échelle de l'archipel guadeloupéen, quatre zones sensibles à la submersion avaient été mises en évidence : le Grand-Cul-de-Sac marin et le Petit-Cul-de-Sac marin en Grande-Terre, les mangles de Folle-Anse et les Mangles de Saint-Charles à Marie-Galante (Illustration 18).



Illustration 18 : 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 19 : 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 20) :

- 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 20 : Cadre géodynamique de l'arc des Petites Antilles (BRGM) [figurés rayés arc interne et en blanc arc externe]

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 km<sup>2</sup>) se situe sur l'arc insulaire interne des petites Antilles qui est le siège d'un volcanisme récent du Miocène à l'actuel (Illustration 19). 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 21).



Illustration 21 : 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 soussystèmes 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 quantitative de la ressource (modèles et cartes de vulnérabilité notamment).

## 4.1.2. Grande - Terre

L'île de Grande-Terre, d'une superficie de 750 km<sup>2</sup>, se situe sur l'arc insulaire externe ancien des Petites Antilles ayant fonctionné de l'Eocène à l'Oligocène (Illustration 19); 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 Grippon, les Grands-Fonds et les Plateaux de l'Est (Illustration 22).



Illustration 22 : 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 visà-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 23).



Illustration 23 : 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 (Nivellement Général de la Guadeloupe). 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 hydrodynamiques 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 en 2D. 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 l'altitude du toit de la nappe d'eau douce 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 km<sup>2</sup>, se situe sur l'arc insulaire externe ancien des Petites Antilles (Illustration 19). 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 24).



Illustration 24 : 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 (Bézèlgues et al., *2003*) a été réalisé en régime transitoire à l'aide du code de calcul MARTHE. La position de l'interface eau douceeau 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<sup>2</sup>) se situe sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 19). 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<sup>+</sup>] jusqu'à 1600 mg/l et [Cl<sup>-</sup>] jusqu'à 1560 mg/l !) (Brenot et al., 2008).

## 4.1.5. Les Saintes

L'archipel des Saintes (15 km<sup>2</sup>) se situe sur l'arc interne des Petite Antilles (Illustration 19) ; 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 km<sup>2</sup>, est située à environ 200 km au nord de la Guadeloupe. Elle se trouve sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 19). 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 permet 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) (Petit V., 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 km<sup>2</sup>, est située à environ 200 km au nord de la Guadeloupe. Elle se trouve sur l'arc externe des Petites Antilles (Illustration 19). 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'Unité Constitutive d'Aquifère (UCA), 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.

A chaque UCA a été attribuée une fourchette de « débit potentiel instantané » (Illustration 25). 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 25 : Productivité potentielle des unités constitutives d'aquifères (Vittecoq et al., 2007)

La carte de l'Illustration 26 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 26 : 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 27), suivies de la réalisation d'un forage de reconnaissance sur chacun des sites. Des limites du biseau salé et de la zone de diffusion sont précisées sur les coupes géoélectriques interprétées par le BRGM (Illustration 28). Les analyses faites en fin de pompages d'essai (55 m<sup>3</sup>/h pendant 20h pour Fond Canonville et 9 m<sup>3</sup>/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 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Saint-Pierre (Paulin, 1978)



Illustration 28 : 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 29). Dans leur ensemble, les coupes interprétatives 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 30). 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 (Nivellement Général de la Martinique).



Illustration 29 : Plan de situation des sondages électriques implantés à Bellefontaine (Paulin, 1980)



Illustration 30 : 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 31). 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 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées à Case Pilote (Cottez et Thibault, 1973)

## 4.2.4. Plaine du Lamentin (2007)

L'étude de reconnaissance du biseau salé la plus poussée concerne la Plaine du Lamentin (Vittecoq et al., 2007) :

- mise en œuvre de 7 panneaux électriques de longueurs comprises entre 350 et 1050 m (LAM1 à 7 ;Illustration 32);
- confrontation avec les sondages électriques réalisés dans les années 1970 ;
- utilisation des données lithologiques (coupes de forages) pour caler les profils et aider à l'interprétation.



Illustration 32 : 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 géoélectriques).

Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer ces résultats :

 la profondeur de l'interface eau douce / eau salée au sein des formations du substratum serait plus importante que celle investiguée par géophysique (Illustration 33).



Illustration 33 : 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 34).

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

## 4.2.6. Vatable, Les Trois Ilets (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 audelà du biseau salé (Illustration 35).

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<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> (Illustration 36). 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 36).

Les concentrations en ions  $CI^-$  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 salée proche. En fin de pompage, la concentration en  $CI^-$  est très largement supérieure à la norme française de potabilité (941 mg/l contre 250 mg/l).



Illustration 35 : Plan de situation des investigations hydrogéologiques menées au Diamant (Paulin, 1979)



Illustration 36 : 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<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> 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).</li>

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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 37 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 38).

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



Illustration 38 : 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 39 : 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 40, se situent :

 Dans le secteur de l'Etang de Saint-Paul (milieu sédimentaire fluvio-marin, résistivité de 800 Ω.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 Ω.cm 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 40 : 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 μS/cm sont identifiés comme « recoupant l'interface eau douce/eau salée » ou du moins la zone de transition<sup>1</sup>,
- pour une conductivité électrique supérieure à 1 000 µS/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 μS/cm.

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 41 extraite du rapport de 2005.



Illustration 41 : Localisation des ouvrages soumis aux intrusions salines sur l'Ile 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.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La conductivité de l'eau de mer est comprise entre 52 et 54 mS/cm.

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

- A Trois Bassins, l'eau salée (conductivité supérieure à 10 000  $\mu$ S/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 (Nivellement Général de la Réunion) 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.

# 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 a 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 42). 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 42 : 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 43).



Illustration 43 : 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 44). Il n'y a pas de tendance évolutive vers un faciès chloruré sodique.



Illustration 44 : 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  $\mu$ S/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  $\mu$ S/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 qualitomètres du réseau de surveillance DCE sont rapportés ci-après.

Les concentrations en Na et Cl (Illustration 46), les signatures isotopiques en Sr (Illustration 45) et en B (Illustration 47) 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, <u>Anses d'Arlet</u>) et Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, <u>Marin</u>) présentent à la fois des concentrations élevées en Na (>3,8 mmol.L<sup>-1</sup>), Cl (>3 mmol.L<sup>-1</sup>), B (>6,3 µmol.L<sup>-1</sup>) et Sr (>3 µmol.L<sup>-1</sup>), des signatures isotopiques en Sr (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr>0,70576) et en B (δ<sup>11</sup>B>31‰) compatibles avec une contribution d'eau de mer ;
- les points Le Galion (Indice BSS : 1175ZZ0154, <u>Trinité</u>) et Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024, <u>Prêcheur</u>) présentent des signatures isotopiques en Sr (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr =0,70722 et 0,70677 respectivement) et des concentrations en Sr (>1,1 μmol.L<sup>-1</sup>) compatibles avec une contribution d'eau de mer malgré des concentrations peu élevées en B (<5 mmol.L<sup>-1</sup>), pour ces deux points, et en Na (< 1,3 mmol.L<sup>-1</sup>), et Cl (< 0,7 mmol.L<sup>-1</sup>), pour le point du Galion.

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



Illustration 45: <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr vs. 1/Sr , SS : saison sèche, SP : saison des pluies (Brenot et al., 2008)



Illustration 46 : 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)



Illustration 47 :  $\delta^{11}$ B vs. 1/B (a), CI vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche) (Brenot et al., 2008)

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 48). 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). C'est une approche simplifiée, qui fera l'objet de comparaison avec la mise en œuvre de la méthode GALDIT.

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, <u>Rivière Salée</u>), Fougainville (Indice BSS : 1183ZZ0052, <u>Rivière Pilote</u>), La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, <u>François</u>), Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, <u>François</u>) et Cap Macré (Indice BSS : 1186ZZ0119, <u>Marin</u>). 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, <u>Marin</u>) et La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, <u>Rivière Pilote</u>) 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  ${}^{87}$ Sr/ ${}^{86}$ Sr  $\approx$  0,7090 (De Paolo, 1986), proche de la signature de l'eau de mer actuelle ( ${}^{87}$ Sr/ ${}^{86}$ 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 48 : 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, <u>Trinité</u>), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, <u>Trois Ilets</u>), Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, <u>Anses d'Arlet</u>), Habitation Dizac (Indice BSS : 1184 ZZ0001 et 1184ZZ0016, <u>Diamant</u>), Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, <u>Robert</u>) et Puyferrat (Indice BSS : 1183ZZ0026, <u>Vauclin</u>) (Illustration 48).

# 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 de la Réunion, afin de repérer les secteurs où une salinisation est constatée, où l'interface est recoupée et de corréler 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 conditions naturelles (sans pompage). Certains logs sont réalisés depuis 1986 jusqu'à aujourd'hui, mais tous les piézomètres n'ont pas été suivi 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  $\mu$ S/cm) pourront être assimilées à une contamination par de l'eau salée.

Les valeurs de conductivité enregistrées en dehors de la zone avec crépines 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) ; sur ces cartes est représentée des zones impactées par une remontée du niveau marin, en considérant uniquement le paramètre altimétrique.



illustration 49 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur du Port



illustration 50 : Localisation des piézomètres suivis dans le secteur de la Baie de Saint-Paul



illustration 51 : Localisation des piézomètres dans le secteur de Saint-Paul Sud, Trois-Bassins



illustration 52 : Localisation des piézomètres étudiés dans le secteur de l'Etang-Salé, Saint-Louis, Pierrefonds



illustration 53 : 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 dû 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 carbonatées 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

La cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers est réalisée à l'aide de la méthode GALDIT présentée dans le paragraphe 6.3. pour la Guadeloupe et l'île de la Réunion. Concernant la Martinique, le manque de connaissance des aquifères côtiers ne permet pas d'appliquer cette méthode. Le paragraphe 6.2. fait état des connaissances sur les zones de vulnérabilité de manière globale pour la Martinique.

#### 6.2. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES ZONES DE VULNERABILITE 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 48). En outre, les programmes de reconnaissance en eau 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 48). 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) et des forages de reconnaissance sont envisagés dans le cadre de projets de service public en 2011 et 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 être pertinent de surveiller l'intrusion saline au niveau d'un réseau de piézomètres.

# 6.3. LA METHODE GALDIT

# 6.3.1. Principe de la méthode

La méthode GALDIT est une méthode de cartographie de la vulnérabilité spécifique des aquifères côtiers, dédiée au risque l'intrusion saline. Elle a été initialement développée par Chachadi et Lobo-Ferreira (2001) dans le cadre du projet européen de coopération avec l'Inde : COASTIN (programme INCO DEV du 4<sup>ème</sup> PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de Goa en Inde, d'Algarve au Portugal (Lobo-Ferreira et al, 2005a 2005b), et de France métropolitaine (Dörfliger N.,et al. 2010).

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

- Groundwater occurrence (type d'aquifère);
- > Aquifer hydraulic conductivity (conductivité hydraulique de l'aquifère) ;
- Depth to groundwater Level above sea (altitude de la nappe au-dessus du niveau de la mer);
- Distance from the shore (distance perpendiculaire à la côte);
- Impact of existing status of seawater intrusion in the area (impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée);
- > Thickness of the aquifer (épaisseur de l'aquifère).

Une indexation de la vulnérabilité et une classification des potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique donné sont établies à partir des six paramètres de GALDIT. Le principe d'attribution de classe de vulnérabilité repose sur trois composantes :

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

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

Où p<sub>i</sub> est le poids accordé (1 à 4) à chaque paramètre i R<sub>i</sub> est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10)

Les poids (p<sub>i</sub>) et les notations (R*i*) des attributs des six paramètres de la méthode GALDIT par rapport à l'intrusion saline sont décrits ci-après.

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

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

#### 6.3.2. Les paramètres de la méthode GALDIT

#### a) Paramètre G : le type d'aquifère

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

Paramètre G	Poids	Attributs du paramètre	Valeur rang
		Aquifère captif	10
	Aquifère libre	7.5	
l ype d'aquifère	I	semi-captif	5
u aquilere		Aquifère contraint <sup>(1)</sup>	2.5
<sup>(1)</sup> Recharge et/ou barrière alignée parallèlement à la côte			

Ainsi, un aquifère libre, sous pression atmosphérique, est plus vulnérable à l'intrusion saline qu'un aquifère captif du fait de l'existence, pour ce dernier, d'un cône de dépression plus important lors de pompage. Dans le cas d'un système aquifère multicouche, la valeur la plus importante devrait être adoptée (note de 10).

#### b) Paramètre A : la conductivité hydraulique de l'aquifère

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

Deremètre A	Daida	Attributs du paramètre		Nete
Parametre A	Polas	Classe	Rang	- Note
		Elevée	> 40	10
Conductivité		Moyenne	10 – 40	7.5
hydraulique	3	Faible	5 – 10	5
de l'aquifère (m/jour)		Très faible	< 5	2.5

# c) Paramètre L : Niveau piézométrique de la nappe par rapport au niveau de la mer

Le niveau piézométrique par rapport au niveau moyen de la mer est un paramètre important (poids maximal de 4) pour évaluer la vulnérabilité à l'intrusion saline dans une zone donnée, car il détermine le potentiel hydraulique capable de repousser le front d'intrusion saline. Tel que défini par l'équation de *Ghyben-Herzberg*, pour chaque mètre d'eau douce stockée au-dessus du niveau de la mer, ce sont 40 mètres d'eau douce qui sont présents sous l'interface eau douce eau salée ainsi définie. L'attribution des notes du paramètre L doit prendre en considération les variations du niveau piézométrique sur le long terme. De manière générale, il est important de ne pas considérer uniquement une valeur piézométrique moyenne, mais d'examiner avec attention les périodes pour lesquelles le niveau piézométrique est le plus bas, audessus du niveau de la mer, correspondant à la plus grande vulnérabilité potentielle. Pour l'attribution des valeurs, les auteurs proposent la notation suivante :

Paramètre L	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
		Très faible	<1.0	10
Hauteur à la nappe par rapport	4	Moyenne- ment faible	1.0 – 1.5	7.5
au niveau de la		Moyenne	1.5 – 2.0	5
mer (m)		Elevée	> 2.5	2.5

# d) Paramètre D : distance perpendiculaire à la côte

La distance de l'aquifère par rapport à la mer est aussi un critère important de la vulnérabilité (poids maximale de 4). En général, l'impact de l'intrusion saline décroît on s'éloignant de la côte. La valeur maximale de l'indice peut être fixée à 10 pour des distances de la côte inférieures à 500 m. Cette valeur est dégressive. Une valeur de 2.5 est acceptable pour des distances supérieures à 1000 m.

Paramètre D	Poids	Attributs paramètre	du	note
		Classe	Rang (m)	-
Distance perpendiculaire à la côte (m)		Très courte	< 500	10
	4	Courte	500 - 750	7.5
	4	Moyenne	750 – 1000	5
		Eloignée	> 1000	2.5

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

# e) Paramètre I : Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée

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

Baramètro I	Boide	Attrib	uts du paramètre	Valour rang
Falamettei	Folds	Classe	Rang	valeur rang
Impact de l'état actuel de l'intrusion saline de la zone concernée :		Elevé	>2 ou > 1 000 ou >200	10
- ratio (HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2 -</sup> ) (en ppm) - Méthode nationale		Moyen	<b>1,5 – 2</b> ou 800 – 1000 ou 100 - 200	7,5
- conductivité électrique (en μS/cm)	1	Faible	<b>1 – 1,5</b> ou 400 – 800 ou 50 - 100	5
-teneur en Cl (en mg/l)		Très faible	<b>&lt;1</b> <400 ou 0-50	2,5

Le ratio chlorures/bicarbonate peut être utilisé uniquement si des données chimiques des eaux souterraines sont disponibles. Des logs de température et de conductivité électrique au niveau de forages situés dans la zone côtière de l'aquifère permettent également de déterminer la variabilité spatiale de l'intrusion saline, les variations saisonnières ainsi que la distribution verticale. Ce type de mesures avec une représentation cartographique peut permettre également de distinguer des classes d'indice en fonction des ordres de grandeurs de la conductivité électrique. Le tableau ci-dessus résume les valeurs de conductivité électrique ou de concentration en chlorures utilisée dans le cadre de cette cartographie de la vulnérabilité.

# f) Paramètre T : Epaisseur de l'aquifère

L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans l'extension et de l'ampleur de l'intrusion saline en zones côtières. Il a été clairement démontré que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline devrait être moindre et inversement. Suivant ce principe, des valeurs de rang correspondantes à différentes épaisseurs d'aquifère sont attribuées comme suit :

Paramètre T	Poids	Attributs du paramètre		Note
		Classe	Rang	
	2	Large	> 10	2,5
Epaisseur de		Moyenne	7.5 – 10	5
l'aquifère (m)		Petite	5 - 7.5	7,5
		Très petite	< 5	10

Ce paramètre peut être utilisé pour les aquifères karstiques côtiers, pour autant que l'information géologique relative à la géométrie de l'aquifère est disponible. La variation de l'épaisseur de l'aquifère peut être directement lié au gradient hydraulique. Celui-ci peut être variable au sein d'un aquifère karstique en fonction de la présence d'hétérogénéités (par exemple présence de cavités ou de conduits dans la zone saturée) plus importantes à proximité de la côte.

# 6.4. APPLICATION DE LA METHODE GALDIT SUR GRANDE-TERRE ET MARIE-GALANTE

# 6.4.1. Paramètre G : Type de nappe

# a) Grande-Terre

La position verticale et l'épaisseur du niveau volcano-sédimentaire conditionnent la nature captive ou libre de la nappe de Grande-Terre. Il est identifié indirectement dans les Grands-Fonds, la plaine des Abymes, la plaine des Grippons, les plateaux de l'Est. Il est totalement absent dans les plateaux du Nord (S. Bézelgues et N. Amraoui, 2006). Par ailleurs une seule donnée d'épaisseur est obtenue par observation directe (coupe de forage) au niveau de la plaine des Grippons, et est évaluée à 2 mètres.

Globalement, peu de données de position et d'épaisseur de ce niveau sont disponibles dans la partie Ouest des Grands-Fonds, la plaine des Grippons et dans les plateaux de l'Est.

Une sélection des données pertinentes a été effectuée lors de l'élaboration du modèle hydrodynamique de Grande-Terre (S. Bézelgues et N. Amraoui, 2006) afin de déduire la zone de captivité de la nappe. Tout d'abord, une cartographie de la position verticale du toit du niveau volcano-sédimentaire a été réalisée, représentant la position théorique du niveau volcano-sédimentaire supérieur. En réalité, il est absent des vallées où il a été érodé et est en position perchée (au-dessus de 20 m NGG) dans le centre et dans l'Est du bloc morpho-structural surélevé des Grands-Fonds. Il est donc très discontinu et son rôle vis-à-vis des écoulements souterrains peut être considéré comme minime à l'échelle de l'aquifère.

Ensuite, le rôle hydraulique du niveau volcano-sédimentaire supérieur est appréhendé par superposition de la carte du toit du niveau volcano-sédimentaire et de la carte piézométrique de Grande-Terre. Dans le cas d'un aquifère principal constitué des calcaires supérieurs, si le niveau piézométrique est inférieur à celui du niveau volcano-sédimentaire supérieur, alors la nappe n'est pas mise en charge. Dans la situation contraire, la nappe est mise en charge et acquiert un caractère captif.

Quand l'aquifère principal est constitué des calcaires inférieurs (cas des Grands-Fonds), cela se traduit par la mise en charge de la nappe qui devient captive. Par ailleurs, lorsque le niveau volcano-sédimentaire est continu et suffisamment épais (e> 1 m), celui-ci est alors susceptible de constituer un écran vis-à-vis de remontées verticales d'eau salée. Une carte illustrant la délimitation de l'aquifère principal situé dans les calcaires inférieurs, ainsi que la position du niveau piézométrique par rapport au niveau volcano-sédimentaire supérieurs est réalisée : elle permet par superposition de délimiter la zone de captivité de la nappe de Grande-Terre présentée en illustration 54.



illustration 54 : Zone de captivité de la nappe de Grande-Terre, selon S. Bézelgues et N. Amraoui, 2006.

Par souci de simplicité, les zones de semi-captivité de la nappe, qui s'avèrent être de petites surface, seront négligées dans la représentation du type de nappe de Grande-Terre. Finalement, la zone de captivité de la nappe de Grande-Terre s'étend sur la plaine des Abymes, à l'Ouest de Grande-Terre. Il en découle la carte de répartition des notations GALDIT présentée en illustration 55.



illustration 55 : Carte de répartiation des notations GALDIT pour le paramètre G sur Grande Terre (Guadeloupe).

#### b) Marie-Galante

Contrairement à l'île de Grande-Terre, la masse d'eau de Marie-Galante est contenue dans une série carbonatée continue ne renfermant pas de niveaux imperméables. La nappe de Marie-Galante est libre sur toute la surface de l'île. En l'état actuel des connaissances, aucune zone de semi-captivité de la nappe n'est définie. La carte de répartition des notations GALDIT est présentée en illustration 56.



illustration 56 : Carte de répartiation des notations GALDIT pour le paramètre G sur Marie-Galante (Guadeloupe).

# 6.4.2. Paramètre A : paramètres hydrodynamiques

# a) Grande-Terre

Dans la bibliographie, Grande-Terre est caractérisée essentiellement par des valeurs de transmissivité ponctuelles. Par ailleurs, l'élaboration d'un modèle hydrodynamique de Grande-Terre (V. Hamm et al., 2007) a permis d'aborder les valeurs de perméabilité du secteur de Grande-Terre. Le calage du modèle sur les observations piézométriques permet d'accéder à l'ordre de grandeur des paramètres physiques du système aquifère (perméabilité, coefficient d'emmagasinement, paramètre de la recharge) et d'appréhender leur possible répartition (Illustration 57).



Illustration 57: Répartition des perméabilités (en m/s) simulées de Grande-Terre (V. Hamm, D. Thiery, N. Amraoui, S. Bézelgues-Courtade, juin 2007)

Selon le modèle, la perméabilité varie entre 5.10<sup>-6</sup> m/s (zone centrale de Grande-Terre) et 5.10<sup>-1</sup> m/s (Nord-Ouest de Grande-Terre) avec de nombreuses zones ayant une perméabilité comprise entre 1 .10<sup>-4</sup> et 1.10<sup>-2</sup> m/s. La comparaison des perméabilités simulées et calculées à partir de mesures de transmissivité et d'épaisseur captée révèle des ordres de grandeur similaires. Certains écarts sont cependant à relier avec l'incertitude associée aux données de perméabilités recalculée à partir de données insuffisantes.

Le choix d'utiliser cette carte permet d'une part de disposer de données spatialisées, indispensables pour l'élaboration de la carte des vulnérabilités, et d'autre part de disposer de valeurs ajustées à partir de données connues ponctuellement avec les informations de piézométrie observée. Les perméabilités simulées ne représentent pas forcement la réalité, le recoupement d'information avec davantage d'essais de pompage permet une meilleure approche des valeurs de perméabilité réelles. La carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A est présentée en Illustration 58.

Cette carte présente une zone de faible vulnérabilité (forte perméabilité) dans les terres, ainsi qu'une très forte vulnérabilité sur le littoral. Les notes comprises entre la note la plus basse et la plus haute sont peu représentées. Au Nord, une zone de



vulnérabilité s'étend dans les terres. Par ailleurs, le réseau de fracturation au Sud se prolonge localement la zone de forte vulnérabilité.

Illustration 58: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A sur Grande-Terre.

#### b) Marie-Galante

Quelques données ponctuelles de perméabilité et de transmissivité sont disponibles sur Marie-Galante : 18 relatives à la transmissivité et 2 à la perméabilité. Sur la base des données hydrodynamiques calculées à partir d'essais de pompage et à partir de la connaissance du milieu (lithologie des formations, organisation structurales de l'île), T. Mauboussin a défini une répartition des perméabilités de l'île en 1987. Elle respecte le schéma conceptuel hydrogéologique de l'île avec les zones karstifiées qui se sont enfoncées sous le niveau de la mer lors du basculement de l'île vers l'Ouest et où les perméabilités sont progressivement de plus en plus élevées en valeurs relatives. Cette répartition est retenue pour l'élaboration du modèle hydrodynamique de Marie-Galante et est présentée en Illustration 59.



Illustration 59: Répartition des valeurs de perméabilité sur Marie-Galante (T. Mauboussin, 1987)

Pour les mêmes raisons que pour Grande-Terre, le choix de cette carte est pertinent pour la réalisation de la carte de vulnérabilité. Il en découle la carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A présentée en Illustration 60. Comme pour Grande-Terre, une zone de faible à moyenne vulnérabilité s'étend dans les terres. Sur le littoral, la vulnérabilité est globalement forte, et très forte à l'Ouest. Il semblerait que des zones karstifiées enfoncées sous le niveau marin soient la cause de ces fortes valeurs.



Illustration 60: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre A sur Marie-Galante.

# 6.4.3. Paramètre L : côtes piézométriques

# a) Données disponibles

Les chroniques piézométriques disponibles pour Grande-Terre et Marie-Galante sont issues de différents réseaux. En effet, le réseau piézométrique de Guadeloupe existe depuis 1975 sur les nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante. Il comptait à l'origine 35 points de suivi manuel : 21 en Grande-Terre et 14 à Marie-Galante. La modernisation de ce réseau a été initiée en 2002, et s'est traduite par l'automatisation des stations de suivi et la télétransmission des données. Depuis 2008, le réseau de surveillance de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine a été adapté aux exigences de la DCE :

- i. Diminution des points de suivi sur les masses d'eau souterraine de Grande-Terre et de Marie-Galante
- ii. Extension à la masse d'eau à la Désirade.

Désormais, le réseau DCE est constitué de 22 points d'eau automatisés et télétransmis, dont 12 sur Grande-Terre et 8 sur Marie-Galante (Annexe 3Annexe 3: Localisation des points de surveillance des masses d'eau du réseau DCE sur Grande-Terre et Marie-Galante.). La surveillance de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine de Guadeloupe est réalisée par le BRGM, dans le cadre de la convention nationale annuelle entre l'ONEMA et le BRGM. Les données issues de ce suivi sont consultables sur le site internet ADES.

On dispose par ailleurs d'un tableau de statistiques sur la piézométrie destiné à l'élaboration des bulletins hydrogéologiques semestriels sur Grande-Terre et Marie-Galante.

# b) Données utilisées

La méthode GALDIT conseille d'observer les chroniques piézométriques à long terme et de prendre en compte les situations les plus critiques vis-à-vis de l'intrusion d'eau saline. Par ailleurs, le choix des points d'eau pris en compte est intimement lié à celui de la période de l'étude. Il s'agit de prendre en compte un seul réseau afin d'optimiser la dérive des résultats due au changement de matériel de mesures. Par conséquent, les données issues du réseau DCE sont choisies : elles ont en effet l'avantage d'être récentes, régulières et à disposition facilement. Par souci d'homogénéités des données, cette présente étude prend en compte les cinq dernières années, de 2006 à 2011. La carte veut illustrer la situation actuelle : les données des cinq dernières années seront traitées (01/01/2006 au 01/01/2011) pour chaque station.

Plusieurs approches ont été abordées :

#### > Approche 1 : Situation piézométrique moyenne

Les niveaux piézométriques les plus critiques vis-à-vis de l'intrusion saline sont observés en période basses-eaux, qui s'étend des mois de décembre au mois de mai.

Le scénario moyen consiste au calcul de la moyenne des moyennes annuelles de la piézométrie en basses-eaux. Pour ce faire, les données brutes extraites d'ADES ont été utilisées.

#### > Approche 2 : Situation piézométrique extrême

Cette approche consiste à prendre en compte la moyenne mensuelle minimale sur l'ensemble des données disponibles pour chaque station. Ainsi la valeur prise en compte s'approche du minima historique sur la chronique. Ce calcul est effectué à partir des moyennes piézométriques mensuelles calculées dans le tableau de BHS.

#### c) Spatialisation des données

Les cartes piézométriques utilisées pour la méthode GALDIT sont élaborées par interpolation des données ponctuelles décrites dans le paragraphe précédent. Le logiciel ArcGis (®ESRI) propose différentes méthodes d'interpolation par le biais de son module *Spatial Analyst Tools*. Pour réaliser les cartes piézométriques, l'interpolation *Topo to raster* est utilisée . Il s'agit d'une technique d'interpolation conçue spécifiquement pour créer une surface qui représente plus précisément une surface d'écoulement naturelle et conserve mieux à la fois les crêtes et les réseaux hydrographiques des données d'isolignes en entrée. L'algorithme utilisé est basé sur celui d'ANUDEM, développé par Hutchinson et al. de l'Australian National University.

Pour ce faire, les niveaux piézométriques de l'interface littorale sont créés et fixés à 0 m NGG.

L'interpolation mise en œuvre fait apparaître des cônes de dépression aux abords des points de données les plus proches du littoral. Aucun prélèvement n'étant mentionné pour ces points dans l'élaboration de la carte piézométrique, la configuration des isopièzes a été corrigée et les limites de zones GALDIT ont été lissées manuellement.

La cartographie de la vulnérabilité est établie selon le principe de précaution, qui consiste à prendre en compte le scénario le plus pessimiste. On s'intéressera donc particulièrement à l'approche 2 (Illustration 61 - Illustration 62). Cependant, les cartes relatives à l'approche 1 (Annexe 5) seront utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité en situation moyenne.

Pour ce paramètre, les zones associées aux quatre notations sont très visibles et concentriques, les zones de fortes vulnérabilité (faible piézométrie) à proximité du littoral et les zones de plus faibles vulnérabilité au centre. Pour les deux îles étudiées et dans le cas de la situation extrême (approche 2), les zones de forte vulnérabilité sont un peu plus étendues et la zone de faible vulnérabilité plus restreinte par rapport à la situation moyenne (approche 1).

# 6.4.4. Paramètre D : distance à la côte

La cartographie de la distance à la côte est réalisée grâce à l'outil *Zone Tampon* de ArcGis (Illustration 63 - Illustration 64).



Illustration 61: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètres L sur Grande-Terre

Approche 2 : Situation piézométrique extrême.



Illustration 62: Carte de répartition des notations GALDIT pour la paramètre L sur Marie-Galante

Approche 2 : Situation piézométrique extrême.



Illustration 63: Répartition des notation GALDIT pour la paramètre D sur Grande-Terre



Illustration 64: Répartition des notations GALDIT pour la paramètre D sur Marie-Galante.

### 6.4.5. Paramètre I : état des lieux de la salinisation

La méthode GALDIT préconise l'utilisation du rapport Cl<sup>-</sup> / (HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) pour réaliser l'état des lieux de la salinisation des aquifères. Au vu des analyses, les carbonates sont absents dans les eaux, et les teneurs en hydrogénocarbonates sont sensiblement constantes dans le temps et dans l'espace. Il existe donc une relation évidente entre les chlorures et le rapport Cl<sup>-</sup> / (HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) dans notre zone d'étude, que l'on peut étendre à la méthodologie GALDIT. Parallèlement, la zone Guadeloupe dispose davantage de données de conductivité et de chlorures, toutes deux représentatives de la salinisation de l'aquifère (Ratsimihara, 2010). Les teneurs en chlorures et les conductivités ont déjà été utilisées pour l'application de la méthode, notamment en métropole. Deux cartes seront réalisées pour le paramètre l : une carte de teneur en chlorures et une carte de conductivité.

#### a) Les données disponibles

#### Les réseaux de surveillance qualitative des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante

1. Les réseaux de surveillance au titre de la DCE

Dans le cadre de ses actions de service public, le BRGM assure un suivi mensuel quantitatif de la nappe d'eau souterraine de la Grande-Terre depuis le milieu des années 1970. L'aspect qualitatif (mesures des conductivités et des températures) y a été intégré à partir de 1996. En 1997, la DIREN (DEAL) a pris en charge la maitrise d'ouvrage de ce réseau de surveillance et l'assure avec l'appui du BRGM. Cette collaboration a abouti en 2002 à la réorganisation du réseau ainsi qu'à son instrumentation partielle, notamment pour la mesure des conductivités et des températures. Depuis 1998, le suivi qualitatif concerne aussi Marie-Galante. Les chroniques de données sont extraites des logiciels Hydras 3 et sont disponibles à partir de 2002.

Par ailleurs, depuis 2008, des réseaux de suivis de l'état qualitatif des masses d'eau souterraines ont été mis en place pour répondre aux exigences de la DCE, et confié au BRGM dans le cadre de la convention annuelle ONEMA-BRGM. Ces données sont répertoriées dans ADES. Pour cette étude, des analyses biannuelles de chlorures seront utilisées (Illustration 65), ainsi que des chroniques de conductivité relatives aux points d'eau illustrés en Annexe 4.

Localisation	Nom	Date de la mesure
Grande-Terre	Blanchard	22/04/2009
	Chazeau	22/04/2009
	Duchassaing	22/04/2009
	Marchand	30/04/2009
Marie-Galante	Source 2	21/04/2009

Illustration 65: Points d'eau concernés par le suivi qualité DCE du BRGM depuis 2008.

#### 2. Le contrôle sanitaire au titre du Code de la Santé Publique

Le contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine est réalisé par l'ARS (Agence Régional de Santé) sur les captages AEP, la fréquence et le type d'analyse associés à ce réseau de suivi qualité sont définis dans le Code de la Santé Publique, et dépendent du débit de captage. Dans le cas des forages de Grande-Terre et de Marie-Galante, une analyse est réalisée par an. Le suivi sanitaire est assuré sur 18 forages répartis sur Grande-Terre et Marie-Galante (Annexe 6). Pour cette étude, les données de conductivité ramenées à 25°C seront utilisées, ainsi que les teneurs en chlorures mesurés. Les points d'eau concernés sont répertoriés dans ADES.

# 3. Les réseaux qualité de la DEAL (ex-DIREN)

Les concentrations en chlorures et en nitrates obtenues mensuellement depuis 2003 sur les points de suivis dans le cadre du réseau patrimonial par la DEAL. Ces analyses concernent 7 forages AEP en Grande-Terre (Blanchard, Charropin, Chazeau, Duchassaing, Kancel, Marchand, Pelletan) et 3 forages AEP à Marie-Galante (Source 2, Rabi, Calebassier).

Les données des trois réseaux précédents sont disponibles sur ADES. Les données disponibles sur ADES sont issues des différents réseaux de suivi qualitatif (Illustration 66).

Nom	Descriptif	Code SANDRE
RNSISEAU	Réseau national de suivi au titre du contrôle sanitaire sur les eaux brutes utilisées pour la production d'eau potable	000000028
RRESOUQGUANO3	Réseau de suivi qualitatif de suivi des nitrates et des chlorures des eaux souterraines de Guadeloupe	070000005
FRISOS	Contrôle de surveillance de l'état chimique des eaux souterraines du bassin Guadeloupe	070000002
FR_SOS	Contrôle de surveillance de l'état chimique des eaux souterraines de la France	000000071

Illustration 66: Réseaux d'analyse qualité répertoriées dans ADES pour Grande-Terre et Marie-Galante.

#### Les mesures ponctuelles

#### 1. Les chlorures

Une étude du fond géochimique des eaux en Guadeloupe (Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008) a été réalisée et consiste en l'élaboration d'une base de données regroupant les informations pertinentes disponibles sur la qualité de l'eau, notamment les chlorures. Ces données sont utilisées en vue de compléter les données ADES notamment sur les secteurs non renseignés par les différents réseaux de suivi qualité. Les résultats d'analyse obtenus dans des études ponctuelles, en particulier des études de réalisation de forages. Les données utilisées pour le fonds géochimique correspondent à des travaux de recherche récents (après 1990) afin de disposer pour ces données de performances analytiques acceptables. Il est à noter que la période couverte par les données du fond géochimique est antérieure à celle couverte par la présente étude. Les points concernés par cette base de données sont illustrés en Annexe 5.

#### 2. La conductivité

Une mesure ponctuelle de conductivité est disponible sur la source de Poucet, situé dans la zone humide du bourg du Gosier (Weng P. et Dumon A., 2008). Ses caractéristiques sont précisées en Illustration 67.

Nom	Х	Y	Conductivité électrique	Température
Source de Poucet	661956	1792915	266 µS/cm	31.8°C

Illustration 67: Mesure ponctuelle de conductivité sur la source de Poucet au Gosier (Weng P. et Dumon A., 2008)

#### b) Les données retenues pour la cartographie

Le paramètre I a pour but de dresser un état des lieux de la salinisation actuelle des eaux souterraines. Les données des cinq dernières années seront donc prises en compte (1<sup>e</sup> janvier 2006 au 31 décembre 2010) dans la mesure du possible. Il est nécessaire de noter que certains points ne sont pas renseignés par des chroniques de données mais seulement par des données ponctuelles.

Afin d'améliorer la représentativité spatiale des cartes, les données disponibles seront toutes utilisées indépendamment de leur source de données.

Pour la conductivité :

- i. les chroniques de conductivité relatives au réseau DCE ;
- ii. les mesures annuelles de l'ARS;

iii. la mesure ponctuelle sur la source de Poucet.

Pour les chlorures :

- i. les mesures annuelles de l'ARS ;
- ii. les mesures de chlorures de la DEAL (3 à 12 analyses par an) ;
- iii. les informations de la base de données issue de l'étude sur le fond géochimique des eaux de Guadeloupe.

Au vue des périodes couvertes et des données récoltées, la cartographie des données les plus représentatives sont celles issues du réseau DCE pour les conductivités et de ADES pour les chlorures. Au cas où des points d'eau seraient renseignés par deux ou plusieurs sources de données, les données issues de ces sources seront préférées.

#### c) Le choix des seuils

Le choix des seuils GALDIT pour la conductivité et la concentration en chlorures est basée sur une étude bibliographique, selon la méthodologie utilisée pour la métropole (Dörfliger et al., 2010).

#### > Conductivité

Le choix de la valeur des rangs de conductivité est proposé à partir de valeurs remarquables issues de la bibliographie:

- 1100 μS/cm : limite supérieure de qualité selon le code de la santé publique à 25°C ;
- 800 µS/cm : seuil observé comme limite pour les eaux concernées par une intrusion d'eau saline, selon le rapport ONEMA métropole (Dörfliger et al., 2010);
- 600 µS/cm : seuil en dessous duquel les eaux ne semblent pas contaminées par une pollution, selon le rapport ONEMA métropole (Dörfliger et al., 2010).

Les valeurs de classes pour la conductivité sont présentées en Illustration 68.

Caractérisation de l'impact	Rang	Note GALDIT
Haut	> 1100 µS/cm	10
Moyen	800 à 1100 μS/cm	7,5
Bas	600 à 800 μS/cm	5
Très bas	< 600 µS/cm	2,5

Illustration 68: Définition des rangs GALDIT pour les valeurs de conductivité.

#### > Chlorures

Le choix de la valeur des rangs de conductivité est proposé à partir de valeurs remarquables issues de la bibliographie:

- les cartes issues de l'étude concernant l'identification des zones à risque de fonds géochimiques élevé dans eaux de Guadeloupe (Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008) sont réalisées selon les rangs suivants de teneurs en chlorures suivantes : 0,1, 25, 200 mg/L ;
- dans l'étude sur les conséquences de la remontée du niveau marin sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole (Dörfliger et al., 2010), la carte de Caen est effectuée avec seulement 3 classes de teneur en chlorures, séparés par des valeurs de rangs de 100 et 250 mg/L;
- la Norme de Qualité Environnemental évoque une valeur limite supérieure de 200 mg/L de chlorures pour une eau de bonne qualité ;
- le code de la santé publique impose une norme de 250 mg/L de chlorure pour les eaux brutes de toutes origines destinées à la consommation humaine et 200 mg/L pour les eaux de distribution.

A partir de ces éléments seront retenues les valeurs de rangs présentés en Illustration 69.

Caractérisation de l'impact	Rang	Note GALDIT
Haut	> 200 mg/L	10
Moyen	100 à 200 mg/L	7,5
Bas	50 à 100 mg/L	5
Très bas	< 50 mg/L	2,5

Illustration 69: Définition des rangs GALDIT pour les valeurs de teneurs en chlorures.

#### d) Les approches de cartographie du paramètre l

Comme pour le paramètre L, plusieurs approches de traitement des données sont envisagées et comparées :

#### > Approche 1 : Etat des lieux moyen de la salinisation

Un état des lieux moyen de la situation actuelle est recherché en moyennant les données qualité pour obtenir une valeur par point d'eau. La teneur en chlorures et la conductivité de l'eau sont marquées pas des variations périodiques sur certains points, en lien avec le cumul de précipitation et les prélèvements effectués dans la nappe (Ratsimihara, 2010).

En ce qui concerne les conductivités, le calcul de la moyenne des moyennes annuelles sera pris en compte. Parallèlement, en ce qui concerne les chlorures, la moyenne des moyennes annuelles est calculée pour chaque point d'eau indépendamment des différentes sources de données. Dans le cas de l'ARS, une seule donnée est disponible par an : la moyenne des données disponibles est prise en compte.

#### > Approche 2 : Etat des lieux extrême de la salinisation

En suivant le principe de précaution, les données représentatives d'une avancée du biseau salé maximale seront prises en compte, c'est-à-dire les valeurs de conductivité et de chlorures les plus hautes. Les données dont on dispose sont des données brutes. Par souci de représentativité, le maximum historique enregistré n'est pas utilisé. En effet, les valeurs extrêmes des chroniques sont souvent entachées d'erreur de mesures ou d'enregistrements aberrants : les données seront moyennées sur une période mensuelle dans la mesure du possible.

En ce qui concerne les conductivités, la moyenne mensuelle maximale des conductivités est prise en compte. Pour les teneurs en chlorures, les données disponibles sont insuffisantes pour le calcul des moyennes mensuelles. Le maximum
historique enregistré sera donc retenu pour chaque point d'eau, en prenant en compte indépendamment l'ensemble des sources de données.

### e) Cartes relatives au paramètre l et analyse critique

#### > Cartes des conductivité électrique

Les cartes de répartition des notations GALDIT élaborées à partir des conductivités sont présentées en Annexe 8 et Annexe 9.

Les cartes liées aux conductivités et relatives à un état des lieux extrême (approche 2 : état des lieux extrême de la salinisation) illustrent majoritairement des zones de forte vulnérabilité (notations GALDIT de 10) et laissent apparaître dans le cas de Grande-Terre et de Marie-Galante une zone de faible vulnérabilité (notation GALDIT de 2,5) au centre. Par ailleurs, quelques « lentilles» de plus faible vulnérabilité apparaissent. Bordée des zones de vulnérabilité intermédiaire, la géométrie des zones de faible vulnérabilité est très peu représentative de la piézométrie, et son interpolation est basée sur peu de points dans les deux cas. L'approche 1 fournit des résultats similaires en ce qui concerne la géométrie des zones, cependant les zones de faible vulnérabilité y sont plus étendues.

L'extension des zones de plus forte vulnérabilité (notation GALDIT de 10) remet en cause la pertinence du choix des rangs. En effet, les cartes finales ne sont pas représentatives d'une situation de danger différentielle selon les zones. Après une seconde étude bibliographique, il apparaît que l'étude du fond géochimique naturel des eaux souterraines de Grande-Terre (Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008) comporte des cartes de teneurs en chlorures dont les valeurs seuils sont supérieures à celles prises en compte précédemment: 600, 1100 et 2000  $\mu$ S/cm.

### > Les cartes de teneurs en chlorures

Les cartes de répartition des notations GALDIT élaborées à partir des conductivités sont présentées pour l'approche 1 : état des lieux moyen de la salinisation, en Illustration 70 et en Illustration 71 pour l'approche 2 : état des lieux extrême de la salinisation. La cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers a pour but de prévenir leur salinisation due à la montée du niveau marin. La montée du niveau marin étant amenée à s'amplifier dans les années qui viennent, les aquifères côtiers seront amenés à subir une contrainte croissante. Par souci de prévention, l'approche 2 la plus pessimiste est retenue.

Dans le cas de Grande-Terre (Illustration 70), les zones de notations GALDIT sont concentriques et à notations croissantes vers le littoral. Les zones de faible et moyenne teneurs en chlorures (notations GALDIT respectivement de 2,5 et 5) sont très limitées. Au Nord et à l'Est, la teneur en chlorures est plutôt élevée. Au Nord, ces fortes teneurs s'expliquent par une piézométrie plutôt faible (Illustration 23), de l'ordre de 1 à 2 mètres, couplée à des prélèvements non négligeables sur les points de prélèvement. A l'Est, elles s'expliquent plutôt par la proximité du littoral. La piézométrie est surtout faible à l'Est de la barrière imperméable et il n'y pas de prélèvements dans ce secteur.

Dans le cas de Marie-Galante (Illustration 71), les teneurs en chlorures sont très influencées par la piézométrie (Illustration 24), et la géométrie des zones de répartitions des notations GALDIT en est très révélatrice. Les zones de notations GALDIT sont globalement concentriques, avec des notations croissantes vers le littoral, et sont recoupées par la barre de l'île qui constitue une barrière imperméable. La bordure littorale est très vulnérable (notation GALDIT de 10) sur une largeur de 1 à 3 km dans l'unité des Hauts, de 2 à 3 km dans l'unité des Bas, plus sensible aux risques d'intrusion. La zone de faible vulnérabilité (notation GALDIT de 2,5) et de moyenne vulnérabilité (notation GALDIT de 5) se trouvent au centre de l'île seulement dans l'unité des Hauts. La précision de cette cartographie ne permet pas à ce stade de distinguer les zones de vulnérabilité de manière plus fiable et précise. L'approche 1 conserve des géométries de zones GALDIT similaires avec des zones de faible vulnérabilité plus étendues.

La cartographie des chlorures semble être plus révélatrice des zones en danger. Le choix des rangs prend en compte le fond géochimique naturel des eaux souterraines de Grande-Terre (Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008). Il a été démontré (Ratsimihara, 2010) que la teneur en chlorures a un lien direct avec la piézométrie et les prélèvements. La géométrie des zones GALDIT est révélatrice de ce lien. Cela est particulièrement visible à Marie-Galante, mais aussi dans la partie Sud de Grande-Terre. Dans la partie Nord de Grande-Terre, une zone de forte vulnérabilité est visible dans les terres. La forte teneur en chlorures dans cette zone s'explique par la piézométrie naturellement faible dans cette zone (Illustration 70), couplée à l'emplacement d'ouvrages de prélèvement de l'eau souterraine.



Illustration 70: Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorure sur Grande-Terre. Approche 2: état des lieux extrême de la salinisation.



Illustration 71: Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorure sur Marie-Galante. Approche 2: état des lieux extrême de la salinisation.

#### Analyse critique des données et cartes retenues

Les données brutes fournies par les différents acteurs des contrôles qualité en Guadeloupe apparaissent très hétérogènes au fil des années, ne favorisant pas un regard continu sur la qualité des analyses. En effet de nombreuses lacunes temporelles sont présentes sur les bases de données (Hydras 3, ADES) pour les chroniques, et les prélèvements dédiés aux analyses ponctuelles sont très irréguliers et au mieux biannuelles. Parallèlement, l'ensemble des données n'est pas disponible sur les mêmes périodes : les données prises en compte dans l'étude couvrent la période d'étude 2006 à 2010 de manière hétérogène. Par ailleurs, une grande hétérogénéité de limites de quantification des différents laboratoires et de leur méthode d'analyse est à noter. Les données utilisées proviennent de différents laboratoires :

- Institut Pasteur de Guadeloupe (IPG) basé à Pointe-à-Pitre
- Laboratoire du BRGM, Mesures Monitoring Analyses (MMA) basé à Orléans.

Les données brutes ne sont pas renseignées concernant les techniques d'analyses en vigueur au moment des analyses et le laboratoire référent. Ces observations ne favorisent pas la continuité des données.

Les données de conductivité et de chlorures dont on dispose sont mesurées au fond de chaque ouvrage après renouvellement suffisant des eaux. La localisation de la mesure est très superficielle par rapport au substratum de l'aquifère, susceptible de subir l'avancée du biseau salé. Ces mesures ne sont pas représentatives de l'ensemble de la masse d'eau dans toute sa profondeur, et peu adaptées à notre problématique. En l'absence d'un réseau d'analyse dédié à l'étude du biseau (localisation sur le littoral, profils verticaux de conductivité et de chlorures), les données présentées seront tout de même prises en compte.

Parallèlement, les cartes liées aux teneurs en chlorures semblent plus révélatrice de la piézométrie et des zones vulnérables connues. En prenant en compte ces remarques, les cartes de répartition des notations GALDIT relatives aux teneurs en chlorures seront finalement retenues pour les cartographies multicritères (Illustration 70 et Illustration 71).

## 6.4.6. Paramètre T : épaisseur saturée de l'aquifère

## a) Grande-Terre

La définition de l'épaisseur saturée de l'aquifère diffère selon le type d'aquifère. Le toit de l'aquifère peut être le mur du niveau volcano-sédimentaire supérieur (VSS) (cas de la nappe captive), ou le niveau piézométrique (cas de la nappe libre). Le mur de l'aquifère peut être constitué du substratum ou de l'interface eau douce - eau salée : la limite caractérisée par la topographie la plus élevée est choisie pour remplir ce rôle.

En zone libre, la position du substratum des formations carbonatées n'est pas clairement identifiée dans la bibliographie. Il est certainement constitué d'un niveau volcano-sédimentaire situé entre 200 et 2000 m de profondeur, il n'a jamais été clairement identifié par forage. L'interface eau douce – eau salée est considérée toujours topographiquement supérieure au substratum sur la partie libre de Grande-Terre; la loi de Ghyben-Herzberg sera utilisée pour déterminer l'épaisseur saturée de l'aquifère à partir des côtes piézométrique connues notées h : e = 41 h.

En zone captive, la position du toit du VSS est connue par le biais de quelques courbes d'iso-profondeur (Bézelgues S., Amraoui N., juin 2007). Le krigeage de ces iso-lignes donne une position étendue du toit du VSS, qui s'étend depuis une altitude de -10 m NGG à l'Ouest jusqu'à 20 m NGG à l'Est. Etant donné que l'épaisseur du VSS est négligeable par rapport à l'épaisseur total de l'aquifère, le toit du VSS est considéré comme le toit de l'aquifère ; son altitude est notée t. L'épaisseur saturée e de l'aquifère est calculée par l'expression :  $\mathbf{e} = 40 \, \mathbf{h} + \mathbf{t}$ .

A l'Ouest de la zone captive, le VSS se situe à une altitude inférieure à celle de l'interface eau douce – eau salée. La nappe est considérée libre et l'épaisseur saturée de l'aquifère est calculée de la même manière que dans la zone libre de Grande-Terre.

Pour le tracé des zones de notations GALDIT sur la zone captive, une interpolation d'une épaisseur d'aquifère supérieure à 10 mètres est réalisée à l'Ouest. Les données de la position ou même de l'existence du VSS ne sont pas prouvées dans cette zone et ce parti pris est cependant emprunté dans le cadre de cette présente étude. La carte



Illustration 72: Carte de répartition ddes notations GALDIT pour la paramètre T sur Grande-Terre

### b) Marie-Galante

Le modèle hydrodynamique de 2003 (Bézelgues S., Petit V., Gourdol L., 2003) utilise la position du substratum proposée par T.Mauboussin dans sa cartographie datant de 1987, présentée en Illustration 73. Elle a été élaborée à partir de l'analyse comparée de trois sources de données :

- recoupement par les forages qui a permis de connaître sa position dans le secteur du plateau du Robert, notamment celui de Vidon où l'on peut voir le substratum à 136 m de profondeur, celui de Fond Lolo à 143 m et celui de Rabi à 152 m;
- campagne de prospection géophysique où le substratum est identifié comme formation électriquement résistante (BRGM);
- Interprétation géomorphologique et stratigraphiques.

BRGM/RP-60828-FR - Rapport final



Illustration 73: Position du substratum, selon T. Mauboussin, 1987.

Les seuils de notation de la méthode GALDIT sont compris entre 0 et 10 mètres de profondeur sous le niveau marin. Selon la carte de Mauboussin (Illustration 73), la zone d'influence du substratum est caractérisée par une position du substratum supérieure à 20 m au-dessous du niveau de la mer. Par conséquent, la notation GALDIT est égale à 10 dans la zone d'influence du substratum, et se différencie seulement au niveau du littoral où l'interface ED-ES est topographiquement supérieure. La carte de répartition des notations GALDIT pour l'épaisseur de la zone saturée est présentée en Illustration 74.



Illustration 74: Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T sur Marie-Galante.

# 6.5. LA CARTOGRAPHIE MULTICRITERE

## 6.5.1. Choix cartographiques

## > Bilan des cartes disponibles

Chaque paramètre est illustré soit par une carte unique (cas de G, A, D, T), soit par plusieurs cartes parmi lesquelles un choix s'avère nécessaire (cas de L et I) (Illustration 75).



Illustration 75: Bilan des cartes superposables pour la cartographie GALDIT multicritère.

Comme évoqué ci-dessus, les cartes de teneurs en chlorures sont utilisées pour caractériser le paramètre I. La réalisation de cartes multicritères respectent le choix suivant, à l'aide de deux cartes:

- 1. carte multicritère révélatrice de la situation moyenne avec les cartes des paramètres L et l réalisées selon l'approche 1 (situation moyenne);
- 2. carte multicritère révélatrice de la situation extrême avec les cartes des paramètres L et l réalisées selon l'approche 2 (situation extrême).

## > Méthodologie de cartographie sous ArcGis

La superposition pondérée des cartes unicritères est réalisée en deux étapes :

 création d'une seule couche comprenant la géométrie de l'ensemble des limites inter-zones GALDIT figurant sur les 6 cartes unicritères Outil : Union de Analysis Tools (Analysis Tools > Superposition > Union);  ii. calcul de l'indice GALDIT de chaque polygone résultant de l'union.
Outil : *Calculatrice de valeurs de champs* disponible à partir d'un clic droit sur le nom du champ dans la table attributaire de la nouvelle couche.

### 6.5.2. Résultats de la cartographie multicritère sur Grande-Terre et Marie-Galante

Globalement, l'observation des cartes multicritères révèle une organisation concentrique des trois classes de vulnérabilité, la plus forte vulnérabilité concernant le littoral, la plus faible l'intérieur des terres (Illustration 76). Par ailleurs elle met en évidence en particulier l'influence des cartes des critères L et D dotés des poids les plus forts lors de la superposition.

Zone	Indice GALDIT	Risque d'intrusion du biseau salé	Localisation	
Verte	< 5	Faible	Dans les terres	
Orange	Compris entre 5 et 7,5	Fort	Intermédiaire entre les zones vertes et rouges	
Rouge	>7,5	Très fort	A proximité du littoral	

Illustration 76: Caractéristiques des trois zones de vulnérabilité sur les cartes multicritères

## a) Carte multicritère de Grande-Terre

Dans le cas de Grande-Terre (Illustration 81), les limites entre les zones de forte et de moyenne vulnérabilité sont principalement les limites de classes associées au paramètres D. Parallèlement les limites entre les zones de moyenne et de faible vulnérabilités sont principalement les limites de classes associées au paramètres L.

La zone de forte vulnérabilité apparaît comme un liseré large de 750 mètres en moyenne, s'amincissant au Sud à proximité de Sainte-Anne et s'élargissant sur la côte Nord-Est où il atteint 3000 mètres, ainsi qu'à la Pointe des Châteaux. Les zones d'élargissement correspondent à des zones de fortes teneurs en chlorures (Illustration 70). Cependant selon les teneurs en chlorures, il apparait que la zone centrale du Nord de Grande-Terre est vulnérable à l'intrusion saline à cause de l'emplacement de prélèvements à cet endroit. L'incidence des prélèvements sur l'intrusion saline n'est visible seulement par le biais du paramètre I. Le paramètre I étant doté d'un faible poids dans la superposition, cet élément n'est pas visible sur la carte multicritère.

La zone de faible vulnérabilité s'étend à l'intérieur des terres, où les piézométries et la distance à la côte sont grandes. Située loin du littoral à l'Ouest, elle s'en rapproche à

l'Est. La zone de faible vulnérabilité chevauche à proximité de la Pointe des Châteaux une zone de forte teneur en chlorure.

La surface de Grande-Terre est partagée par trois classes de vulnérabilité de la manière suivante (Illustration 77) :

	Approche 1		Approche 2		
Zone de vulnérabilité	Superficie (km²)	Pourcentage par rapport à Grande- Terre	Superficie (km²)	Pourcentage par rapport à Grande- Terre	
Faible	211,01	35,54	196,95	33,17	
Moyenne	251,84	42,42	262,44	44,20	
Forte	130,84	22,04	134,31	22,62	
SOMME	593,69	100,00	593,69	100,00	

Illustration 77: Comparaison des répartition de zones de vulnérabilité sur la carte multicritère de Grande-Terre pour les situations moyenne et pessimiste

En comparaison avec la situation moyenne (Annexe 11), les zones de vulnérabilité fortes et moyennes sont légèrement plus étendues dans le cas pessimiste (approche 2), tandis que la zone de vulnérabilité faible est plus réduite.

## b) Carte multicritère de Marie-Galante

Dans le cas de Marie-Galante (Illustration 82), les limites entre les zones de forte et de moyenne vulnérabilité sont principalement les limites de classes associées au paramètre D, et influencées par endroit par les limites du paramètre T (Nord de l'Unité des Bas). Parallèlement, les limites entre les zones de moyenne et de faible vulnérabilité sont presque exclusivement les limites de classes associées au paramètre L ; une influence des limites de perméabilités est en effet notable sur la partie Ouest.

La zone de forte vulnérabilité forme un liseré bordant le littoral, d'une largeur régulière de 1 km environ. Dans l'Unité des hauts, elle s'amincit au nord, sur les côtes Ouest et Est. Au Sud des unités des Bas, elle retrouve une largeur moyenne de 1 km. La zone de faible vulnérabilité occupe l'intérieur de l'île, sa limité extérieure est distante du littoral de 4 km environ à l'Ouest, jusqu'à 1 km environ à l'Est, au Nord de l'Unité des Hauts. L'effet de la barre de l'île est visible dans la répartition des vulnérabilités.

La géométrie des zones de vulnérabilité est comparable aux zones de classes de teneurs en chlorures (Illustration 71), mais leur largeur apparaît plus régulière et

inférieure, révélatrice de la géométrie des piézométries. L'observation des deux cartes correspond aux vulnérabilités attenues, c'est-à-dire grande sur le littoral.

Les zones de vulnérabilité sont réparties sur Marie-Galante de la manière suivante (Illustration 78):

	Approche 1 : Situation moyenne		Approche 2 : Situation extrême		
Zone de vulnérabilité	Superficie (km²)	Pourcentage par rapport à Marie- Galante	Superficie (km²)	Pourcentage par rapport à Marie- Galante	
Faible	79,48	49,87	74,64	46,83	
Moyenne	45,56	28,58	48,62	30,50	
Forte	34,35	21,55	36,13	22,67	
SOMME	159,38	100,00	159,38	100,00	

Illustration 78: Comparaison des répartition de zones de vulnérabilité sur la carte multicritère de Marie-Galante pour les situations moyenne et pessimiste.

Comme dans le cas de Grande-Terre, en comparant les situations moyennes (Annexe 10) et pessimiste, les zones de vulnérabilité fortes et moyennes sont légèrement plus étendues dans le cas pessimiste (approche 2), tandis que la zone de vulnérabilité faible est plus réduite.

# c) Réserves apportées sur les cartes de vulnérabilité multicritères de Grande-Terre et Marie-Galante

Au vue des cartes multicritères élaborées à partir de la méthode GALDIT, les paramètres L et D sont largement prédominants dans la caractérisation de la géométrie des zones de vulnérabilité ; cette observation est en accord avec les poids qui leur sont accordés lors de la superposition (poids de 4 pour chacun d'eux). Les paramètres A et T, de poids respectifs 3 et 2, sont plus discrètement visibles à marie-Galante.

Pour le cas de Grande-Terre, il apparaît que les zones de vulnérabilité des cartes multicritères ne sont pas en corrélation avec les zones de teneurs en chlorures. Ce paramètre étant révélateur de la salinisation actuelle, en particulier liée à l'incidence des prélèvements, il est étonnant que la méthode GALDIT ne lui attribue pas un poids plus important. A Marie-Galante, le manque de données de teneurs en chlorures a imposé une interprétation des données de chlorures appuyée sur son lien avec la

piézométrie. Par conséquent, l'observation de la carte multicritère de Marie-Galante ne permet pas de confirmer la différence entre le paramètre l et la carte multicritère.

La principale omission de la méthode est l'absence des informations d'exploitation des eaux souterraines à proximité de la côte. Les prélèvements effectués dans l'aquifère occasionne la formation de cône de rabattement qui abaissent localement la piézométrie. Il est ainsi possible d'avoir un aquifère à haut indice de vulnérabilité mais sans risque d'intrusion saline car il n'y aurait pas d'exploitation importante de la ressource à proximité de la côte. Dans une approche d'évaluation du risque et non de vulnérabilité, il serait nécessaire d'intégrer à la méthode GALDIT un paramètre relatif aux prélèvements, ou bien de prendre en compte la géométrie des cônes de rabattement dans la cartographie du paramètre L. Pour le besoin d'une démarche de risque et non de vulnérabilité comme la méthode GALDIT, la connaissance des débits prélevés est indispensable. A ce jour, ces débits sont mal connus en Guadeloupe.

Les situations moyennes et pessimistes aboutissent à des cartes multicritères peu différentes. Seuls les paramètres L et T diffèrent entre les deux situations. La sensibilité de la méthode GALDIT ne permet pas de mettre en évidence une différence notable entre les deux approches.

Globalement, la répartition des zones de vulnérabilité entre le littoral et l'intérieur des terres correspondent aux attentes et aux études faites précédemment (S. Bézelgues et al., 2002 à 2006 (4 phases) ; Dörfliger N.et al., 2010).

## 6.6. LA CARTOGRAPHIE DE LA SUBMERSION A PARTIR DU MNT 10

Il avait été prévu de réaliser la cartographie des zones submergées avec l'outil Litto 3D lors de la présente étude. Cependant ces données n'ont pas été disponibles dans la période de l'étude. Un Modèle Numérique de Terrain de résolution 10 m sur le plan (X,Y) et 0,5 m sur l'axe Z est utilisé ; il est traité sur le logiciel SIG ArcGis. Au vu de la qualité du MNT à disposition, les zones de submersion délimitées dans cette étude sont de 0.5 m NGG, 1 m NGG, 2 m NGG.

## 6.6.1. Les résultats de la cartographie de la submersion

## a) La Grande-Terre

La cartographie de la submersion sur Grande-Terre est présentée en Illustration 79.

Le trait de côte de Grande-Terre est doté de paysages variés. Au Nord, de hautes falaises calcaires surplombent l'océan. A l'Ouest et en particulier à proximité de la Rivière Salée, le littoral est caractérisé par la présence de zones de mangroves, tandis que de grandes plages s'étendent sur la côte Sud, en particulier à proximité des villes de Saint-François et de Sainte-Anne. A l'Est, la Pointe des Châteaux est une langue de terre étroite et au relief faible qui avance dans l'océan.

La majorité des zones touchées par une submersion future de 0,5 à 2 mètres sont actuellement des zones de mangroves. Parallèlement les villes de Saint-François et Sainte-Anne sont aussi couvertes par les zones de submersion : la présence de grandes plages favorise l'avancée du littoral. Concentrées à l'Ouest de la Grande-Terre, les zones d'altitude de 0,5 à 2 m mises en évidence incluent la ville de Port-Louis ainsi que celle de Pointe-à-Pitre, qui est la plus exposée au risque de submersion. Les bourgs de Morne-à-l'Eau, Petit-Canal et Vieux-Bourg sont situées à proximité des zones de risques. Au Nord, les falaises des plateaux du Nord limite l'aléa de submersion.

Des industries situées aux alentours de Pointe-à-Pitre peuvent être gravement touchées. La révision ou l'adaptation des fondations des bâtiments est donc souhaitable.

### b) Marie-Galante

La cartographie de la submersion sur Marie-Galante est présentée en Illustration 80.

Le littoral Atlantique de Marie-Galante est surplombé par un complexe de falaises et de terrasses surélevées, en particulier au Nord de l'île. La côte occidentale de ce compartiment est basse et localement marécageuse à l'arrière de la pointe de Folle-Anse. La côte Caraïbe de l'île est surtout bordée de plages sableuses, en particulier entre Saint-Louis et Grande-Anse, et de récifs coralliens, en particulier entre les Roches Noires et la plage de Petite Anse. On les retrouve au Sud entre la Pointe des basses et Grand-Bourg. (Roques et al., 2010)

Les zones de submersion de Marie-Galante sont essentiellement concentrées à l'Ouest, en particulier au Sud de Saint-Louis, dans un périmètre actuellement qualifiée de zone humide. Le littoral reliant cette zone humide à Grand-Bourg semble sensible à la submersion. Il s'agit de zones basses et de zones de plage. Au Nord, les falaises de l'unité des Bas limite l'aléa de submersion. Les bourgs principaux, Saint-Louis, Grand-Bourg et Capesterre-de-Marie-Galante, sont situés sur la bordure littorale. Ils sont donc situés dans des zones sensibles à la submersion. Les fondations des bâtiments de ces zones sont à surveiller.



Illustration 79: Cartographie de l'impact de la submersion du littoral lors de la remontée du niveau marin sur la Grande-Terre



Illustration 80: Cartographie de l'impact de la submersion du littoral lors de la remontée du niveau marin sur Marie-Galante

# 6.6.2. Réserves sur la cartographie de la submersion du littoral de Grande-Terre et Marie-Galante

Sur les cartes des zones submergées (Illustration 79 - Illustration 80), des zones correspondant à différents intervalles d'altitude sont déterminées pour évaluer l'impact qu'aurait l'élévation du niveau de la mer sur la morphologie de la ligne de côte. La précision du MNT est insuffisante pour obtenir limitation de qualité de ces différentes zones.

- l'intervalle 0 à 0,5 m est seulement représentatif du trait de côte dans le cas des deux îles. Dans la réalité, la zone du littoral a une plus grande extension. Cette observation révèle la précision horizontale insuffisante du MNT avec des mailles de 10 mètres ;
- l'intervalle 0,5 à 1 m s'étend en particulier à l'embouchure des cours d'eau principaux, ainsi que sur la côte ouest de Grande-Terre ;
- l'intervalle 1 à 2 m s'étend de manière très large à l'Ouest de Grande-Terre. A Marie-Galante, l'extension de cette zone est surtout marquée au Sud de Saint-Louis. Dans les deux cas, la délimitation de l'intervalle de 1 à 2 m est considérée de meilleure qualité que les précédentes, et peu entachée par la précision du MNT. Cependant ce scénario très pessimiste semble exagéré par rapport à une réalité envisageable selon l'ensemble de la bibliographie.

La cartographie obtenue à partir de ce MNT est donc très peu représentative de la réalité à deux niveaux :

- la délimitation des zones correspondant aux différents intervalles d'altitude entachée par la précision insuffisante du MNT;
- le choix des intervalles ne correspondant pas aux valeurs les plus probables citées dans la bibliographie et retenues pour cette étude, mise à part la côte basse de 0,5 m. Ce choix correspond en effet à une délimitation en adéquation avec la qualité du MNT, selon les zones visibles et leur géométrie acceptable.

En complément de l'altitude, la nature du littoral influence largement le phénomène de submersion, selon la sensibilité des terrains à l'altération. En effet, il peut être plus ou moins vulnérable à l'altération physique et chimique imposé par l'avancée marine (Roques et al., 2010). Ce volet n'est pas l'objet de cette présente étude, cependant la superposition des altitudes et des natures des terrains permettrait de caractériser plus distinctement l'aléa. Parallèlement, la superposition d'un plan d'occupation des sols actuel permettrait d'évaluer le risque lié à la submersion.



Illustration 81: Carte de vulnérabilité de Grande-Terre selon la méthode GALDIT ; Approche 2 : Situation extrême



Illustration 82: Carte de vulnérabilité de Marie-Galante selon la méthode GALDIT Approche 2 : Situation extrême

# 6.7. APPLICATION DE LA METHODE GALDIT AUX AQUIFERES COTIERS DE L'ILE DE LA REUNION

La méthode de cartographie GALDIT a été appliquée aux aquifères côtiers de l'île de la Réunion, sur une bande d'une largeur comprise en 1 et 8km approximativement.

# 6.7.1. Cartographie du Critère G

### a) Données locales du paramètre G

Dans le cadre d'une étude réalisée par le BRGM (rapport RP-57955-FR, 2010), les données de l'Office de l'eau (projet ECSHY) de 19 ouvrages du nord de La Réunion ont été analysées par traitement du signal grâce au logiciel Tempo du BRGM (cf. annexe 11). Les résultats obtenus permettent d'aboutir à une hypothèse générale : l'ensemble des aquifères du nord de La Réunion, étudiés par l'intermédiaire des ouvrages, présentent un caractère semi-captif.

En effet, le contexte volcanique général de l'Ile de La Réunion est caractérisé par son hétérogénéité et par l'alternance de paléosols d'extension variable (dont des paléovallées re-incisées et recoupées). Certains de ces différents horizons sont peu perméables mais de façon discontinue. Ceci explique que certains forages recoupent localement des aquifères de type captif. Ainsi, les données de la BSS (Banque de données du Sol et du Sous-Sol, BRGM Réunion) ont permis d'identifier neuf ouvrages recoupant localement des aquifères captifs sur les 117 ouvrages considérés. Ces neuf ouvrages, leur profondeur et la géologie des terrains recoupés (notamment les couches lithologiques peu perméables) sont répertoriés dans le tableau suivant (annexe 12) :

Le type aquifère captif est généralement observé au niveau d'ouvrages profonds. Trois ouvrages sur les neuf répertoriés présentent ainsi une profondeur supérieure à 90m et possèdent des crépines sur plusieurs niveaux. Les aquifères superficiels qui sont étudiés dans ce rapport peuvent donc être supposés de type semi-captif.

D'après la carte de l'illustration 84, ces ouvrages se situent principalement au Nord-Ouest, au niveau des aquifères de Sainte Marie - Sainte Suzanne et Saint André - Bras Panon et au Sud-Est, au niveau de l'aquifère de l'Etang Salé - Saint Louis.

b) Données spatialisées du paramètre G

Ces différentes observations permettent d'extrapoler les résultats et d'attribuer le rang 5 (correspondant à un aquifère de type semi-captif) à l'ensemble de la zone étudiée. Les aquifères de type libre ne semblent pas représentés à La Réunion. Par conséquent, le rang intermédiaire 7,5 n'intervient pas pour la carte finale du paramètre G.

La carte (illustration 84) permet d'observer que les ouvrages recoupant localement un aquifère de type captif représentent 8% de l'ensemble des ouvrages étudiés et précise leur emplacement (9 ouvrages sur les 117 répertoriés).







illustration 83 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre G.



illustration 84 : Carte du paramètre G pour l'île de la Réunion

Ce paramètre présente donc un rang moyen de 5 selon la méthode GALDIT ainsi qu'une pondération faible de 1. Il correspond donc à une vulnérabilité moyenne pour ce paramètre et influencera peu la carte finale de vulnérabilité GALDIT.

## 6.7.2. Cartographie du paramètre A

## a) Données locales du paramètre A

### Sources de données

Les valeurs de transmissivité et de puissance de l'aquifère sont synthétisées afin de calculer la conductivité hydraulique d'après la formule T=Kb. Les valeurs de transmissivité du rapport de J.-L. Join et J. Coudray, 1992, sont utilisées pour le cas particulier de la zone de Saint-Gilles. Les autres valeurs de transmissivité sont obtenues grâce aux données de la BSS (Banque de données du Sol et du Sous-Sol) en considérant 68 stations réparties sur l'ensemble de l'Ile de La Réunion. Pour cela, seuls les ouvrages pour lesquels on dispose des pompages d'essai et situés à moins de 2 km de la côte sont considérés.

- Les données issues des essais de longue durée, à la remontée sur les forages sont privilégiées dans un premier temps.

- Dans un second temps, pour compléter les communes où les données sont peu nombreuses (moins de deux données de transmissivité par commune), les données des puits et des piézomètres sont aussi utilisées.

Pour chacune des stations considérées, la profondeur de l'ouvrage associée au calcul de la transmissivité est répertoriée en annexe. Dans certains cas, la transmissivité est calculée au niveau de la nappe inférieure (7 stations sont concernées dans le cas de cette étude).

#### **Distribution des données**

L'étude des corrélations entre ces données permet de conclure qu'il n'existe pas de relation évidente entre les profondeurs des 68 ouvrages considérés et les transmissivités obtenues par pompages d'essais (illustration 88). D'autant plus que selon cet échantillon, les ouvrages semblent tous productifs (avec des transmissivités élevées) ce qui ne permet pas de caractériser clairement le lien avec la profondeur des ouvrages.

Ceci peut s'expliquer par l'hétérogénéité hydraulique du milieu considéré à l'échelle d'un ouvrage. Ainsi, le caractère transmissif d'une série volcanique peut être localisé sur quelques mètres au niveau d'un forage grâce à certains niveaux scoriacés intercoulées ou grâce à des chenaux basaltiques. Ces niveaux perméables semblent alterner étroitement avec des axes à perméabilité moindre tels que des basaltes plus massifs ou des tufs.



illustration 85 : Corrélation entre les 68 valeurs de transmissivité obtenues par pompages d'essai et les profondeurs des ouvrages associés



illustration 86 : Histogramme de distribution des données de transmissivités obtenues grâce à l'étude de 68 ouvrages de La Réunion et détail de cette distribution pour les valeurs inférieures à 0,01 m2/s

Sur le littoral de l'Ile, les transmissivités répertoriées sont relativement élevées avec la majorité des 68 ouvrages étudiés (51,5 %) qui ont une transmissivité supérieure à 0,1 m<sub>2</sub>/s (illustration 86). Les valeurs inférieures à 0,01 m<sub>2</sub>/s sont peu nombreuses avec seulement 8 ouvrages concernés sur les 68 ouvrages étudiés (soit 11% des données étudiées). La distribution présente deux modes : T=0,08 m<sub>2</sub>/s et T=0,6 m<sub>2</sub>/s comme le montre le graphe suivant :

### b) Données spatialisées du paramètre A

Dans un premier temps, la carte de J.L Folio, 2001 (annexe 15) a permis d'extrapoler ces données au sud-est de l'île. Cette carte présente en effet la répartition des logarithmes de la transmissivité interprétative obtenue par modélisation inverse avec 21 points de calage.

Dans un second temps, on utilise l'IDPR l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux du rapport BRGM RP-59057-FR-BAC (annexe 16). Cet indice est basé sur l'hypothèse suivante: l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent.

Selon le rapport BRGM RP-59057-FR-BAC, la nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci, notamment en fonction de la lithologie ou de la couverture végétale. En effet, ces paramètres influencent la

perméabilité qui conditionne à son tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration (appelé aussi coefficient d'écoulement).

Ainsi, l'IDPR tient compte de la capacité intrinsèque des formations du sous-sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. La densité de drainage est un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Cette observation permet d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble de l'IIe en tenant également compte des limites d'aquifère utilisées par le BRGM (entités du Référentiel hydrogéologique) et de la géologie des terrains.

La carte du paramètre A est représentée à l'illustration 88. Les zones correspondant à une vulnérabilité faible pour ce paramètre et donc à un faible IDPR sont les zones qui représentent le moins d'ouvrages à cause de la nature peu perméable des terrains rencontrés. C'est pourquoi il s'agit également des zones où peu de pompages d'essai ont pu être réalisés et où peu de données de transmissivité sont disponibles. Ceci explique la différence dans la répartition des données locales (où le rang maximal représente 86% des données) et celle des données spatialisées. Le rang GALDIT maximal pour le paramètre A est le plus représenté avec 39% des données spatialisées. Le rang GALDIT minimal en revanche est très peu représenté avec seulement 1% des données spatialisées. La distribution des 4 surfaces associées aux 4 rangs GALDIT pour ce paramètre se rapproche de la distribution finale de la vulnérabilité (illustration 111) avec des vulnérabilités élevées ou très élevées prépondérantes. Cette observation met en évidence l'influence majeure de ce paramètre A avec une pondération de 3 sur la carte de vulnérabilité résultante.



illustration 87 : Légende et répartition des données du paramètre A pour l'île de la Réunion



illustration 88 : Carte du paramètre A selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion

Cette carte met en évidence l'extrême variabilité géographique des caractères hydrodynamiques des formations volcaniques. Cette variabilité est certainement une conséquence de la diversité des formations géologiques considérées et de leur état d'altération.

Selon ce paramètre, les zones de plus grande vulnérabilité sont dispersées géographiquement : notamment au niveau du Port, de Saint André et surtout à l'Est, au niveau des coulées récentes très perméables. Des valeurs de transmissivités exceptionnellement élevées sont observées dans le secteur du Gol. L'interprétation des pompages d'essai de la Saphir (projet BRGM PSP10REU47, 2010), donne ainsi des valeurs homogènes isotropes comprises entre 0,5 et 1 m<sup>2</sup>/s.

Les zones les moins vulnérables correspondent aux formations bréchiques, peu perméables au sein des tufs de Saint Gilles. Ceci concerne seulement 2 ouvrages d'altitude en liaison avec des aquifères perchés (sur les 68 ouvrages étudiés). En effet, selon le rapport de Join J-L et Coudray J., 1992, la paléo-vallée de Saint Gilles fonctionne comme un drain au sein d'un réservoir souterrain chenalisé dans la nappe de base.

Les zones les moins vulnérables correspondent également au secteur nord-ouest compris entre Saint Denis et la Possession, au secteur ouest compris entre les Trois Bassins et les Avirons et au secteur oriental compris entre Sainte Rose et Saint Benoît.

## 6.7.3. Cartographie du paramètre L

### a) Données locales du paramètre L

#### Méthode d'étude des niveaux piézométriques minimum en période d'étiage

En première approximation les aquifères de La Réunion ont un cycle annuel avec une recharge, suivie d'une vidange. Ce cycle est influencé par une pluviométrie très variable selon la saison cyclonique (annexe 11). Ainsi, il est possible de distinguer trois périodes dans le cycle hydrologique annuel des nappes étudiées : la recharge de l'aquifère, sa vidange puis une période d'étiage.

La recharge des aquifères se fait généralement en début d'année, lors de la saison des pluies. Elle débute en janvier et se prolonge jusqu'en mars, voire en mai pour les nappes les plus inertielles. La vidange suit cette recharge et se prolonge jusqu'en septembre.

En général, ces hydrosystèmes présentent peu d'effet mémoire et les variations climatiques n'engendrent qu'un impact à court terme mais il faut quand même tenir compte des différentes variations piézométriques (annexe 12).



illustration 89 : Répartition des niveaux piézométriques minimum toutes stations confondues selon le mois



illustration 90 : Distribution données de niveau piézométrique minimum toutes stations confondues selon les années de 1985 à 2011

## Sources de données

Pour la synthèse des données piézométrique,

- Les niveaux piézométriques mesurés en **période d'étiage** permettent de lisser les contrastes liés aux variations de pluviométrie mensuelles.
- La moyenne des niveaux piézométriques permet également de ne pas tenir compte des variations du mois de recharge d'une année à l'autre.

Par conséquent, les données utilisées sont les valeurs minimales de niveau piézométrique moyen mensuel pour les différentes années. Les chroniques utilisées sont celles du portail ADESet de de l'Office de l'eau de la Réunion et couvrent la période de 1985 à 2010. Ces données sont étudiées pour 53 ouvrages et tiennent compte des mesures automatiques et instantanées. Pour chaque station, la fourchette de chronique ainsi que le mois où le minimum piézométrique est atteint sont bien précisés.

### Distribution des données

La distribution de ces minimums piézométriques moyens, met en évidence que la majorité des stations présentent un étiage maximum pour le mois de novembre (27% des stations sont concernées) (illustration 89).

D'après l'illustration 90, l'année la plus sèche sur l'ensemble des chroniques est 2001.

Cependant, hormis certains cas particuliers, ces données sont globalement constantes d'une année à l'autre car elles sont contraintes par la condition à la limite aval imposée par l'océan.

Ainsi, d'après J.L Join, 1991, l'aquifère de la zone littorale peut être considéré comme continu. Il précise également que les aquifères basaltiques, séparés par endroit par des paléosols, sont la plupart du temps en quasi équilibre de charges et présentent des fluctuations très similaires. En revanche, l'aquifère superficiel contenu dans les alluvions présente localement des fluctuations d'amplitude plus importante, sans doute à cause d'une perméabilité moindre. Il faut cependant noter que ces données sont représentatives de secteurs géographiques, géologiques et de contextes d'alimentation très différents.

#### Contexte piézométrique général observé à partir d'une date fixe (novembre 2009)

D'autre part, le contexte piézométrique a été étudié à une date fixée (en novembre 2009) afin d'observer la distribution spatiale globale des niveaux piézométriques en période d'étiage. Pour cela, 61 stations réparties sur l'ensemble de l'île ont été étudiées. Sept ouvrages aux niveaux piézométriques supérieurs à 50 m NGR ont été écartés puisqu'ils correspondaient à des aquifères d'altitude.

En domaine littoral, la piézométrie de la nappe de base est très peu élevée au-dessus du niveau de la mer. En effet, selon l'histogramme de distribution suivant (illustration 91), 70,5% des ouvrages (43 ouvrages concernés sur les 61) présentent un niveau piézométrique compris entre 0 et 5 m NGR et 16,4% (10 ouvrages concernés sur les 61) entre 5 et 10 m NGR. Seulement 13% (8 ouvrages concernés sur les 61) présentent des niveaux piézométriques supérieurs à 10 m NGR.



#### illustration 91 : Distribution et fréquence des niveaux piézométriques et corrélation avec l'altitude des stations

L'étude des corrélations entre ces données permet de conclure qu'il n'existe pas de relation évidente entre les 61 niveaux piézométriques et les altitudes des ouvrages considérés (illustration 92). Ce graphe permet également de montrer que les niveaux piézométriques supérieurs à 20 m NGR sont rares. Selon J.L Join, 1991, ils sont alors



vraisemblablement associés un contexte hydrogéologique particulier, comme par exemple une relation piézométrique avec un écoulement superficiel.

illustration 92 : Corrélation observée entre les niveaux piézométriques et l'altitude des ouvrages étudiés

La dispersion des gradients piézométriques est étudiée grâce au graphe des niveaux piézométriques en fonction de la distance perpendiculaire au rivage (illustration 93) :



illustration 93 : Corrélation entre les niveaux piézométriques de novembre 2009 et la distance au rivage mettant en évidence les principaux gradients hydrauliques

Les données globales ont très peu évoluées en comparaison avec celles présentées par J.L Join en 1991 ce qui montre à nouveau la stabilité de la piézométrie à l'échelle de la Réunion.

## b) Données spatialisées du paramètre L

#### **Gradients hydrauliques**

Les différents gradients hydrauliques sont calculés grâce aux 61 données locales de niveaux piézométriques mesurées sur une même ligne de courant ( $i=\Delta h/d$ ) (cf. les flèches sur la carte de l'annexe 14). Ces gradients sont ensuite analysés statistiquement et comparés aux données pluviométriques moyennes obtenues grâce à météo France, aux MNT ainsi qu'aux pentes observées.

Les valeurs moyennes de gradients hydrauliques par secteur géographique et selon l'échantillon des niveaux piézométriques étudié sont résumées dans le tableau suivant (illustration 94) :

Secteur géographique aux valeurs de gradients hydrauliques homogènes	Valeur du gradient hydraulique moyen (en ‰)
Nord-Est	30
Sud	3,4
Nord	2,2
Sud-Ouest	1,7

illustration 94 : Valeurs moyennes des gradients hydrauliques par secteur géographique

La carte du paramètre L selon la méthode GADLIT pour l'île de la Réunion est présentée à l'illustration 96. Le rang GALDIT 10 maximal représente environ 25% des données locales ou spatialisées (illustration 95). La distribution des 4 surfaces associées aux 4 rangs GALDIT met en évidence que le rang GALDIT minimal reste majoritaire avec environ 60% des données concernées. Les rangs intermédiaires sont moins représentés et ne dépassent pas 20% des données.

Une très bonne correspondance entre la répartition de données locales et spatialisées est observée. Ceci met en évidence la bonne représentativité des données locales étudiées.

Avec un poids de 4, et une vulnérabilité importante, ce paramètre influencera de manière conséquente la carte finale.



#### **REPARTITION SELON LES 4 RANGS GALDIT**



illustration 95 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre L pour les aquifères côtiers de l'île de la Réunion



illustration 96 : Carte du paramètre L selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion

Cette carte permet d'observer la nette opposition entre les secteurs ouest et est. Ainsi, la partie ouest semble beaucoup plus vulnérable par rapport à une montée du niveau marin selon ce paramètre que la partie est.

Ainsi, la zone étudiée (délimitée par la courbe de niveau de 200m) est entièrement classée selon le rang maximal 10 à l'ouest entre Saint Gilles et les Avirons. C'est l'inverse à l'est, où la zone d'étude est entièrement classée selon le rang minimal 2,5 entre Saint André et Sainte Rose.

D'après J.L Join, 1991, les différents environnements littoraux de l'aquifère volcanique sont donc bien caractérisés. Pour deux secteurs dans un environnement identique, l'allure de la surface piézométrique ne change pas, seuls les gradients piézométriques peuvent légèrement varier en fonction des conditions locales du flux souterrain d'alimentation en amont et de la perméabilité relative des formations volcaniques du secteur.

# 6.7.4. Cartographie du paramètre D

La valeur du rang de ce paramètre est supposée varier linéairement avec la distance à la côte. Les distances sont donc calculées sous Mapinfo (outil tampon) par rapport à la ligne de marée du littoral (appelée « morphotype »).

Les variations du tracé de ce morphotype dues aux marées (de l'ordre de 50 cm) sont négligées.

La carte finale du paramètre D selon la méthode GALDIT est présentée en illustration 97et illustration 99.

Avec un poids de 4, et une vulnérabilité importante, ce paramètre influencera de manière conséquente la carte finale pondérée (comme le paramètre L).



#### **REPARTITION DES 4 RANGS GALDIT**



illustration 97 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre D selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion

		RANG GALDIT			
		2,5	5	7,5	10
PARAMETRE	D	60%	9%	10%	21%
	L	62%	8%	5%	25%

illustration 98 : Tableau de la répartion des différentes classes des paramètres D et L pour l'île de la Réunion

Il existe une très bonne correspondance entre la répartition des données de ce paramètre et celles du paramètre L (illustration 98). En effet, ce paramètre D présente également une prédominance du rang GALDIT minimal d'une valeur de 2,5 (60% des données spatialisées) et 20% des données associées au rang GALDIT maximal d'une valeur de 10.

Ce paramètre D, distance au rivage semble donc lié au paramètre L, hauteur du toit de la nappe sur le niveau marin ; cette relation est liée à la cartographie de L prenant en considération un gradient, fonction notamment de la distance.



illustration 99 : Carte du paramètre D selon la méthode GADLIT pour l'île de la Réunion

Cette carte permet d'observer l'importance de la zone étudiée (délimitée par l'altitude 200m). En effet, plus la courbe de niveau est éloignée du rivage (donc plus la pente est faible), plus la surface associée au rang GALDIT minimal est relativement importante par rapport aux autres surfaces. Elle est proche du rivage et donc associée à des secteurs dont la vulnérabilité élevée représente un pourcentage plus fort, dans le secteur Nord-Ouest de la Montagne, dans le secteur entre Trois Bassins et les Avirons et au Sud Est. Elle est loin du rivage au niveau du Port, dans le secteur Sud-Ouest compris entre l'Etang Salé les Hauts et Saint Pierre au niveau de tout le secteur Nord Est.

# 6.7.5. Cartographie du paramètre I

### a) Données locales du paramètre l

# Sources de données et étude de deux types de paramètre : conductivité électrique et teneur en chlorures

#### Données issues des logs de conductivité électrique, rapport BRGM RP-59457

Les premières données utilisées sont les conductivités maximum obtenues par synthèse des logs de conductivité électrique des chroniques de 1986 à 2010 (rapport BRGM RP-59457). Pour cela, les logs de 36 ouvrages sont considérés.

Ainsi, 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

Ces données permettent de suivre au fil des années l'évolution de la conductivité électrique suivant la profondeur afin de surveiller une éventuelle contamination marine dans la zone littorale. Ce suivi permet également de déterminer la profondeur et l'épaisseur de la zone de transition (interface eau douce - eau salée) lorsque celle-ci peut être mise en évidence.



illustration 100 : Graphique de corrélation entre les deux types de données permettant l'étude du paramètre I : teneur en chlorures et conductivité électrique

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 sont ainsi écartées.

# Données issues des paramètres physico-chimiques, chroniques de l'Office de l'eau 2010

Les secondes données utilisées sont les conductivités électriques maximum ainsi que les teneurs en chlorures (en mg/l) obtenues par synthèse des chroniques des paramètres physico-chimiques de l'Office de l'Eau, mesurés de 1986 à 2010. Pour cela, les valeurs mesurées au niveau de 85 ouvrages sont considérés. Seules les données issues du réseau souterrain (forages, piézomètres et puits) sont étudiées. Pour chaque station, la valeur maximum observée de 1986 à 2010 est répertoriée.

#### Corrélation entre les deux types de données étudiées

Les minimum et maximum de ces différentes données sont comparées statistiquement et sous ®Mapinfo.

La corrélation entre les données de conductivité électrique et de teneur en chlorures est plus particulièrement étudiée (illustration 100). Pour cela, les valeurs de deux stations (piézomètre Hermitage Lot Dayo) aux conductivités électriques très élevées en 1999 sont éliminées du graphique.

Ce graphe permet de valider la première hypothèse utilisée : les deux types de données sont liés avec un coefficient de corrélation élevé de 0,85. Les plus fortes valeurs de conductivité électrique correspondent bien à des fortes valeurs de teneur en chlorures et correspondent à une intrusion saline.

Cette corrélation permettra donc d'utiliser les deux types de données : on pourra ainsi faire des extrapolations si l'une des valeurs est absente et utiliser le rang GALDIT maximal associé pour chaque station.

Il faut cependant remarquer que ces données n'ont été corrélées que pour de faibles valeurs de conductivité électrique (< 2000µS/cm). Il serait intéressant d'observer si la corrélation est aussi évidente pour des conductivités électriques très élevées (correspondant à une contamination avérée de l'ouvrage).

### b) Données spatialisées du paramètre l

Les données locales sont extrapolées grâce à l'esquisse de l'invasion marine de la nappe de base dans les formations volcaniques présente par J.L Join, 1991 (annexe 18). Cette carte présente la salinité des eaux à l'échelle 1/25 000<sub>ème</sub> (Daesslé et Join, 1988) d'après les données d'archives de la Banque du Sous-Sol. Les lignes d'iso-conductivité 500, 1000 et 2000  $\mu$ S/cm sont représentées et adaptées selon les différents rangs du paramètre GALDIT.

Les données de teneurs en chlorures sont détaillées en annexe d'après le rapport de l'Office de l'Eau de La Réunion, CG974, Juillet 2010 (annexe 19).

La carte des hauteurs du toit de la nappe (illustration 101) peut être reliée à celle du paramètre I :

- En plaine détritique, les principaux aspects de cette contamination marine sont bien représentatifs des conditions piézométriques.

- Inversement dans les formations volcaniques affleurantes (Trois Bassins et Saint Leu), ce sont les phénomènes de dispersion qui semblent prépondérants. La contamination marine y est très hétérogène et non représentative des conditions piézométriques.

Comme pour le paramètre L, d'autres cartes sont utilisées pour l'extrapolation des résultats (annexe 14) :

- La carte des rivières pérennes (les rivières, ravines, bras et canaux sont représentés) (annexe 17).

- La pluviométrie moyenne (les données météo France de précipitations en cumul moyen annuel sont représentées pour la période de 1970 à 2009).

- Le MNT

La carte finale et les résultats associés à ce paramètre I sont présentés à l'illustration 102 et l'illustration 103.

Une très bonne correspondance entre la répartition de données locales et spatialisées est à nouveau observée (illustration 101). Ceci met en évidence la bonne représentativité des données locales étudiées.

Le rang GALDIT 10 maximal représente environ 14% des données spatialisées. Le rang GALDIT minimal reste majoritaire avec environ 70% des données spatialisées. C'est le paramètre qui présente la plus grande surface associée au rang le plus faible. Les rangs intermédiaires sont moins représentés et ne dépassent pas 20% des données spatialisées.

Avec un poids de 1, ce paramètre influencera moins que les autres la carte finale pondérée.

Cette carte peut également être comparée à celle du paramètre L (illustration 96). Elle présente la même opposition entre les secteurs ouest et est (partie ouest plus vulnérable) avec cependant une zone associée au rang GALDIT maximal moins importante.



illustration 101 : Légende et répartition des données de la carte finale de la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à la montée du niveau marin selon le paramètre l



illustration 102 : Carte du paramètre I pour l'île de la Réunion

En effet, selon ce paramètre, la zone étudiée délimitée par l'altitude 200m est entièrement classée selon le rang GALDIT minimal 2,5 sur un grand secteur (secteur plus grand que pour le paramètre L) compris entre La Montagne et l'est de Saint Philippe. Une donnée se distingue parmi les autres, il s'agit du forage Gillot qui est le seul contaminé dans le secteur nord de l'Ile (illustration 102). Cette zone d'étude est entièrement classée selon le rang le plus fort seulement sur un petit secteur (secteur plus petit que pour le paramètre L) compris entre Saint Leu et les Avirons. En revanche, en comparaison avec le paramètre L, on observe que la zone de Saint Gilles semble plus vulnérable plus loin dans les terres selon ce paramètre I.

Par ailleurs, si l'on compare cette carte finale à l'esquisse des iso conductivités de 1991, on peut noter que la contamination saline a bien pénétré dans les terres en 20 ans. D'après l'illustration 103, les résultats du paramètre I obtenus selon les teneurs en chlorure semblent bien cohérents en comparaison avec ceux des concentrations électriques de l'illustration 102. L'hypothèse que ces deux données sont liées semble donc vérifiée.



illustration 103 : Carte du paramètre I à partir des teneurs en chlorures pour l'île de la Réunion
### 6.7.6. Cartographie du paramètre T

#### a) Données locales du paramètre T

#### Sources de données

Sur les coupes de forage étudiées, le mur de l'aquifère est rarement représenté. Pour la limite inférieure de la nappe d'eau douce, la pénétration des eaux marines dans la zone étudiée doit être considérée. C'est également en raison de ce risque de contamination saline que la totalité des forages exploitent l'aquifère volcanique dans des conditions de pénétration partielle.

Par conséquent, la différence entre le mur et le toit des crépines (obtenue grâce à la BSS) est utilisée pour le calcul de la puissance de l'aquifère. L'approximation de la profondeur du mur de l'aquifère par le mur de la crépine est supposée lissée à l'échelle de la Réunion. Les puissances de 138 ouvrages répartis sur l'ensemble de l'Ile sont étudiées. Par ailleurs :

- En cas de crépine multiple, la somme des épaisseurs utiles crépinées est calculée (8 stations sont concernées dans le cas de cette étude).

- La législation interdisant la connexion entre différents aquifères, il s'agit la plupart du temps du même ensemble.

- Les essais réalisés entre packers au niveau de ces différentes hauteurs sont répertoriés pour le calcul de la transmissivité.

- Ces résultats sont vérifiés et confirmés grâce aux logs de conductivité électrique répertoriés par l'Office de l'eau de la Réunion.

Certaines données sont délicates et doivent être considérées avec attention :

- Les forages industriels peu profonds de la Montagne sont utilisés pour le suivi des exploitations avec des différences toit-mur crépine qui sous estiment donc l'épaisseur mouillée réelle

- Les forages peu profonds, en règle générale qui représentent un pourcentage d'erreur d'estimation de la puissance plus élevé (puisque les crépines sont placées à environ 2/3 de l'ouvrage)

- Dans le cas des puits, seule une puissance minimale déterminée à partir des dimensions de l'ouvrage est considérée.

- Pour St Gilles, la différence d'altitude entre les deux bassins supérieurs est utilisée en approximation (soit 50m).

#### Distribution des données

Dans le contexte piézométrique défini avant (pour la date fixe de novembre 2009) avec des niveaux piézométriques compris entre 0,3 et 5 m NGR, dans 70,5% des cas, l'approximation de la profondeur de l'interface eau douce - eau salée par la formule de Ghyben Herzberg permet de calculer en première approximation une épaisseur d'eau douce principalement comprise entre 12 et 200 mètres.

La distribution des données de puissance de l'aquifère (illustration 104) présente une dispersion importante avec des valeurs comprises entre 4,1 et 181,5m. Cette épaisseur mouillée est supérieure à 10 m pour 87% des ouvrages considérés (soit 115 ouvrages sur les 132 étudiés). Les épaisseurs supérieures à 50 m concernent essentiellement les ouvrages captant l'aquifère volcanique en relation avec une nappe alluviale. Ces épaisseurs les plus importantes sont souvent associées à des crépines multiples qui correspondent dans ce cas à des « épaisseurs utiles cumulées » comprises entre 30 et 180 m.



illustration 104 : Histogramme de distribution des données de puissances des aquifères obtenues grâce à l'étude de 132 ouvrages de La Réunion

Par ailleurs, il existe une corrélation entre la profondeur de l'ouvrage et la puissance de l'aquifère : de façon logique, plus la puissance de l'aquifère est importante, plus l'ouvrage est profond. Les données du paramètre T sont plus dispersées pour les faibles valeurs de profondeur d'ouvrage mais la corrélation devient linéaire pour une épaisseur mouillée supérieure à 50 mètres (illustration 105).

Ces données locales sont extrapolées grâce au découpage des aquifères selon le referentiel\_reu\_niveau 3.



illustration 105 : Corrélation entre le paramètre T et la profondeur des ouvrages étudiés

#### b) Données spatialisées du paramètre T

Ces résultats permettent de classer l'ensemble de l'Ile au rang GALDIT maximal, soit 100% des données spatialisées. La carte du paramètre T et les résultats associés à ce paramètre sont présentés à l'illustration 107 et l'illustration 106.







illustration 106 : Légende et répartition des données de la carte du paramètre T selon la méthode GALDIT pour l'île de la Réunion



illustration 107 : Carte du paramètre T selon la méthode GADLIT pour l'île de la Réunion

La carte du paramètre T est présentée à l'illustration 107.Le rang GALDIT 10 maximal représente 87% des données locales (illustration 106). Ces résultats permettent de classer l'ensemble de l'Ile au rang GALDIT maximal, soit 100% des données spatialisées. Le classement de ce paramètre peut donc être critiqué et devrait certainement être ajusté au cas de La Réunion.

Ce paramètre correspond donc à une vulnérabilité très importante mais avec un poids de 2, il influencera relativement peu la carte finale pondérée. C'est le paramètre pour lequel ce rang maximal (associé à une grande vulnérabilité) est le plus représenté. Ce résultat est spécifique à l'Ile de la Réunion avec son contexte volcanique.

# 6.7.7. Classement numérique multicritère de la vulnérabilité : superposition pondérée des cartes des différents paramètres

# a) Carte finale des indices GALDIT et répartition des zones de vulnérabilité à l'intrusion saline

Les six cartes des six paramètres GALDIT sont superposées et pondérées selon l'Équation 1 (cf. paragraphe 6.3.1.). La distribution en % des indices GALDIT finaux sont présentées grâce au graphique suivant :



illustration 108 : Répartition des indices GLADIT avant le reclassement des données par vulnérabilité pour l'île de la Réunion

La carte finale pondérée obtenue avant le reclassement selon les trois types de vulnérabilité est présentée à l'illustration 109.



illustration 109 : Carte finale des indices GALDIT avant le reclassement selon trois classes de vulnérabilité

Ces indices sont ensuite regroupés par classes de vulnérabilité selon le Tableau du paragraphe 6.3.1. La carte des zones de vulnérabilité des ressources en eau par rapport à l'intrusion saline en fonction des indices GALDIT finaux est présentée à l'illustration 110 et à l'illustration 111.

Cette carte permet d'observer la répartition géographique des différentes classes de vulnérabilité. Cette carte présente également les conductivités électriques maximales (données des logs et mesures des paramètres chimiques confondus) correspondant au rang GALDIT le plus élevé :

Classes GALDIT de vulnérabilité Vulnérabilité forte Vulnérabilité moyenne Vulnérabilité faible	41% 24% 35%
Zone étudiée	
Carroyage 10 km x 10 km PROJECTION WGS 84 UTM 40 Sud Courbe de niveau 200 m Commune	
Surfaces de référence englobant les zones de vulnérat	pilité
1,9 km - surface ONEMA année 2	
2,8 km - surface ONEMA année 1	
Conductivités électriques de rang GALDIT maximal 10	
données des logs et des paramètres chimiques	
☆ >1000 μS/cm	

La zone la plus vulnérable, associée au rang GALDIT d'une valeur de 7,5 à 10 représente 35% de la zone étudiée. Cette zone la plus vulnérable se situe au maximum à 1,9 km du rivage. Cette surface de référence est comparée à celle obtenue à l'issue du diagnostic du projet ONEMA en 2010 (BRGM RP-59049-FR.) : celle-ci était plus élevée et allait jusqu'à 2,8 km dans les terres. Les zones les plus vulnérables se situent au niveau du Port, de Saint Gilles, entre Saint Leu et les Avirons et entre Saint Pierre et Saint Joseph. La pénétration dans les terres de l'intrusion saline est la plus importante au niveau de l'Etang Salé. Cette zone de plus forte vulnérabilité ne concerne pas la partie orientale comprise entre Saint André et Sainte Rose.

La zone moyennement vulnérable, associée au rang d'une valeur de 5 à 7,5 représente la majorité de la zone étudiée avec 41% de la surface concernée.

La zone faiblement vulnérable, associée au rang d'une valeur de 2,5 à 5, représente 24% de la zone étudiée. La zone faiblement vulnérable est prépondérante au nord-est, et moins représentée dans le secteur allant de Saint Leu aux Avirons et dans les zones où la courbe de niveau est proche du rivage.

illustration 110 : Légende et répartition des données de la carte des zones de vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en fonction des induces GALDIT finaux.

Certaines zones au Sud (entre Saint Louis et Saint Pierre) sont proches du littoral mais sont pourtant classées en zone de moyenne vulnérabilité. Ceci peut s'expliquer par un faible rang GALDIT associé au paramètre L dans ce secteur.

Certains secteurs présentent des pénétrations dans les terres plus importantes par rapport aux secteurs adjacents. Ceci peut s'expliquer par la grande hétérogénéité des rangs GALDIT associés au paramètre A dont le poids est maximal (p<sub>A</sub>=4).



illustration 111 : Carte des zones de vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline en fonction des indices GALDIT pour l'île de la Réunion

Selon cette carte finale, certains forages considérés comme contaminés (>1000µS/cm) se trouvent dans la zone de faible vulnérabilité. Des corrections semblent donc nécessaires.

# b) Exemples de corrélations observées entre les différents paramètres GALDIT

# Corrélations entre les paramètres L et I (hauteur du toit de la nappe sur le niveau marin et impact de l'état actuel)

Les cartes des paramètres L et I semblent étroitement liées. Les graphes suivants (illustration 112 et illustration 113) mettent en évidence leur corrélation.



illustration 112 : Corrélation entre les conductivités électriques maximales (issues des logs de l'Office de l'eau) et les niveaux piézométriques à une date fix (novembre 2009).



illustration 113 : Corrélation entre les conductivités électriques maximales (issues des mesures de paramètres chimiques de l'Office de l'eau) et les niveaux piézométriques par secteur

Cette corrélation va bien dans le sens d'une augmentation de la conductivité avec la baisse du niveau piézométrique. Il y a bien une diminution de la conductivité avec la hausse du niveau piézométrique (effet de dilution) et une augmentation de la conductivité avec la diminution de la charge (effet de concentration). Cependant, le coefficient de corrélation reste relativement faible.

Il est important de signaler que lors des arrêtés sécheresse à La Réunion, le critère pris en compte pour cesser d'exploiter un ouvrage AEP est la charge piézométrique : il est considéré que pour une charge très faible, le risque de concentration de certains éléments (surtout les chlorures en zone littorale) est trop important.

Or, on constate ici qu'il n'y a en général peu ou pas de corrélation entre le niveau piézométrique et la conductivité, ainsi le risque de concentration d'ions chlorures peut subsister malgré une charge piézométrique supérieure à la côte d'alerte.

# Corrélations entre les paramètres L et D (hauteur du toit de la nappe sur le niveau marin et distance perpendiculaire au rivage)

La corrélation entre les paramètres L et D est indéniable et a été utilisée dans le paragraphe précédent pour le calcul des gradients hydrauliques.

## Corrélations entre les paramètres D et I (distance perpendiculaire au rivage et impact de l'état actuel)

La relation entre les paramètres I et D est détaillée dans le rapport BRGM RP-59049-FR, 2010. Le graphe suivant (illustration 114) permet ainsi de confirmer l'altitude de la zone de transition de l'interface eau douce-eau salée (altitude à partir de laquelle une forte augmentation de la conductivité est observée avec des valeurs > 1000  $\mu$ S/cm) est inversement proportionnelle à la distance au rivage (paramètre D).



illustration 114 : Corrélation entre l'altitude d'augmentation de la salinité et les distances au rivage (d'après le rapport BRGM RP-59049-FR)

Ce graphe montre ainsi que les piézomètres les plus proches de la mer semblent les plus vulnérables à une salinisation. Cette observation tend à confirmer le modèle théorique du « biseau salé » où l'eau douce repose sur l'eau de mer selon un équilibre qui est fonction des gradients de densité et de charge hydraulique.

### c) Comparaison du résultat final avec les données existantes

#### Carte finale des zones de vulnérabilité et nature du littoral

La carte finale est comparée à la nature du morphotype du littoral (illustration 115).



illustration 115 :Carte finale des zones de vulnérabilité et nature du littoral

Selon cette carte, la vulnérabilité semble sur-estimée au niveau des falaises et côtes rocheuses et sous-estimée au niveau des plaines côtières bordées par un récif corallien et des plages de cordons de galets d'estuaire.

En effet, les falaise et côtes rocheuses représentent une vulnérabilité moindre car la surface d'échange et le flux associés sont moins importants. Au contraire, les plaines côtières sont réputées plus vulnérables au risque de salinisation si on considère l'impact de la houle (évènement ponctuel).

Cette corrélation suggère donc une correction à envisager pour la méthode GALDIT afin de mieux tenir compte de la morphologie du littoral. Un nouveau paramètre « **morphologie de la ligne littorale** » pourrait être introduit, ou surimposé à la carte finale.

#### b) Carte finale des zones de vulnérabilité et données du MNT

La carte finale est comparée aux données de référence (basées sur le MNT) d'après le rapport BRGM RP-57955-FR (année 1 du projet ONEMA) (illustration 116 et illustration 117). Cette cartographie 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 :



illustration 116 : Légende de la carte finale des zones de vulnérabilité et des données de référence de l'année 1 du projet ONEMA (BRGM RP-57955-FR)



illustration 117 : Carte finale des zones de vulnérabilité et des données de référence de l'année 1 du projet ONEMA (BRGM RP-57955-FR)

Selon cette carte, la zone de vulnérabilité maximale de l'année 2010 du projet pénètre de manière plus avancée dans les terres au niveau de la baie de Saint Paul et de ses ravines. La même observation est constatée au niveau de l'Etang Salé, de l'Etang de Gol et de Pierrefonds. La vulnérabilité maximale de cette étude semble donc sousestimée au niveau des ravines, des embouchures ou des zones de faible altitude de manière générale.

Ces zones correspondent à des zones côtières bordées de plages de cordons de galets d'estuaire ou de cône-delta. 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. Cette corrélation suggère donc une correction à envisager pour la méthode GALDIT afin de mieux tenir compte des rivières et de leur embouchure. Un nouveau paramètre « **paramètre altitude, pente**» pourrait être superposé.

### c) Carte finale des zones de vulnérabilité et zones d'activité et d'AEP

La carte des zones d'activité et des captages AEP en lien avec les fortes conductivités électriques observées est présentée à l'illustration 118.



illustration 118 Carte des zones d'activité et des captages AEP en lien avec les fortes conductivités électriques observées (Ile de la Réunion).

# 6.7.8. Conclusions concernant la cartographie de la vulnérabilité des 6 paramètres de la méthode GALDIT

#### a) Guadeloupe

En Guadeloupe, le contexte tropical insulaire et le manque de données ont nécessité une adaptation de la méthode GALDIT.

En métropole, l'étude est effectuée sur une bande littorale de 5 km de largeur. L'application d'une telle bande littorale couvre presque la totalité de Marie-Galante. De plus le contexte insulaire favorable à une large intrusion du biseau salé sous les terres nécessite une surveillance accrue de la vulnérabilité des aquifères. L'étude est donc menée sur l'ensemble de la superficie de Grande-Terre et de Marie-Galante.

La cartographie du paramètre L est basée sur une interpolation du niveau piézométrique à partir des données du réseau DCE, qui représente un nombre limité de points de données (12 sur Grande-Terre et 8 sur Marie-Galante). Pour une meilleure précision, il serait pertinent de mettre en place un réseau de surveillance quantitative plus dense, en particulier sur le littoral, qui est plus exposé aux intrusions.

La cartographie du paramètre I est rendue difficile par le manque de données. Par manque d'information sur les carbonates et les hydrogénocarbonates, l'étude se base sur les conductivités d'une part et les chlorures d'autre part. Les deux approches sont comparées. Cependant pour chacune d'elle le manque de données impose des interpolations spatiales arbitraires, bien qu'elles soient basées sur des principes de base démontrés (relation piézométrie/teneurs en chlorures/prélèvements). Il serait donc pertinent de mettre en place un réseau de surveillance de la qualité des nappes sur le littoral, qui est le plus exposé aux intrusions d'eau salée selon nos résultats. Le suivi de la conductivité et des chlorures fourniront des indices représentatifs de la salinisation de l'aquifère.

L'utilisation des teneurs en chlorures et des conductivités a imposé le choix de seuils pour l'application de la méthode GALDIT. Ces choix sont actuellement arbitraires, bien que basé sur une étude bibliographique. Les seuils doivent dépendre en effet du fond géochimique initial de l'eau, spécifique à chaque zone d'étude. Une homogénéisation des seuils sur les zones en contexte tropical insulaire et selon les types d'aquifère (carbonatés, volcaniques...) pourrait être proposée.

La cartographie du paramètre T est basée sur l'approximation de Ghyben-Herzberg qui estime la position de l'interface eau douce- eau salée. Pour une meilleure précision, l'implantation de forages profonds ou des investigations géophysiques dédiés à positionner le substratum constituant le mur de l'aquifère s'avèrerait nécessaire. Ces investigations seraient particulièrement nécessaires en Grande-Terre où aucune information n'est disponible.

#### Représentativité des paramètres pris en compte

La méthode GALDIT estime la vulnérabilité de l'aquifère à partir de critères naturels, sans prendre en compte l'incidence anthropique, notamment les prélèvements. En effet, les prélèvements abaissent localement la piézométrie et change de manière significative la géométrie du biseau salé. Ainsi les aquifères côtiers exploités sont exposés de manière plus prononcée aux intrusions. C'est le cas notamment en Grande-Terre, où les prélèvements de Charropin et Pelletan sont implantés dans une zone de faible piézométrie. Cette zone est classée comme peu vulnérable selon la méthode GALDIT, pourtant de hautes teneurs en chlorures y sont observées.

#### Le choix des poids et des seuils

Les poids attribués aux différents paramètres sont arbitraires. L'attribution des poids est discutable, notamment dans notre zone d'étude. A titre d'exemple, dans les zones pour lesquelles une forte salinisation est observée, le paramètre I est prépondérant puisqu'un déséquilibre entre l'eau douce et l'eau salée peut être supposé. Ce type de déséquilibre étant irréversible, ce paramètre mérite d'être davantage pris en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité.

#### b) lle de la Réunion

**G** : Ce paramètre présente une vulnérabilité moyenne (rang GALDIT de 5). Ce résultat est spécifique à l'Ile de la Réunion et pourra être comparé aux résultats obtenus au niveau du littoral métropolitain et des autres DOM. Les aquifères de la Guadeloupe par exemple, sont majoritairement de type libre

**A** : Ce paramètre met en évidence l'extrême variabilité géographique des caractères hydrodynamiques des formations volcaniques. La vulnérabilité forte est la plus représentée pour ce paramètre avec 39 % des données spatialisées. La vulnérabilité minimale en revanche est très peu représentée avec seulement 1% des données spatialisées. Ce paramètre a une influence majeure (avec p<sub>A</sub>=3) sur le résultat final de vulnérabilité ce qui est confirmé par la répartition des données finales.

L : La zone de plus grande vulnérabilité représente environ 25% des données pour ce paramètre. La zone de plus faible vulnérabilité reste majoritaire avec environ 60% des données spatialisées. Les rangs intermédiaires sont moins représentés et ne dépassent pas 20% des données. La carte de vulnérabilité présente une nette opposition entre les secteurs ouest et est (partie ouest plus vulnérable). Avec un poids de 4, et une vulnérabilité importante, ce paramètre influencera de manière conséquente la carte finale.

**D** : Il existe une très bonne correspondance entre la répartition des données de ce paramètre et celles du paramètre L. Avec un poids de 4, et une vulnérabilité importante, ce paramètre influence de manière conséquente la carte finale pondérée (comme le paramètre L).

I : La zone de plus grande vulnérabilité représente environ 14% des données spatialisées pour ce paramètre. C'est le paramètre qui présente la plus grande surface associée à la vulnérabilité la plus faible (avec 70% des données spatialisées). Cette carte peut également être comparée à celle du paramètre L. Elle présente la même opposition entre les secteurs ouest et est (partie ouest plus vulnérable) avec cependant une zone associée au rang GALDIT maximal moins importante. Par ailleurs, si l'on compare cette carte finale à l'esquisse des iso conductivités de 1991, on peut noter que la contamination saline a bien pénétré dans les terres en 20 ans. Avec un poids de 1, ce paramètre influencera moins que les autres la carte finale pondérée. Les résultats du paramètre I obtenus selon les teneurs en chlorure semblent bien cohérents en comparaison avec ceux des concentrations électriques. L'hypothèse que ces deux données sont liées semble donc vérifiée.

**T** : La zone de plus grande vulnérabilité représente 87% des données locales. C'est le paramètre qui présente la plus grande surface associée à la vulnérabilité la plus élevée (avec 87% des données locales et 100% des données spatialisées).

## 7. Modélisation de l'impact du niveau marin sur Grande Terre (Guadeloupe) et cartographie de la vulnérabilité pour trois scénarios de remontée du niveau marin

L'objectif de ce chapitre est de connaître les piézométries associées à Grande-Terre pour des remontées du niveau marin de 0,5, 1 et 2 mètres. Pour ce faire, des simulations sont réalisées sur un modèle existant de Grande-Terre, élaboré à l'aide du logiciel MARTHE (© brgm). Ce volet de l'étude ne concerne pas Marie-Galante faute de données suffisantes pour réaliser un modèle. A terme, il est envisagé d'intégrer au modèle l'évolution prévue de la recharge d'ici 2100. Peu d'études traitent des modifications météorologiques d'ici 2100 spécifiquement aux Petites Antilles. Par conséquent, le modèle ne prend pas en compte les modifications de la recharge de l'aquifère.

### 7.1. SIMULATION DES PIEZOMETRIES POUR DIFFERENTS SCENARII DE REMONTEE DU NIVEAU MARIN

### 7.1.1. Le principe des simulations

Pour prévenir l'avancée du biseau salé, il s'avère nécessaire de connaître les effets de la remontée du niveau marin sur les caractéristiques de la nappe de Grande-Terre. Le modèle hydrodynamique finalisé en 2007 (Hamm V. et al., 2007) permet d'estimer l'évolution de la piézométrie, ainsi que l'évolution de la géométrie du biseau salé qui lui est associé selon la loi de Ghyben-Herzberg.

Trois simulations prenant en compte un écoulement diphasique sont réalisées :

- une simulation de référence en régime permanent créée à partir du modèle hydrodynamique existant en régime transitoire sur la période 1985-2005 (Bézèlgues et al, 2006; Hamm et al., 2007);
- une simulation d'élévation du niveau marin de 0,5, 1 et 2 mètres en régime permanent effectuée à partir du modèle de référence ;
- une simulation d'élévation du niveau marin de 0,5, 1 et 2 mètres en régime transitoire effectuée à partir des modèles correspondants en régime permanent.

Nota : Dans le cadre de cette étude, il n'est pas prévu de simuler les impacts du changement climatique sur la piézométrie, avec les scénarios climatiques (Pluie et Température).

A partir de ces simulations deux fichiers de formes sont obtenus :

- un fichier de forme contenant les charges simulées pour les différentes remontées du niveau marin ;
- un fichier de forme contenant la géométrie de l'interface eau douce eau salée simulées pour les différentes remontées du niveau marin selon la loi de Ghyben-Herzberg.

La prise en compte de l'élévation du niveau marin s'effectue par la modification des conditions aux limites du modèle pour chaque valeur de remontée :

- i. modification du nouveau contour de Grande-Terre élaboré à partir de la carte des impacts de la submersion (Illustration 79) ;
- ii. neutralisation des cellules extérieures au nouveau contour pour les paramètres suivants : perméabilités, débit d'eau douce, débit d'eau salée, interface eau douce – eau salée ;
- iii. modification des charges d'eau douce et d'eau salée sur le nouveau contour. Elles seront fixées respectivement à 0,5, 1 et 2 mètres pour chacune des simulations.

Pour ajuster les isopièzes simulées au contour modifié de Grande-Terre, les piézométries sont corrigées en leur soustrayant l'équivalent de leur remontée (par exemple, on soustraie 1 mètre aux piézométries simulées dans le modèle de remontée du niveau marin de 1m).

#### 7.1.2. Les résultats des simulations

Les charges de référence et les charges simulées pour les trois scénarii de remontée du niveau marin sont présentées à l'annexe 20. Les simulations sont faites à partir du modèle hydrodynamique en régime permanent.

Globalement, les isopièzes s'éloignent du littoral quand le niveau marin augmente, mais les charges maximales restent de 18 mètres à l'Ouest de la partie Sud de Grande-Terre, quel que soit le scénario de remontée du niveau marin pris en considération. Une élévation du niveau marin augmente le gradient hydraulique qui sépare le dôme piézométrique du littoral.

Par ailleurs, à titre d'exemple, la carte de la saturation en eau salée de l'aquifère est extraite du modèle pour une remontée du niveau marin de 1 m. Elle constitue une information pertinente et représentative de la salinisation future des aquifère. Les cartes de salinisation de référence et simulées issues du modèle sont présentées à l'illustration 119 et à l'illustration 120. La salinisation augmente légèrement sur tout le

territoire de Grande-Terre, du littoral vers les terres. La saturation en eau salée simulée peut être prise comme référence pour le paramètre I de la méthode GALDIT, sous réserve de délimiter des seuils pertinents. Elle ne sera cependant pas prise en compte dans cette présente étude par souci de pertinence des comparaisons des cartes actuelles et les différents scénarii de remontée du niveau marin.



illustration 119 : Saturation de l'aquifère en eau salée pour la situation de référence.



illustration 120 : Saturation en eau salée de l'aquifère simulée pour une élévation du niveu marin de 1 m NGG.

### 7.1.3. Les limites de la simulation

Les piézométries simulées dépendent d'une part de l'élévation du niveau marin et de l'évolution de la géométrie du biseau salé, d'autre part de la recharge de l'aquifère qui reste à ce jour à intégrer au modèle.

Par ailleurs, les isopièzes obtenus par la simulation ont une géométrie complexe. Dans la suite de l'étude, la géométrie des isopièzes sera donc simplifiée manuellement sous ArcGis.

Par souci de cohérence avec les cartes de vulnérabilité multicritères actuelles, les interfaces eau douce – eau salée sont calculées par l'approximation de Ghyben-Herzberg et à partir des piézométries simulées.

### 7.2. INTEGRATION DES PIEZOMETRIES SIMULEES A LA METHODE GALDIT

Les cartes unicritères des paramètres L et T sont réalisées en prenant en compte ces modifications, puis une carte de vulnérabilité multicritère selon la méthode GALDIT est réalisée pour chacun des scénarii de remontée du niveau marin pris en considération : 0,5, 1 et 2 mètres NGG.

Les cartes des paramètres L et T sont disponibles respectivement à l'illustration illustration 96et illustration 107. Les cartes de vulnérabilité multicritères sont disponibles respectivement en Illustration 123, Illustration 124 et Illustration 125.

#### a) Réserves sur la cartographie de vulnérabilité pour une élévation du niveau marin

Les simulations sont réalisées en régime permanent à partir de charges de référence

### (Annexe 11: Synthèse des résultats obtenus permettant de qualifier le type d'aquifère (lle de la Réunion)

D'après le rapport BRGM RP-57955-FR, 2010.

Dans une première approche, l'analyse du signal piézométrique permet d'identifier trois fonctionnements d'aquifères différents, matérialisés par trois types de réponses piézométriques des forages aux précipitations.

Les corrélogrammes croisés permettent en effet d'analyser les relations de causalité entre la piézométrie et la pluviométrie et de fournir une estimation du temps de réponse moyen de la nappe suite à un épisode pluvieux. C'est ce temps de réponse qui peut permettre de caractériser la nature de l'aquifère considéré.



Schéma conceptuel réponse impulsionnelle issue des corrélogrammes croisés pluiecharge

La distinction entre transfert de masse et de pression a également été étudiée à partir d'un point suivi en conductivité.

Les deux tableaux suivants donnent la correspondance entre la réponse du système à des précipitations et la nature de l'ouvrage.

Système piézométrique de l'ouvrage et Nature associée		Réponse du système aux précipitations		
Inertiel -> CAPTIF	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre faible : <b>quelques</b> décimètres	Lente	<ul> <li>T transfert compris entre 1 et 2 mois</li> <li>Possible isolation de la surface par des horizons peu perméables</li> <li>Probable alimentation par des flux percolant lentement ou des infiltrations se produisant en amont</li> </ul>	
Hybride	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre de plusieurs : décimètres à quelques mètres	Hybride	- Recharge multiple (différents pics) par transfert de pression rapide (quelques jours)	
Très réactif -> LIBRE	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre importante : <b>plusieurs mètres</b>	Rapide	<ul> <li>Recharge majoritairement par transfert de pression rapide (ou la nappe pourrait etre proche de la surface du sol)</li> <li>t transfert de pression rapide de quelques jours et inférieurs a une semaine</li> <li>Variations de charges hydrauliques présentent des similitudes avec les fluctuations d'un débit de rivière</li> <li>Probable transfert entre les rivières proches et les nappes : relation eaux de surface/eaux souterraines</li> </ul>	

OUVRAGE	SYSTEME	NATURE
La Convenance	lent	libre
Grand-Prado	lent	captive
Le Verger	lent	libre
La Découverte	lent	captive
Domenjod	lent	libre
F4 llet Quinquina	lent	captive
Rivière des Pluies	lent	captive
F2 Gillot	lent	captive
Ravine des Chèvres Inférieure	lent	captive
Bel Air	lent	captive
S1 Puits ZEC	rapide	libre
Appoint ZEC	rapide	libre
S1 Puits du Chaudron.	rapide	libre
P22 Les Cocos	hybride	captive
F3 Duparc	hybride	captive
P27 Belle Eau	hybride	libre
Puits Tomi	hybride	libre
Chemin Grimm	hybride	libre
Ravine des Chèvres supérieure	hybride	libre

Annexe 12). Cependant, la comparaison des cartes de ces charges avec les charges interpolées à partir des données quantitative et traitées précédemment par le biais des approches 1 et 2 révèle des différences notables. Ces différences résultent d'une part de la période couverte par les données. En effet, les données de référence utilisées dans le modèle couvrent la période de 1985 à 2005, tandis que les données traitées dans le paragraphe 6.4.3 couvrent la période de 2005 à 2010. D'autre part, ces différences résultent du nombre de points de données disponibles dans les deux cas : de l'ordre de 60 pour les données du modèles et 12 pour les données traitées dans le paragraphe 6.4.3.

Les charges de référence prises dans le modèle atteignent un maximum de 18 m NGG au Sud-Ouest des Grands-Fonds. L'isopièze de 2 m apparaît dans la partie centrale du Nord de Grande-Terre. Les cartes piézométriques utilisées dans le chapitre précédent (6.4.3) illustrent des charges maximales moindres : 15,5 m NGG pour l'approche moyenne (approche 1), et 13 m NGG environ pour l'approche minimale (approche 2 - Illustration 121). Contrairement aux charges de référence utilisées pour le modèle, les isopièzes de 1 et 2 m NGG apparaissent exclusivement dans la partie Sud de l'île. A titre de comparaison, la charge maximale illustrée dans la carte piézométrique de 2010 prise comme référence est de 16 m NGG. L'isopièze 1 m NGG y apparait dans la partie Nord de Grande-Terre.



Illustration 121: Charges interpolées à partir des données quantitatives du réseau DCE et révélatrices d'une piézométrie minimale sur les cinq dernières années (approche 2 : situation extrême)

Par ailleurs, la barrière hydraulique existante au Nord de Saint-François n'est pas représentée dans les cartes interpolées. Pour ces raisons, les cartes de vulnérabilité multicritères relatives à une remontée du niveau marin seront seulement comparées entre elles, et sont traitées indépendamment des cartes relatives au niveau marin actuelles.

Pour rappel, les zones de submersion liée aux différents valeurs d'élévation du niveau marin sont représentées par la zone de très forte vulnérabilité dans les cartes unicritères (notations GALDIT : 10).

# *b)* Carte multicritère prenant en compte une élévation du niveau marin de l'ordre de 0,5 m

En lien avec les remarques faites dans le paragraphe précédent, la carte unicritère relative au paramètre L laisse apparaître une zone de moyenne vulnérabilité (notation GALDIT : 5) dans la partie centrale du Nord. La zone de très forte vulnérabilité (notation GALDIT : 10) est assez développée au niveau du littoral. Parallèlement, la carte unicritère relative au paramètre T est caractérisée par une grande extension de la zone de faible vulnérabilité (notation GALDIT : 2.5). Une zone de très forte vulnérabilité apparait au niveau de la Pointe des Châteaux, de Port-Louis, et de la zone captive de la nappe.

La carte de vulnérabilité multicritère résultant de la superposition de ces deux cartes (Illustration 123) est assez proche de la carte relative à l'approche 2 (Illustration 81). Elle est caractérisée cependant par l'apparition de la zone de faible vulnérabilité (IG<5) dans la partie Nord. Par ailleurs, la zone de vulnérabilité moyenne (5<IG<7.5) qui apparaît dans la zone captive pour l'approche 2 apparaît diminuée. A proximité de la zone captive, la zone de faible vulnérabilité (IG<5) est diminuée à l'Ouest. Parallèlement, le liseré littoral de forte vulnérabilité est de largeur comparable ; il s'amincit cependant au Nord-Est et s'épaissit légèrement à proximité du Moule et de Saint-François.

# c) Carte multicritère prenant en compte une élévation du niveau marin de l'ordre de 1 m

La carte unicritère relative au paramètre L, illustre une avancée de la zone de forte vulnérabilité (notation GALDIT : 10) dans les terres. Dans la partie Nord, la zone de forte vulnérabilité (notation GALDIT : 7.5) apparaît en forme de triskèle, tandis que la zone de moyenne vulnérabilité (notation GALDIT : 5) a disparu. La zone de faible vulnérabilité a une extension similaire à une remontée de 0.5 m. Parallèlement, la zone de forte vulnérabilité a gagné du terrain pour le paramètre T, en particulier au Nord, à proximité de Saint-Félix et dans la zone captive.

La carte de vulnérabilité multicritère (Illustration 124) est caractérisée par une augmentation du liseré rouge (IG>7.5) par rapport à une élévation de 0.5 m, en particulier à proximité de Port-Louis et de Saint-François. La zone de faible

vulnérabilité (IG<5) est d'extension similaire, à part au Sud-Ouest où la zone de vulnérabilité moyenne (5<IG<7.5) gagne du terrain.

# d) Carte multicritère prenant en compte une élévation du niveau marin de l'ordre de 2 m

La carte unicritère relative au paramètre L révèle une avancé de la zone de très forte vulnérabilité (notations GALDIT : 10), ainsi que de celle de forte vulnérabilité à l'Ouest (notations GALDIT : 7.5). Parallèlement, la zone rouge (notations GALDIT : 10) gagne du terrain pour le paramètre T. La carte est caractérisée par une considérable avancée de cette zone dans la partie centrale de l'île, en lien avec les contours de la zone de submersion. Elle traverse l'île dans sa partie centrale : le bourg de Morne-à-l'Eau y est situé dans la zone de très forte vulnérabilité. Les zones de forte et moyenne vulnérabilité sont très fines, comme sur les autres cartes relatives au paramètre T.

La carte de vulnérabilité multicritère (Illustration 125) ressemble à la carte relative au paramètre T. Elle est caractérisée par une avancée considérable de la zone de forte vulnérabilité (IG>7.5) dans la partie centrale de l'île. La zone de faible vulnérabilité, au centre des terres, a une extension similaire que pour une remontée du niveau marin de 1 m, et la zone de vulnérabilité moyenne est réduite du terrain. Cette carte est très représentative des contours de submersion (Illustration 79).

### e) Comparaison et conclusions

A titre comparatif, les surfaces occupées par les trois zones de vulnérabilité sont comparées pour chacune des trois remontées du niveau marin considérées (Illustration 122) :

	0,5 mètre		1 mètre		2 mètres	
Zone de vulnérabilité	Superficie (km²)	Part de la surface totale Grande- Terre (%)	Superficie (km²)	Part de la surface totale Grande- Terre (%)	Superficie (km²)	Part de la surface totale Grande- Terre (%)
Faible	195,9	33,0	196,4	33,1	195,8	33,0
Moyenne	272,4	45,9	263,7	44,4	204,0	34,4
Forte	125,4	21,1	133,7	22,5	193,9	32,7
SOMME	593,7	100,0	593,7	100,0	593,7	100,0

Illustration 122: Tableau de comparaison des surfaces occupées pour chacune des zones de vulnérabilité GALDIT pour des remontées du niveau marin de 0.5, 1 et 2 mNGG.

Globalement, la prise en compte une remontée du niveau marin ne change pas la part de l'île touchée par une faible vulnérabilité à l'intrusion. Elle entraine cependant une augmentation de l'extension de la zone de forte vulnérabilité, en lien avec l'avancée des zones de submersion. La zone de vulnérabilité moyenne est réduite selon l'avancée de la zone rouge.



Illustration 123: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 0.5 m.



Illustration 124: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 1 m.



Illustration 125: Carte de vulnérabilité multicritère élaborée par la méthode GALDIT sur Grande-Terre pour une remonté du niveau marin de 2 m

## 8. Conclusion et perspectives

### 8.1. 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 dispose de données qui permettront 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 à l'heure actuelle basés sur des hypothèses généralisées 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 sont de deux types, les premières basées sur des sectorisations par altitude et les deuxièmes selon la méthode GADLIT pour le niveau marin actuel ; les premières 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 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.

D'après la méthode de cartographie multicritère GALDIT, les paramètres hydrogéologiques qui présentent la plus grande vulnérabilité intrinsèque par rapport à la montée du niveau marin sont la conductivité hydraulique (paramètre A) et la puissance de l'aquifère (paramètre T).

Selon la carte de vulnérabilité finale pour les aquifères côtiers de l'île de la Réunion, obtenue par superposition pondérée des cartes des six paramètres hydrogéologiques :

La zone la plus vulnérable, représente 35% de la zone étudiée et se situe au maximum à 1,9 km du rivage. La pénétration dans les terres de l'intrusion saline est la plus importante au niveau du sud-ouest de l'Ile.

La zone moyennement vulnérable représente la majorité de la zone étudiée avec 41% de la surface totale.

La zone faiblement vulnérable représente 24% de la zone étudiée et est prépondérante au nord-est de l'Ile.

Cette présente étude a permis de mettre en évidence les zones de vulnérabilité des aquifères de Grande-Terre, de Marie-Galante et de la zone littorale de l'île de la Réunion, par le biais de la méthode de cartographie multicritère GALDIT. La méthode GALDIT est simple d'utilisation et nécessite peu de données. Cependant le manque de données que ce soit de type piézométrie détaillée sur la côte ou de concentrations en chlorures ou de conductivités électriques, donne lieu à des approximations. Si les résultats sont globalement cohérents, certaines zones sont affectées d'une valeur de vulnérabilité trop faible dans certains cas.

# 8.2. RECOMMANDATIONS POUR LE SUIVI ET LA GESTION DES AQUIFERES COTIERS DES DROM COM

Les cartes de vulnérabilité obtenues sont des cartes de vulnérabilité intrinsèque ne prenant pas en considération l'impact potentiel des prélèvements anthropiques pouvant augmenter la progression d'un biseau salé.

Elles mettent en évidence des zones de forte vulnérabilité sur tout le pourtour de Grande Terre en Guadeloupe, et pénétrant certains secteurs de basse altitude (Centre-Ouest au niveau de Morne à l'Eau), à Marie Galante et sur le pourtour de l'île de la Réunion. Pour cette dernière certaines zones de forte vulnérabilité correspondent à des zones de falaise et donc ne sont pas à considérer en tant que telles.

Pour Marie-Galante, l'ensemble du pourtour est considéré comme fortement vulnérable, cependant il y a un défaut de données concernant la salinisation sur ce secteur. La zone de vulnérabilité moyenne, intègre les piézométries globalement inférieures à 2m NGG. Des prélèvements sont situés en limite de cette piézométrie de

2m NGG, au Centre Ouest de l'ile de Marie Galante (Sources 3). Le réseau piézométrique DCE comprend un certain nombre de points d'eau localisés dans les zones de vulnérabilité forte et moyenne (Poisson, La Treille, Coulisses, Marie Louise, Champfrey, Dorot) ; les sources 3 appartiennent au réseau de points suivis par l'ARS. Au vu de la localisation des points de prélèvement, il n'est pas nécessaire d'envisager d'équiper tous les points du réseau DCE de sonde de conductivité électrique et de faire l'objet de logs de conductivité périodiquement (lors des périodes de basses eaux en particulier). Par contre le renforcement du suivi des sources 3 avec des enregistrements de la conductivité électrique devrait être envisagé. Le point du réseau DCE situé à l'aval hydraulique des sources 3, au lieu-dit Poisson pourrait également faire l'objet d'un suivi ou de logs de conductivité périodiques.

Concernant Grande Terre, les points de prélèvement actuels sont situés dans des zones de vulnérabilité faible pour la situation actuelle ainsi que pour les différents scénarios de remontée de niveau marin. Cependant certains points d'eau tels que Picard, Gensolin (Centre Ouest) sont néanmoins à surveiller périodiquement (dans le cadre du suivi ARS), tout comme Pelletan (Nord) et Duchassaing (Sud-Est). Le point de prélèvement Kancel (Sud-Ouest) est situé dans la zone de vulnérabilité moyenne et mérite un suivi périodique. En fonction de l'évolution des teneurs en chlorures, un suivi en continu à l'aide d'une sonde de conductivité électrique pourra être envisagé ainsi que des logs de conductivité de manière périodique (en période de basses eaux). Si de nouveaux points de prélèvements venaient à être implantés dans les zones de vulnérabilité forte et moyenne, un suivi périodique en ayant recours à des points du réseau piézométrique DCE et de l'ARS devrait être mise en place.

Pour l'île de la Réunion, les zones de vulnérabilité fortes et moyennes sont pour la partie occidentale de l'île déjà affectées par des intrusions salines, comme en témoignent les fortes conductivités électriques au niveau des aquifères du Port, de St Paul bas, des Trois bassins bas, du Gol, de Petite ile et de St Pierre ouest. Un suivi existe déjà ; il n'est pas nécessaire de procéder à son renforcement. Néanmoins des solutions de gestion active basées sur le recyclage des eaux usées traitées pour effectuer une recharge artificielle et créer une barrière hydraulique sont à envisager, afin de limiter ces phénomènes.

La mise en place d'un réseau dédié au suivi quantitatif et qualitatif est nécessaire. Il est en partie existant avec le réseau piézométrique DCE. Concernant les données de salinité, la mise en œuvre de profils verticaux permettraiet d'obtenir des données indispensables pour améliorer la cartographie de la vulnérabilité ou le cas échéant d'effectuer des simulations numériques. Les données actuelles à l'exception de la Réunion sont essentiellement ponctuelles, ne reflétant pas la réalité de la position du biseau salé.

### 9. 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. Buitehuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, RA. Houghton, Gregg Marland (2007) : Contributions to accelerating atmospheric CO2 growth form economic activity carbon intensity and efficiency of natural sinks. Proceedings of the National Academy of Science.

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 reevalutation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo, Global and Planetary Change, 2 doi:10.106/j/gloplacha.208;10.004, 2009.

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

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

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

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

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

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

Compagnie de Prospection Géphysique 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)

Cottez 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.

Cottez 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

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

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

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

Giambastiani, B.M.S., Antonellini, M., Oude Essink, G.H.P., Stuurman, R.J., 2007, Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy) : A numerical model. Journal of Hydrology 340 : 91-104
GIEC, (2007) : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse.

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 Æ J. C., Jevrejeva Æ 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. (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.

Hutchinson, M. F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106: 211–232.

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

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

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

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

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

Lenôtre N, Le Cozannet G, Dörfliger 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., Kitoth A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C. (2007): Global Climate Projections. In : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* 

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

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

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.

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 Cozanet 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., Rahmstrof, 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.

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

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















#### Saint-Leu: 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







### 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 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

# Annexe 3: Localisation des points de surveillance des masses d'eau du réseau DCE sur Grande-Terre et Marie-Galante.



Localisation des points de surveillance de la nappe du réseau DCE sur Grande-Terre.



Localisation des points de surveillance de la nappe du réseau DCE sur Marie-Galante.

## Annexe 4

# Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L sur Grande-Terre et Marie-Galante

Approche 1 : Situation piézométrique moyenne



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L sur Grande-Terre - Approche 1.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L sur Marie-Galante - Approche 1.

# Annexe 5: Points de surveillance des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante appartenant au réseau de contrôle qualité mis en place au titre du Code de la Santé Publique et réalisé par l'ARS.


Points de surveillance de l'ARS pour la nappe de Grande-Terre.



Points de surveillance de l'ARS pour la nappe de Grande-Terre.

## Annexe 6: Cartes des points de données répertoriées dans l'étude du fond géochimique de Guadeloupe pour Grande-Terre et Marie-Galante

(Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008).



Localisation des points de données répertoriées dans l'étude du fond géochimique des eaux de Guadeloupe pour Grande-Terre.



Localisation des points de données répertoriées dans l'étude du fond géochimique des eaux de Guadeloupe pour Marie-Galante.

## Annexe 7: Carte de répartition des notations GALDIT pour les conductivités sur Grande-Terre et Marie-Galante

# Approche 1 : Etat des lieux moyens de la salinisation



Carte de répartition des notations GALDIT pour les conductivté sur Grande-Terre – Approche 1.



Carte de répartition des notations GALDIT pour les conductivités sur Marie-Galante – Approche 1.

### Annexe 8: Carte des répartitions des notations GALDIT pour les conductivités sur Grande-Terre et Marie-Galante.

Approche 2: Etat des lieux extrême de la salinisation.



Carte de répartition des notations GALDIT pour les conductivités sur Grande-Terre – Approche 2.



Carte de répartition des notations GALDIT pour les conductivté sur Marie-Galante – Approche 2.

## Annexe 9: Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorures sur Grande-Terre et Marie-Galante

Approche 1 : Etat des lieux moyen de la salinisation



Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorures sur Grande-Terre – Approche 1.



Carte de répartition des notations GALDIT pour les teneurs en chlorures sur Marie-Galante – Approche 1.

## Annexe 10: Cartes de vulnérabilité multicritères établies par la méthode GALDIT sur Grande-Terre et Marie-Galante.

Approche 1 : Situation piézométrique moyenne et état des lieux moyen de la salinisation.



Carte de vulnérabilité multicritère selon la méthode GALDIT pour Grande-Terre - Approche 1.



Carte de vulnérabilité multicritère selon la méthode GALDIT pour Marie-Galante - Approche 1.

## Annexe 11: Synthèse des résultats obtenus permettant de qualifier le type d'aquifère (lle de la Réunion)

D'après le rapport BRGM RP-57955-FR, 2010.

Dans une première approche, l'analyse du signal piézométrique permet d'identifier trois fonctionnements d'aquifères différents, matérialisés par trois types de réponses piézométriques des forages aux précipitations.

Les corrélogrammes croisés permettent en effet d'analyser les relations de causalité entre la piézométrie et la pluviométrie et de fournir une estimation du temps de réponse moyen de la nappe suite à un épisode pluvieux. C'est ce temps de réponse qui peut permettre de caractériser la nature de l'aquifère considéré.



Schéma conceptuel réponse impulsionnelle issue des corrélogrammes croisés pluiecharge

La distinction entre transfert de masse et de pression a également été étudiée à partir d'un point suivi en conductivité.

Les deux tableaux suivants donnent la correspondance entre la réponse du système à des précipitations et la nature de l'ouvrage.

Système piézométrique de l'ouvrage et Nature associée		Réponse du système aux précipitations		
Inertiel -> CAPTIF	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre faible : <b>quelques</b> décimètres	Lente	<ul> <li>T transfert compris entre 1 et 2 mois</li> <li>Possible isolation de la surface par des horizons peu perméables</li> <li>Probable alimentation par des flux percolant lentement ou des infiltrations se produisant en amont</li> </ul>	
Hybride	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre de plusieurs : décimètres à quelques mètres	Hybride	- Recharge multiple (différents pics) par transfert de pression rapide (quelques jours)	
Très réactif -> LIBRE	Amplitude des variations du NP d'une saison à l'autre importante : <b>plusieurs mètres</b>	Rapide	<ul> <li>Recharge majoritairement par transfert de pression rapide (ou la nappe pourrait etre proche de la surface du sol)</li> <li>t transfert de pression rapide de quelques jours et inférieurs a une semaine</li> <li>Variations de charges hydrauliques présentent des similitudes avec les fluctuations d'un débit de rivière</li> <li>Probable transfert entre les rivières proches et les nappes : relation eaux de surface/eaux souterraines</li> </ul>	

OUVRAGE	SYSTEME	NATURE
La Convenance	lent	libre
Grand-Prado	lent	captive
Le Verger	lent	libre
La Découverte	lent	captive
Domenjod	lent	libre
F4 llet Quinquina	lent	captive
Rivière des Pluies	lent	captive
F2 Gillot	lent	captive
Ravine des Chèvres Inférieure	lent	captive
Bel Air	lent	captive
S1 Puits ZEC	rapide	libre
Appoint ZEC	rapide	libre
S1 Puits du Chaudron.	rapide	libre
P22 Les Cocos	hybride	captive
F3 Duparc	hybride	captive
P27 Belle Eau	hybride	libre
Puits Tomi	hybride	libre
Chemin Grimm	hybride	libre
Ravine des Chèvres supérieure	hybride	libre

## Annexe 12: Synthèse des ouvrages répertoriés par la BSS et recoupant des aquifères localement captifs (lle de la Réunion).

Indice BSS	Nom de l'ouvrage	Commune	Profondeur de l'ouvrage	Couche peu perméable d'après la coupe géologique et profondeur associée
12272X0096/F	Forage Les Jacques Ou Bel Air	Sainte- Suzanne	161	basaltes compact (en alternance avec des scories argilisées) de 7 à 49,5 m
12272X0007/F	Puits Du Casier Expérimental De Champ-Borne		6,4	alluvions grossières à liant argilo-sableux de 0 à 3 m
12273X0009/P14			133	alluvions imperméables: graviers, galets et blocs basaltiques cimentés par un liant limono-sableux de 19 à 84 m
12273X0067/P14A	Piezometre Champ Borne Nappe Inferieure	Saint-André	18,5	
12273X0012/P1F2	Piézomètre Champ		27	basaltes compact (en alternance avec des scories) 13 à 49,5 m
12273X0013/P2F2	Borne		30	alluvions argileux, sable graveleux 4,5 à 6 m
12287X0105/S3	Ruite Conal Dea	L'Etang-Sale	30	basalte aphyrique 0 à 6,5 m
12287X0034/P	Ecumes		15	
12292X0041/F	Forage S1 Petite Plaine	La Plaine- Des- Palmistes	93	argile sablo-graveuleuse compacte de 28 à 31m basalte compacte (en alternance avec des scories) de 86 à 90,5 m

## Annexe 13: Mise en évidence des variations piézométriques mensuelles et annuelles à l'Ile de La Réunion

Les graphiques suivants permettent de mettre en évidence :

- des variations mensuelles cycliques sont observées à l'échelle d'une année
- des variations annuelles sont observées puisque le mois de basses eaux (où le minimum piézométrique est atteint) est variable à la Réunion



Comparaision des précipitations mensuelles moyennes sur l'île de la Réunion pour les mois de février et de novem bre (Données Météo France)



Exemple de chroniques piézométriques suivies par l'Office de l'eau sur 4 ouvrages de la Réunion.

### Annexe 14 : Extrapolation de la piézométrie (lle de la Réunion) : grâce aux gradients hydrauliques et à l'esquisse piézométrique existante
#### **Gradients hydrauliques**

Ces valeurs moyennes de gradients hydrauliques par secteur sont mises en évidence sur la carte suivante.

Gradients hydrauliques calculés Entre deux mesures de niveaux piézométriques		
→ 0,1à 1	Zone étudiée	10000
→ 1 à 3 → 3 à 10	Carroyage 10 km x 10 km PROJECTION WGS 84 UTM 40 Sud	9000
→ 10 à 100	Courbe de niveau 200 m	7000
Gradients hydrauliques movens	Commune	6000
Par secteur géographique	DEFOIDITATIONS	4000
0.1 à 1 (2)	PRECIPITATIONS	3000
1 à 3 (4)	période : 1970-2009	2000
10 à 100 (1)		1500
	Toujours un temps d'avance	1000
Valeurs de gradients par secteur et moyenne associée		500
Rivière permanente		

Les gradients hydrauliques les plus faibles se situent à l'Ouest entre Trois Bassins et Saint Leu (0,6%) et entre le Port et Saint Paul (0,8%). Les gradients hydrauligues les plus forts se situent au nord-ouest entre Saint André et Sainte Rose.

La carte des conductivités hydrauliques permet d'interpréter ces résultats :

- le Sud Est de l'île présente des perméabilités élevées : les gradients hydrauliques sont donc faibles même si la pluviométrie est conséquente ;
- Le Nord-Est présente des perméabilités faibles associées à une forte \_ pluviométrie : les gradients hydrauliques sont élevés.



### Esquisse piézométrique existante (thèse de Jean Lambert JOIN, 1991)

Les données locales sont extrapolées grâce à l'esquisse piézométriques de la nappe de base dans les formations volcaniques. Les isopièzes 1m, 1,5m et 2m correspondent aux différents rangs du paramètre GALDIT sont représentées.

La piézométrie proposée sur cette carte est établie pour la saison hivernale de 1990 en utilisant la valeur ponctuelle la plus faible considérée comme représentative de l'étiage à 5 centimètres près.



Esquisse piézométrique de la nappe de base dans les formations volcaniques (d'après JL Join, 1991)

## Annexe 15 : Répartition des logarithmes de transmissivité interprétée selon J.L Folio, 2001 (île de la Réunion)



Figure 56 Répartition des logarithmes de transmissivité interprétative selon Folio, 2001

Cette classification est cependant inutilisable pour la méthode GALDIT à l'échelle nationale dont le classement présente des valeurs de conductivité hydraulique moins élevées.

Paramètre A T	Poids	Attributs du paramètre		Valeur rang
		Classe	Rang	r al call r al lig
Transmissivité de l'aquifère (m <sup>2</sup> /s)	5	Elevée	1-10 1/2	10
		Moyenne	10 <sup>-1</sup> -1	7,5
		Faible	10 <sup>-2</sup> – 10 <sup>-1</sup>	5
		Très faible	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-2</sup>	2,5

Figure 57 Classification de la transmissivté interprétative issue de la thèse de Folio

## Annexe 16 : Classement des conductivités hydrauliques par rapport à l'IDPR (Indice de Persistance des Réseaux) (Ile de la Réunion)

L'IDPR permet de quantifier cette densité de drainage selon une méthode indirecte en comparant **un réseau théorique de talwegs calculés à partir du relief**, établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement **ID**), **au réseau hydrographique naturel** mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux **PR**).

L'IDPR permet une quantification de l'écart constaté entre les deux réseaux puisqu'il résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé. Il varie selon une échelle ouverte et est ramené à une gamme de 0 à 2000 afin de faciliter les comparaisons avec d'autres territoires. Les deux distances calculées sont **pondérées par la pente.** 

Cet indice permet de hiérarchiser les systèmes vis-à-vis de la **vulnérabilité des premières nappes** rencontrées ce qui est cohérent dans le cadre de cette étude.

Les données locales de conductivité hydraulique semblent par ailleurs bien corrélées aux données de la carte de cet indice (les fortes conductivités hydrauliques correspondent bien à un IDPR élevé et vice versa).

Afin de mieux corréler cet IDPR avec la conductivité hydraulique, le classement ajusté suivant a été utilisé :

IDPR	CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE	Rang GALDIT	
1800-2000	Elevée	10	
1000-1800	Moyenne	7,5	
400-1000	Faible	5	
0-400	Très faible	2,5	

Tableau 19 Correspondance constatée entre la conductivité hydraulique et l'IDPR et ajustée pour l'extrapolation de la conductivité hydrulique à l'ensemble de l'Ile

### Annexe 17 : Contamination saline liée à la pérennité des rivières selon l'esquisse de l'invasion de J. L. Join, 1991 du Nord au Sud de la côte Ouest de l'île de la Réunion

La présence d'eau douce au niveau des ravines peut être liée :

- Aux écoulements souterrains liés aux ravines correspondantes (d'après Clerc et al. 1986, Daesslé et Join 1988).
- Au ruissellement au cours des pluies importantes qui pourrait contribuer à un « rinçage » des formations par les eaux douces d'infiltration au niveau des ravines (d'après Join, 1991).
- A la modification ponctuelle de la côte au droit de la ravine qui pourrait représenter un facteur de protection contre la contamination salée de l'aquifère volcanique.

Pour la spatialisation des données, il faut donc considérer les hypothèses suivantes :

- Les écoulements pérennes (ex : rivière Langevin) représentent une source de dilution
- Les autres rivières (écoulement intermittent) représentent une source de dilution en cas de crue mais une source de contamination en cas d'étiage, à cause de la formation d'eaux stagnantes au niveau de l'embouchure des ravines. Ces hypothèses sont synthétisées dans le Tableau suivant.

Dans un futur proche, le bureau d'études Antéa publiera un rapport sur la continuité hydraulique qui permettrait d'affiner l'extrapolation de ces résultats.

Rivières	Pérennes	Diluti on	Contamination
Galets	oui	non	non
Ravine St Gilles	oui	oui	non
Ravine des 3 Bassins	non	non	oui
Petite Ravine	non	non	oui
Ravine des Colimacons	non	oui	non
Ravine de la Chaloupe	non	non	oui
Ravine de la Fontaine	non	oui	non
Ravine du Grand Etang	non	non	oui
Ravine du Cap, Fond Bagatelle, Fond Madil, Ravine du Portail, Ravine de la Veuve	non	non	oui
Ravine des Sables, Ravine Jacques Lebon	non	oui	non
Ravine du Trou, Ravine des Avions	non	non	oui
Ravine du Ruisseau, Ravine Mila	non	oui	non
Ravine Sèche	non	oui	non
Ravine de Bellevue, Rivière St Etienne	oui	oui	non
SUD sauvage	non	oui	non
Rivière des Remparts, Rivière Langevin	oui	oui	non

Contamination saline par le vecteur rivière selon l'esquisse de l'invasion de JL Join, 1991, du Nord au Sud de la Côte Ouest de l'île de la Réunion

# Annexe 18 : Invasion marine dans la nappe de base, d'après Daesslé et Join 1988



Figure 64 Invasion marine dans la nappe de base (d'après Daesslé et Join 1988) 1 : eaux douces, conductivité à la surface de la nappe <500µS/cm ; 2 : courbes d'isoconductivité à la surface de la nappe

## Annexe 19 : Evolution des teneurs moyennes en chlorures des stations suivies par l'Office de l'Eau (lle de la Réunion)

D'après le rapport de l'Office de l'Eau de La Réunion, CG974, Juillet 2010, l'observation des évolutions des teneurs moyennes annuelles en chlorures fait ressortir les points suivants :

- Certains forages montrent une assez grande variabilité certainement liée aux modalités de prélèvements et à leur répartition dans l'année et d'une année sur l'autre
- Tandis que d'autres révèlent une relative stabilité.

Plus dans le détail, les résultats permettent de regrouper les forages en 5 catégories et de distinguer 3 secteurs de nappes montrant un degré de salinisation variable (tableau ci-dessous) :

Teneurs moyennes en Cl (mg/l)	Commune	Forages concernés	Sensibilité à la salinité
150-200 ou supérieur	Saint Leu, secteur de la Pointe des Châteaux	Fond Petit Louis et Petite Ravine	très sensible au phénomène de salinisation
100-150	secteur de la Grande Ravine à la Saline-Ermitage	Puits de la Grande Ravine, en rive gauche	moyennement touché par le sel possible sensibilité accrue au sel (d'après l'évolution de ces dernières années sur certains forages et leurs variations intra-annuelles)
50-100	Trois-Bassins et Saint-Paul	F6 Le Blanchard, Puits de la Grande Ravine en rive droite, F1 Ermitage	
<50	secteur du Tour des Roches et de Savannah et sur la Ravine Saint-Gilles	6 forages : F5 Plaine Saint-Paul FRH9 FRH5, F2 Montée Panon	aujourd'hui peu concerné par une salinisation localement peut être très sensible (d'après teneurs passées de certains forages)
Baisse significative constatée depuis le début du suivi	Saint-Paul	4 forages	

Synthèse des résultats obtenus à partir des teneurs en chlorures d'après le rapport de l'Office de l'Eau de la Réunion, CG974, Juillet 2010

### Annexe 20 : Cartes des charges de reférence et des charges simulées sur Grande-Terre pour différents scénarii de remontée du niveau marin



Charges simulées pour une élévation du niveau marin de 0,5 mètre NGG.





Charges simulées pour une élévation du niveau marin de 2 mètres NGG.

### Annexe 21 : Carte de vulnérabilité unicritères pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 0,5 m.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L pour une remontée du niveau marin de 0,5 m.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T pour une remontée du niveau marin de 0,5 m.

### Annexe 22 : Cartes de vulnérabilité unicritères de Grande-Terre pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 1 m.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L sur Grande-Terre pour une remontée du niveau marin de 1 mètre.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T sur Grande-Terre pour une remontée du niveau marin de 1 mètre.
## Annexe 23: Cartes de vulnérabilité unicritères de Grande-Terre pour les paramètres L et T, pour une remontée du niveau marin de 2 m.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre L sur Grande-Terre pour une remontée du niveau marin de 2 mètres.



Carte de répartition des notations GALDIT pour le paramètre T sur Grande-Terre pour une remontée du niveau marin de 2 mètres.



Direction Eau, Environnement & Ecotechnologies 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 Orléans Cedex 2 – France Tel.: +33 (0)2 38 64 34 34