

BRGM/RP-56266-FR
Septembre 2008

Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : Caractérisation physico-chimique naturelle des eaux souterraines.

Rapport final

BRGM/RP-56266-FR
Septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 EAU D20

A. Brenot, B. Vittecoq, P. Négrel, V. Mardhel

Vérificateur :

Nom : L. Chery

Date : 11/07/2008

Signature :

Approbateur :

Nom : JP. Comte

Date : 21/07/2008

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 9001:2000.

Mots clés : Martinique, eaux souterraines, isotopes stables de l'eau, isotopes Sr, isotopes B, fond géochimique, Directive Cadre sur l'Eau.

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

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

Synthèse

Dans le but d'élaborer un système d'information régional sur les eaux souterraines de la Martinique, incluant l'étude de la qualité et de la vulnérabilité de la ressource, la Région Martinique et le BRGM, avec le soutien de la DIREN, se sont associés dans le cadre d'un projet de recherche. L'approfondissement de la connaissance relative aux caractéristiques géochimiques naturelles des eaux souterraines de la Martinique constitue une des phases de ce projet. Ainsi la démarche engagée par la Région Martinique et le BRGM s'inscrit très étroitement dans la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) et sa directive fille de décembre 2006 (2006/118/CE). En effet l'évaluation du bon état chimique des masses d'eau par les Etats Membres nécessite notamment de bien connaître la composition géochimique des eaux souterraines de manière à distinguer les éléments dissous présents naturellement de ceux résultant des activités humaines.

Le présent rapport correspond à la phase 1 du projet « Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : qualité et vulnérabilité des eaux souterraines » pour laquelle la démarche s'est articulée suivant 3 étapes.

La première a permis la synthèse des données existantes sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique, notamment des données acquises par le BRGM depuis 2004 sur les réseaux de suivi de la qualité des eaux souterraines, et celles de la DSDS acquises dans le cadre du suivi sanitaire des captages d'eaux souterraines.

La deuxième étape correspond à l'acquisition de nouvelles données grâce à deux campagnes de prélèvement, une réalisée en saison sèche (avril 2006) l'autre en saison des pluies (novembre 2006). L'objectif de ces campagnes est de disposer de données isotopiques (isotopes H et O de l'eau, isotopes du Sr et du B) pour des échantillons d'eaux souterraines représentatifs des masses d'eau de la Martinique et pour deux régimes hydriques contrastés.

La troisième étape est l'interprétation et la synthèse de l'ensemble des données disponibles sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique. L'aboutissement de ce travail est la caractérisation géochimique des eaux souterraines de la Martinique. Cette caractérisation a permis de **distinguer 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). Ces différentes sources contrôlent de manière variable, dans le temps et l'espace, la géochimie des eaux souterraines. L'analyse couplée de la géochimie élémentaire dite « classique » avec l'approche isotopique proposée (isotopes H et O de l'eau, isotopes du Sr et du B) a permis de tracer l'origine de l'eau et des éléments dissous et de mettre en évidence différents comportements des eaux souterraines vis-à-vis des variations saisonnières du régime hydrique. **L'étude des variabilités spatiales et temporelles** de la géochimie des eaux souterraines a permis de proposer de nouveaux éléments de discussion sur le fonctionnement et la dynamique des systèmes aquifères (origine de

l'eau, temps de transfert...). La **différenciation géochimique** des eaux souterraines à l'échelle de la Martinique a ensuite été discutée afin de proposer des caractéristiques géochimiques générales **pour chacune des 6 masses d'eau**. Enfin **une identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire**, pour les secteurs géographiques où les données actuelles sont pertinentes et suffisamment abondantes, a été proposée.

De l'ensemble de cette approche on retiendra que la composition en éléments dissous des masses d'eau « Nord » (9201), « Nord Caraïbes » (9203), « Nord Atlantique » (9202) et « Centre » (9204) semble contrôlée principalement par les interactions eau/roche (lithologies volcaniques) et les apports des eaux de pluie. Pour ces masses d'eau des zones à risque de fond géochimique élevé en Fe et Mn et intermédiaire en Ca et Mg ont été identifiées. Pour les masses d'eau « Sud Caraïbes » (9206) et « Sud Atlantique » (9205), la part relative d'éléments dissous provenant d'eau salée (soit via l'interaction avec de l'eau de mer fossile soit via l'interaction avec le biseau salé) est plus importante que pour les autres masses d'eau de la Martinique. Pour ces masses d'eau, des zones à risque de fond géochimique élevé en Ca, Mg, Na, Cl, K, Fe et Mn ont été identifiées. Enfin, le long du littoral de la Martinique, et principalement dans la moitié Sud de l'île, il existe un risque de fond géochimique élevé en Na et Cl et intermédiaire en B et F lié à l'interaction possible des eaux souterraines avec le biseau salé.

Cette étude a en outre permis, grâce aux différents outils utilisés, d'améliorer la compréhension des hydrosystèmes :

- les **isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)** permettent de montrer comment les aquifères sont rechargés (cf. chapitre 3.2) : l'origine des eaux souterraines est majoritairement contrôlée par les précipitations, et les eaux souterraines ne sont quasiment pas affectées par des phénomènes géothermiques ni par l'évaporation. Ils permettent également de montrer que l'eau de mer n'a pas un impact majeur et généralisé. L'impact de la recharge par l'eau de pluie a également été mis en évidence par la chimie élémentaire (cf. chapitre 3.7).
- Les **isotopes du Sr** ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et du **B** ($\delta^{11}\text{B}$) permettent de mettre en évidence l'origine des éléments dissous (cf. chapitre 3.3). Les isotopes du Strontium permettent également de mettre en évidence une contribution forte d'éléments dissous provenant de la lithologie. La comparaison des isotopes (**$\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, Sr & B**) et de la chimie élémentaire sur deux saisons a permis de mettre en évidence des fonctionnements géochimiques différents selon les systèmes aquifères (cf. chapitre 3.6).
- les **isotopes du B** quant à eux peuvent permettre de mettre en évidence des pollutions anthropiques (cf. chapitre 3.3.2).

Un système d'information géographique, et ses bases de données associées ont été élaborés. Ils facilitent l'identification d'une part des données acquises et d'autre part des zones à risques de fond géochimique élevé.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte hydrogéochimique et stratégie d'échantillonnage	13
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOCHIMIQUE	13
2.2. STRATEGIE D' ECHANTILLONNAGE	16
2.2.1. Choix des points d'échantillonnage	16
2.2.2. Localisation des points de prélèvement	17
2.2.3. Prélèvement et conditionnement des échantillons	20
2.3. ANALYSES ISOTOPIQUES	21
2.3.1. Analyse des isotopes stables de la molécule d'eau	21
2.3.2. Analyses des isotopes du strontium	21
2.3.3. Analyses des isotopes du bore	22
3. Caractérisation géochimique des eaux souterraines	23
3.1. CHIMIE ELEMENTAIRE	23
3.1.1. Validité des analyses chimiques réalisées	23
3.1.2. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux	25
3.1.3. Relations inter-éléments	26
3.1.4. Calcul de l'Indice échange base	31
3.1.5. Rapports élémentaires	34
3.2. CARACTERISATION DES RESERVOIRS : ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU ($\delta^{18}\text{O}$ ET $\delta^2\text{H}$)	36
3.3. CARACTERISATION DES APPORTS D'EAU ET D'ELEMENTS DISSOUS ...	39
3.3.1. Isotopes du strontium	39
3.3.2. Isotopes du bore	41
3.4. VARIATION DE SOURCE D'ELEMENTS DISSOUS	45
3.4.1. Eau de pluie	48
3.4.2. Lithologie	48
3.4.3. Eau de mer	49
3.5. VARIATION SPATIALE	50
3.5.1. Liée à la pluviométrie	50

3.5.2. Liée à l'intrusion du biseau salé.....	53
3.5.3. Liée à la lithologie.....	56
3.6. VARIATION SAISONNIERE	56
3.7. VARIATION INTERANNUELLE	65
3.8. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	67
4. Synthèse par Masses d'eau : différenciation géochimique et identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	71
4.1. METHODOLOGIE	71
4.1.1. Différenciation géochimique par masse d'eau	71
4.1.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	72
4.2. MASSE D'EAU NORD.....	74
4.2.1. Différenciation géochimique	74
4.2.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	75
4.3. MASSE D'EAU NORD CARAÏBES	77
4.3.1. Différenciation géochimique	77
4.3.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	78
4.4. MASSE D'EAU NORD ATLANTIQUE.....	80
4.4.1. Différenciation géochimique	80
4.4.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	81
4.5. MASSE D'EAU CENTRE.....	83
4.5.1. Différenciation géochimique	83
4.5.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	84
4.6. MASSE D'EAU SUD CARAÏBES	86
4.6.1. Différenciation géochimique	86
4.6.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire.....	87
4.7. MASSE D'EAU SUD ATLANTIQUE.....	89
4.7.1. Différenciation géochimique	89

4.7.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire	90
4.8. ILLUSTRATIONS	92
5. Conclusion	99
6. Bibliographie	105

Liste des illustrations

Illustration 1 : Synthèse de compositions chimiques d'eaux de pluies d'origine côtière dans un contexte insulaire disponibles dans la littérature.	15
Illustration 2 : Synthèse d'analyses de compositions chimiques d'eaux de mer pour la Martinique (Sanjuan et al., 2003) et pour la Guadeloupe (Sanjuan et Brach, 1997).	15
Illustration 3 : Localisation des points de prélèvement de la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006) et masses d'eau souterraines associées.	18
Illustration 4 : Liste des points de prélèvement de la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006) et niveau hydrogéologique correspondant.	19
Illustration 5 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses isotopiques	21
Illustration 6 : TDS vs. conductivité électrique de l'eau (a), somme des anions (Σ^-) vs. somme des cations (Σ^+) (b), balance ionique (NICB) vs. somme des cations (Σ^+) pour les campagnes de prélèvement de novembre 2006 et avril 2007. SS : saison sèche ; SP : saison des pluies. TDS = minéralisation totale ; NICB : balance ionique.	24
Illustration 7 : Diagramme de Piper pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004.	25
Illustration 8 : Cl vs. Na (a), Cl vs. NO ₃ (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. Mg (d), Cl vs. SO ₄ (e) pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004. SP : saison des pluies, SS : saison sèche.	29
Illustration 9 : Cl vs. Sr (a), Cl vs. B (b) pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2005. SP : saison des pluies, SS : saison sèche.	30
Illustration 10 : Indice échange base calculé pour la Martinique	32
Illustration 11 : Relation entre la concentration en Cl et la distance à l'océan	33
Illustration 12 : Relation entre la concentration en Cl et l'altitude du point	33
Illustration 13 : Ca/Na vs. Mg/Na pour les eaux souterraines (en mole). SS 2006 : avril 2006, saison sèche ; SP 2006 : novembre 2006, saison des pluies.	35
Illustration 14 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, LMWL Guyane et Guadeloupe : droite météorique locale calculée pour les eaux de pluie de la Guyane et de la Guadeloupe ; GMWL : droite	

météorique mondiale. SS 2006 : campagne de prélèvement d'avril 2006, saison sèche ; SP 2006 : campagne de prélèvement de novembre 2006, saison des pluies.	38
Illustration 15 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$, SS : saison sèche, SP : saison des pluies.	41
Illustration 16 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/\text{B}$ (a), Cl vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche).	44
Illustration 17 : Carte de synthèse réalisée à partir de la géochimie « classique » et le calcul de l'Indice échange base (ieb) et présentant les points contrôlés majoritairement par une des trois sources d'éléments dissous : eau de pluie, interactions eau/roche et eau salée(voir également Annexe 2).	46
Illustration 18 : Carte de synthèse réalisée à partir de l'approche géochimique « classique » et isotopique présentant les points contrôlés majoritairement par une des trois sources d'éléments dissous : eau de pluie, interactions eau/roche et eau de mer (voir également Annexe 2).	47
Illustration 19 : Facteur d'évaporation $P/(P-E)$ et délimitation des masses d'eau souterraines pour le territoire de la Martinique.	51
Illustration 20 : Proportion d'éléments dissous provenant des apports atmosphériques (%) en fonction de la concentration moyenne en Ca (a), Mg (b), Na (c) et Cl (d) pour chaque point associé à une masse d'eau souterraine.	52
Illustration 21 : Esquisse de l'intrusion du biseau salé (pointillés noirs), limite des communes (trait noir) et point influencés par une eau salée (en rouge).....	55
Illustration 22 : Comparaison des compositions géochimiques entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006) pour Ca (a), Cl (b), Sr (c), B (d).	59
Illustration 23 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en chlore (a), calcium (b), strontium (c) et bore (d) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).	60
Illustration 24 : Comparaison des compositions isotopiques entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006) pour $\delta^2\text{H}$ (a) et $\delta^{18}\text{O}$ (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c).	61
Illustration 25 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation de compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ (a) et $\delta^{18}\text{O}$ (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).	62
Illustration 26 : Variation de l'origine de l'eau à partir des valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (a) et des éléments dissous à partir des valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et du ratio $1/\text{Sr}$ (b) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).	64
Illustration 27 : Comparaison des moyennes de concentrations en Ca (a), Cl (b), Sr (c), B (d) calculées sur l'ensemble des campagnes de saison sèche (SS) et de saison des pluies (SP) depuis 2004 et variabilité interannuelle représentée par les barres d'erreurs (écart-type).	66
Illustration 28 : répartition géographique des groupes d'eau mis en évidence (extrait du rapport BRGM/RP-55844-FR)	68
Illustration 29 : Relation entre les concentrations en nitrates et catégories d'âges des eaux (extrait du rapport BRGM/RP-55844-FR)	69

Illustration 30 : Masses d'eau souterraine de la Martinique et les critères ayant permis de les délimiter (Comte et al., 2003).	72
Illustration 31 : Diagramme de Piper pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004 en fonction de la masse d'eau considérée.	92
Illustration 32 : Cl vs. Na (a), Cl vs. SO ₄ (b), Cl vs. NO ₃ (c), Cl vs. Ca (d), Cl vs. Mg (e), Cl vs. Sr (f) pour la campagne de prélèvement d'avril 2006 pour les 6 masses d'eau de la Martinique.	93
Illustration 33 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ pour les 6 masses d'eau de la Martinique.	94
Illustration 34 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. 1/Sr pour les 6 masses d'eau de la Martinique.	95
Illustration 35 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. 1/B pour les 6 masses d'eau de la Martinique.	96
Illustration 36 : Eléments majeurs : zones à risque de fond géochimique élevé (en rouge) et intermédiaire (en orange) en éléments majeurs pour les eaux souterraines identifiées à partir de l'approche géochimique classique et isotopique proposée dans cette étude.	97
Illustration 37 : Eléments traces : Zones à risque de fond géochimique élevé (en rouge) et intermédiaire (en orange) en éléments traces pour les eaux souterraines identifiées à partir de l'approche géochimique classique et isotopique proposée dans cette étude.	98
Illustration 38 : Origine des éléments dissous et zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire pour les eaux souterraines de la Martinique.	102
Illustration 39 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire pour les eaux souterraines	103

Liste des annexes

Annexe 1 Résultats des analyses isotopiques.	111
Annexe 2 Tableau et carte reportant l'origine des éléments dissous pour les points de prélèvement des eaux souterraines.	115
Annexe 3 Les outils isotopiques appliqués à la connaissance des ressources en eau en Martinique	121

1. Introduction

Ce projet s'inscrit dans le cadre général de l'élaboration du Système d'Information Régional sur les ressources en eau souterraine de la Martinique dont les objectifs sont de :

- contribuer à améliorer significativement la **connaissance régionale patrimoniale des ressources en eau souterraine**, nécessaire pour leur protection, leur valorisation et leur suivi dans le cadre d'une gestion durable et respectueuse de l'environnement, conformément aux orientations du SDAGE,
- s'inscrire dans le cadre du plan d'action pour répondre à la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) en matière de **caractérisation des ressources en eau souterraine**
- **porter à connaissance** les résultats synthétisés au niveau régional, de façon à ce qu'ils puissent être utilisés dans les projets spécifiques de **mise en valeur ou de protection des eaux souterraines**

En effet, des situations de crises saisonnières apparaissent de plus en plus fréquemment en Martinique du fait du manque de ressource en eau destinée à l'Alimentation en Eau Potable (AEP), notamment en période de carême sec. Du fait de l'augmentation prévisible de la demande (démographie, développement social et économique), ces situations risquent de s'amplifier dans les années à venir. Actuellement 92% de l'eau utilisée proviennent d'eau de surface (le reste provenant de sources et de forages). Pourtant, du fait de leurs caractéristiques qualitatives, de leur généralement bonne protection naturelle et de leur proximité des zones de consommation, les eaux souterraines constituent un complément intéressant aux eaux de surface. Ces ressources en eau souterraine pourraient ainsi être exploitées sous réserve d'une bonne appréciation des disponibilités quantitatives et qualitatives.

Néanmoins, il n'existait pas de documents d'information et d'orientations sur ces ressources, aussi bien cartographiques que méthodologiques, ni d'éléments devant permettre d'organiser leur gestion durable (quantité et qualité) à l'échelle régionale.

De plus la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) et sa directive fille de décembre 2006 (2006/118/CE) impose aux Etats Membres l'évaluation du bon état chimique des masses d'eau. Cette évaluation nécessite notamment de bien **connaître la composition géochimique des eaux souterraines** de manière à **distinguer les éléments dissous présents naturellement de ceux résultant des activités humaines**.

La Région, la DIREN et le BRGM ont ainsi engagé un programme d'évaluation au niveau régional des ressources en eau souterraine de la Martinique. Par délibération Indice 04-1964 en date du 09 novembre 2004, la Région Martinique a convenu de se porter maître d'ouvrage d'un programme d'étude portant sur l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine de la Martinique, mis en œuvre par le BRGM.

Le présent rapport correspond à la **caractérisation et différenciation géochimique des eaux souterraines de la Martinique**, dont la démarche s'est articulée en trois étapes :

- La première est constituée par la synthèse des données existantes sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique, notamment des données acquises par le BRGM, en collaboration avec la Diren, depuis 2004 (Comte et al., 2004 ; Négrel et Vittecoq, 2005 ; Baran et al., 2006 ; Malcuit et al., 2006 ; Ollagnier et Vittecoq, 2007 ; Ollagnier, 2007) et celles de la DSDS acquises dans le cadre du suivi sanitaire des captages d'eaux souterraines.
- La deuxième étape correspond à l'acquisition de données nouvelles lors de deux campagnes de prélèvement, une réalisée en saison sèche (avril 2006) et l'autre en saison des pluies (novembre 2006). L'objectif de ces campagnes est de disposer de données isotopiques (isotopes H et O de l'eau, isotopes du Sr et du B) pour des échantillons d'eaux souterraines représentatifs de l'ensemble des masses d'eau de la Martinique pour deux régimes hydriques contrastés.
- La troisième étape est l'interprétation et la synthèse de l'ensemble des données disponibles sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique.

Ce travail s'appuie donc sur une connaissance du contexte hydrogéologique et sur une stratégie d'échantillonnage appropriée dans l'objectif de dégager les caractéristiques géochimiques des eaux souterraines sur l'ensemble du territoire de la Martinique.

Cette caractérisation vise à permettre de **distinguer les différentes sources d'éléments dissous** qui contrôlent de manière variable, dans le temps et l'espace, la géochimie des eaux souterraines.

La différenciation géochimique des eaux souterraines à l'échelle de la Martinique est ensuite discutée afin de proposer des **caractéristiques géochimiques générales pour chaque masse d'eau**.

Enfin, une **identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire**, pour les secteurs géographiques où les données actuelles sont pertinentes et suffisamment abondantes, est également proposée.

2. Contexte hydrogéochimique et stratégie d'échantillonnage

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOCHIMIQUE

Le contexte géologique et hydrogéologique de la Martinique a été détaillé en 2007 par Vittecoq et al. (Rapport BRGM/RP-55099-FR). La géologie de la Martinique est constituée principalement de formations volcaniques d'âge Oligocène à Plio-pléistocène. Les quelques formations sédimentaires de l'île sont essentiellement des formations alluviales et exceptionnellement calcaires. Au Nord et à l'Est, la Martinique est très montagneuse (Montagne Pelée et Pitons des Carbets dépassent 1000 m), à l'Est et au Sud au niveau des complexes volcaniques et volcano-sédimentaires plus anciens le relief est nettement plus doux (Montagne du Vauclin 504 m). Les formations volcaniques sont diverses : coulées massives de lave, dépôts pyroclastiques (nuées ardentes, ponces), lahars, conglomérats et brèches. Des dépôts de hyaloclastites existent également.

De manière générale, les concentrations en éléments chimiques dans les eaux proviennent en grande partie de l'altération des roches encaissantes. Les éléments traces permettent de préciser l'origine de la minéralisation, les variations pouvant être liées à des variations de lithologie ou de faciès, ou à des apports anthropiques bien identifiés. Pour interpréter correctement les données recueillies sur la répartition des éléments chimiques dans les eaux, il est nécessaire de connaître leur spéciation, et pour ce faire de posséder la composition chimique complète de l'eau des différents pôles potentiels d'alimentation, avec en appui la mesure des paramètres physico-chimiques sur le terrain.

Le contexte géologique et hydrogéologique particulier au territoire de la Martinique détermine un certain nombre de processus contrôlant potentiellement la composition géochimique en éléments majeurs et traces des eaux naturelles.

Parmi les plus importants, on retiendra :

- Les interactions eau-roche, accentuées par la nature volcanique des roches. Les verres volcaniques sont notamment beaucoup plus réactifs pendant l'altération que les autres roches silicatées (Gislason et Euster, 1987). Ainsi la mobilisation des éléments de ces roches vers la phase dissoute des eaux se trouve accentuée. En Martinique, ce facteur est combiné avec des taux élevés de précipitation en saison des pluies qui accroît encore davantage le flux d'altération.
- Les interactions eau-gaz volcaniques. Les gaz émis dans le contexte volcanique de la Martinique peuvent présenter les composés dissous suivants : des sulfites, des sulfates et des thiosulfates ; de l'acide chlorhydrique (HCl) ;

des chlorures (NaCl , AlCl_3 , FeCl_3) ; des composés du fluor (F , HF , SiF_4) ; des oxydes de carbone (CO , COS) ; du méthane ; de l'azote ; de l'hydrogène (Rittman, 1963). Les eaux naturelles interagissant avec ces gaz sont susceptibles de collecter ces composés dissous ainsi que certains éléments volatils (Tonani, 1971 ; Symonds et al., 2001). Par ailleurs en présence d'acides (sulfurique et chlorhydrique) provenant des gaz volcaniques, l'hydrolyse des minéraux, et donc les interactions eau-roche se trouvent également accentuées.

- Les phénomènes maritimes liés à la proximité d'eau de mer : embruns marins, biseau salé, eaux saumâtres de bord de mer. Les eaux de pluie prélevées à proximité de la Martinique, en Guadeloupe, ont été documentées par Rad et al. (2007) et présentent des concentrations moyennes en calcium de $0,43 \text{ mg.L}^{-1}$, en magnésium de $0,44 \text{ mg.L}^{-1}$, en sodium de $4,36 \text{ mg.L}^{-1}$ et en potassium de $0,55 \text{ mg.L}^{-1}$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les concentrations moyennes documentées dans la littérature pour des pluies côtières prélevées dans d'autres zones géographiques (Illustration 1) : concentration moyenne en calcium de $0,61 \text{ mg.L}^{-1}$, en magnésium de $0,49 \text{ mg.L}^{-1}$, en sodium de $2,98 \text{ mg.L}^{-1}$, en potassium de $1,36 \text{ mg.L}^{-1}$, en chlorures de $4,77 \text{ mg.L}^{-1}$ et en sulfates de $0,92 \text{ mg.L}^{-1}$ (Berner et Berner, 1987 ; Négrel et al., 1997 ; Louvat et Allègre, 1998 ; Rad et al., 2007). Par ailleurs en raison du caractère insulaire de la Martinique, les eaux souterraines peuvent être influencées par la composition chimique de l'eau de mer. En effet un équilibre hydrodynamique s'établit entre la pression exercée par les eaux douces d'infiltration et la contre-pression due à la mer, c'est ce qu'on appelle le biseau salé. Dans cette zone, des échanges sont possibles entre les eaux souterraines et l'eau de mer. La composition chimique de l'eau de mer a été caractérisée par le BRGM localement par Sanjuan et al. (2003) et en Guadeloupe par Sanjuan et Brach (1997) et figure dans l'illustration 2.

L'occupation des sols, notamment la répartition des activités agricoles utilisatrices d'amendements, d'engrais et/ou de produits phytosanitaires (bananeraies, champs d'ananas...), peut avoir un impact sur les eaux souterraines (pollutions diffuses). En effet la composition chimique naturelle des eaux souterraines peut être significativement modifiée par la contribution d'éléments d'origine anthropique. Par la suite les analyses chimiques présentées dans cette étude seront donc interprétées en tenant compte des possibles contaminations locales liées aux activités humaines (agriculture, urbanisation, pollution ponctuelle de type décharge...).

Zone géographique	Référence	Ca mg.L ⁻¹	Mg mg.L ⁻¹	Na mg.L ⁻¹	K mg.L ⁻¹	Cl mg.L ⁻¹	SO4 mg.L ⁻¹	HCO3 mg.L ⁻¹	NO3 mg.L ⁻¹	NH4 mg.L ⁻¹	Al µg.L ⁻¹	Ba µg.L ⁻¹	pH
Bermudes	Berner et Berner, 1987	2.91	-	7.23	0.36	12.41	2.12	-	0.1	0.1	-	-	-
Bermudes	Berner et Berner, 1987	0.19	0.41	3.38	0.17	6.2	1.74	-	0.34	0.04	-	-	4.8
Cayenne	Négrel et al., 1997	1.31	0.61	3.55	0.4	5.44	1.04	0.73	0	-	-	-	6.17
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.33	0.68	3.93	1.14	6.95	0.17	3.93	0.19	-	-	-	6.4
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.25	0.37	2.46	0.29	4.53	0.64	1.27	0.19	-	-	-	6.2
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.67	0.42	2.61	0.74	7.36	1.12	1.32	0.22	-	-	-	6.12
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.05	0.06	0.87	0.21	2.47	0.5	0.098	0.095	-	-	-	6.12
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.05	0.05	0.34	0.06	1.06	0.26	0.68	0.22	-	-	-	5.74
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.23	0	0.53	0.72	1.97	0.39	1.57	0.42	-	-	-	5.52
Cayenne	Négrel et al., 1997	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.89	1.13	4.44	5.78	1.68	1.72	6.89	0.95	-	-	-	6.56
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.15	0.18	2.4	1.77	6.5	1.04	3.33	0.23	-	-	-	6.03
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.62	0.41	2.7	1.96	6.43	0.74	-	0.49	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.53	0.04	1.64	2.43	4.34	-	-	-	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.13	0.1	1.42	0.14	3.98	0.95	0.56	0.21	-	-	-	5.64
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.24	0.04	0.61	0.13	1.68	0.2	-	10.92	-	-	-	3.91
Cayenne	Négrel et al., 1997	3.39	3.3	1.9	13.04	1.32	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.12	0.19	1.59	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.44	0.61	5.96	0.66	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.56	0.75	7.38	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.40	0.34	3.70	1.21	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.60	0.29	3.17	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.27	0.40	3.34	0.15	5.68	1.14	-	0.43	-	2.16	0.14	5.3
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.16	0.50	3.93	0.24	6.67	1.19	-	0.04	-	1.62	0.27	5.3
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.08	0.28	2.35	0.09	3.91	0.76	-	0.10	-	1.89	0.14	5.3
Min		0.05	0	0.34	0.06	1.06	0.17	0.098	0	0.04	1.62	0.14	
Max		3.39	3.3	7.383	13.04	12.41	2.12	6.89	10.92	0.1	2.16	0.27	
Moyenne		0.61	0.49	2.98	1.36	4.77	0.92	2.04	0.89	0.07	1.89	0.18	

Illustration 1 : Synthèse de compositions chimiques d'eaux de pluies d'origine côtière dans un contexte insulaire disponibles dans la littérature.

Références	Ca mg.L ⁻¹	Mg mg.L ⁻¹	Na mg.L ⁻¹	K mg.L ⁻¹	Cl mg.L ⁻¹	SO4 mg.L ⁻¹	HCO3 mg.L ⁻¹	NO3 mg.L ⁻¹	Al µg.L ⁻¹	Ba µg.L ⁻¹	B µg.L ⁻¹	Mn µg.L ⁻¹	F µg.L ⁻¹	As µg.L ⁻¹
Martinique ^(a)	390	1200	11400	309	20200	2626	143	0	56	76	3,84	10	1,3	93
Guadeloupe ^(b)														
Min	385	1337	10488	345	17750	1903	135	0	76	77	464	55	608	1393
Max	461	1400	11500	430	21336	2806	153	0	76	77	5724	55	893	1393
Moyenne	423	1361	10933	398	19774	2274	145	0	76	77	3395	55	766	1393
N°	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	1	3	1

*N : nombre d'échantillons

(a) Sanjuan et al (2003)

(b) Sanjuan et Brach (1997)

Illustration 2 : Synthèse d'analyses de compositions chimiques d'eaux de mer pour la Martinique (Sanjuan et al., 2003) et pour la Guadeloupe (Sanjuan et Brach, 1997).

2.2. STRATEGIE D' ECHANTILLONNAGE

2.2.1. Choix des points d'échantillonnage

A partir de la synthèse des données existantes sur la géochimie des eaux de la Martinique, un certain nombre de points a été défini sur lesquels l'approche isotopique est mise en place. L'objectif est de coupler les informations existantes concernant la géochimie dite « classique » (éléments majeurs et traces) et les informations acquises dans cette étude grâce à la géochimie isotopique afin d'apporter des éléments de réponses aux questions suivantes :

- D'où vient l'eau souterraine ? Comment est-elle rechargée ? Quelles sont les relations entre les aquifères ? Quel est le fonctionnement des systèmes aquifères ? Quels sont les proportions de mélange des différents composants naturels ?
- D'où viennent les éléments dissous ? Existe-t-il des composantes d'eau récente et ancienne dans le système ?
- Quel est l'impact de l'intrusion saline sur la chimie des eaux ?

Ainsi stratégiquement les points ont été choisis de manière à échantillonner :

- Des points de prélèvement pour lesquels des données sur la géochimie existent,
- Les aquifères les plus représentatifs,
- Les aquifères correspondants aux formations géologiques dominantes en Martinique.

De 2004 à 2006, 35 points de prélèvement des eaux souterraines ont été suivis par le BRGM dans le cadre du réseau patrimonial (Comte et al., 2004 ; Négrel et Vittecoq, 2005 ; Baran et al., 2006 ; Malcuit et al., 2006 ; Ollagnier et Vittecoq, 2007). Depuis 2007, 20 points, reprenant certains points de ce réseau (Vittecoq, 2006), sont suivis dans le cadre du contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraines au titre de la DCE (Ollagnier, 2007).

Les données ainsi recueillies entre 2004 et 2007 sur la géochimie des eaux souterraines de la Martinique ont montré une variabilité saisonnière des concentrations en éléments chimiques, variations qui ne sont pas directement liées aux variations du niveau piézométrique. L'approche isotopique engagée dans le cadre de cette étude s'est donc appuyée sur 2 campagnes existantes (saison sèche et saison des pluies 2006) afin d'avoir une vision sur deux situations hydrologiques contrastées. L'intérêt étant également de disposer des analyses en éléments majeurs et traces sur les mêmes échantillons que ceux analysés pour les isotopes H et O de l'eau, du Strontium

et du Bore. Les résultats des analyses de la géochimie élémentaire dite « classique », disponibles pour ces 2 campagnes (avril et novembre 2006) sont reportés dans les rapports de Malcuit et al. (2006) et Ollagnier et Vittecoq (2007).

2.2.2. Localisation des points de prélèvement

La localisation et la liste des points de prélèvements interprétés dans cette étude sont présentées respectivement dans l'illustration 3 et l'illustration 4.

L'approche isotopique a été engagée :

- en saison sèche (avril 2006), sur 35 points pour l'analyse des isotopes stables de la molécule d'eau (H et O) et des isotopes du Sr, et sur 10 points pour les isotopes du bore (Illustration 4).
- en saison des pluies (novembre 2006), sur 10 points pour l'analyse des isotopes stables de la molécule d'eau (H et O) et des isotopes du Sr (Illustration 4).

La mise en œuvre des outils de la géochimie isotopique proposés dans cette étude, n'a pas été systématique : les 10 points échantillonnés lors de la seconde campagne ont été choisis à la lumière des résultats obtenus sur la première campagne pour les isotopes stables de la molécule d'eau et les isotopes du Sr ; l'intérêt étant de disposer des analyses les plus pertinentes pour répondre à la problématique de cette étude.

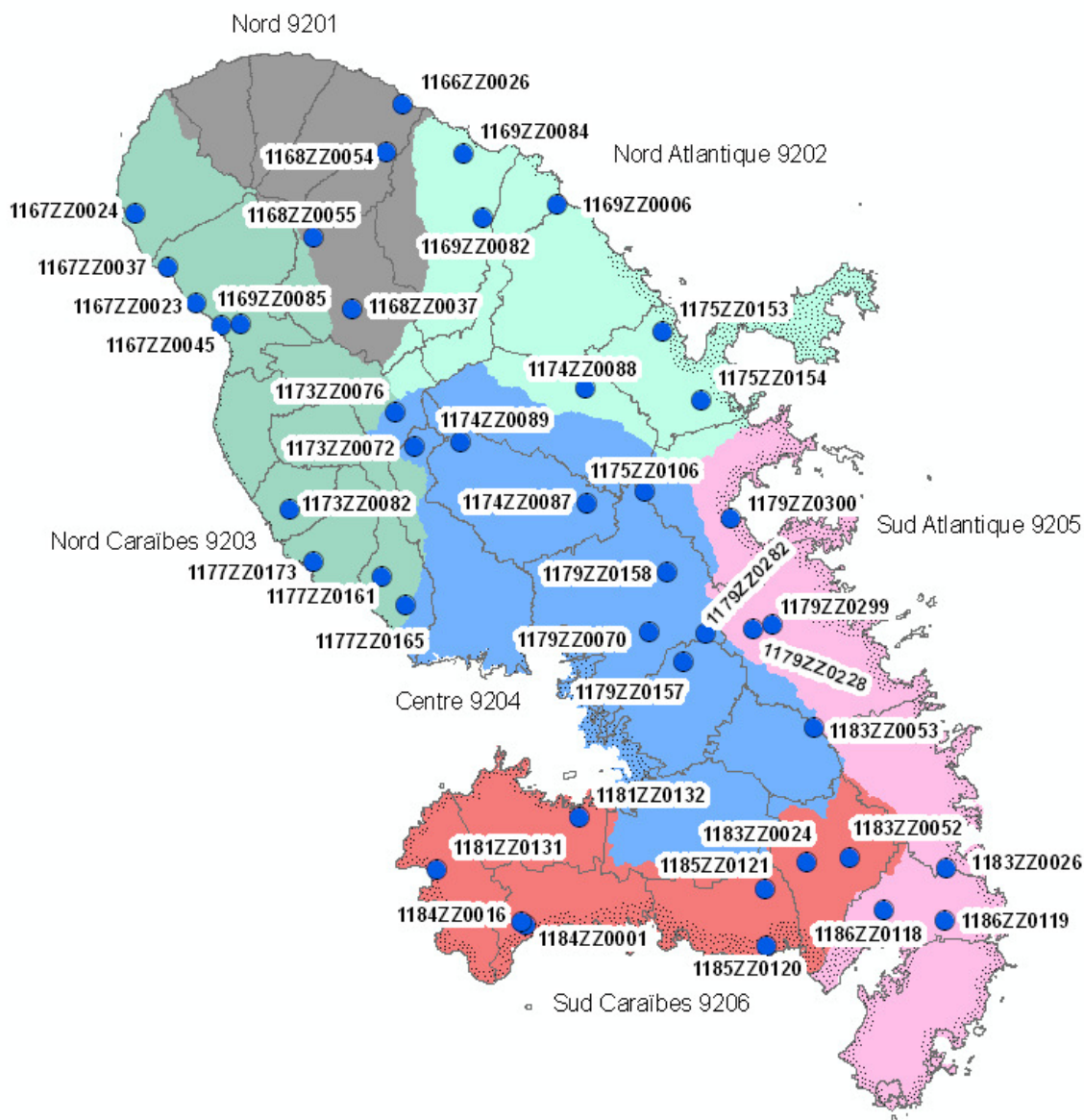


Illustration 3 : Localisation des points de prélèvement de la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006) et masses d'eau souterraines associées.

Masses d'eau	N° BSS	Indice BSS	Commune	Lieu Dit	Unité régionale	Libre / Caplit	Milieu écoulement	Libellé formation géologique	Lithologie des roches	$\delta^{18}\text{O}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{15}\text{N}$
Nord - 9201	1166Z0026NF8	1166Z0026	Basse Pointe	Chalvet	Pelée Nord	Libre	Poreux	NAB1 ou N	Nuées Ardentes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1166Z0023S	1166Z0023	Macouba	Source Grand Plage	Pelée Nord	Libre	Poreux ?	10B	Nuées ardentes anciennes	SS 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1166Z0023S	1166Z00219	Basse Pointe	Socco Gradis	Pelée Nord	Libre	Poreux	NSV	Nuées ardentes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1168Z0055S	1168Z0055	Monne Rouge	Habitation Citron	Rivière Capot	Libre	Poreux	NMC	Nuées Ardentes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1168Z0054/P2	1168Z0054	Basse Pointe	Rivière Falaise	Rivière Capot	Libre ?	Poreux	NAB1 & NSV	Nuées Ardentes	SS 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1168Z0037/F1	1168Z0037	Monne Rouge	Desgrottes	Rivière Capot	Caplit	Poreux	B	argiles varvées et conglomérats	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1169Z0084NF7	1169Z0084	Lorrain	Fond Brûlé	Lorrain-Marigot	Caplit ?	Fissuré et fracturé	1betaol	Andésites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1169Z0082/S	1169Z0082	Lorrain	Source Carabin	Lorrain-Marigot	Libre	Fissuré, fracturé et poreux	1-2C	Conglomérats	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1169Z0006/F	1169Z0006	Marigot	Anse Charpentier	Lorrain-Marigot	Caplit	Fissuré et fracturé	1 H	Hyaloclastites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1175Z0153/S	1175Z0153	Trinité	Monne Figue	Gallon	Libre	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Basaltes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
Nord Atlantique - 9202	1175Z0154NF4	1175Z0154	Trinité	Le Gallon	Gallon	Caplit	Fissuré et fracturé	1alpha ?	Andésites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1174Z0088/P2	1174Z0088	Gros Morne	La Bonelli	Pelée Ouest	Libre ?	Fissuré et fracturé	1-2 C	Conglomérats	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1167Z0024/PRS1	1167Z0024	Prêcheur	Rivière du Prêcheur	Pelée Ouest	Libre ?	Poreux	N	Nuées Ardentes	SS 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1167Z0023/RBS1	1167Z0023	Saint Pierre	Rivière Blanche	Pelée Ouest	Libre	Poreux	1902	Nuées Ardentes	SS 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1167Z0045/NF6	1167Z0045	St Pierre	CDST	Pelée Ouest	Libre	Poreux	N	Nuées Ardentes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1168Z0052/S	1168Z0052	Saint Pierre	source pecoul	Pelée Ouest	Libre	Poreux	P3	Ponces	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1167Z0037/AV1	1167Z0037	Saint Pierre	Fond Canonville	Pelée Ouest	Libre	Poreux	11B	ponces	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1173Z0082/NF5	1173Z0082	Belletontaine	Fond Laillet	Carbet	Caplit ?	Poreux ?	6B2 ?	Brèches	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1177Z0161/FLF1	1177Z0161	Schoelcher	Fond Lahaye	Schoelcher - Case Pilote	Caplit	Fissuré et fracturé	2 alpha	Andésites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1177Z0165/CNF2	1177Z0165	Schoelcher	Case Navire	Schoelcher - Case Pilote	Semi caplit	Poreux	8pc	ponces	SS 2006	SS 2006	SS 2006
Nord Caraïbes - 9203	167Z0031/S	167Z0031	Saint Pierre	Pécul	Pelée Ouest	Libre	Poreux	N	Nuées Ardentes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1177Z0173/P2	1177Z0173	Case Pilote	Maniba	Schoelcher - Case Pilote	Caplit ?	Poreux ?	8pc	Ponces remaniées ?	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1173Z0076/S	1173Z0076	Fond Saint Denis	Source de l'Alma	Lézarde	Libre	Fissuré et fracturé	2alpha	Andésites	SS&SP 2006	SS 2006	SS 2006
	1174Z0089/S	1174Z0089	Saint Joseph	Coeur Bouilli	Lézarde	Libre	Fissuré et fracturé	1betaol	Andésites	SS&SP 2006	SS 2006	SS 2006
	1174Z0087/P2	1174Z0087	Saint Joseph	La Charmille	Lézarde	Libre ?	?	2-5C	Conglomérats	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1175Z0106/F	1175Z0106	Gros Morne/Robert	Vert Pré / Usine Yoplat	Lézarde	Caplit	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Basaltes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0138/PR-S1	1179Z0138	Lamentin	Serrail	Lézarde	Caplit	Fissuré et fracturé	Hm2b	Hyaloclastites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1179Z0070/2F02	1179Z0070	Lamentin	Habitation Ressource	Lézarde	Caplit	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Basaltes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0072/SP2	1179Z0072	Fort de France	La Médaille	Lézarde	?	?	8B ou 2 alpha	?	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0157/CR-S2	1179Z0157	Ducos	Bois Rouge	Lézarde	Caplit	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Basaltes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
Centre - 9204	1183Z0053/S	1183Z0053	Saint Esprit	Source Caraïbe	Petit Bourg	Libre	Fissuré, fracturé et poreux	Hm2d	Hyaloclastites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0282/S	1179Z0282	Lamentin	Source La Frédée	Lézarde	Libre	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Basaltes	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1182Z0160/F2	1182Z0160	Rivière Salée	Nouvelle Cité	Petit Bourg	Caplit	Fissuré et fracturé	pbeam2a	Andésites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1186Z0118/SMA4	1186Z0118	Marin	Grand Fond	Marin	Caplit	Fissuré, fracturé et poreux	palpam2c	Andésites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1179Z0300/NF3	1179Z0300	Robert	Pontalevy	Robert	Caplit	Fissuré, fracturé et poreux	Hm2a4	Hyaloclastites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0228/S11	1179Z0228	François	La Victoire	François	Caplit ?	Fissuré, fracturé et poreux	Hm2a4	Hyaloclastites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1179Z0299/NF2	1179Z0299	François	Grand Fond	François	Caplit	Fissuré, fracturé et poreux	Hm2a5	Hyaloclastites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1186Z019/CMF1	1186Z0119	Marin	Cap Macré	Sainte Anne	Caplit	Fissuré et fracturé	scm1 ou alpag2	Andésites	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1183Z0026/S1	1183Z0026	Vauclin	Puyérat	Sainte Anne	Caplit	Poreux ?	m1a ?	Calcaire	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1181Z0132/P2	1181Z0132	Trois îlets	Variable	Trois îlets	Caplit ?	Fissuré et fracturé	rapham2c	Andésites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
Sud Atlantique - 9205	1181Z0131/P2	1181Z0131	Anses d'Arlet	Grande Anse	Anses d'Arlet	Libre ?	Fissuré et fracturé	rapham2f	Andésites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1186Z0120/P2	1186Z0120	Stade communal	Grande Anse	Sainte Luce	Caplit	Fissuré, fracturé et poreux	Bn2e	Breches à blocs d'andésites	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1185Z0121/S	1185Z0121	Sainte Luce	Source du Riz	Sainte Luce	Libre	?	Cm2d	Conglomérats	SS&SP 2006	SS&SP 2006	SS 2006
	1183Z0024/S2	1183Z0024	Rivière Plote	La Mauny	Rivière Plote	Caplit	Fissuré et fracturé	alpha betam2c	Andésites	SS&SP 2006	SS 2006	SS 2006
	1183Z0052/P2	1183Z0052	Rivière Plote	Fouganville	Rivière Plote	Libre ?	Fissuré et fracturé	alpha betam2c	Andésites	SS&SP 2006	SS 2006	SS 2006
	1184Z0016/Df2	1184Z0016	Diamant	Habitation Dizac	Diamant	Caplit	Poreux	4B	Ponces	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	1184Z0001/S1	1184Z0001	Diamant	Habitation Dizac	Diamant	Caplit	Poreux	4B	Ponces	SS 2006	SS 2006	SS 2006
	SS 2006											
	SS&SP 2006											

SS 2006 : point analysé uniquement pour la campagne de saison sèche (avril 2006)

SS&SP 2006 : point analysé à la fois pour la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006)

Illustration 4 : Liste des points de prélèvement de la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006) et niveau hydrogéologique correspondant.

2.2.3. Prélèvement et conditionnement des échantillons

Toutes les techniques de prélèvement, d'échantillonnage et de conservation permettent de répondre à trois objectifs :

- représentativité du milieu,
- caractérisation des phénomènes,
- limitation des transformations.

Ils font l'objet d'un mode opératoire spécifique qui permet de garantir la non-contamination des échantillons.

L'échantillon prélevé est filtré sur un filtre en acétate de cellulose ($<0,45 \mu\text{m}$) préalablement rincé et conditionné de la façon suivante dans des bouteilles en polypropylène :

- 100 ml pour l'analyse des isotopes stables de l'eau (H et O),
- 250 ml acidifié à $\text{pH} = 2$ avec de l' HNO_3 suprapur conditionnés dans une bouteille préalablement lavée avec une solution d' HNO_3 à $\text{pH}=2$, pour l'analyse des compositions isotopiques du Sr,
- 1000 ml non acidifié pour l'analyse des compositions isotopiques en B.

Les échantillons ainsi conditionnés sont ensuite stockés à 4°C dans le noir jusqu'à l'analyse.

Les analyses physico-chimiques sont faites au moment du prélèvement selon les normes NF EN ISO/CEI 17025 et NF EN ISO 9001-2000. Les paramètres mesurés sont les suivants : pH, température, teneur en oxygène dissous, conductivité et potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Le pH-mètre est préalablement calibré à l'aide de solutions standards à $\text{pH}=4$, $\text{pH}=7$ et $\text{pH}=10$. Le conductivimètre est étalonné avec une solution standard à $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C . Les points de prélèvement échantillonnés pour les analyses isotopiques citées ci-dessus ont également fait l'objet de prélèvement d'eau pour l'analyse des éléments majeurs et traces. Les détails concernant ces prélèvements et leur conditionnement sont reportés dans les rapports de Malcuit et al. (2006) et Ollagnier et Vittecoq (2007).

2.3. ANALYSES ISOTOPIQUES

L'ensemble des résultats des analyses isotopiques de cette étude est reporté en Annexe 1.

2.3.1. Analyse des isotopes stables de la molécule d'eau

L'analyse des isotopes stables de l'eau, de l'oxygène et de l'hydrogène, est réalisée selon les méthodes détaillées sur l'illustration 5. Les signatures isotopiques en hydrogène et en oxygène de la molécule d'eau sont exprimées en unité ‰ de déviation par rapport à un standard de référence. On utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon :

$$\delta = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

où R est le rapport isotopique, isotope lourd sur isotope léger (e.g. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Le standard de référence est le SMOW (Standard Mean Ocean Water), pris à 0 ‰, et correspond à une eau de mer moyenne.

Analyses isotopiques	Méthode	Précision analytique
Rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau	Equilibration avec un CO_2 de composition connue	$\pm 0,1 \%$
Rapport $^2\text{H}/^1\text{H}$ de l'eau	réduction sur zinc	$\pm 0,8 \%$
Teneur en ^3H	Enrichissement électrolytique et comptage pas scintillation liquide	$\pm 10 \%$
Rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du strontium total dissous dans l'eau	TIMS	$\pm 0,05 \%$
Rapport $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ du bore total dissous dans l'eau	TIMS	$\pm 0,05 \%$

Illustration 5 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses isotopiques

2.3.2. Analyses des isotopes du strontium

Les analyses isotopiques du Sr se font par spectrométrie de masse à source solide par méthode TIMS (Spectrométrie de masse à thermo-ionisation) après séparation chimique sur résine. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont normalisés à un rapport $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ de 0,1194.

La précision interne de chaque mesure du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est de $\pm 8,10^{-6}$ (2σ). La reproductibilité des mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est testée par l'analyse répétitive du standard international NBS 987, la valeur obtenue durant cette étude est de $0,710221 \pm 31,10^{-6}$ (2σ , $n = 17$). Les valeurs mesurées sont normalisées à la valeur certifiée du standard NBS 987 (0.71024).

2.3.3. Analyses des isotopes du bore

Le bore est un élément en traces possédant deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B extrêmement solubles dans les fluides aqueux. De la même manière que le strontium, l'analyse des isotopes du bore est réalisée par TIMS (Spectrométrie de masse à thermo-ionisation) (Illustration 5). De même que pour les isotopes stables de la molécule d'eau, on utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon (le standard de référence est le NBS951) :

$$\delta^{11}\text{B} = \left[\left(\frac{^{11}\text{B}}{^{10}\text{B}} \right)_{\text{échantillon}} / \left(\frac{^{11}\text{B}}{^{10}\text{B}} \right)_{\text{standard}} \right] - 1 \cdot 10^3$$

3. Caractérisation géochimique des eaux souterraines

L'approche géochimique présentée dans ce rapport propose la caractérisation des eaux souterraines de la Martinique en s'appuyant sur différents outils de la géochimie dite « classique » (analyse des éléments majeurs et traces) et de la géochimie isotopique (isotopes H et O de la molécule d'eau, isotopes du Sr et du B). Le croisement des informations fournies par l'ensemble de ces traceurs permettra d'aboutir à une différenciation géochimique des eaux souterraines de la Martinique dans le chapitre 4 du présent rapport.

3.1. CHIMIE ELEMENTAIRE

3.1.1. Validité des analyses chimiques réalisées

Les analyses chimiques sont issues des campagnes de prélèvement réalisées en novembre 2006 (35 points) et en avril 2007 (19 points) dans le cadre du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, financé par la DIREN et l'Office de l'Eau de la Martinique(ODE).

Dans le cadre de ces campagnes, les éléments suivants ont été analysés :Ca, Mg, K, Na, HCO₃, NO₃, Cl, SO₄, NO₂, NH₄, PO₄, F, SiO₂, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sr et Zn.

Le TDS (pour Total Dissolved Solids) est la somme des concentrations en mg.L⁻¹ des cations et des anions mesurés en laboratoire. La conductivité électrique, mesurée sur le terrain est fonction de la salinité de l'eau ; il existe donc généralement une relation quasi-linéaire entre la conductivité électrique et le TDS calculé à partir des analyses chimiques de laboratoire. L'illustration 6a présente le TDS en fonction de la conductivité électrique. On observe ici une bonne corrélation entre ces paramètres ; aucun problème majeur lors du déroulement des analyses chimiques ou des mesures de conductivité ne semble donc devoir être suspecté. L'illustration 6b, représentant la somme des anions (Σ-) en fonction de la somme des canions (Σ+) en meq/L, montre un équilibre entre charges positives et charges négatives mesurées dans les eaux. Les analyses ont donc semble-t-il pris en compte l'essentiel des éléments majeurs présents dans l'eau. Ceci doit cependant être confirmé par l'étude de la balance électrique. Le calcul de la balance ionique des analyses chimiques (ou NICB pour Normalized Inorganic Charge Balance) a été calculé suivant la formule :

$$NICB(\%) = \frac{\sum^{+} - \sum^{-}}{\sum^{+} + \sum^{-}} * 100$$

Le NICB correspond au pourcentage de charges positives excédentaires ou manquantes pour avoir un bilan des charges nul. Une eau ayant toujours un bilan de charges nul à l'équilibre, un excès de cations ou d'anions dénote d'une analyse chimique incomplète ou de mauvaise qualité. On considère que les analyses sont correctes pour un NICB compris entre -5% et +5% : **toutes les analyses ayant été réalisées présentent ainsi un NICB acceptable** (Illustration 6c).

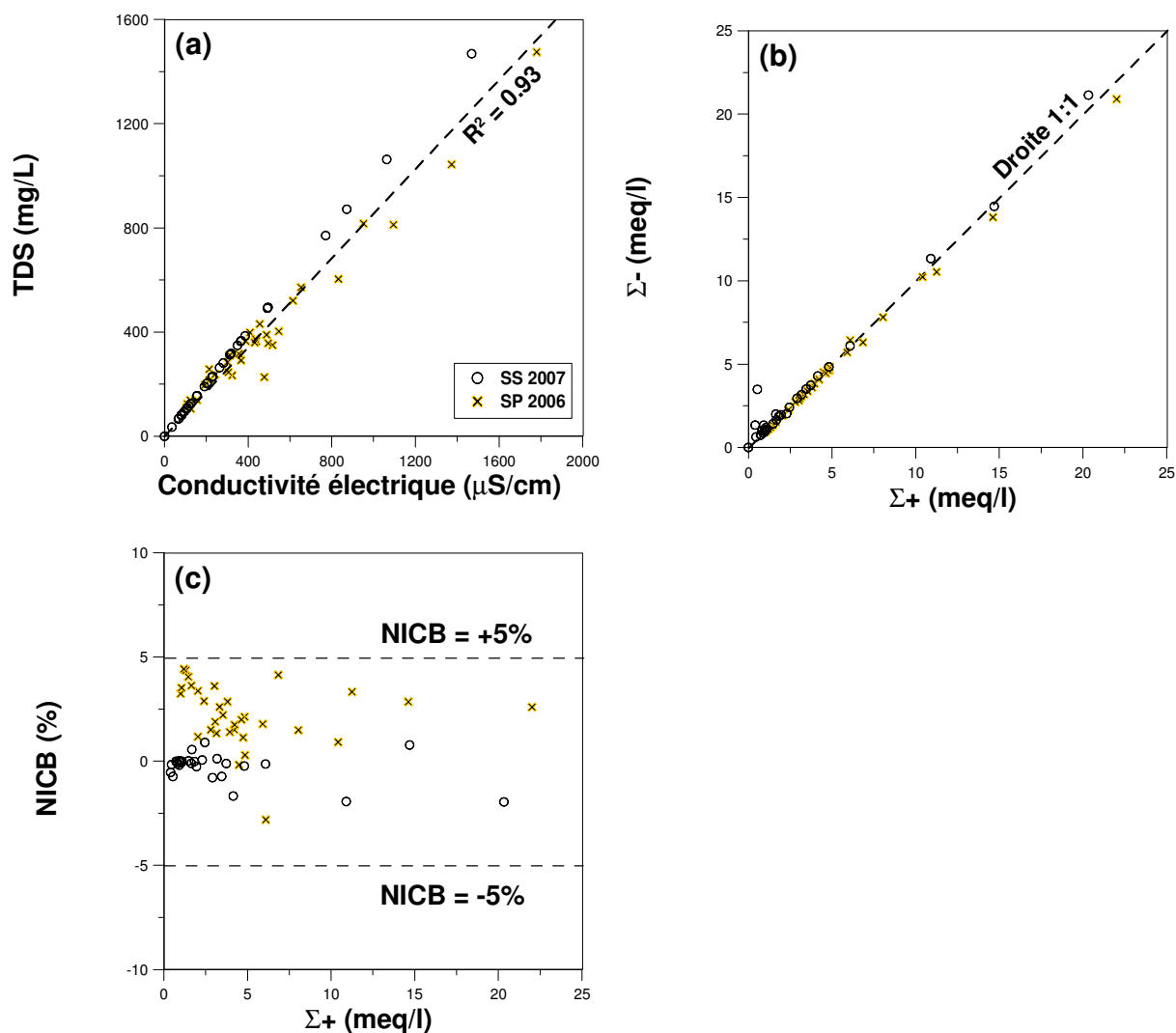


Illustration 6 : TDS vs. conductivité électrique de l'eau (a), somme des anions (Σ^-) vs. somme des cations (Σ^+) (b), balance ionique (NICB) vs. somme des cations (Σ^+) pour les campagnes de prélèvement de novembre 2006 et avril 2007. SS : saison sèche ; SP : saison des pluies. TDS = minéralisation totale ; NICB : balance ionique.

3.1.2. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux

Le diagramme de Piper (Illustration 7) indique que **les eaux souterraines prélevées décrivent l'ensemble des faciès chimiques**. Les points extrêmes pour chaque faciès sont :

- (1) le point La Charmille (Indice BSS : 1174ZZ0087, Saint Joseph) pour le faciès bicarbonaté-calcique ; (2)
- (2) le point Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe) pour le faciès sulfaté-sodique ;
- (3) l'eau de mer, l'eau de pluie et les points Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce) et Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert) pour le faciès chloruré-sodique ;
- (4) les point Source Carabin (Indice BSS : 1169ZZ0082, Lorrain) et Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006, Marigot) pour le faciès bicarbonaté-sodique.

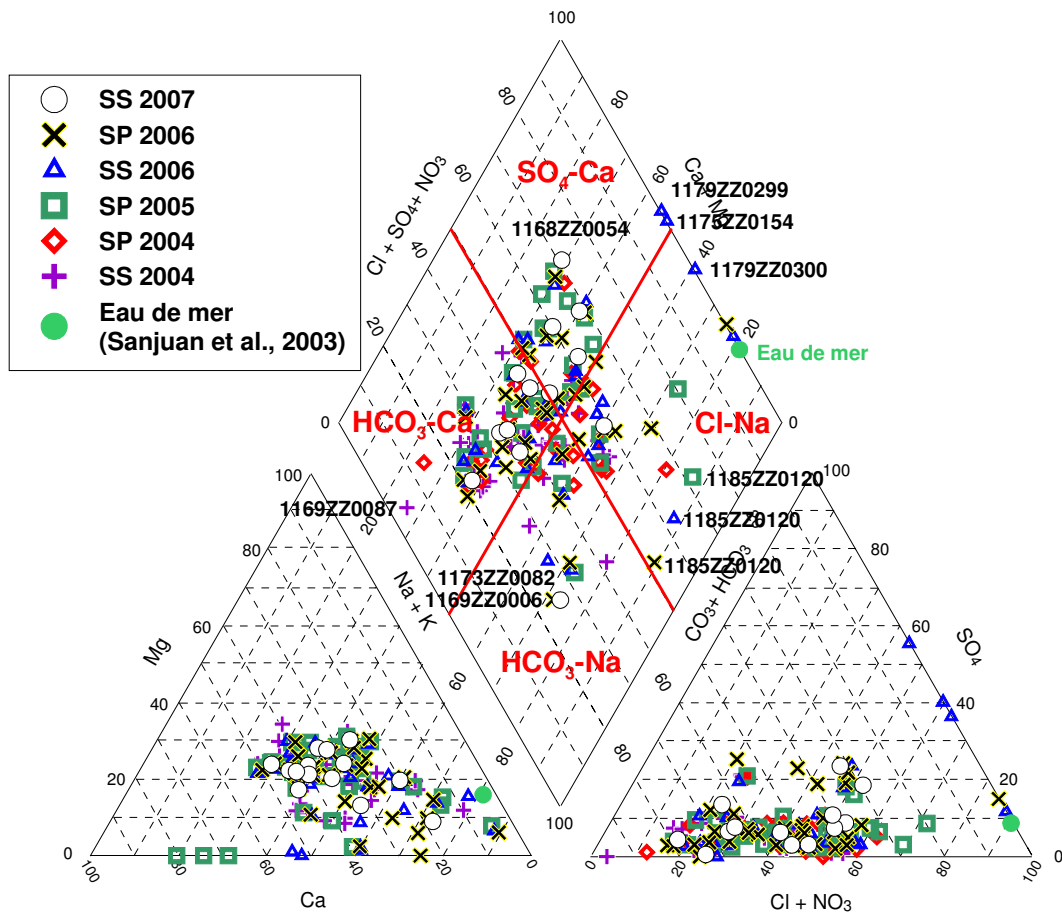


Illustration 7 : Diagramme de Piper pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004.

3.1.3. Relations inter-éléments

Les deux sources naturelles principales de chlorures dans les eaux sont les aérosols marins et la dissolution de la halite (chlorure de sodium). La proportion d'aérosols marins contenus dans les eaux de pluies augmente généralement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la mer. En l'absence de dépôts évaporitiques dans les niveaux lithologiques drainés, les eaux souterraines et les eaux de surface intègrent uniquement des chlorures provenant de l'eau de pluie qui les alimentent (Meybeck, 1986, Berner et Berner, 1987). Ainsi les chlorures sont souvent utilisés comme élément de référence des apports atmosphériques dans les eaux de surface et les eaux souterraines en milieu non contaminé (Meybeck, 1986).

Dans l'illustration 8 sont présentées sous la forme de diagrammes binaires les teneurs en chlorures versus celles d'autres éléments majeurs. Les résultats d'analyses chimiques des 6 dernières campagnes réalisées (janvier 2004 à avril 2007, Comte et al., 2004 ; Négrel et Vittecoq, 2005 ; Baran et al., 2006 ; Malcuit et al., 2006, Ollagnier et Vittecoq, 2007 ; Ollagnier, 2007) sont reportés dans cette illustration. La droite de dilution de l'eau de mer est représentée comme référence, à partir des données synthétisées par Berner et Berner (1987). L'illustration 8 montre que les variations de concentrations d'un échantillon à l'autre sont importantes à l'échelle de la Martinique et, suivant les éléments considérés, de nettes tendances se dessinent. Ces tendances sont discutées ci-après.

- **chlorures versus sodium**

Sur le diagramme chlorures versus sodium (Illustration 8a), les points se répartissent globalement sur la droite de dilution de l'eau de mer représentant les apports de chlorures et de sodium amenés par les aérosols marins via les eaux de pluie. De plus certains points atteignent des concentrations très élevées en Cl et Na (jusqu'à 400 mmol.L⁻¹) qui pourraient correspondre à la contribution d'éléments dissous provenant directement de l'eau de mer en l'absence de dépôts évaporitiques de type halite (NaCl) sur la Martinique. Un certain nombre de points sont enrichis en sodium par rapport à cette droite. En dehors des apports océaniques via les eaux de pluie, le sodium peut être amené par la dissolution d'halite ou par l'altération d'aluminosilicates sodiques. Or les points sont également enrichis en sodium par rapport à la droite de dissolution de la halite (Illustration 8a), de plus, comme évoqué précédemment, les dépôts évaporitiques sont absents sur la Martinique. Ainsi la **mise en solution de sodium provenant de l'altération d'aluminosilicates sodiques** apparaît l'hypothèse la plus réaliste pour expliquer cette déviation.

- **chlorures versus nitrates**

Sur le diagramme chlorures versus nitrates (Illustration 8b), il n'existe pas de corrélation franche entre les concentrations en nitrates et en chlorures. Ce qui confirme bien que la présence de chlorures est majoritairement contrôlée par les aérosols marins, les apports anthropiques ne constituant qu'une source mineure de chlorures en Martinique. Les teneurs en Cl dans les pluies diminuent de la côte vers l'intérieur des terres. Meybeck (1986) a montré que les teneurs en Cl dans les pluies côtières sont de

l'ordre de $0,79 \text{ mmol.L}^{-1}$ et baissent à environ $0,15 \text{ mmol.L}^{-1}$ à 50 km à l'intérieur des terres. Les données les plus proches d'eau de pluie côtière documentées dans la littérature (Bermudes, Guyane, Açores) donnent des concentrations en chlorures de $0,17 \text{ mmol.L}^{-1}$ en moyenne (Illustration 1).

Cette quantité de Cl apportée par la pluie est ensuite augmentée par l'évapotranspiration locale avant l'infiltration. Le facteur d'évapotranspiration est calculé par la différence entre la quantité d'eau précipitée (P en mm) et l'évaporation (E en mm) selon la formule $F_{ET} = P/(P-E)$: le facteur d'évapotranspiration moyen local calculé est de 2,5.

Ainsi, la teneur en Cl moyenne de la pluie locale ($130 \mu\text{mol.L}^{-1}$, moyenne pour les eaux de pluie côtières, Illustration 1) multipliée par le facteur d'évapotranspiration conduit à une recharge avec une teneur moyenne en Cl d'environ $0,32 \text{ mmol.L}^{-1}$. Les eaux souterraines décrivent une large gamme de concentrations en chlorures ($0,07$ à $14,9 \text{ mmol.L}^{-1}$) et en nitrates (jusqu'à $0,79 \text{ mmol.L}^{-1}$) :

- Les concentrations en chlorures les plus élevées sont observées pour les points de Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin), le point Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet), et le point Stade communal (Indice BSS : 1115ZZ0120, Sainte Luce) ($>1,5 \text{ mmol.L}^{-1}$) (Illustration 8).
- Les concentrations en chlorures les plus basses sont observées pour les points Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe), Habitation Citron (Indice BSS : 1168ZZ0055, Morne Rouge), Rivière Blanche (Indice BSS : 1167ZZ0023, Saint Pierre), Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024, Prêcheur), La Médaille (Indice BSS : 1169ZZ0088, Fort de France) et La Borelli (Indice BSS : 1174ZZ0088, Gros Morne) ($<1 \text{ mmol.L}^{-1}$) (Illustration 8).
- Certains points de prélèvement, les points Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe), chalvet (Indice BSS : 1166ZZ0026, Basse Pointe) et Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain), présentent des concentrations en nitrates supérieures à $0,5 \text{ mmol.L}^{-1}$ ($>30 \text{ mg.L}^{-1}$) et sont donc fortement contaminés (Illustration 8).

Ces trois points se trouvent dans le même secteur géographique, sur la côte nord atlantique (unités régionales « Rivière Capot » et Lorrain-Marigot », occupé majoritairement par des cultures de bananes, d'ananas et de canne à sucre. Le reste des points considérés dans le cadre de cette étude présente des concentrations en nitrates inférieures à $0,2 \text{ mmol.L}^{-1}$ ($<15 \text{ mg.L}^{-1}$), largement inférieures à la norme «Eau potable».

- **chlorures versus calcium**

Sur le diagramme chlorures versus calcium (Illustration 8c) et chlorures versus magnésium (Illustration 8d), tous les points se trouvent fortement enrichis en calcium et en magnésium par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer traduisant une origine majoritairement lithologique pour ces deux éléments. Les formations calcaires sont très faiblement représentées sur la Martinique, ainsi l'**origine** la plus vraisemblable pour ces éléments est l'**altération de roches volcaniques riches en Ca et Mg**.

- **chlorures versus sulfates**

Sur le diagramme chlorures versus sulfates (Illustration 8e), une partie des points se répartit sur la droite de dilution de l'eau de mer, indiquant un contrôle de la concentration en sulfates par les aérosols marins via les eaux de pluie.

Les points présentant un enrichissement en sulfates par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer intègrent vraisemblablement des sulfates provenant de l'altération de sulfures présents dans les roches volcaniques. Pour les points enrichis en chlorures par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer, des apports anthropiques de chlorures sont envisageables.

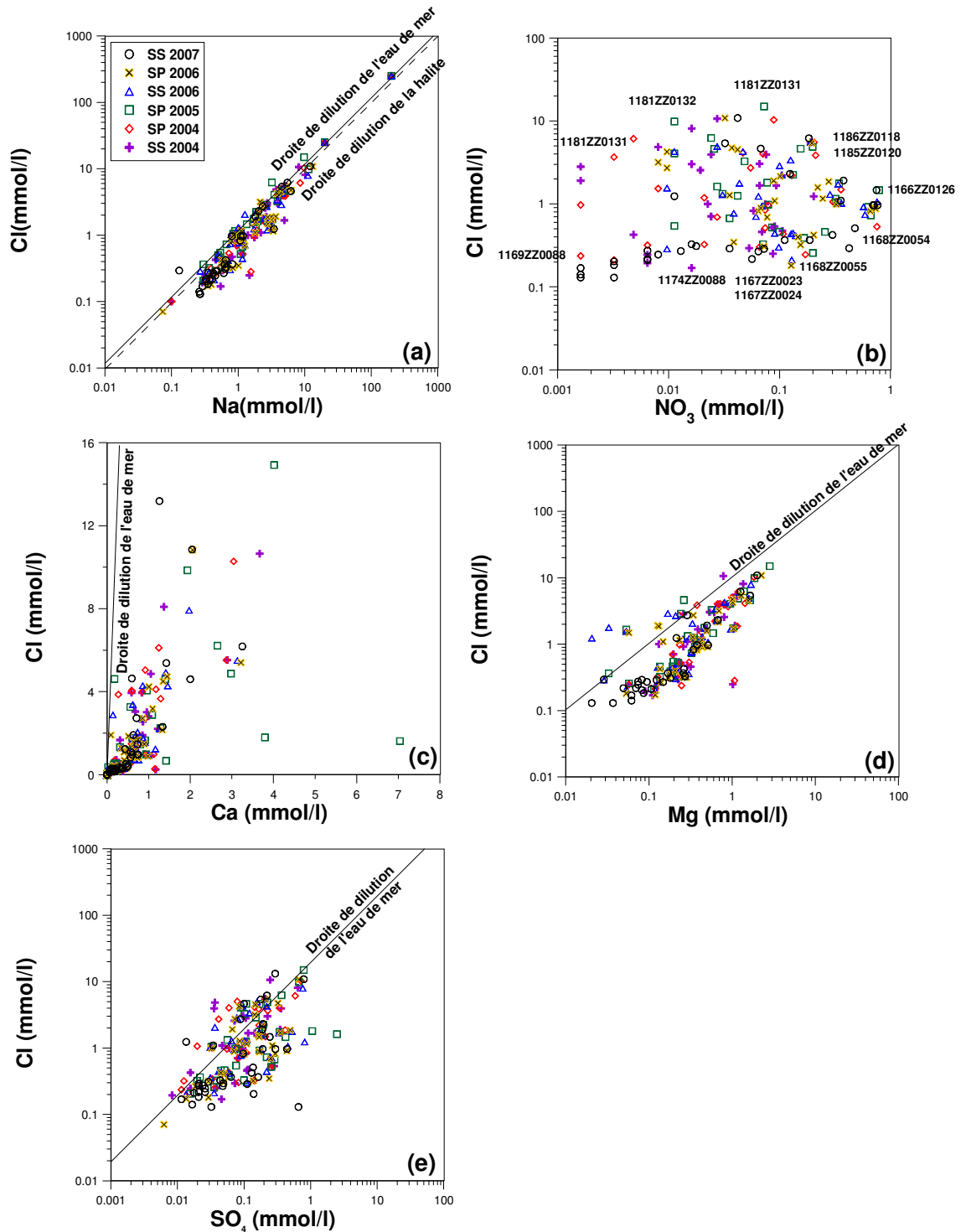


Illustration 8 : Cl vs. Na (a), Cl vs. NO₃ (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. Mg (d), Cl vs. SO₄ (e) pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004. SP : saison des pluies, SS : saison sèche.

- chlorures versus strontium & chlorures versus bore

Sur les diagrammes chlorures versus strontium (Illustration 9a) et chlorures versus bore (Illustration 9b), la majorité des points se trouvent enrichis en strontium et en bore par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer traduisant une origine lithologique pour ces éléments. Il est également possible que ces éléments proviennent en partie d'une origine anthropique.

Les points : Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François), Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois îlets), Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet), et Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024, Prêcheur) présentent des concentrations élevées en Sr ($>2 \text{ mmol.L}^{-1}$) et sont fortement enrichis en Sr par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (1179ZZ0299 et 1186ZZ0118 étant les points les plus fortement déviés par rapport à cette droite).

Pour le bore, des valeurs élevées sont observées pour les points Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006, Marigot), Nouvelle cité (Indice BSS : 1182ZZ0160, Rivière Salé), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois îlets), Rivière Blanche (Indice BSS : 1167ZZ0023, Saint Pierre) et Source Carabin (Indice BSS : 1169ZZ0082, Lorrain). Ces points dévient également significativement de la droite de dilution de l'eau de mer, ce qui traduit que les aérosols marins ne sont pas l'unique source de B dissous dans les eaux. Le point Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet), bien que présentant de fortes concentrations en bore (6,7 à $12,4 \text{ mmol.L}^{-1}$), se trouve sur la droite de dilution de l'eau de mer ce qui traduit potentiellement une contribution d'eau de mer pour ce point.

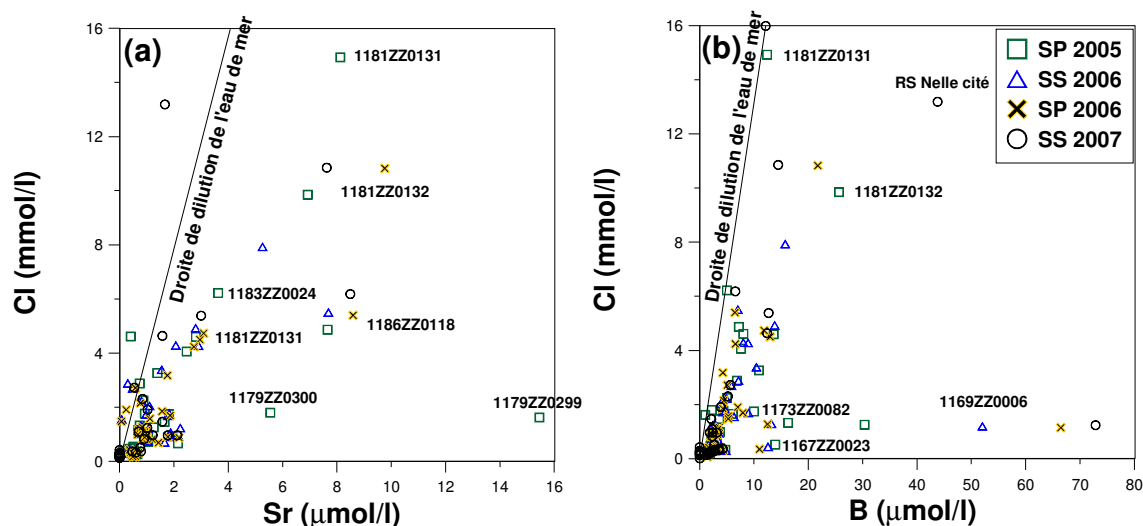


Illustration 9 : Cl vs. Sr (a), Cl vs. B (b) pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2005.
SP : saison des pluies, SS : saison sèche.

3.1.4. Calcul de l'Indice échange base

L'Indice échange base se calcule ainsi :

$$\text{ieb} = (\text{Na} + \text{K}) / \text{Cl}$$

Il permet de mesurer les écarts observés entre une valeur constante, définie par l'eau de mer (issue des embruns marins, du biseau salé ou d'eau de mer fossile, égal à 0,8769 selon la loi de Dittmar pour une eau de mer de salinité 35) et les valeurs observées pour chacun des points analysés.

Le phénomène qui sous-tend cette analyse est associé à l'apport de sel dissous par l'eau de mer. Cet apport est soit amené par les embruns marins soit par des intrusions d'eaux marines dans les aquifères littoraux ou bien, en dernier lieu, hérité d'eau de mer fossile capturée soit sous la forme d'évaporites dans les sédiments côtiers soit au sein des laves mises en place en contexte sous-marin et aujourd'hui émergées.

L'Indice ieb calculé est reporté sur l'illustration 10. Il varie de manière importante et notamment dans le secteur nord de l'île où il s'éloigne de la valeur de référence. En majorité cet Indice est supérieur à cette valeur de référence (0,8769), et décrit systématiquement un **enrichissement en sodium** par rapport aux chlorures, enrichissement qui pourrait être lié aux interactions eau/roche (temps de résidence important des eaux au contact des formations géologiques et/ou apports d'eaux d'origine hydrothermale).

Lorsque l'ieb est inférieur à la valeur guide, il ne traduit pas d'enrichissement en chlorure des eaux analysées mais d'avantage une minéralisation faible liée à un impluvium élevé, abrité des apports par les embruns marins. En effet, l'ion Cl^- est présent en faible proportion dans les lithologies locales (absence de lithologies évaporitiques).

Pour les eaux souterraines ne présentant pas un enrichissement significatif en Na et dont l'Indice ieb reste voisin de celui de l'eau de mer, les concentrations en Na et Cl s'expliquent potentiellement soit par la contribution d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie (embruns marins) soit de l'eau de mer. De plus, **l'apport d'éléments dissous provenant des embruns marins par l'eau de pluie est d'autant plus important que la distance à la mer est faible**. Cette relation est illustrée en comparant la concentration en chlorures et la distance à l'océan (Illustration 11) d'une part et l'altitude du point (Illustration 12) d'autre part, pour les points où l'Indice échange base est conforme à celui de l'eau de mer.

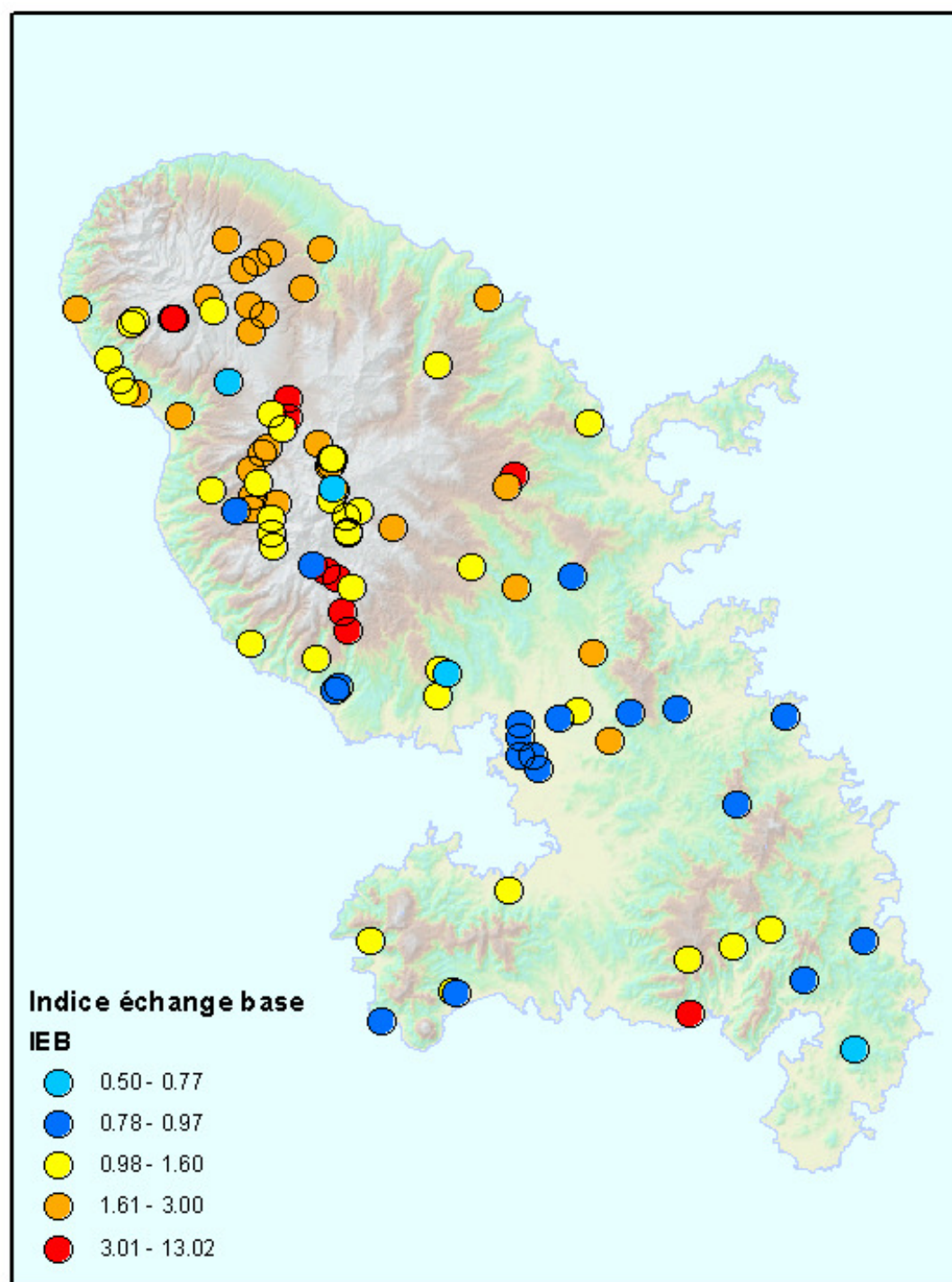


Illustration 10 : Indice échange base calculé pour la Martinique

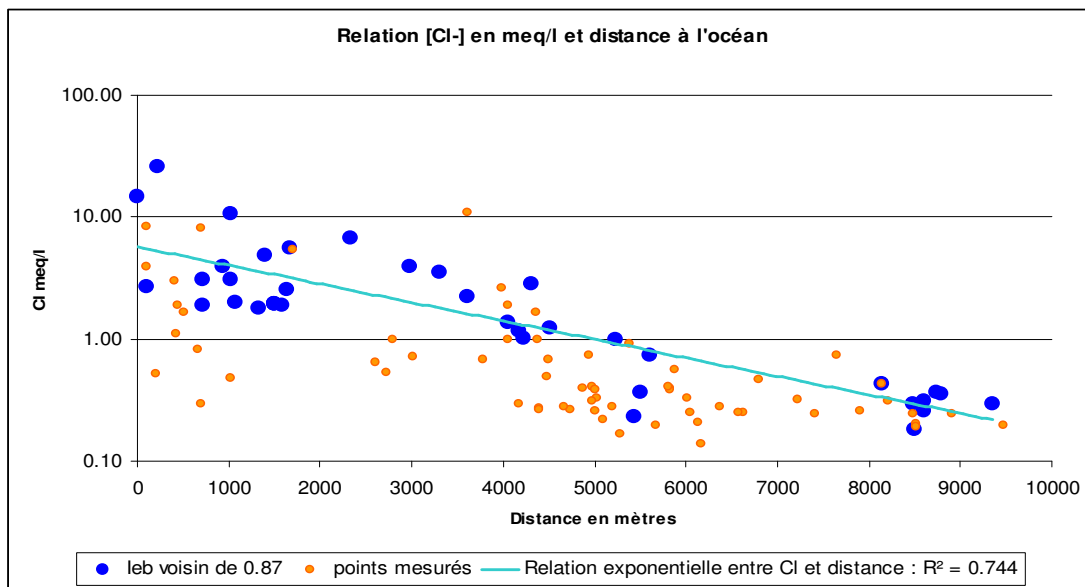


Illustration 11 : Relation entre la concentration en Cl et la distance à l'océan

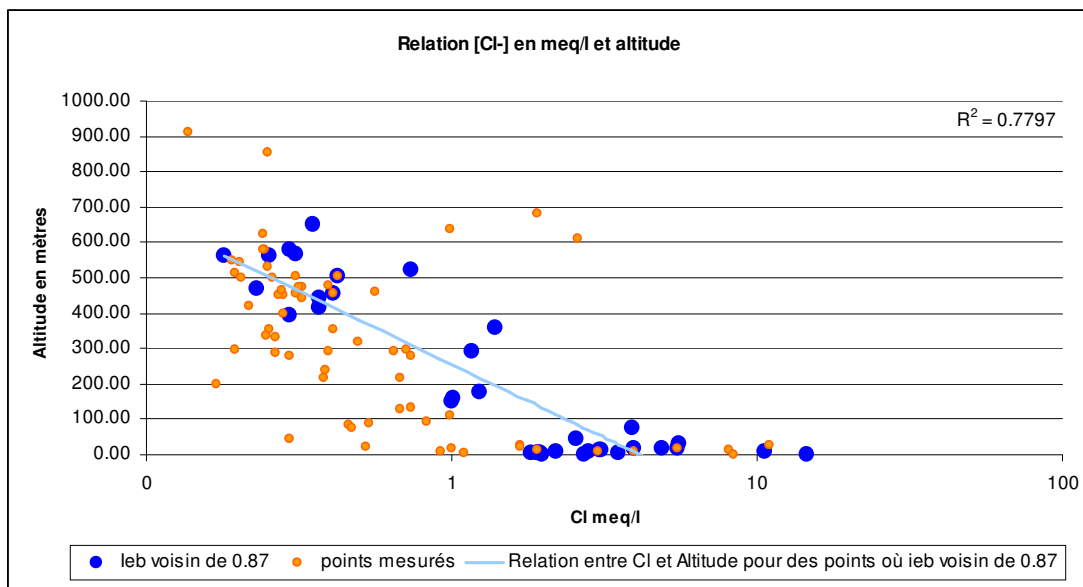


Illustration 12 : Relation entre la concentration en Cl et l'altitude du point

3.1.5. Rapports élémentaires

Nous avons précédemment mis en évidence l'importante influence de la lithologie sur la composition chimique des eaux souterraines. Or pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, un effet dilution-concentration peut aboutir à des compositions chimiques très différentes.

Afin de s'affranchir de ces effets, de nombreux auteurs proposent de normaliser les différents éléments chimiques par rapport au sodium (Négre et al., 1993 ; Gaillardet et al., 1997 et 1999). Le sodium, couramment utilisé comme élément de référence, provient essentiellement de la dissolution d'aluminosilicates sodiques et avec un degré moindre de la dissolution d'évaporites. Ainsi sur un diagramme binaire, la droite de dilution correspondant à une lithologie donnée se rapporte à un point.

Le ratio Mg/Na est reporté en fonction du ratio Ca/Na sur l'illustration 13. Sur un tel diagramme, le mélange entre 2 pôles, sources d'éléments dissous, est représenté par une droite car le même élément (Na) est utilisé pour la normalisation. Sur l'illustration 13, les points présentent une tendance positive vers les rapports molaires Ca/Na et Mg/Na élevés. L'eau de pluie et l'eau de mer présentent des rapports Ca/Na (respectivement 0,05 et 0,02) et Mg/Na (respectivement 0,11 et 0,10) faibles et relativement similaires.

Sur l'illustration 13, plusieurs groupes de points se dégagent :

- **Des eaux souterraines avec des rapports Ca/Na et Mg/Na élevés, respectivement supérieurs à 0,3 et 0,5, s'approchant du pôle lithologique local** : les points Morne Pitault (Indice BSS : 1179ZZ0282, Lamentin), la Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe), Vert Pré (Indice BSS : 1175ZZ0106, Gros Morne), Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain), Chalvet (Indice BSS : 1166ZZ0026, Basse Pointe), Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) et La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote).
- **Des eaux souterraines avec des rapports Ca/Na et Mg/Na proches du pôle défini par l'eau de mer** : le point stade communal (Indice BSS : 1115ZZ0120, Sainte Luce), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois îlets), Fond Laillet (Indice BSS : 1173ZZ0082, Bellefontaine) et Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006 ; Marigot).
- Les autres points échantillonnés lors de la campagne d'avril 2006 présentent des rapports molaires intermédiaires entre ces 2 groupes de points.

Le/(un des) pôle(s) lithologique(s) local présente vraisemblablement des rapports molaires Ca/Na et Mg/Na respectivement supérieurs à 1 et 0,6.

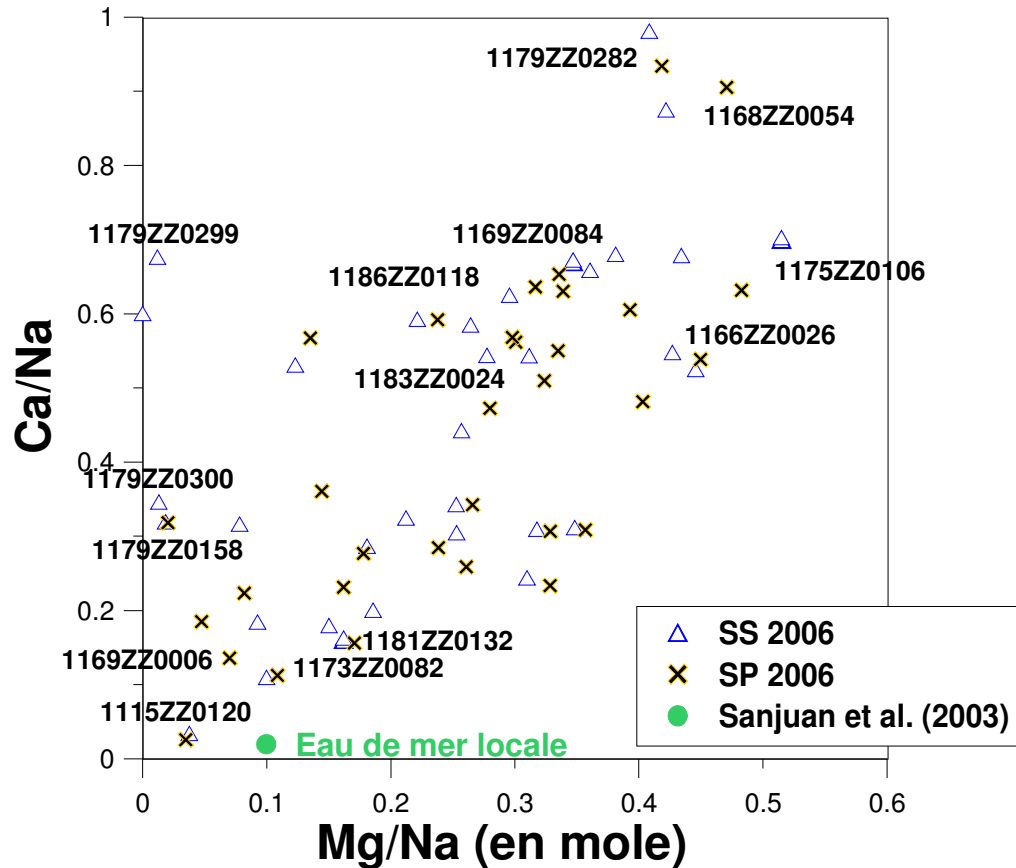


Illustration 13 : Ca/Na vs. Mg/Na pour les eaux souterraines (en mole). SS 2006 : avril 2006, saison sèche ; SP 2006 : novembre 2006, saison des pluies.

L'utilisation de la géochimie dite «classique » reste limitée pour identifier l'origine des éléments dissous. Pour aller plus loin, les informations fournies par les analyses des éléments majeurs et traces ont été croisées à l'analyse des isotopes H et O de la molécule d'eau et les isotopes du Sr et du B des eaux souterraines. Les traceurs isotopiques retenus pour cette étude associent :

- des traceurs d'interaction eau-roche,
- des traceurs de mélange,
- des traceurs d'origine des eaux (recharge),
- des traceurs de processus...

Chaque traceur mis en œuvre couvrant une ou plusieurs de ces caractéristiques. L'association de ces outils avec leurs propriétés respectives permettra d'améliorer la connaissance sur les eaux souterraines de la Martinique.

3.2. CARACTERISATION DES RESERVOIRS : ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU ($\delta^{18}\text{O}$ ET $\delta^2\text{H}$)

En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées. L'histoire hydroclimatique d'un aquifère peut donc être reconstituée par l'abondance des isotopes stables lourds de l'oxygène (^{18}O) et de l'hydrogène (^2H) dont les signatures correspondent à des environnements et des épisodes hydroclimatiques spécifiques, ou des altitudes de recharge différentes. Sous certaines conditions (faible rapport eau/roche, temps de résidence long, température élevée du réservoir, échange avec CO_2 , évaporation, ...), les interactions eau/roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau.

Les variations de concentrations en isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène, traceurs intimes de la molécule d'eau, obéissent à certaines lois. Lors des changements de phases (condensation, évaporation, passage phase liquide-phase solide), des fractionnements isotopiques entre les diverses molécules se réalisent ; ceux-ci sont dépendants de la température. Ainsi la composition isotopique des eaux météoriques varie en fonction de paramètres géographiques ou paléogéographiques : latitude, altitude, saison, période climatique.

Afin de connaître les relations entre aquifères et les relations aquifères/eaux superficielles, les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, traceurs de la molécule d'eau, sont analysés. La mesure de ces deux signatures isotopiques permet la comparaison par rapport à la fonction d'entrée, c'est-à-dire par rapport à la droite météorique locale. **Il est ainsi possible de voir si les eaux de l'aquifère ont été modifiées par échange ou mélange avec des eaux extérieures au système.**

La mesure de ces deux traceurs est indispensable pour détecter les phénomènes d'évaporation et déterminer l'origine des eaux. Les signatures isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des eaux continentales (e.g. les eaux de rivières et les eaux souterraines) sont contrôlées par trois phénomènes qui sont (1) les précipitations, (2) l'évaporation et (3) les mélanges d'eau.

Les compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux souterraines, mesurées pour les campagnes de prélèvement d'avril 2006 (saison sèche) et de novembre 2006 (saison des pluies), sont respectivement comprises entre -14,6 à -5,3‰ et entre -3,0 à -1,8‰. Ces données sont compatibles avec les valeurs mesurées pour des eaux souterraines issues de sources géothermiques en Martinique ($\delta^2\text{H} = -10,3$ à $-4,3$ ‰ et $\delta^{18}\text{O} = -3,0$ à $-1,8$ ‰ ; Lopoukhine et Mouret, 1977) et notamment sur la plaine du Lamentin ($\delta^2\text{H} = -10,6$ à $-6,7$ ‰ et $\delta^{18}\text{O} = -2,8$ à $-1,3$ ‰ ; Fabriol et Ouzounian, 1985), et dans le massif des Pitons du Carbet (Source Médaille, Source Agathe et Source Didier : $\delta^2\text{H} = -6,2$ à $-3,9$ ‰ et $\delta^{18}\text{O} = -3,4$ à $-2,9$ ‰ ; Chery, 1994).

La droite météorique locale de compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ n'a pas été décrite pour la Martinique. Cependant en Guadeloupe, île de contextes géographique et climatique similaires à ceux de la Martinique, la droite d'équation $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 16$ a été définie pour les pluies (Benauges, 1981). Plus éloigné de la Martinique, en Guyane, Négrel et al. (1997) décrit une droite météorique locale d'équation $\delta^2\text{H} = 7,7\delta^{18}\text{O} + 10,4$ pour les précipitations collectées à Cayenne.

Sur le diagramme représentant $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (Illustration 14), la majorité des points se répartissent entre la droite météorique globale (GMWL ; Craig, 1961) et les droites météoriques locales (LMWL) les plus proches décrites par Benauges (1981) pour la Guadeloupe et Négrel et al. (1997) pour la Guyane. Ceci traduit une **origine majoritairement météorique pour les eaux souterraines en l'absence d'évaporation significative**. Les gammes de compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurées sont comprises entre les valeurs moyennes des eaux de pluies mesurées aux stations GNIP (Global Network of Isotopes in précipitations ; <http://isohis.iaea.org/>) les plus proches (Porto Rico et Panama).

Ces données montrent que les compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines n'ont pas été significativement modifiées lors de la circulation en profondeur, ni par échanges gazeux, ni par évaporation au cours de l'infiltration, ni par échange entre l'oxygène des eaux d'infiltration et l'oxygène des minéraux des roches traversées au cours du transfert. Ainsi **les eaux souterraines étudiées** dans le cadre de cette étude **ne sont pas affectées** de manière significative **ni par les phénomènes géothermiques ni par l'évaporation**.

Les points Habitation Dizac (Indice BSS : 1184ZZ0016, Diamant) ($\delta^2\text{H} = -14,6$ et $\delta^{18}\text{O} = -3,6$) et Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Sainte Luce) ($\delta^2\text{H} = -13,4$ et $\delta^{18}\text{O} = -2,9$) présentent les compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ les plus basses, à l'opposé les points de Indice BSS 1181ZZ0132 ($\delta^2\text{H} = -5,3$ et $\delta^{18}\text{O} = -1,8$) et 1167ZZ0024 ($\delta^2\text{H} = -6,9$ et $\delta^{18}\text{O} = -2,4$) présentent les valeurs les plus élevées.

Ces disparités de valeurs pour les eaux souterraines sont susceptibles de rendre compte de **différences dans les périodes de recharge** de ces aquifères. En effet Benauges (1981) décrit pour la Guadeloupe de fortes variations saisonnières des signatures isotopiques H et O des pluies, signatures plus appauvries en période d'hivernage (période pluvieuse de septembre à novembre) et plus enrichies en carême (janvier à mars).

Ces disparités peuvent également correspondre à des **altitudes de recharge différentes** de ces aquifères. Le gradient de variation des compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de pluie en fonction de l'altitude n'a pas été établi pour la Martinique. Les gradients $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de l'altitude documentés dans la littérature pour des îles volcaniques en contexte océanique sont les suivants : $-0,7\text{‰/km}$ pour Tahiti (Hidenbrand et al., 2005), $-1,2\text{‰/km}$ pour la Réunion (Grünberger, 1989). Cependant en raison de l'absence de connaissance du gradient local de variation de composition isotopique des eaux de pluie en fonction de l'altitude et de la forte amplitude saisonnière de composition isotopique des eaux de pluies, il est délicat d'estimer de manière fiable l'altitude de recharge des eaux souterraines.

D'autre part, compte tenu des valeurs obtenues pour l'eau de mer ($\delta^2\text{H} = +9,8$ et $\delta^{18}\text{O} = +0,9$; Sanjuan et al., 2003), **il semble envisageable que les points présentant les signatures isotopiques en H et O les plus élevées puissent intégrer de l'eau de mer**. Cette dernière hypothèse sera discutée par la suite en s'appuyant sur les signatures isotopiques en Sr et B de ces eaux, traceurs de l'origine des éléments dissous.

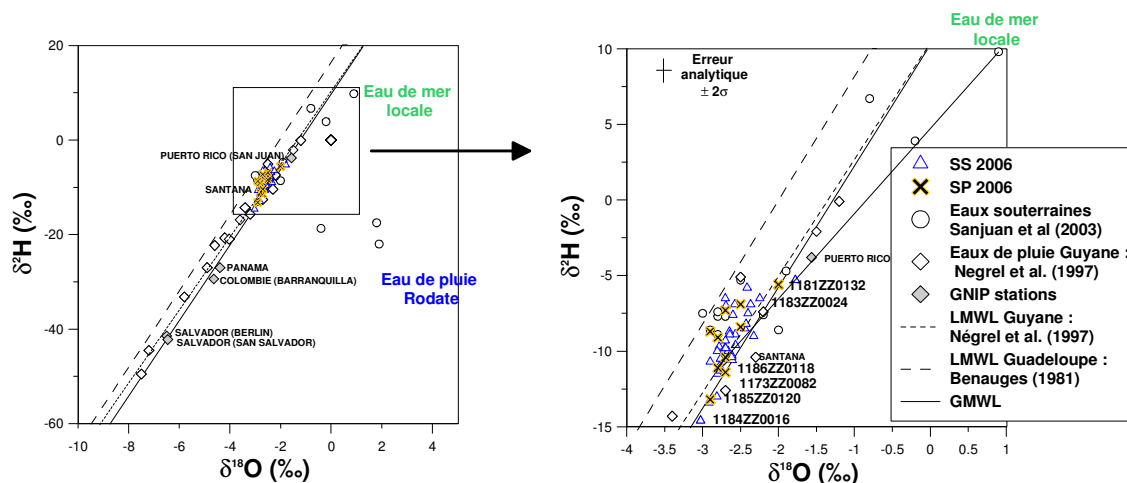


Illustration 14 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, LMWL Guyane et Guadeloupe : droite météorique locale calculée pour les eaux de pluie de la Guyane et de la Guadeloupe ; GMWL : droite météorique mondiale. SS 2006 : campagne de prélèvement d'avril 2006, saison sèche ; SP 2006 : campagne de prélèvement de novembre 2006, saison des pluies.

3.3. CARACTERISATION DES APPORTS D'EAU ET D'ELEMENTS DISSOUS

3.3.1. Isotopes du strontium

Le rapport isotopique en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'une eau est lié à celui du minéral ou à des associations minéralogiques avec lesquelles le fluide a interagi. Lors des phénomènes d'interaction eau-roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la fraction de Sr libéré sera différent de la roche totale et typique du ou des minéraux altérés (et ceci en liaison avec la "résistance" des minéraux vis-à-vis de l'agressivité du fluide).

Les variations isotopiques observées dans les fluides peuvent être issues du mélange de Sr de compositions isotopiques différentes provenant de différentes sources. Ainsi, dans le cas simple où deux sources de rapport isotopique ou chimique différents sont présentes, la composition du mélange peut être déterminée. Les variations du rapport isotopique du Sr dans un hydrosystème peuvent ainsi donner des informations sur (1) la nature et l'intensité des processus d'interaction eau/roche liés notamment à l'altération et à l'érosion ainsi que sur (2) l'origine et les proportions de mélange du Sr dissous provenant de différents réservoirs hydriques (eaux souterraines/ eaux de surface).

La gamme de variation de composition isotopique en Sr décrite par les eaux souterraines pour les campagnes de prélèvement d'avril 2006 (saison sèche) et de novembre 2006 (saison des pluies) est significative : le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varie de 0,70432 à 0,70832.

Les valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesurées dans cette étude pour les eaux souterraines sont compatibles avec les valeurs obtenues dans des études antérieures pour les eaux souterraines (0,70423-0,70914 ; Sanjuan et al., 2003 ; Rad et al., 2007) et pour les eaux de rivière (0,70413-0,70553 ; Sanjuan et al., 2003 ; Rad et al., 2007) de la Martinique. Par ailleurs les compositions isotopiques en Sr des eaux souterraines sont également compatibles avec les signatures isotopiques des roches volcaniques de la Martinique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70413$ à $0,70585$ pour des basaltes ; Davidson, 1986), des petites Antilles du Nord ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70325$ à $0,70485$; White et Dupré, 1986) et la gamme obtenue après compilation de l'ensemble des données sur les îles des petites Antilles réalisée par Williams (2000) ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,703$ à $0,715$). En l'absence de données locales pour la signature isotopique en Sr des eaux de pluie nous nous appuyerons par la suite sur les données obtenues pour des eaux de pluie côtières en Guadeloupe près du dôme de la Soufrière, à l'intérieur des terres (0,70882 à 0,70929 ; Rad et al., 2007) dans les Açores et à la Réunion (0,70887 et 0,70901 ; Négrel, données non publiées). Les concentrations en Sr pour les eaux de pluie côtières en Guadeloupe documentées par Rad et al. (2007) sont comprises entre 0,021 et 1,2 $\mu\text{mol.L}^{-1}$.

Sur le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $1/\text{Sr}$ (Illustration 15), **les eaux souterraines** prélevées lors de la campagne d'avril et de novembre 2006 **se répartissent globalement au sein d'un triangle** dont les pôles sont caractérisés par (1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé et teneur en Sr élevée, (2) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ faible et teneur en Sr élevée et (3) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé et teneur en Sr faible. **Le pôle (1) est représenté par l'eau de mer locale** caractérisée par Sanjuan et al. (2003), le pôle (2) est représenté par le point d'Indice BSS 1169ZZ0084 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70441$ et $0,70432$) et le **pôle (3)** semble correspondre à la contribution en Sr provenant de l'**eau de pluie** : en effet à la fois les concentrations et les compositions isotopiques en Sr attendues pour ce pôle sont compatibles avec les valeurs documentées pour les eaux de pluies de la Guadeloupe par Rad et al. (2007).

Le point Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain) présente les signatures isotopiques en Sr les plus basses ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70441$ et $0,70432$), compatibles avec une origine lithologique d'après l'illustration 13. Par ailleurs sur l'illustration 13, les points les plus influencés par les interactions eau-roche (les points d'indices BSS : 1168ZZ0054 et 1175ZZ0106) présentent des compositions isotopiques également très basses (respectivement $0,70443$ et $0,70485$). Ainsi le **pôle (2)** identifié sur l'illustration 15 semble correspondre à une **source de Sr d'origine lithologique**.

Le point Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) présente des signatures isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,707990$ et $0,70832$) proches de celles de l'eau de mer. Ainsi ce point intègre vraisemblablement du Sr majoritairement d'origine marine via le mélange des eaux souterraines avec de l'eau de mer au niveau du biseau salé. Cependant il est également possible que la signature isotopique en Sr de ce point puisse être expliquée par une origine uniquement lithologique (interaction eau-roche). En effet les valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ observées ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70799$ et $0,70832$) sont compatibles avec la gamme de valeurs documentée pour les roches volcaniques locales ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,703$ à $0,715$; Williams, 2000). Par ailleurs bien que la présence de roches carbonatées ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,709$ pour des roches carbonatées d'âge Miocène, DePaolo, 1986) soit anecdotique à l'échelle de la Martinique, il est possible que la dissolution de ces lithologies puisse contrôler localement la composition isotopique en Sr des eaux souterraines. L'une et l'autre de ces interprétations seront discutées par la suite en s'appuyant sur d'autres traceurs de l'origine des éléments dissous, notamment les isotopes du B.

Sur l'illustration 15, le point Sarrault (Indice BSS : 1179ZZ0158, Lamentin) présente les concentrations les plus faibles en Sr ($0,077$ et $0,070 \mu\text{mol.L}^{-1}$) pour une signature isotopique en Sr intermédiaire ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70586$ et $0,70514$). Ce point semble donc intégrer, en plus du Sr d'origine lithologique, une proportion non négligeable de Sr provenant de l'eau de pluie. Parmi toutes les eaux souterraines analysées pour les isotopes du Sr, le point Sarrault présente proportionnellement la contribution de Sr la plus importante provenant des aérosols marins via les eaux de pluie. Par ailleurs le point Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce) présente également des concentrations en Sr ($0,24$ à $0,41 \mu\text{mol.L}^{-1}$) et des signatures isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70622$ et $0,70792$) qui témoignent d'une contribution non négligeable de Sr provenant de l'eau de pluie (Illustration 15).

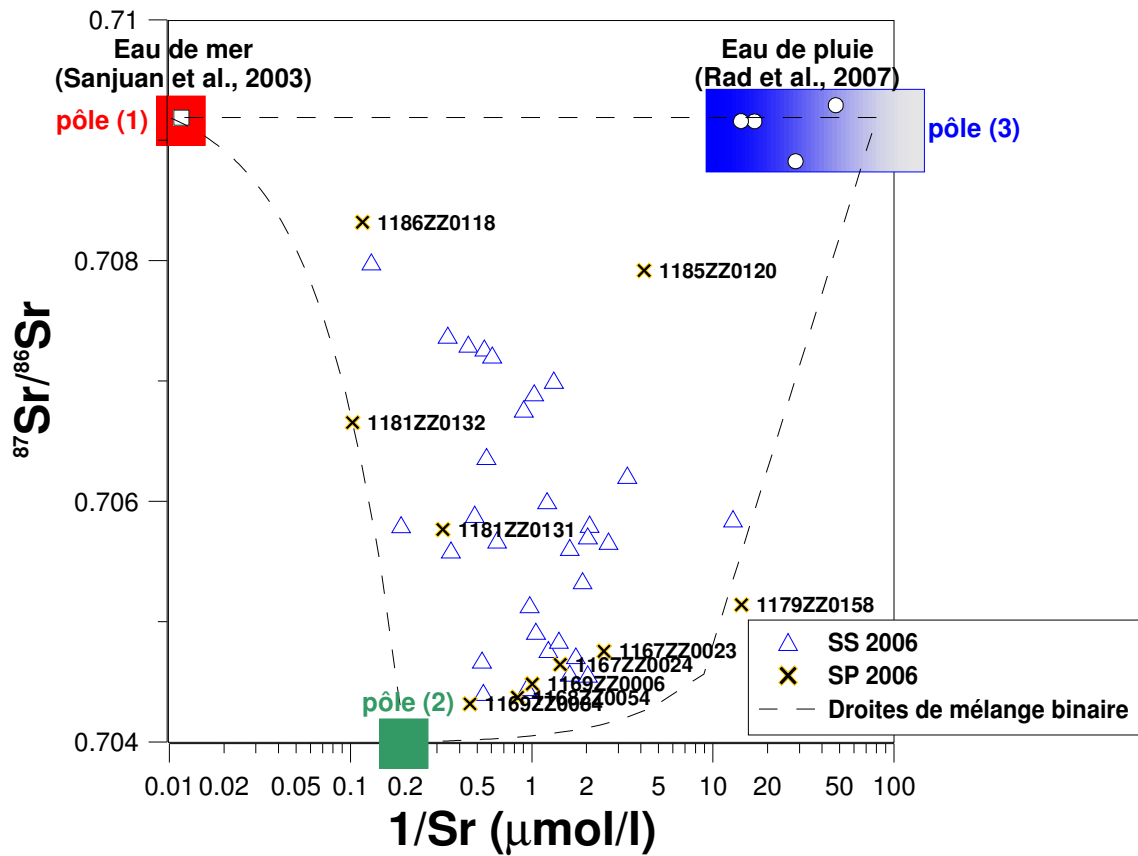


Illustration 15 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$, SS : saison sèche, SP : saison des pluies.

3.3.2. Isotopes du bore

La grande différence relative de masse entre les deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B du bore, ainsi que la forte réactivité géochimique de cet élément entraînent un fractionnement isotopique naturel du B de l'ordre de 90 unités delta (Barth, 1993). Les données bibliographiques disponibles donnent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus basses (-30‰) pour des évaporites non-marines, tandis que le réservoir le plus enrichi en ^{11}B est représenté par les saumures des lacs salés d'Australie et par la Mer Morte en Israël ($\delta^{11}\text{B}$ jusqu'à +59‰). Les eaux de mer présentent une valeur de $\delta^{11}\text{B}$ mondialement constante de l'ordre de +39,5‰.

Les compositions isotopiques en B permettent également d'étudier les interactions eau-roche comme l'altération des silicates (Barth, 2000). Barth (2000) a montré que les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ dans les eaux lessivant des roches mères cristallines ont la même gamme de composition isotopique que ces roches. Dans les roches silicatées crustales, les phases porteuses présentant les teneurs les plus significatives en B sont les tourmalines et les micas (Palmer et Slack, 1989 ; Mossadik, 1997). Les compositions isotopiques en B des tourmalines d'origine ignée sont comprises entre -17 et -5‰ (Swihart et Moore, 1989 ; Trumbull et Chaussidon, 1999). Par ailleurs les

valeurs attendues pour la croûte continentale sont également basses (Barth, 1993). Les isotopes du B ont été appliqués avec succès dans le cas des systèmes géothermiques pour tracer l'origine des eaux et les mélanges entre plusieurs réservoirs (Bassett et al., 1995 ; Casanova et al., 2001 ; Kloppmann et al., 2001).

Les apports anthropiques peuvent également constituer une source importante de B pour les eaux naturelles (Komor, 1997 ; Mossadik, 1997 ; Vengosh, 1998). D'après la littérature les rejets urbains type eaux usées ont une composition isotopique $\delta^{11}\text{B}$ comprise entre -5‰ et 12‰ et les engrais minéraux entre -8‰ et 15‰ (Widory et al., 2004 ; Kloppmann et al., 2005). Ainsi la composition isotopique en B des eaux souterraines, des eaux issues d'eaux résiduaires urbaines ou d'eau de drainage agricole, par exemple, peuvent présenter des signatures très contrastées.

La composition isotopique en B des eaux de pluie côtières n'est pas encore bien contrainte, cependant les quelques études existantes ($\delta^{11}\text{B}=30,5\text{-}45\text{‰}$; Chetelat et al., 2005 pour la plaine côtière en Guyane ; $\delta^{11}\text{B}=38\text{‰}$, Casanova et al. (1999) pour un hydrosystème côtier du Sultanat d'Oman ; $\delta^{11}\text{B}=38\text{‰}$ pour Brest, Millot et al. données non publiées) décrivent pour l'eau de pluie une composition isotopique en B proche de celle de l'eau de mer ($\delta^{11}\text{B}=+39,5\text{‰}$) traduisant une contribution majoritaire d'aérosols marins. Ainsi, compte tenu de la situation insulaire de la zone d'étude, nous considérerons que la signature isotopique en B des précipitations locales est identique à celle de l'eau de mer. Les teneurs en B des pluies côtières prélevées en Guyane, données disponibles les plus proches et correspondant à un contexte géographique proche à la Martinique, sont comprises entre $3,5\text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ et $14\text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ (Chetelat et al., 2005). Les signatures isotopiques en B pour les roches volcaniques documentées dans la littérature décrivent des valeurs faibles ($\delta^{11}\text{B}=-3$ à 0‰ pour des roches volcaniques en Italie ; Tonarini et al., 2001 ; Leeman et al., 2005).

Les eaux souterraines de la Martinique peuvent également intégrer du B d'origine anthropique. La gamme de composition isotopique en B décrite dans la littérature pour les engrais minéraux, amendements agricoles majoritaires pour le territoire de la Martinique, est de $\delta^{11}\text{B}=-8$ à 15‰ (Widory et al., 2004 ; Kloppmann et al., 2005).

Les compositions isotopiques en B mesurées pour les eaux souterraines prélevées en avril 2006 (saison sèche) sont comprises entre -3,8 et 37,9‰ et décrivent ainsi une large gamme de variation. Sur le diagramme $\delta^{11}\text{B}$ versus $1/\text{B}$ (Illustration 16a), les eaux souterraines se répartissent globalement au sein d'un triangle dont les pôles sont caractérisés par (1) $\delta^{11}\text{B}$ élevé et teneur en B élevée, (2) $\delta^{11}\text{B}$ faible et teneur en B élevée et (3) $\delta^{11}\text{B}$ élevé et teneur en B faible.

Le pôle (1) correspond à une composition isotopique $\delta^{11}\text{B}$ proche de 38‰ et des concentrations en B élevées ($>20\text{ }\mu\text{mol.L}^{-1}$) (Illustration 16a). Ces concentrations sont significativement supérieures à celles attendues pour les eaux de pluie ($0,04\text{-}0,14\text{ }\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour la Guyane ; Chetelat et al., 2005) ce qui suggère que ce pôle **correspond** à une contribution de B provenant de l'eau de mer via l'influence du biseau salé. Le point Anse d'Arlet (Indice BSS : 1181ZZ0131 ; Grande Anse) présente la composition isotopique en B la plus élevée observée ($\delta^{11}\text{B}=37,9\text{‰}$) associée à des concentrations relativement élevées en B (6 à $12\text{ }\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour l'ensemble des

campagnes réalisées par le BRGM). De plus sur l'illustration 9b, ce point se trouve sur la droite de dissolution de l'eau de mer. Ces résultats suggèrent que les eaux souterraines de ce point aient interagi avec le biseau salé et que ces eaux intègrent une proportion importante d'éléments dissous provenant de l'eau de mer.

Le pôle (2) est représenté par le point Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006 ; Marigot) qui présente la composition isotopique en B la plus basse observée ($\delta^{11}\text{B} = -3,8\text{‰}$) pour des concentrations élevées en B (25 à 73 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour l'ensemble des campagnes réalisées par le BRGM) (Illustration 16a). Les points Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois Ilets) et Rivière Blanche (Indice BSS : 1167ZZ0023, Saint Pierre) présentent également des compositions isotopiques en B faibles ($\delta^{11}\text{B} = 1,4$ et $4,7\text{‰}$) pour des concentrations en B élevées (11 à 28 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour l'ensemble des campagnes réalisées par le BRGM). Ces trois points présentent les concentrations les plus élevées en B ($>10 \mu\text{mol.L}^{-1}$) par rapport à l'ensemble des points considérés dans cette étude, un fort enrichissement en B par rapport aux chlorures (Illustration 9b) et des signatures isotopiques en B qui suggèrent **soit** la contribution de B **d'origine lithologique soit d'origine anthropique**.

En effet la gamme de composition isotopique en B mesurée pour les eaux souterraines est compatible à la fois avec la contribution de B provenant de l'altération de roches volcaniques ($\delta^{11}\text{B} = -3$ à 0‰ , Tonarini et al., 2001 ; Leeman et al., 2005) et du lessivage d'engrais minéraux ($\delta^{11}\text{B} = -8$ à 15‰ , Widory et al., 2004 ; Kloppmann et al., 2005). Malgré des concentrations en nitrates relativement faibles ($<45 \mu\text{mol.L}^{-1}$) pour ces trois points, des concentrations élevées en produits phytosanitaires ont été mesurées pour le point Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006, Marigot). Ainsi une contribution anthropique pour ce point peut être privilégiée.

Le pôle (3) correspond à une composition isotopique $\delta^{11}\text{B}$ proche de 38‰ et des concentrations en B faibles ($<2 \mu\text{mol.L}^{-1}$) (Illustration 16a). Ce pôle est compatible avec la contribution de B provenant des aérosols marins via les eaux de pluies ($\delta^{11}\text{B} = 30,5$ à 45‰ et $[\text{B}] = 0,04$ à $0,14 \mu\text{mol.L}^{-1}$ pour les eaux de pluies prélevées en Guyane ; Chetelat et al., 2005). Les points Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054 ; Basse Pointe) et Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084 ; Lorrain) présentent les concentrations en B les plus faibles ($1,8$ à $2,4 \mu\text{mol.L}^{-1}$) observées pour l'ensemble des points considérés dans cette étude. Associées à ces faibles concentrations en B, les compositions isotopiques en B ($\delta^{11}\text{B} = 24,7$ et $31,9\text{‰}$) mesurées pour ces deux points suggèrent une contribution majoritaire de B provenant de **l'eau de pluie**.

Les points Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024, Prêcheur), Sarrault (Indice BSS : 1179ZZ0158, Lamentin), Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce) et Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) présentent des concentrations et des signatures isotopiques en B intermédiaires entre ces trois pôles avec une contribution croissante du pôle (2) (eau de mer) en allant du point Rivière du Prêcheur au point Grand Fond (Illustration 16a).

Par ailleurs sur l'illustration 16b, on observe conjointement à l'augmentation de concentrations en Cl et Na, le positionnement des points de plus en plus proches de la droite de dilution de l'eau de mer en allant du point Rivière du Prêcheur (Indice BSS : 1167ZZ0024) au point Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118). Ceci est également observé pour l'ensemble des campagnes de prélèvement du BRGM.

Ce résultat est compatible avec un **enrichissement progressif de ces points en éléments dissous provenant de l'eau de mer**, vraisemblablement **via l'interaction de ces eaux souterraines avec le biseau salé**.

Les isotopes du B permettent donc clairement d'écarter l'hypothèse d'une origine lithologique, précédemment évoquée pour expliquer les signatures isotopiques en Sr élevées ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0,707$) observées pour les eaux souterraines. Ainsi, à la fois la géochimie dite « classique » et l'approche de la géochimie isotopique (isotopes du B et Sr) supportent une origine des éléments dissous type « eau de mer » pour les points Anse d'Arlet (Indice BSS : 1181ZZ0131), Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118) et Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120). Par ailleurs ces résultats suggèrent que le pôle lithologique, correspondant au Sr mis en solution dans les eaux souterraines lors des interactions eau/roche volcanique, présente vraisemblablement une signature isotopique en Sr plus restreinte que la gamme de valeurs mesurées pour les roches avec une valeur proche de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,704$.

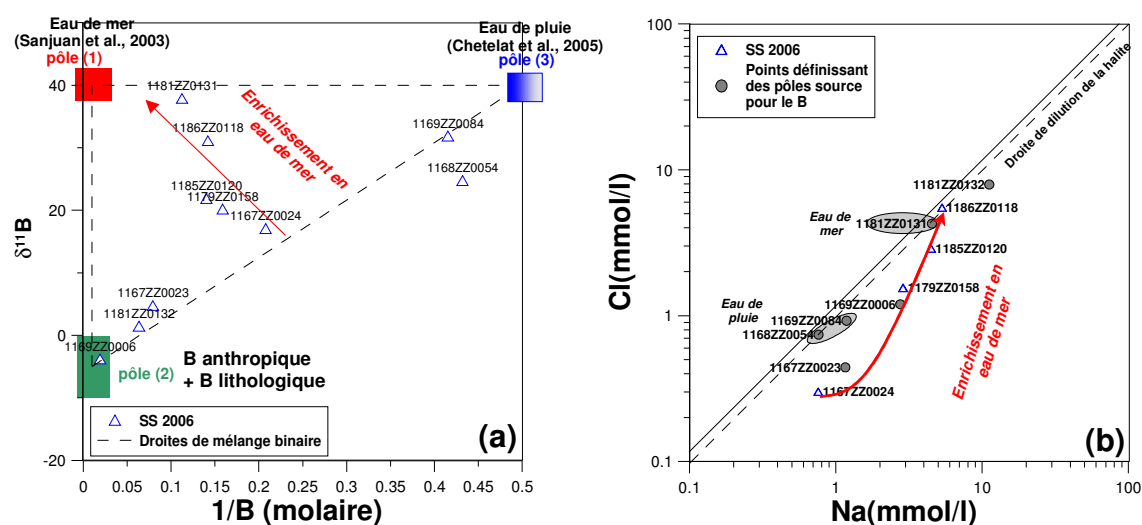


Illustration 16 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/\text{B}$ (a), Cl vs. Na (b) pour la campagne d'avril 2006 (saison sèche).

3.4. VARIATION DE SOURCE D'ÉLÉMENTS DISSOUS

L'analyse couplée de la géochimie élémentaire dite « classique » avec l'approche isotopique proposée dans cette étude a permis de mettre en évidence trois sources d'éléments dissous majoritaires pour les eaux souterraines sur le territoire de la Martinique : l'eau de pluie, la lithologie et l'eau de mer. Ces sources contrôlent de manière variable la composition chimique naturelle des eaux souterraines.

La géochimie élémentaire dite « classique », le calcul de l'Indice échange base (ieb) et sa valeur de référence obtenue pour l'eau de mer a permis de proposer une classification des eaux souterraines de la Martinique suivant la contribution plus ou moins importante des différentes sources d'éléments dissous identifiées (eau de pluie, interactions eau/roche et eau de mer) (cf. Illustration 17 et tableau en Annexe 2). L'enrichissement en sodium a été considéré comme un indice d'une accentuation des interactions eau/roche. La relation entre les concentrations en chlorures, la distance à l'océan et l'altitude du point, pour des rapports Na/Cl proches du rapport Na/Cl de l'eau de mer, traduit l'influence d'eaux souterraines ayant interagit avec les eaux du biseau salé (eau de mer actuelle) et/ou de l'eau de mer fossile.

Sur l'Illustration 18 et dans le tableau présenté en Annexe 2 sont reportées les origines majoritaires suivant l'un ou l'autre traceur. A titre d'exemple pour le point de Rivière Blanche (Indice BSS 1167XX0023, Saint Pierre) le Sr provient majoritairement de la lithologie (d'après les isotopes du Sr) alors que le B provient majoritairement des eaux de pluie (d'après les isotopes du B) (Annexe 2). Plusieurs origines d'éléments dissous sont donc possibles pour chaque point.

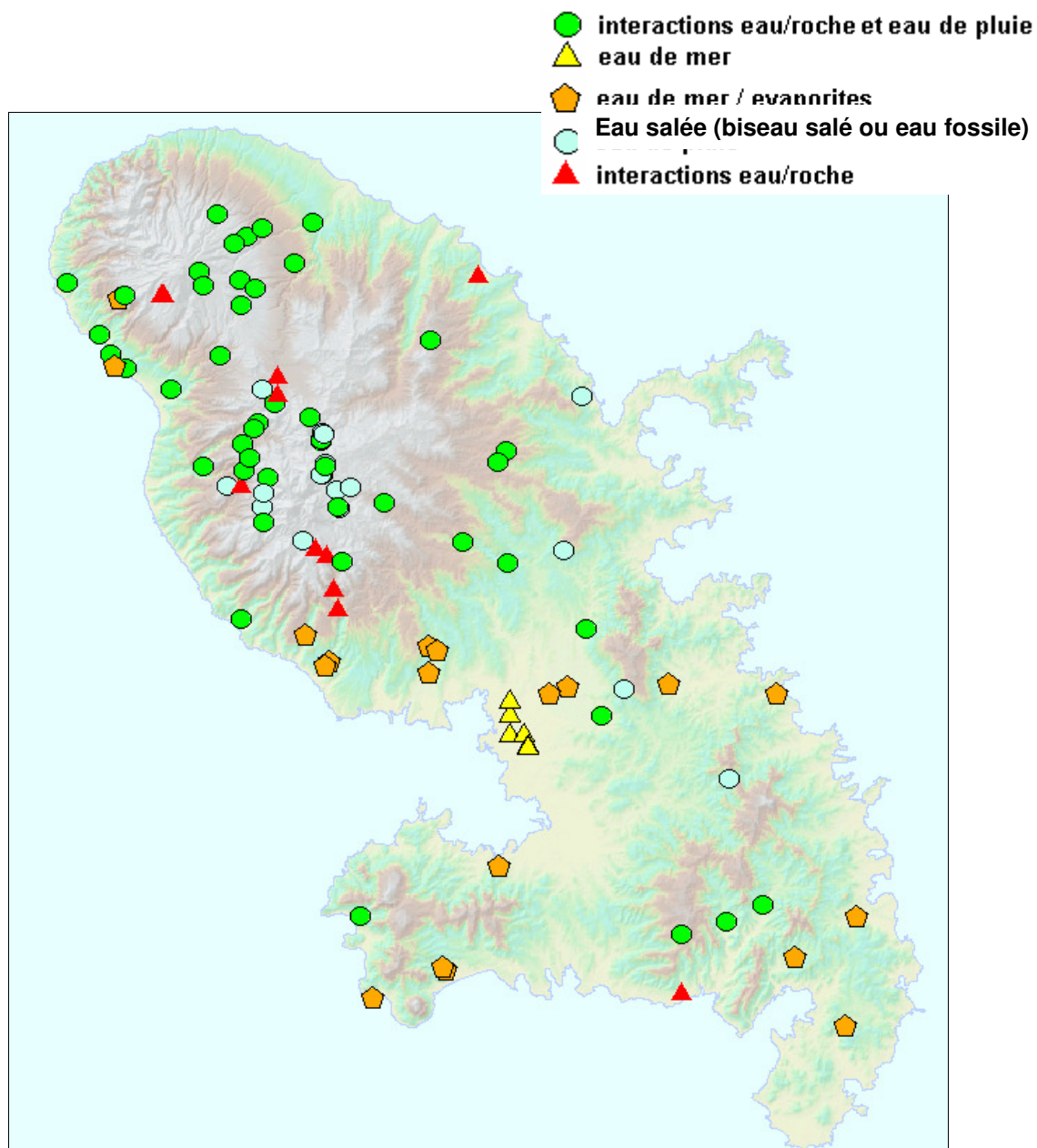


Illustration 17 : Carte de synthèse réalisée à partir de la géochimie « classique » et le calcul de l'Indice échange base (ieb) et présentant les points contrôlés majoritairement par une des trois sources d'éléments dissous : eau de pluie, interactions eau/roche et eau salée (voir également Annexe 2).

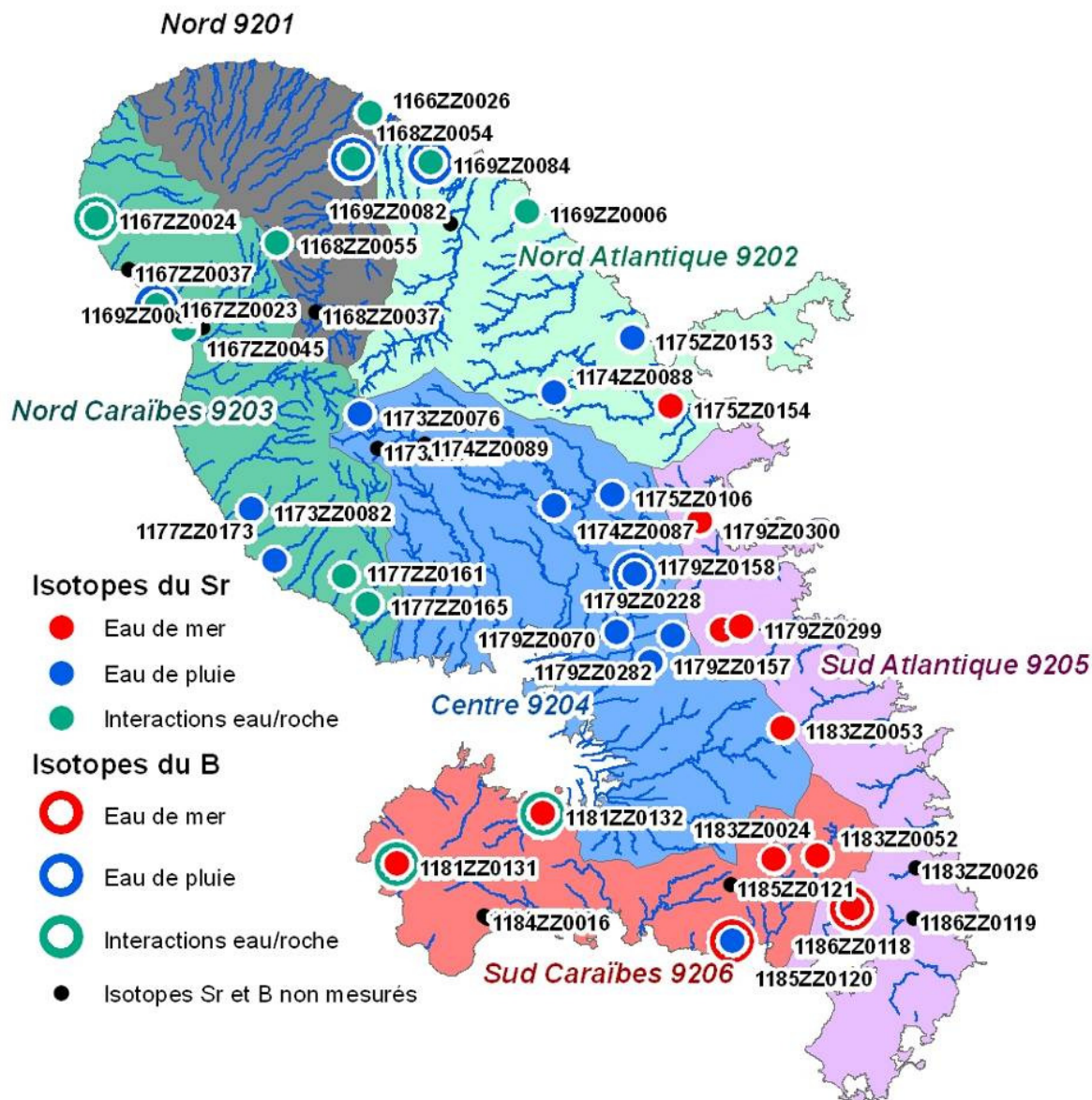


Illustration 18 : Carte de synthèse réalisée à partir de l'approche géochimique « classique » et isotopique présentant les points contrôlés majoritairement par une des trois sources d'éléments dissous : eau de pluie, interactions eau/roche et eau de mer (voir également Annexe 2).

3.4.1. Eau de pluie

L'eau de pluie a été identifiée comme une source majoritaire d'éléments dissous pour les eaux souterraines. Sur l'illustration 15 un certain nombre de points ont été identifiés comme présentant une importante proportion de Sr provenant de l'eau de pluie, notamment le point Sarrault (Indice BSS : 1179ZZ0158, Lamentin) mais également les points Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce) et La Charmille (Indice BSS : 1174ZZ0087, Saint Joseph).

Cependant, d'après les isotopes du B, le point stade communal (indice BSS 1185ZZ0120, Ste Luce) intègre également du B provenant de l'eau de mer (Illustration 16). Ce découplage entre les sources en Sr et les sources en B dissous sont également observées pour les points Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain) et Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe). En effet ces deux points présentent des signatures isotopiques en B (Illustration 16) traduisant clairement la contribution d'eau de pluie alors que les isotopes du Sr suggèrent une origine majoritairement lithologique pour le Sr (Illustration 15).

3.4.2. Lithologie

La seconde source d'éléments dissous correspond à la lithologie. De la même manière que la contribution d'eau de pluie, cette source a également pu être tracée par les isotopes du Sr et du B. Pour les points Anse Charpentier (Indice BSS 1169ZZ0006, Marigot) et Rivière Blanche (Indice BSS 1167ZZ0023, Saint Pierre) à la fois les compositions isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,705$) et les compositions isotopiques en B ($\delta^{11}\text{B} < 5\text{‰}$) sont compatibles avec une contribution majoritaire des éléments dissous provenant des roches volcaniques.

Pour les points Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain) et Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe), les compositions isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7045$) témoignent d'une origine lithologique du Sr. En revanche la signature isotopique en B de ces eaux souterraines (Illustration 16a) suggère que le B provient majoritairement des eaux de pluie et que les apports de B d'origine lithologique restent limités. Ces deux résultats ne sont pas incompatibles dans la mesure où la chimie de ces deux éléments peut être découplée. Les roches drainées qui apportent du Sr aux eaux souterraines des points Fond Brulé et Rivière Falaise libèrent probablement peu de B comparativement aux roches drainées par les eaux souterraines des points Anse Charpentier et Rivière Blanche.

Le point Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois Ilets) présente des signatures isotopiques en B ($\delta^{11}\text{B} = 1,4\text{‰}$) et en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70581$ et $0,70665$) qui pourraient également correspondre à une origine majoritairement lithologique pour ces éléments. Cependant ce point présente des signatures isotopiques en Sr intermédiaires par rapport aux autres points analysés dans le cadre de cette étude (Illustration 15), compatibles toutefois avec les signatures isotopiques des roches volcaniques de la Martinique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70413-0,70585$; Davidson, 1986) mais qui pourraient également correspondre à un mélange de Sr d'origine lithologique et d'origine anthropique. En effet la gamme de composition isotopique en Sr attendue pour les

engrais minéraux ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,708-0,709$; Vitoria et al., 2004) est compatible avec cette interprétation.

Les isotopes du Sr et du B se sont ainsi révélés être pertinents pour tracer l'origine lithologique des éléments dissous des eaux souterraines de la Martinique.

3.4.3. Eau de mer

La troisième source d'éléments dissous identifiée correspond à l'eau de mer. Les concentrations en Na et en Cl (Illustration 8a), les signatures isotopiques en Sr (Illustration 15) en B (Illustration 16a) ont permis de mettre en évidence clairement l'interaction des eaux souterraines d'une part avec le biseau salé et la contribution d'éléments dissous provenant d'eau salée. L'identification de cette contribution 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 pour lesquels le contrôle de l'eau salée sur la géochimie des eaux souterraines est le plus marqué sont :

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

3.5. VARIATION SPATIALE

Les variabilités spatiales de la pluviométrie, de la lithologie et les connections éventuelles des eaux souterraines avec le biseau salé sont susceptibles d'induire, à l'échelle de la Martinique, un contrôle variable des différentes sources d'éléments dissous identifiées (eau de pluie, lithologie et eau de mer) sur la géochimie des eaux souterraines.

3.5.1. Liée à la pluviométrie

La région nord atlantique constitue, du fait de son exposition aux vents dominants et des reliefs qui la composent, le secteur le mieux arrosé de la Martinique. La pluviométrie moyenne interannuelle est partout supérieure à 2000 mm et croît proportionnellement à l'altitude pour dépasser 5000 mm au droit des principaux reliefs. La cartographie simplifiée des intensités d'alimentation pluviométrique établie par Météo-France en 2003 (Comte et al., 2003) dégage le zonage suivant :

- Le nord de l'île enregistre des cumuls de l'ordre de 4 à 6 m/an avec une pluie répartie sur toute l'année.
- Le centre-est (Atlantique) est plus humide avec 1,5 à 2,5 m/an, que le Centre Ouest (Caraïbes) avec 1 à 3 m/an.
- Le sud de l'île ainsi que l'extrémité est de la Caravelle enregistrent des cumuls entre minimum de 1 m/an jusqu'à 1,8 m/an. L'alimentation de ces zones est donc relativement réduite.

Le facteur d'évaporation correspond à la différence entre la quantité d'eau précipitée (P en mm) et l'évaporation (E en mm) selon la formule $F_{ET} = P/(P-E)$. Ce facteur d'évaporation permet d'évaluer la part nette d'eau s'infiltrant vers la nappe. De plus il permet de calculer l'augmentation des concentrations en éléments dissous dans les eaux d'origine météorique après évaporation et avant infiltration vers les eaux souterraines. L'illustration 19 présente les disparités spatiales de ce facteur d'évaporation pour la Martinique calculé à partir des données de pluviométrie et d'évaporation de Météo France.

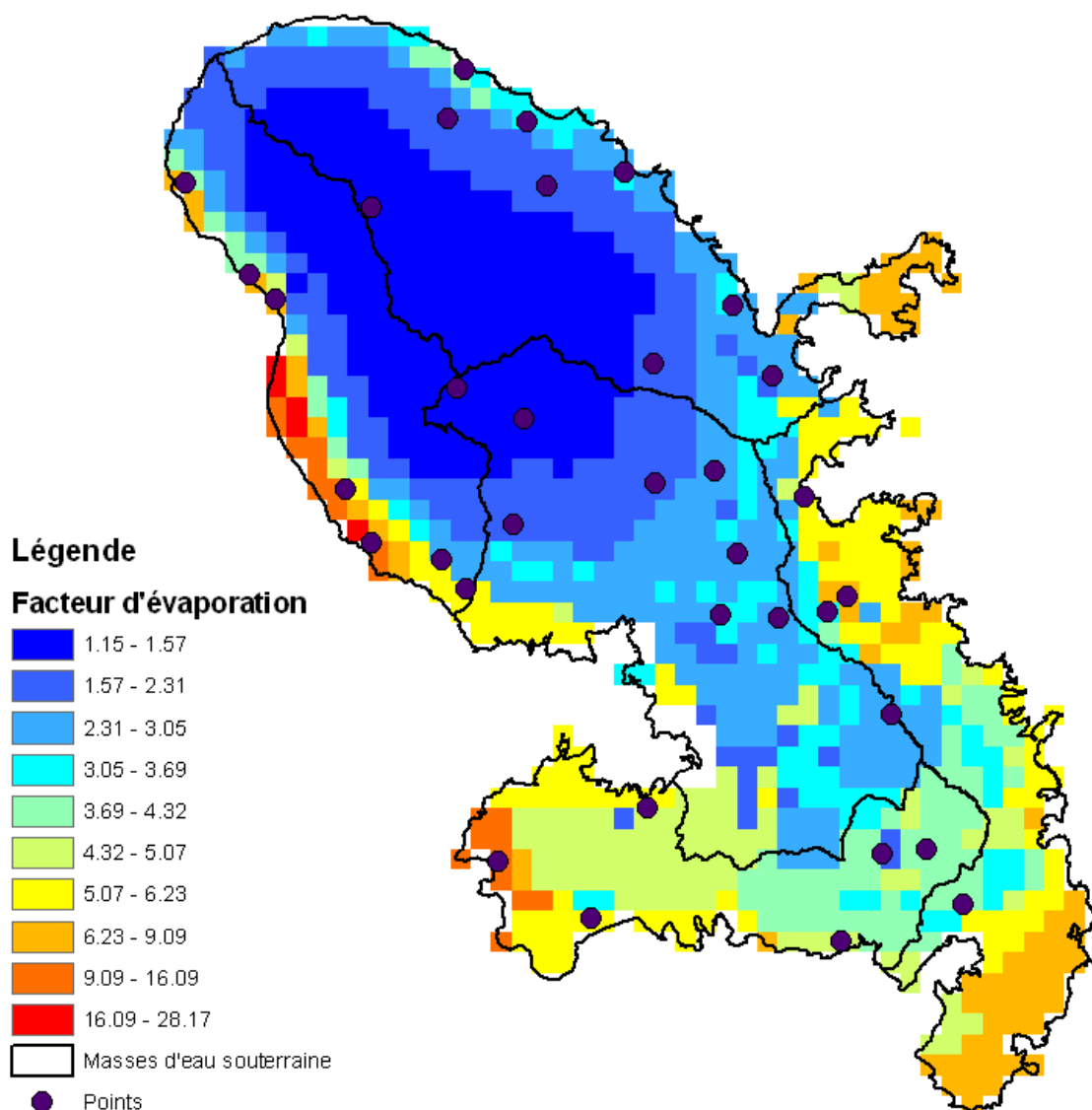


Illustration 19 : Facteur d'évaporation $P/(P-E)$ et délimitation des masses d'eau souterraines pour le territoire de la Martinique.

L'illustration 20 représente la proportion d'éléments dissous dans les eaux souterraines provenant des apports atmosphériques en fonction des concentrations mesurées dans les eaux souterraines. Cette proportion a été calculée en prenant la composition moyenne des eaux de pluies côtières calculée d'après la littérature (Illustration 1), le facteur d'évaporation (Illustration 19) et les concentrations connues pour chaque point de prélèvement d'eaux souterraines. Les points pour lesquels les calculs aboutissent à une proportion d'éléments dissous provenant des apports atmosphériques supérieure à 100% s'expliquent par le fait que la composition chimique de l'eau de pluie prise en compte correspond à une composition moyenne d'après la littérature et ne reflète pas

les disparités attendues à l'échelle locale. L'intérêt de l'illustration 20 est d'avoir un aperçu de l'importance relative des apports atmosphériques d'éléments dissous afin d'estimer dans quelle mesure ces apports peuvent expliquer la composition chimique des eaux souterraines.

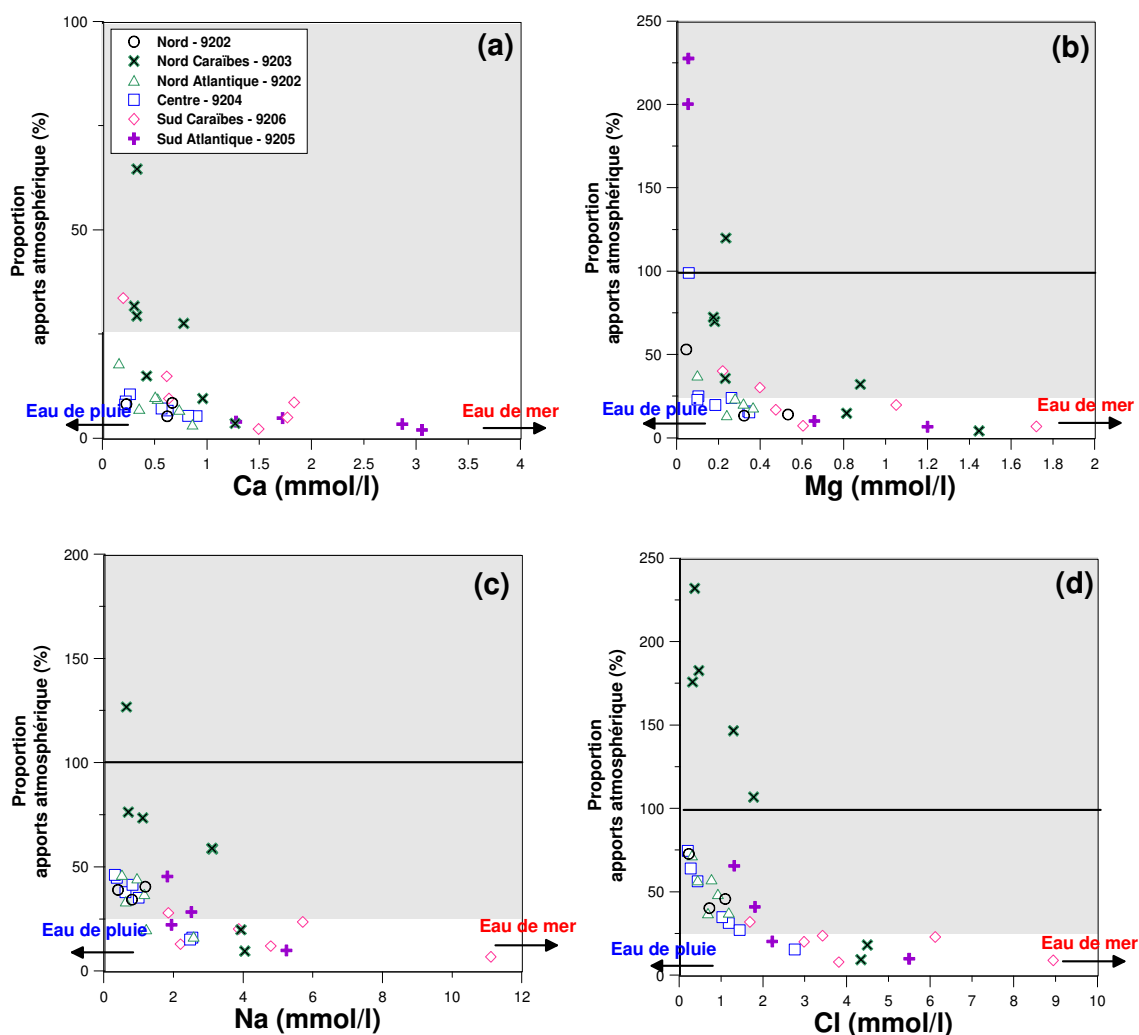


Illustration 20 : Proportion d'éléments dissous provenant des apports atmosphériques (%) en fonction de la concentration moyenne en Ca (a), Mg (b), Na (c) et Cl (d) pour chaque point associé à une masse d'eau souterraine.

Tous les points appartenant à la **masse d'eau « Sud-Caraïbes »**, excepté les points Habitation Dizac (Indice BSS : 1184ZZ0016, Diamant) et Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce), présentent de **faibles proportions en éléments dissous provenant des apports atmosphériques** (<25%, Illustration 20), malgré un facteur d'évaporation élevé pour cette zone géographique (>2, Illustration 19).

Ainsi les concentrations élevées en Ca, Mg, Na et Cl associées à ces eaux souterraines correspondent majoritairement à des éléments dissous provenant soit de la lithologie soit de l'eau de mer via l'interaction de ces eaux avec le biseau salé. Ce résultat conforte l'interprétation de la signature isotopique en B pour le point Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) qui suggère une proportion importante de B provenant de l'eau de mer. La proportion élevée des apports atmosphériques calculée pour le point Stade communal (Indice BSS : 1185ZZ0120, Ste Luce) (jusqu'à 40% pour le Mg, Illustration 20) est en adéquation avec les résultats obtenus précédemment à partir des isotopes du Sr qui donne une signature isotopique fortement contrôlée par l'eau de pluie.

A l'inverse le point Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain) appartenant à la masse d'eau « Nord-Atlantique », présente une proportion d'éléments dissous provenant des apports atmosphériques jusqu'à 48% pour les chlorures (Illustration 20). Ce résultat apparaît tout à fait compatible avec la signature isotopique en Sr mesurée pour ce point, traçant clairement une proportion importante de Sr provenant de l'eau de pluie (Illustration 15).

Pour les points appartenant aux **autres masses d'eau** (excepté la masse d'eau « Sud-Caraïbes »), on observe de manière générale une **proportion importante d'éléments dissous provenant des apports atmosphériques** pour les concentrations élémentaires les plus basses mesurées (Illustration 20).

3.5.2. Liée à l'intrusion du biseau salé

Afin de tester la possible contribution d'éléments dissous provenant du biseau salé, une carte représentant l'emprise supposée de ce biseau a été éditée (Illustration 21). 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 été calculée à partir des données de forages disponibles (Vittecoq et al, 2007). L'objectif étant de déterminer la zone où les différences de niveaux piézométriques entre l'eau de mer et le niveau de la nappe sont inférieures à 2 m. Cette démarche est similaire à celle engagée par Bézelgues et al (2006) pour la prise en compte du risque de salinisation des eaux souterraines à Marie Galante. L'intérêt de l'Illustration 21 est d'avoir un aperçu de l'emprise spatiale relative (secteurs les plus à risque) du biseau salé par rapport à la ligne de côte de la Martinique.

Ainsi l'apport d'éléments dissous provenant du biseau salé semble pertinente pour expliquer la géochimie des eaux souterraines des points : Le Galion (Indice BSS : 1175ZZ0154, Trinité), Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois Ilets), Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet), Habitation Dizac (Indice BSS : 1184ZZ0001 et 1184ZZ0016, Diamant), Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert) et Puyferrat (Indice BSS : 1183ZZ0026, Vauclin) (Annexe 2).

Cependant sur l'illustration 21, on voit clairement qu'un certain nombre de points sont situés dans une zone éloignée de l'emprise spatiale attendue du biseau salé. De plus l'altitude de ces réservoirs n'est pas compatible avec une contribution d'éléments dissous provenant du biseau salé. C'est le cas notamment des points La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, François) et Cap Macré (Indice BSS : 1186ZZ0119, Marin).

Ainsi d'autres hypothèses doivent être envisagées pour expliquer une signature géochimique marquée par l'eau de mer pour ces points.

Une première hypothèse est celle de la remobilisation d'eau de mer fossile, capturée dans les formations lithologiques et qui aurait une signature isotopique en Sr proche de l'eau de mer actuelle. Cette hypothèse pourrait expliquer les compositions géochimiques observées pour Nouvelle cité (Indice BSS : 1182ZZ0160, Rivière Salée), Fougainville (Indice BSS : 1183ZZ0052, Rivière Pilote), La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, François), Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François) et Cap Macré (Indice BSS : 1186ZZ0119, Marin). En effet ces points se trouvent dans des formations géologiques qui se sont soit mises en place en contexte sous-marin, soit ont vu a posteriori des invasions marines.

Une autre hypothèse, déjà formulée par Baran et al. (2006), est celle de l'altération de rares formations calcaires. Ces formations sont très faiblement représentées sur la Martinique mais peuvent contrôler ponctuellement la géochimie des eaux souterraines de certains points de prélèvement. En effet les coupes des forages des points Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) et La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote) mettent en évidence la présence de formations calcaires. De plus la géologie à proximité de la Source Caraïbe (Indice BSS : 1183ZZ0053, Saint Esprit) suggère la possible altération de formations calcaires sous-jacentes (Westercamp et al., 1989). La signature isotopique en Sr attendue pour ces formations calcaires d'âge Miocène est de l'ordre de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,7090$ (DePaolo, 1986), proche de la signature de l'eau de mer actuelle ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70919$, Sanjuan et al., 2003). De plus, les concentrations en Ca mesurées pour ces points plaident bien en la faveur de la dissolution de roches carbonatées.

Une dernière hypothèse est celle de l'apport d'éléments dissous et notamment de Ca via les apports de poussières continentales par les pluies (issues de source(s) locale(s)) et/ou à une circulation de particules carbonatées plus générale à l'échelle de l'atmosphère comme l'ont envisagé Négrel et al. (1997).

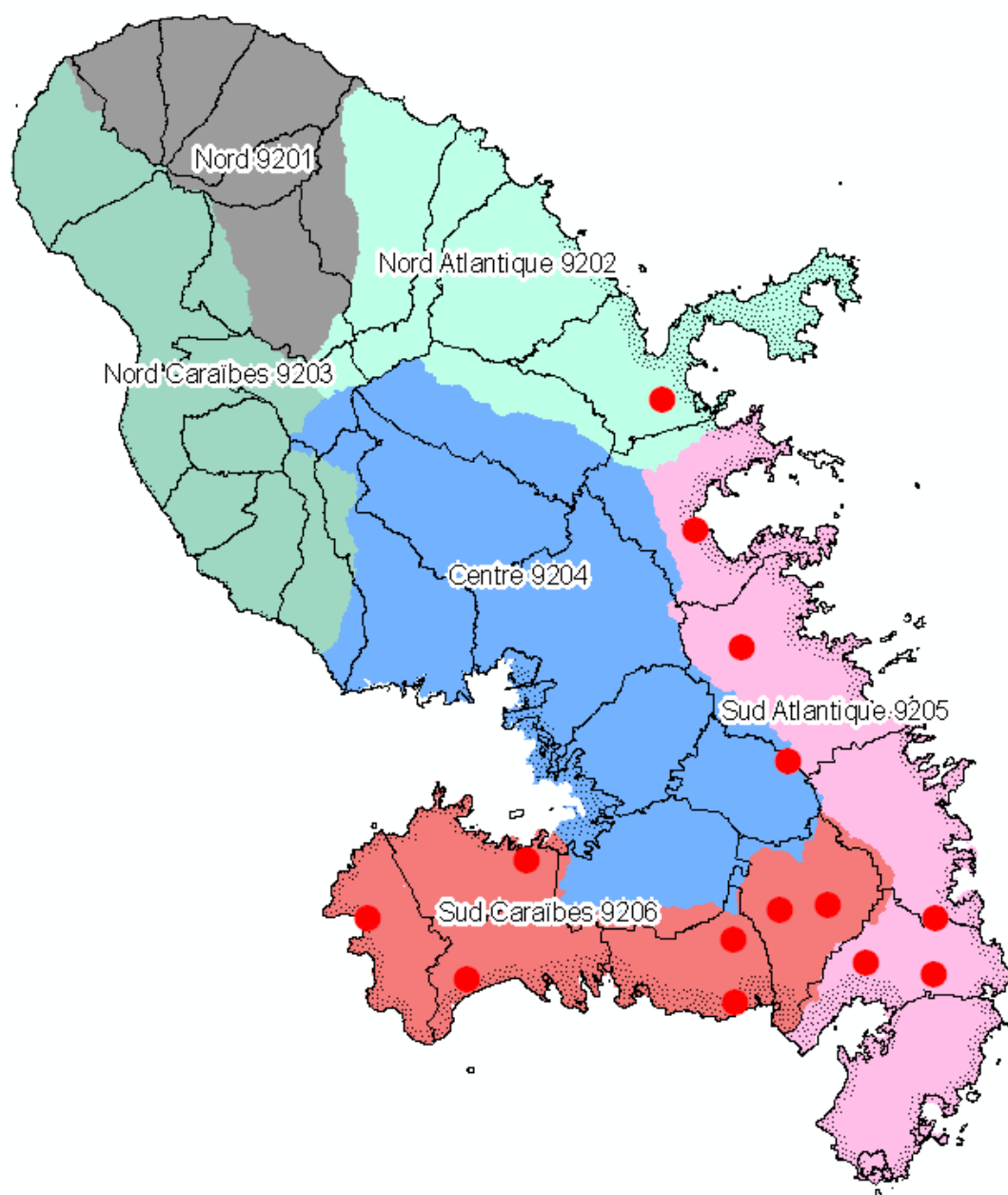


Illustration 21 : Esquisse de l'intrusion du biseau salé (pointillés noirs), limite des communes (trait noir) et point influencés par une eau salée (en rouge)

3.5.3. Liée à la lithologie

Les variabilités de composition géochimique observées pour les eaux souterraines, analysées dans cette étude, ont été discutées en les confrontant à la diversité des niveaux géologiques drainés. La correspondance entre un point de prélèvement et une/ou plusieurs lithologie(s) associée(s) a été établie en s'appuyant sur les coupes de forages disponibles et la carte géologique de la Martinique (Westercamp et al., 1989).

Pour les isotopes du Sr, le pôle lithologique correspondant à la libération de Sr lors des interactions eau/roche apparaît bien contraint avec une valeur de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,704$. Compte tenu du fait que les formations volcaniques de la Martinique correspondent à la même lignée magmatique (sans différenciation majeure) et ont été mises en place à partir des mêmes chambres magmatiques (Westercamp et al., 1989), il semble justifié d'assigner une signature isotopique en Sr unique pour le Sr provenant des roches volcaniques de la Martinique.

On observe néanmoins des disparités spatiales liées au type de dépôts volcaniques. En effet **les interactions eau/roche semblent plus prononcées pour les dépôts pyroclastiques de type nuées ardentes que pour les laves**. Cette observation semble s'expliquer par des différences de porosités entre ces deux types d'aquifères, porosités d'interstices pour les nuées ardentes et de fissures/fractures pour les laves. Ainsi **les eaux souterraines qui s'écoulent dans les nuées ardentes acquièrent les signatures isotopiques en Sr les plus marquées par la lithologie**.

3.6. VARIATION SAISONNIERE

La pluviométrie de la Martinique est globalement élevée (de 1000 à 6000 mm/an) et très inégalement répartie dans le temps (90% de la pluie tombe durant 5 mois de juillet à novembre), et dans l'espace (couramment plus de 3000 mm dans la moitié nord, et moins de 2000 mm dans la moitié sud). On observe également de fortes variabilités inter-annuelles. Afin d'appréhender les possibles variabilités temporelles de compositions géochimiques des eaux souterraines en fonction du régime hydrique (saison sèche / saison des pluies), deux campagnes de prélèvement ont été réalisées dans le but d'analyser les compositions isotopiques H et O de l'eau et les compositions isotopiques en Sr.

Les concentrations obtenues pour ces 2 campagnes (avril et novembre 2006) sont directement comparées sur l'illustration 22. La droite de pente 1 :1 représente un état de concentration identique, **les points situés sur cette droite n'ont donc pas de variation de concentration significative entre les deux campagnes**. Pour les points de prélèvement où des différences significatives de concentrations sont observées, les rapports élémentaires (X/Cl , pour l'élément X) seront interprétés afin de mettre en évidence une éventuelle variabilité saisonnière dans la source d'éléments dissous.

En effet, comme évoqué précédemment, pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, en d'autres termes de la période du cycle hydrologique considérée, un effet de dilution-concentration peut aboutir à des

différences significatives de concentrations sans toutefois avoir une variation dans la source d'éléments dissous. Ainsi, l'utilisation des rapports élémentaires permet de s'affranchir de ces effets. **Pour la grande majorité des points considérés**, entre la saison sèche et la saison des pluies, **les variations de concentrations en Ca** (Illustration 22a), **en Cl** (Illustration 22b) **et en Sr** (Illustration 22c) **ne sont pas significatives** (incluses dans la barre d'erreur analytique). Cette stabilité remarquable des concentrations pour les deux campagnes considérées **traduit un apport constant d'éléments provenant des mêmes sources d'éléments dissous**.

La variabilité de concentration pour les éléments Cl, Ca, Sr et B a été directement comparée à l'amplitude de variation du niveau piézométrique observée pour ces points entre la campagne de saison des pluies et de saison sèche de 2006 (Illustration 23). L'étude de Malcuit et al. (2006) a mis en évidence, pour les eaux souterraines de la Martinique, 3 comportements différents en fonction du régime hydrique :

- Des points où la hauteur d'eau varie sans qu'il n'y ait de modification significative de la composition chimique des eaux souterraines ;
- Des points où ni la hauteur d'eau ni la composition chimique ne varient ;
- Des points où la hauteur d'eau et la composition chimique varient.

Pour les points considérés dans cette étude, entre la saison sèche et la saison des pluies, on observe également ces 3 comportements reliant la variabilité de concentration et la variabilité de niveau piézométrique.

Pour les concentrations en Ca, seuls les points Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François), Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert) et Le Galion (Indice BSS : 1175ZZ0154, Trinité) présentent une variabilité temporelle significative pour une relativement faible variabilité de hauteur d'eau (<1m). De plus pour ces points les variations de concentration sont associées à des variations du rapport molaire Ca/Cl (Ca/Cl plus bas en saison sèche). Le point Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François) présente également une variation de concentration en Sr et une variation du rapport molaire Sr/Cl (Sr/Cl plus bas en saison sèche) entre la saison sèche et la saison des pluies.

Pour les points La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote), Case Navire (Indice BSS : 1177ZZ0165, Schoelcher) et Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois Ilets), les variations de concentration observées pour le calcium, les chlorures et le strontium ne correspondent pas à des variations significatives des rapports molaires normalisés par rapport à Cl (X/Cl, pour l'élément X). Ainsi un simple effet dilution-concentration permet d'expliquer ces variations de concentration sans qu'il n'existe de différence significative de source d'éléments dissous entre la saison sèche et la saison des pluies. Pour ces trois points on observe donc une forte variabilité de concentrations associée à une relativement faible variabilité de hauteur d'eau (<1m).

Pour les concentrations en bore, on observe une variation significative entre la saison sèche et la saison des pluies pour le point Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006, Marigot) (Illustration 22c), variation associée également à une variation du rapport molaire B/Cl (Sr/Cl plus élevé en saison sèche) et une très faible variabilité

de niveau piézométrique (<0.3 m) (Illustration 23c). Pour les autres éléments la variabilité de concentration entre la saison sèche et la saison des pluies n'est pas significative.

Les autres points présentent des concentrations similaires pour les 2 campagnes de prélèvement considérées, associées aussi bien à des niveaux piézométriques proches (<1 m pour les points 1186ZZ0118, 1183ZZ0052, 1168ZZ0054, 1169ZZ0006, 1177ZZ0161, 1181ZZ0132, 1167ZZ0045 et 1169ZZ0084) qu'à des variations de niveaux très contrastées (>1 m pour les points 1179ZZ0070, 1166ZZ0026 et 1167ZZ0024) (Illustration 23).

Contrairement aux concentrations en éléments dissous, les compositions isotopiques considérées (H, O de l'eau ; Sr et B) ne sont pas sensibles aux effets de dilution, les variations temporelles traduisent donc uniquement des mélanges différents de sources d'éléments dissous.

Sur le diagramme comparant les signatures isotopiques H et O de l'eau mesurées en saison sèche (avril 2006) et en saison des pluies (novembre 2006) (Illustration 24a,b), la majorité des points se trouvent en dessous de la droite de pente 1 :1. La déviation de ces points de la droite 1 :1 vers des compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ plus basses pour la saison des pluies peut correspondre à l'intégration des **variations saisonnières classiques** de la composition isotopique H et O des eaux de pluies (valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ basses pendant la saison des pluies/ valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ élevées pendant la saison sèche) mais également à des **alimentations en eau différentes pour les eaux souterraines entre la saison sèche et la saison des pluies**.

Compte tenu de l'erreur analytique, la variation temporelle de signature isotopique en H et O est significative pour les points Source de l'Alma (Indice BSS 1173ZZ0076, Fond Saint Denis) et Grande Anse (Indice BSS 1181ZZ0131, Anses d'Arlet). Les points Fond Brulé (Indice BSS 1169ZZ0084, Lorrain), Sarrault (Indice BSS 1179ZZ0158, Lamentin) et La Mauny (Indice BSS 1183ZZ0024, Rivière Pilote) présentent une signature isotopique contrastée entre les deux campagnes de prélèvement uniquement pour les isotopes de l'hydrogène. De la même manière le point Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois Ilets) présente une différence significative de composition isotopique en O entre la saison sèche et la saison des pluies.

Sur le diagramme comparant les signatures isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesurées en saison sèche (avril 2006) et en saison des pluies (novembre 2006) (Illustration 24c), un certain nombre de points se trouvent éloignés de la droite de pente 1:1 ce qui traduit une **variabilité saisonnière dans la source d'éléments dissous**. Dans ce diagramme, les barres d'erreur, correspondant à l'incertitude analytique, sont comprises dans la taille des points. Les points Grande Anse (Indice BSS 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) et Sarrault (Indice BSS 1179ZZ0158, Lamentin) ont une composition isotopique en Sr plus basse en saison des pluies. A l'inverse, les points Stade communal (Indice BSS 1185ZZ0120, Ste Luce) et Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois Ilets) ont une composition isotopique en Sr plus élevée en saison des pluies.

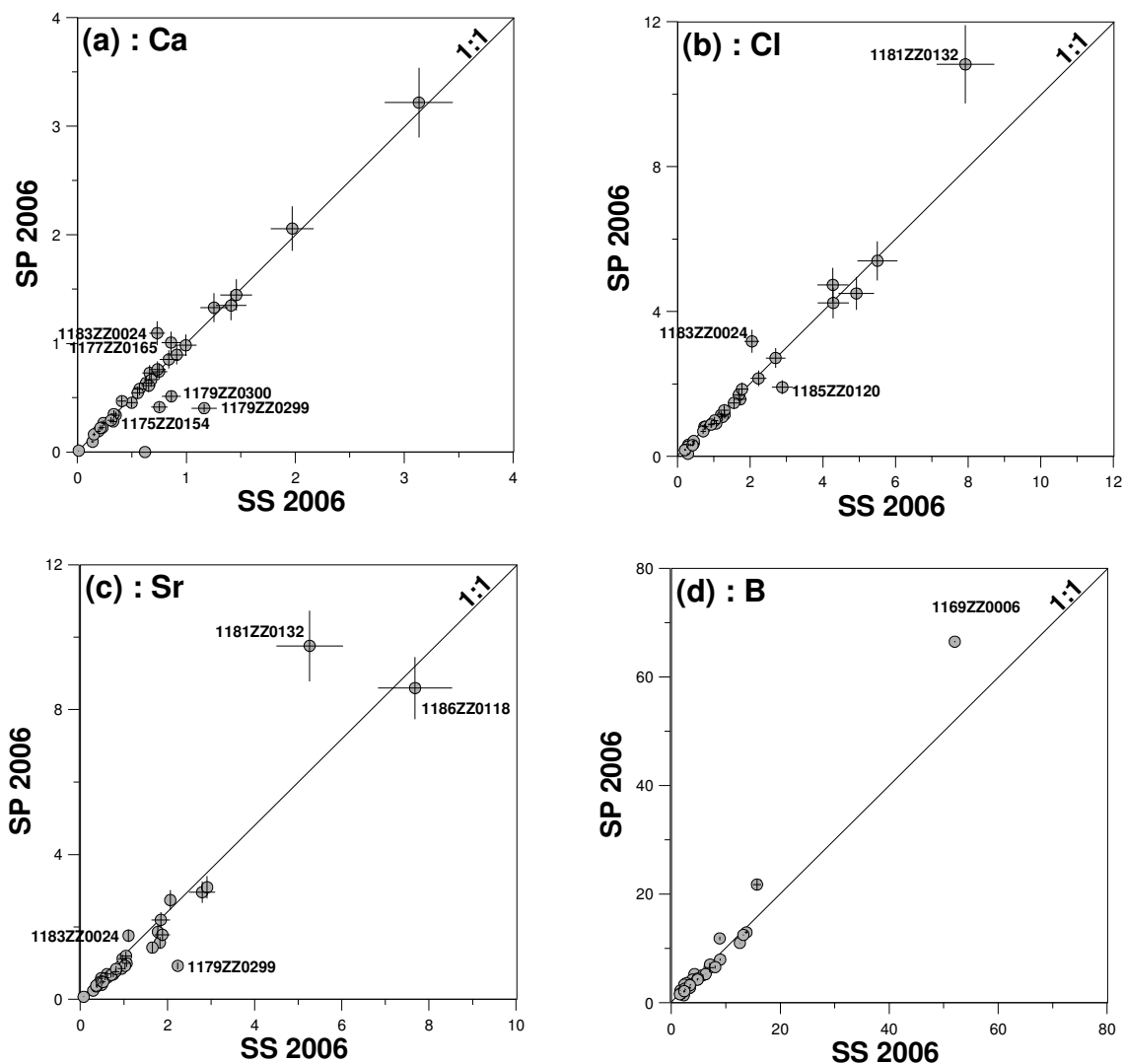


Illustration 22 : Comparaison des compositions géochimiques entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006) pour Ca (a), Cl (b), Sr (c), B (d).

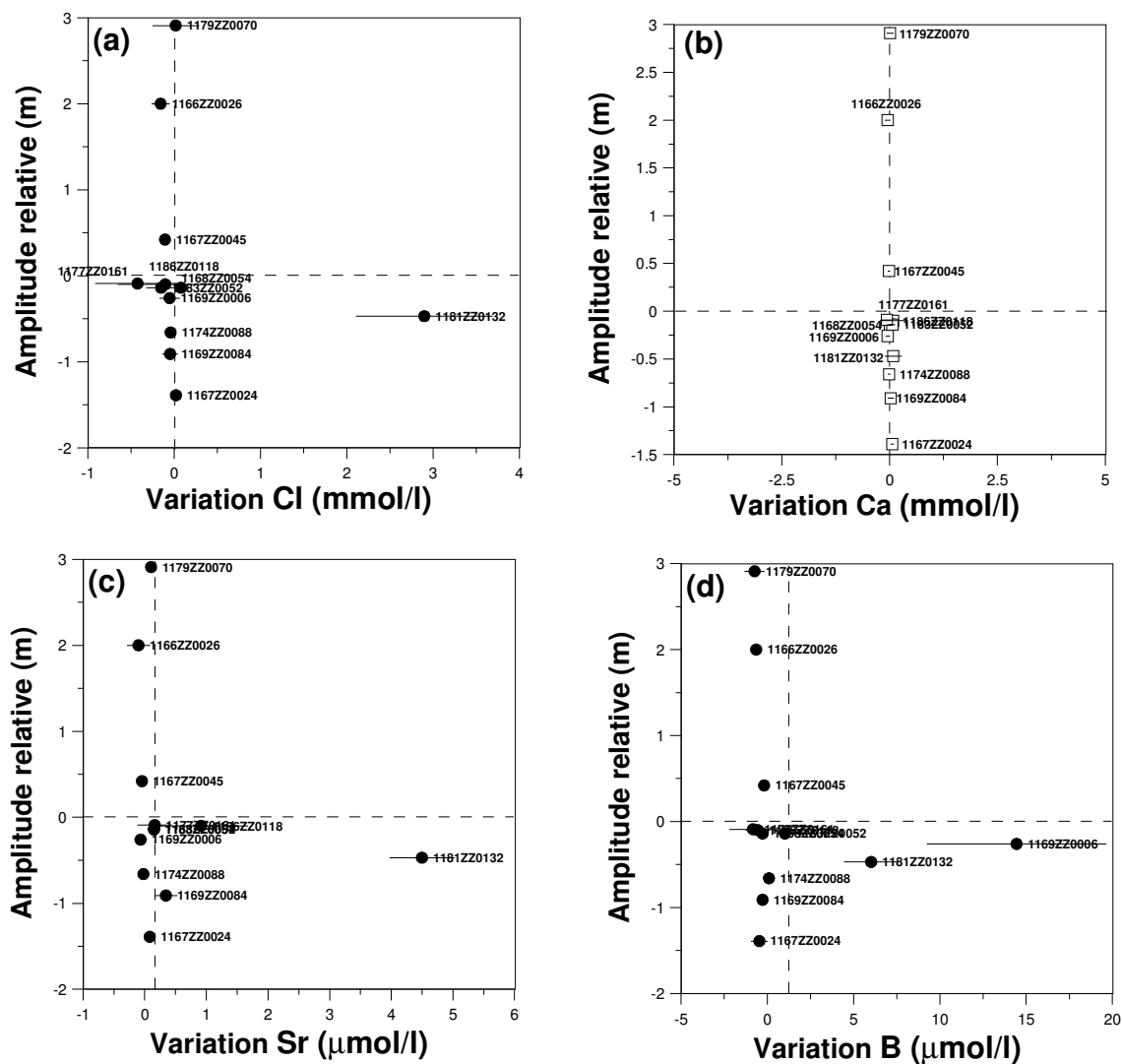


Illustration 23 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en chlore (a), calcium (b), strontium (c) et bore (d) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).



Illustration 24 : Comparaison des compositions isotopiques entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006) pour $\delta^2\text{H}$ (a) et $\delta^{18}\text{O}$ (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c).

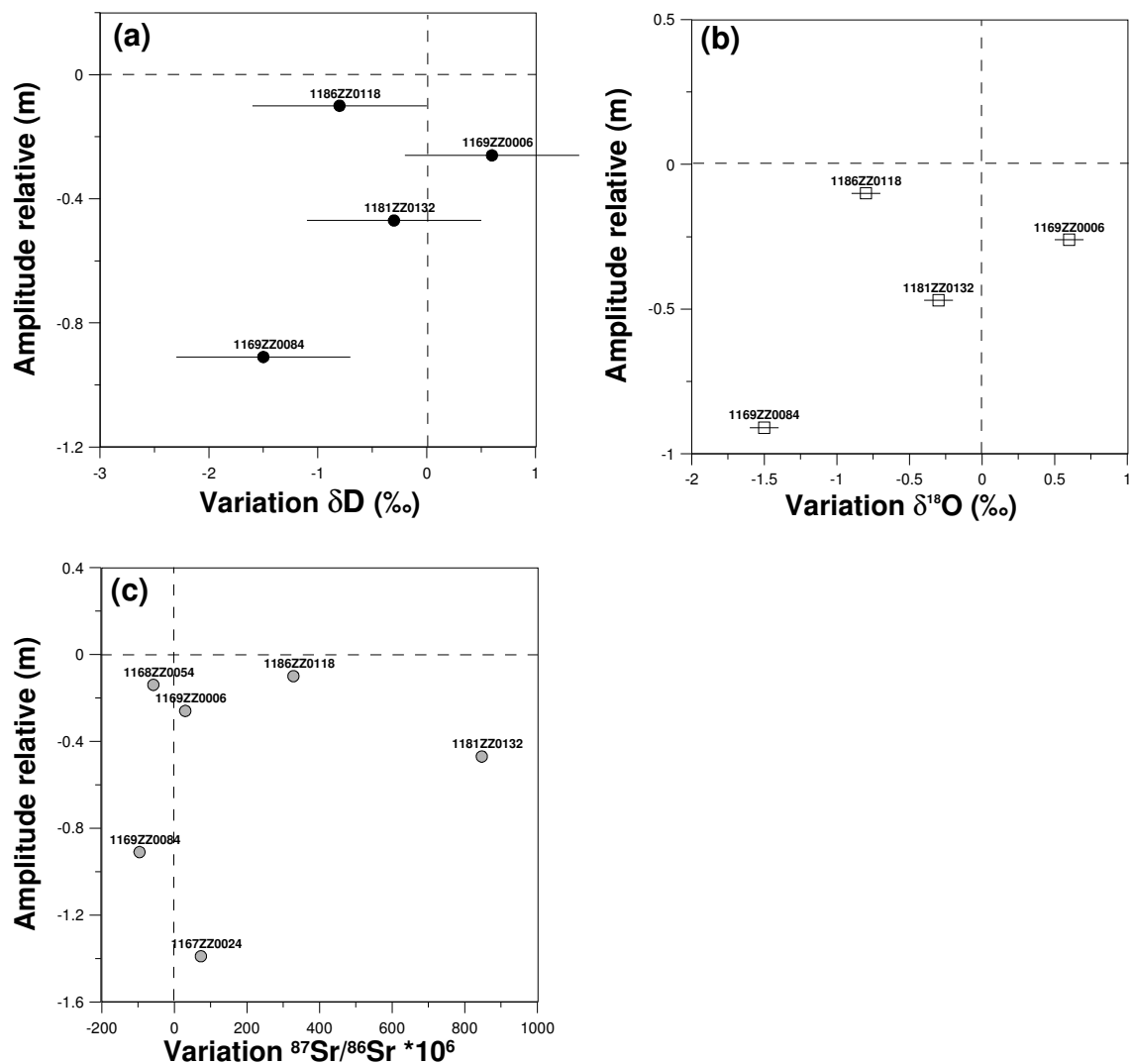


Illustration 25 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation de compositions isotopiques δ^2H (a) et $\delta^{18}O$ (b) $^{87}Sr/^{86}Sr$ (c) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).

En résumé les variations saisonnières, entre la saison sèche (avril 2006) et la saison des pluies (novembre 2006) considérées, peuvent être regroupées suivant plusieurs cas :

- **Origine de l'eau et source d'éléments dissous variables :**

Le point Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois Ilets) présente des variations dans l'origine de l'eau, comme le traduisent les signatures isotopiques en O (Illustration 24b) et dans la source d'éléments dissous, comme le traduisent les signatures isotopique en Sr (Illustration 24c) associées à une faible variabilité des niveaux piézométriques (<0.5m).

- **Origine de l'eau variable / source d'éléments dissous constante :**

Les points La Mauny (Indice BSS 1183ZZ0024, Rivière Pilote) et Fond Brulé (Indice BSS 1169ZZ0084, Lorrain) présentent de faibles variations dans la source d'éléments dissous tracées par les signatures isotopiques en Sr (Illustration 24c) associées à une variabilité significative dans l'origine de l'eau tracées par les signatures isotopique en H (Illustration 24b), et une variabilité importante des niveaux piézométriques (>0.9m) (Illustration 23).

La source de l'Alma (Indice BSS 1173ZZ0076, Fond Saint Denis) présente une forte variabilité saisonnière de l'origine de l'eau, traduite par les signatures isotopiques en H et O associée à une faible variabilité de concentrations en éléments dissous.

Ainsi les variations de valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ pour ces deux points semblent suivre les variations saisonnières attendues pour les valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurées pour les eaux de pluie (Illustration 26a).

- **Origine de l'eau constante / source d'éléments dissous variable :**

Le point Stade communal (Indice BSS 1185ZZ0120, Ste Luce) présente une forte variabilité saisonnière de la source des éléments dissous tracée par les isotopes du Sr et une faible variabilité de l'origine de l'eau selon les signatures isotopiques en H et O mesurées pour les eaux souterraines. Les signatures isotopiques en Sr plus élevées observées en saison des pluies sont compatibles avec une contribution plus importante d'éléments dissous provenant de l'eau de mer pendant cette période (Illustration 26b).

Le point Grand Fond (Indice BSS 1186ZZ0118, Marin) présente une variabilité saisonnière significative dans la source d'éléments dissous (isotopes du Sr) associée une faible variabilité des niveaux piézométriques (<0.3m) (Illustration 25). Ces variations saisonnières semblent correspondre à une contribution plus importante d'éléments dissous provenant de l'eau de mer en saison des pluies (Illustration 26b).

- **Origine de l'eau et source d'éléments dissous constante :**

Le point Anse Charpentier (Indice BSS 1169ZZ0006, Marigot) présente une faible variabilité de la source d'éléments dissous comme le traduisent les signatures isotopiques en Sr (Illustration 24c), une faible variabilité de l'origine de l'eau, comme le traduisent les signatures isotopiques en O et H (Illustration 24a,b) et une faible variabilité des niveaux piézométriques (<0.3m) (Illustration 23). Ainsi la variabilité saisonnière observée pour les concentrations en B (Illustration 22d), pourrait correspondre à des apports de B anthropiques. Ces apports permettraient d'expliquer l'absence de variations saisonnières pour la signature isotopique en Sr (traceur des interactions eau-roche), une signature isotopique en B compatible avec des apports anthropiques de type engrais minéraux (Illustration 16a) et une augmentation de la concentration en B dans les eaux souterraines en saison des pluies, période de plus fort lessivage des sols.

- **Origine de l'eau et source d'éléments dissous variables, associées à des variations des niveaux piézométriques :**

Le point Grande Anse (Indice BSS 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) présente une forte variabilité saisonnière à la fois dans l'origine de l'eau et la source d'éléments dissous. Les signatures isotopiques plus basses en H, O et Sr observées en saison des pluies sont compatibles avec une contribution plus importante d'eau provenant de l'eau de pluie et d'éléments dissous provenant des interactions eau-roche pendant cette période. A l'inverse pendant la saison sèche, les valeurs plus élevées observées pour les compositions isotopiques en H, O et Sr sont compatibles avec une contribution d'eau et d'éléments dissous provenant de l'eau de mer (Illustration 26) qui pourrait être assimilé à une **remontée du biseau salé**.

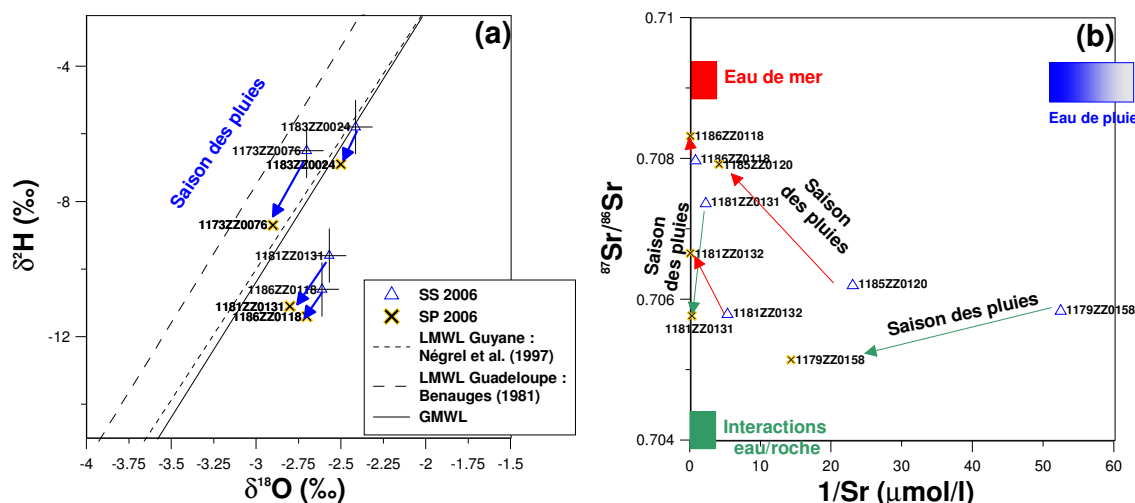


Illustration 26 : Variation de l'origine de l'eau à partir des valeurs δ^2H et $\delta^{18}O$ (a) et des éléments dissous à partir des valeurs $^{87}Sr/^{86}Sr$ et du ratio $1/Sr$ (b) entre la campagne de saison sèche en avril 2006 (SS 2006) et de saison des pluies en novembre 2006 (SP 2006).

Le point Sarrault (Indice BSS 1179ZZ0158, Lamentin) présente une forte variabilité saisonnière dans la source d'éléments dissous associée à une faible variabilité d'origine de l'eau (isotopes H et O de la molécule d'eau). Les signatures isotopiques plus basses en Sr observées en saison des pluies sont compatibles avec une contribution plus importante d'éléments dissous provenant des interactions eau-roche pendant cette période (Illustration 26b). A contrario, en période de saison sèche la contribution de Sr provenant de l'eau de pluie est plus importante.

- **Source d'éléments dissous constante, associée à des conditions hydrogéologiques contrastées :**

Pour les points où les différences de concentration et de composition isotopique ne sont pas significatives malgré des conditions hydrogéologiques (saison sèche/saison des pluies) contrastées, les compositions chimiques des eaux souterraines suggèrent que les ressources en eau sont localisées dans des réservoirs de taille relativement importante. C'est le cas notamment du point Rivière Falaise (Indice BSS : 1168ZZ0054, Basse Pointe) qui présente de faibles variabilités saisonnières pour les signatures isotopiques en Sr associées à de faibles variations des niveaux piézométriques.

3.7. VARIATION INTERANNUELLE

Les fortes variabilités interannuelles de la pluviométrie se répercutent également sur la composition chimique des eaux souterraines.

En effet on observe de fortes variabilités interannuelles, notamment pour les concentrations en Ca, Cl, Sr et B, à la fois pour les campagnes de saison des pluies et de saison sèche (écart-type représenté par les barres d'erreurs, Illustration 27).

Les variabilités interannuelles sont d'autant plus prononcées que les concentrations en éléments dissous sont élevées. De plus ces variabilités sont accentuées en saison des pluies. Cette observation s'explique aisément par l'intégration d'eau nouvelle provenant des eaux de pluie par les eaux souterraines et une modification de leurs concentrations en éléments dissous variable suivant l'intensité des évènements pluvieux.

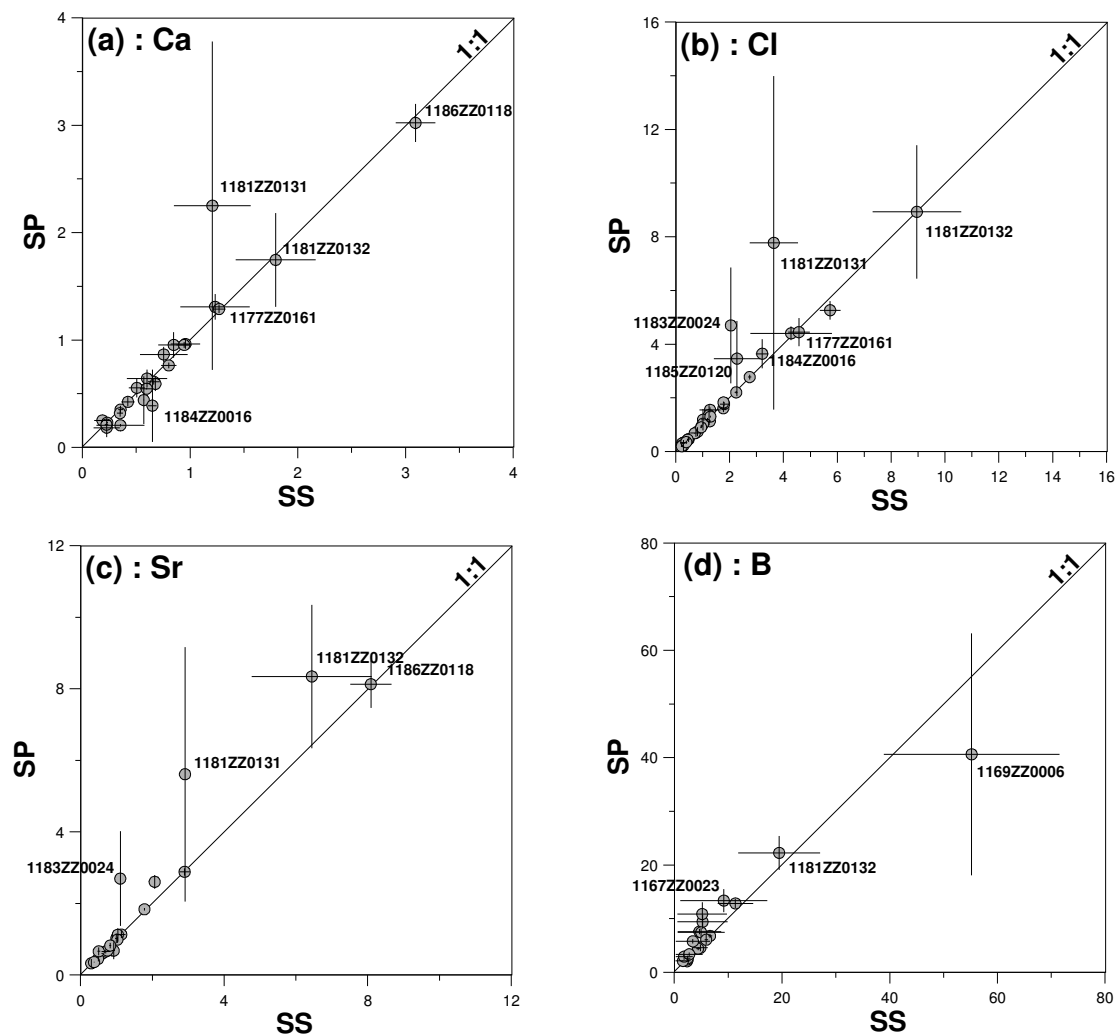


Illustration 27 : Comparaison des moyennes de concentrations en Ca (a), Cl (b), Sr (c), B (d) calculées sur l'ensemble des campagnes de saison sèche (SS) et de saison des pluies (SP) depuis 2004 et variabilité interannuelle représentée par les barres d'erreurs (écart-type).

3.8. DATATION DES EAUX SOUTERRAINES

Les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) peuvent, dans certains contextes (nappes anciennes captives, climat présentant des variations de températures saisonnières notamment), être utilisés comme un outil de datation. En effet, des corrélations peuvent être établies entre les variations annuelles de température et les variations de concentrations en isotopes stables mesurées, permettant ainsi de dater les eaux.

Néanmoins, compte tenu des variations saisonnières observées en Martinique et mises en évidence par les différents outils (cf. chapitres précédents), il apparaît que les eaux souterraines sont relativement récentes et que les temps de réactions des hydro-systèmes sont relativement courts (cycle hydrologique). D'autre part, compte tenu des faibles variations de température et des fortes pentes, les isotopes stables ne permettent pas une datation plus précise des eaux de Martinique. Ils ont néanmoins permis de contraindre les temps de résidence des eaux dans les systèmes aquifères.

Afin d'améliorer la caractérisation des eaux souterraines, et notamment d'apprécier plus précisément « leur âge récent », une étude spécifique a été réalisée avec la DIREN Martinique afin de tester une nouvelle méthode de datation qui n'était pas disponible au moment du montage du présent projet.

Les objectifs de cette étude étaient les suivants :

- **Tester la méthode de datation des eaux par les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF6)** dans le contexte spécifique volcanique insulaire de la Martinique, ce type d'analyse n'ayant jamais été réalisé en milieu tropical et en contexte volcanique.
- Mieux appréhender la dynamique de circulation des eaux souterraines grâce à **la connaissance du temps de résidence des eaux dans les aquifères et la détermination de leur âge apparent.**
- S'appuyer sur les résultats de datation pour contribuer à **l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines face aux nitrates et produits phytosanitaires**, et pour **estimer le temps de résilience des aquifères.**

Les CFC et SF6 ont été mesurés sur 19 sites du réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au titre de la DCE. Le tritium a été mesuré sur 7 de ces sites afin de déterminer plus précisément l'âge des eaux notamment dans le cas de mélanges binaires, et de valider les âges calculés par les CFC et SF6 sur ces points.

Trois groupes d'eau ont été mis en évidence :

- **eaux majoritairement anciennes (<1962)**
- **eaux d'une vingtaine d'années avec une composante d'eau plus actuelle plus ou moins importante (1988-2002) mais supérieure à 50%**
- **eaux d'âge intermédiaire**

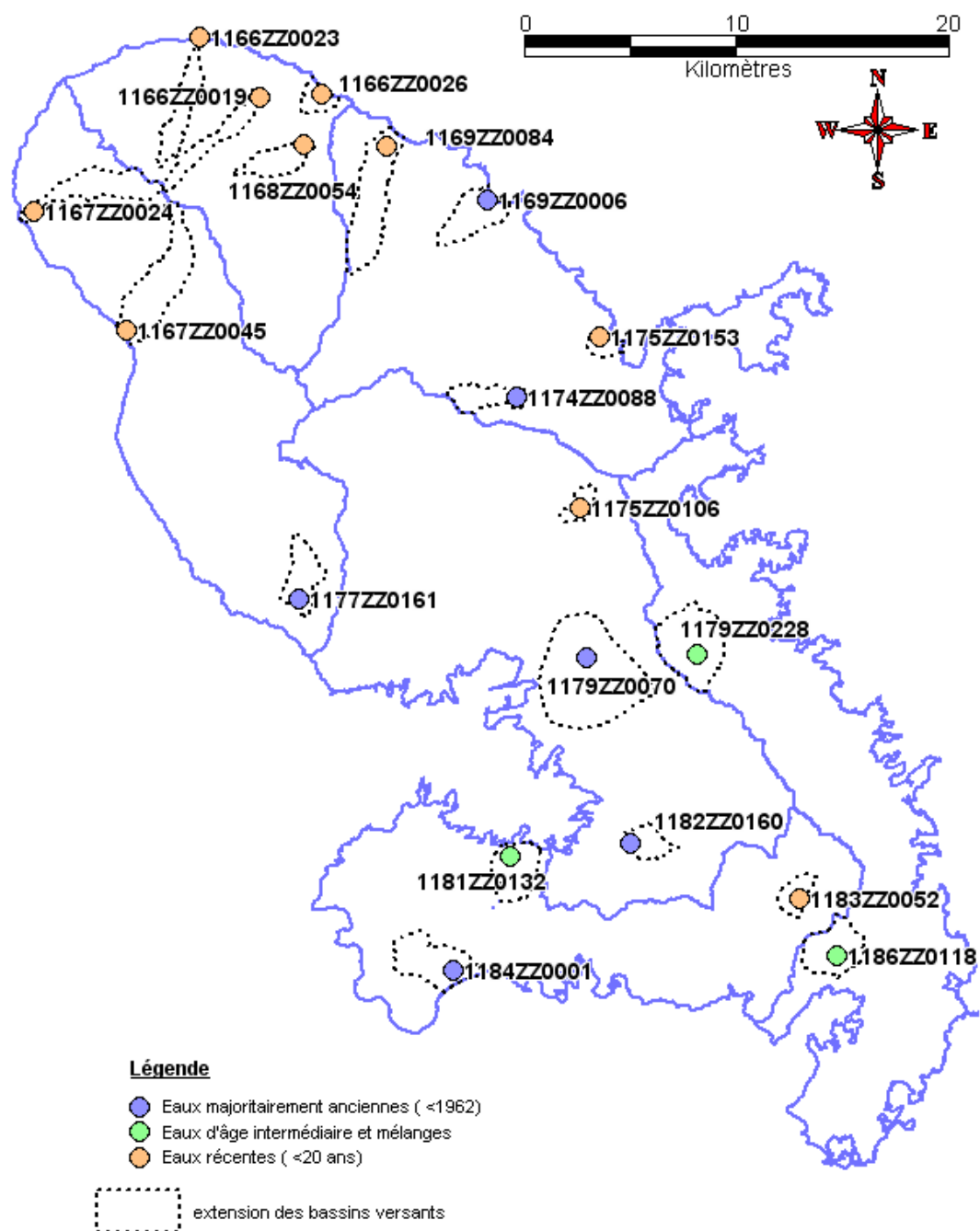


Illustration 28 : répartition géographique des groupes d'eau mis en évidence (extrait du rapport BRGM/RP-55844-FR)

Les résultats obtenus ont été croisés avec les concentrations en nitrates et phytosanitaires mesurées dans le cadre du réseau de surveillance, et on constate une bonne corrélation entre les concentrations en nitrates des eaux souterraines et leurs âges estimés. **Les eaux anciennes présentent peu de nitrates et l'on retrouve les plus fortes concentrations en nitrates parmi les eaux majoritairement jeunes.** La corrélation n'est pas observée pour certains points qui pourraient être sujets au processus de dénitrification engendrant des faibles teneurs en nitrates.

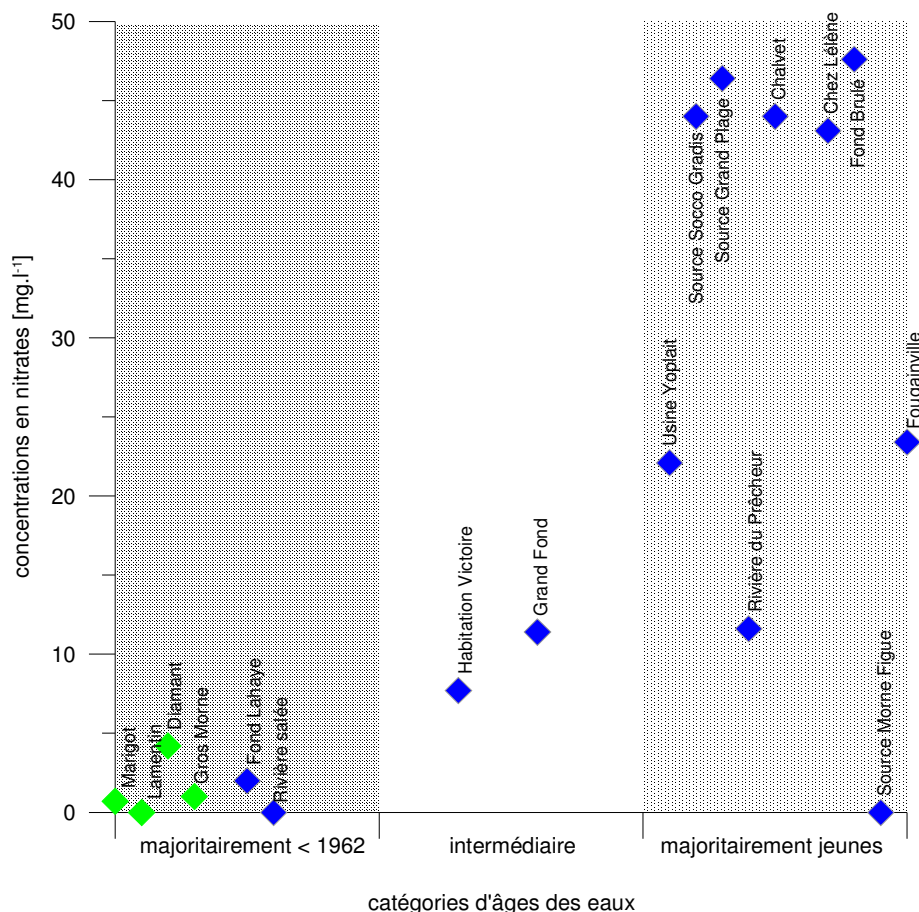


Illustration 29 : Relation entre les concentrations en nitrates et catégories d'âges des eaux (extrait du rapport BRGM/RP-55844-FR)

Il apparaît également que **les produits phytosanitaires ou produits de dégradation sont détectés particulièrement dans des eaux majoritairement jeunes. Toutefois des pesticides ont également été détectés dans des eaux majoritairement anciennes** : l'hypothèse d'une contamination localisée liée à une infiltration d'eau récente et contaminée mais en faible volume est avancée. Cette infiltration pourrait être liée à la fracturation ou à des défauts de conception des ouvrages. Un schéma global de la sensibilité des eaux à la contamination est proposé et suggère que, **dans la majorité des cas, le système pourrait présenter un temps de résilience élevé soit du fait des temps de résidence des eaux, soit du fait de la potentielle remobilisation des molécules en cours de transfert.**

4. Synthèse par Masses d'eau : différenciation géochimique et identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

4.1. METHODOLOGIE

4.1.1. Différenciation géochimique par masse d'eau

Les masses d'eau souterraine, dans le sens où la Directive cadre sur l'Eau l'entend, correspondent à un ensemble d'aquifères présentant des caractéristiques homogènes et destiné à être l'unité d'évaluation du bon état des eaux souterraines. Pour le territoire de la Martinique, la pré-délimitation des masses d'eau souterraine a été réalisée par Comte et al. (2003) en s'appuyant sur plusieurs critères :

- La géologie, renseignant pro parte sur les capacités d'infiltration et de stockage,
- La pluviométrie, permettant une approche de l'alimentation naturelle potentielle
- Les bassins versants, formant des unités indépendantes d'eau de surface potentiellement interdépendantes des eaux souterraines, à défaut de grands systèmes aquifères sédimentaires.
- Les facteurs socio-économiques relatifs aux pressions sur les ressources en eau ont également été intégrés dans cette délimitation.

L'intégration de ces critères a permis de définir une partition du territoire en six domaines hydrogéologiques juxtaposés, correspondant à des masses d'eau souterraine présentant des contextes relativement contrastés (Illustration 30). Au vu de la géologie essentiellement volcanique de l'île, ces masses d'eau souterraine sont de type « Edifice Volcanique » selon la terminologie du référentiel national.

Masse d'eau	N°	Pluvio/an	Géologie	Population*	Surface (km ²)	Densité (hab/km ²)
Nord	9201	2 à 6	Form. Volcan Pelée récent	11 800	115	128
Nord-Atlantique	9202	2 à 4	Form. Volcan. Jacob	48 310	177	268
Nord-Caraïbes	9203	1,8 à 5	Form. Volcan. Pelée + Carbet	43 150	180	239
Centre	9204	1,5 à 4	Form. Volcan. Carbet + Jacob + Vauclin-Lamentin	188 620	280	672
Sud-Atlantique	9205	1 à 2,3	Form. Volcan. anciennes Vauclin	59 050	183	289
Sud-Caraïbes	9206	1 à 2	Form. Volcan. anciennes à très anciennes Vauclin-Diamant	33 360	151	231

* base de recensement 1999

Illustration 30 : Masses d'eau souterraine de la Martinique et les critères ayant permis de les délimiter (Comte et al., 2003).

Les traceurs isotopiques retenus pour cette étude (H et O de la molécule d'eau, Sr, B) associent des traceurs d'interaction eau-roche, de mélange, d'origine des eaux et de processus, chaque traceur couvrant une ou plusieurs de ces caractéristiques.

Le couplage de la géochimie dite « classique » avec les différents outils isotopiques considérés permet de caractériser la composition géochimique générale de chaque masse d'eau et de proposer des pistes concernant le fonctionnement hydrologique des points pour lesquels des données étaient disponibles. De plus l'association de ces outils permet de contraindre la variabilité spatiale et temporelle de chaque masse d'eau.

4.1.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

On désigne par le terme « fond géochimique » tous les éléments majeurs et traces provenant uniquement d'une origine naturelle, c'est-à-dire soit des eaux de pluies soit des interactions eau/roche, soit éventuellement de l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé. Cette dernière origine doit être traitée néanmoins avec prudence. En effet il faut garder à l'esprit que le sur-pompage des eaux souterraines peut aboutir à une accentuation de la proportion d'éléments dissous provenant de l'eau de mer et on ne parle alors plus de fond géochimique pour ces eaux souterraines « contaminées » du fait de surexploitation.

L'approche géochimique proposée pour identifier les zones à risque de fond géochimique élevé pour la Martinique s'appuie sur une base de données rassemblant :

- Toutes les données acquises pour la Martinique par le BRGM depuis 2004 (Comte et al., 2004 ; Négrel et Vittecoq, 2005 ; Baran et al., 2006 ; Malcuit et al., 2006 ; Ollagnier et Vittecoq, 2007 ; Ollagnier, 2007), notamment des analyses isotopiques en H et O de l'eau, en Sr et en B. Ces données ont été

rentrées dans la base nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES), en juin 2008.

- Les données bancarisées dans ADES pour les eaux souterraines (extraction juin 2008).
- Les données issues du contrôle sanitaire exercé par la Direction de la Santé et du Développement Social (DSDS) sur les captages AEP.

La base de données ainsi constituée rassemble donc un nombre important de données qui permettent, par leur qualité, de bien documenter de nombreux secteurs géographiques de la Martinique. Pour les secteurs où le niveau de connaissance est élevé, cette étude propose d'identifier les **zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire dans les eaux souterraines**. Un **niveau de confiance élevé** sera donc attribué à ces zones à risque.

Pour les zones où la quantité et/ou la qualité des analyses géochimiques disponibles pour les eaux souterraines ne permettent pas d'avoir un niveau de connaissance élevé, une approche prédictive (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006) doit être engagée pour caractériser le fond géochimique. C'est l'objet de l'étude BRGM sur la Martinique en cours de réalisation pour l'ONEMA qui reprend la démarche engagée par le BRGM sur la métropole et la Guadeloupe (Sonney et al., 2005, Blum et al., 2006, Brenot et al., 2006, Brenot et al., 2007 et Brenot et al., 2008 ; rapports : BRGM/RP-54031-FR, BRGM/RP-54030-FR, BRGM/RP-54663-FR, BRGM/RP-55346-FR et BRGM/RP-55709-FR).

De cette analyse prédictive découle donc un niveau de confiance moindre (moyen à faible) attribué aux zones à risque de fond géochimique élevé. Ainsi pour l'identification des zones à risque de fond géochimique, l'étude pour l'ONEMA et l'étude pour la Région Martinique (présente étude) sont tout à fait complémentaires. Il est à noter que l'étude ONEMA s'intéresse également au fond géochimique dans les eaux de surface.

4.2. MASSE D'EAU NORD

4.2.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Nord » regroupe quatre grands ensembles hydrogéologiques :

- Au nord-ouest les andésites massives associées au volcanisme du Mont Conil
- Au centre les formations pyroclastiques émises par les différents édifices de la Montagne Pelée
- Au sud-est les andésites du Mont Conil
- Enfin au sud-ouest les dépôts associés au paléo lac de Champflore

Les aquifères associés présentent deux types de porosité : porosité de fissure et/ou de fracture au sein des andésites et porosité d'interstice au sein des pyroclastites. Les nappes circulant dans les pyroclastites sont le plus souvent libres, tandis que les nappes circulant dans les andésites sont plutôt captives. La pluviométrie sur cette masse d'eau est importante, avec des cumuls pluviométriques compris entre 1 et 5 m/an (dont plus de la moitié de la masse d'eau >2,5 m/an).

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent deux types de faciès :

- sulfaté-calcique pour les points Rivière Falaise (Indice BSS 1168ZZ0054, Basse Pointe) et Chalvet (Indice BSS 1166ZZ0026, Basse Pointe)
- bicarbonaté-calcique pour les points Habitation Citron (Indice BSS 1168ZZ0055, Morne Rouge) et Desgrottes (Indice BSS 1168ZZ0037, Morne Rouge) (Illustration 31).

Par rapport à l'ensemble des eaux souterraines de la Martinique, la masse d'eau « Nord » présente des **concentrations peu élevées** (Illustration 32) en :

- **Cl** : < 2 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg. L⁻¹,
- **Na** : < 2 mmol.L⁻¹ soit < 40 mg.L⁻¹,
- **Ca** : < 0.8 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg. L⁻¹,
- **Mg** : < 0.6 mmol.L⁻¹ soit < 50 mg.L⁻¹,
- **SO₄** : < 0.5 mmol.L⁻¹ soit < 250 mg.L⁻¹.

Les valeurs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr sont inférieures à 0,7048 et correspondent à du Sr provenant majoritairement des interactions eau-roche (Illustration 34). L'unique composition isotopique en B ($\delta^{11}\text{B} = 24,8\text{‰}$ pour le point Indice BSS 1168ZZ0054, Basse Pointe) mesurée pour cette masse d'eau suggère une contribution importante de B provenant des aérosols marins via les eaux de pluie (Illustration 35). Ainsi **cette masse d'eau semble contrôlée majoritairement par des apports d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie et de la lithologie.**

Les compositions isotopiques en H et O mesurées sont comprises dans une gamme de valeurs resserrée et intermédiaire par rapport à l'ensemble des eaux souterraines de la Martinique (Illustration 33).

De plus les variabilités saisonnières observées pour les concentrations en éléments dissous et pour les signatures isotopiques en Sr (Indice BSS 1168ZZ0054, Basse Pointe) sont peu prononcées ce qui suggère que **les ressources en eau de cette masse d'eau sont localisées dans des réservoirs de taille relativement importante qui tendent à tamponner l'apport d'eau nouvelle par les eaux de pluies.**

4.2.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau « Nord » (9201), les données acquises montrent des **concentrations élevées en Fe et en Mn**, supérieures respectivement à $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Fe et à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn. Les valeurs maximales observées pour ces deux éléments sont de $13\,600 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Fe et $334 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn au forage Desgrottes (Indice BSS 1168ZZ0037, Morne Rouge).

L'origine de ces éléments est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches en minéraux ferro-magnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). De plus l'approche isotopique a montré que les éléments dissous dans les eaux souterraines de cette masse d'eau proviennent majoritairement de la lithologie. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour les éléments **fer et manganèse**. Cependant la présence effective de ces éléments dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Les concentrations en Ca et Mg sont relativement élevées mais ne dépassent pas respectivement 47 et 26 mg.L^{-1} (au forage Desgrottes Indice BSS 1168ZZ0037, Morne Rouge). Comme pour le fer et le manganèse, ces éléments proviennent des interactions eau/roche. Les roches volcaniques drainées libèrent du **Ca et du Mg** en quantité supérieure aux autres roches silicatées mais en quantité bien inférieure aux roches carbonatées (Meybeck, 1986). Ainsi le **fond géochimique** pour ces deux éléments sera considéré comme **intermédiaire**.

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les éléments majeurs suivants :

- sodium $<40 \text{ mg.L}^{-1}$,
- potassium $<12 \text{ mg.L}^{-1}$,
- chlorures $<60 \text{ mg.L}^{-1}$ et
- sulfates $<250 \text{ mg.L}^{-1}$

et pour tous les éléments traces suivants (excepté le fer et le manganèse) :

- As $<10 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Al $<30 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Ba $<40 \mu\text{g.L}^{-1}$;

- $B < 500 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- $F < 300 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- $\text{Zn} < 50 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag < Limite de quantification.

Pour le cuivre des concentrations élevées sont observées (allant jusqu'à $550 \mu\text{g.L}^{-1}$) ; cependant, compte tenu de la quantité de données disponibles et du caractère ponctuel de l'occurrence naturelle de cet élément dans les eaux souterraines, en l'état des connaissances il n'est pas possible de se prononcer quant à l'existence d'un fond géochimique élevé pour cet élément.

Pour les points proches du littoral, les concentrations en chlorures et en sodium dépassent ponctuellement 200 et 150 mg.L^{-1} respectivement. De la même manière on observe des concentrations en B et F (supérieures respectivement à 60 et à $190 \mu\text{g.L}^{-1}$) supérieures aux valeurs attendues pour des aquifères dans des lithologies volcaniques (Meybeck, 1986). L'approche isotopique décrite précédemment a mis en évidence que l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé contrôle la composition en éléments dissous de ces eaux. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé en chlorures et en sodium** et **intermédiaire en bore et en fluor** est identifiée pour les eaux souterraines **sous l'emprise potentielle du biseau salé** (Illustration 21).

4.3. MASSE D'EAU NORD CARAÏBES

4.3.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Nord Caraïbes » regroupe trois grands ensembles hydrogéologiques :

- A l'extrême Nord les andésites du Mont Conil
- Au nord les formations pyroclastiques émises par les différents édifices de la Montagne Pelée
- Au sud les andésites et dacites émises par le Morne Jacob puis les pitons du Carbet.

Les aquifères associés présentent deux types de porosité : porosité de fissure et/ou de fracture au sein des andésites et dacites et porosité d'interstice au sein des pyroclastites. Les nappes circulant dans les pyroclastites sont le plus souvent libres, tandis que les nappes circulant dans les andésites sont plutôt captives.

La zone géographique recouverte par la masse d'eau « Nord Caraïbes » est moins arrosée que la zone recouverte par la masse d'eau « Nord Atlantique » en raison des reliefs bloquant les précipitations à l'Est. La pluviométrie sur cette masse d'eau est comprise entre 200 et 4000 mm/an, les plus forts cumuls ne s'observant que sur les pitons du Carbet. La majeure partie de la masse d'eau ne dépassant pas les 2000 mm/an.

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent globalement toutes un **faciès bicarbonaté-calcique** sauf le point La Charmille (Indice BSS 1174ZZ0087, Saint Joseph) présentant un faciès bicarbonaté-sodique (Illustration 31).

La masse d'eau « Nord Caraïbes » décrit une **large gamme de concentrations élémentaires** (Illustration 32) :

- **Cl** : de 0,5 à 10 mmol.L⁻¹ soit < 300 mg.L⁻¹,
- **Na** : de 0,5 à 10 mmol.L⁻¹ soit < 110 mg.L⁻¹,
- **Ca** : de 0,25 à 1,5 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg.L⁻¹,
- **Mg** : de 0,1 à 2 mmol.L⁻¹ soit < 50 mg.L⁻¹,
- **SO₄** : de 0,08 à 0,8 mmol.L⁻¹ soit < 250 mg.L⁻¹.

Les valeurs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr décrivent également une gamme de composition importante (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,7045-0,7065) mais significativement inférieure à la composition isotopique en Sr de l'eau de mer (Illustration 34).

Les compositions isotopiques en B mesurées suggèrent une contribution de B provenant à la fois des aérosols marins via les eaux de pluie et de la lithologie (Illustration 35).

Ainsi **cette masse d'eau semble contrôlée majoritairement par des apports d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie et de la lithologie**. D'après les signatures isotopiques et les concentrations en Sr mesurées (Illustration 34), cette masse d'eau est susceptible également d'intégrer, mais avec des proportions moindres, de l'eau de mer.

Les compositions isotopiques en H et O mesurées décrivent également une large gamme de valeurs, couvrant presque la totalité des valeurs observées pour les eaux souterraines de la Martinique (Illustration 33). Les variabilités saisonnières observées pour les concentrations en éléments dissous et pour les signatures isotopiques en Sr sont peu prononcées ce qui suggère que les ressources en eau de cette masse d'eau sont localisées dans des réservoirs de taille relativement importante qui tendent à tamponner l'apport d'eau nouvelle par les eaux de pluies. Les variabilités de composition géochimique observées au sein de la masse d'eau semblent donc plus contrôlées par des variabilités spatiales dans la lithologie et dans l'alimentation en eau que par des variabilités temporelles liées à la période de recharge de l'aquifère.

4.3.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau « Nord Caraïbes » (9203), les données acquises montrent des concentrations élevées en Fe et en Mn, supérieures respectivement à $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ en fer et à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn. Les valeurs maximales observées pour ces deux éléments sont de $2\,040 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Fe et $1\,399 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn pour le point de Case Navire (Indice BSS 11177ZZ0165, Schœlcher).

L'origine des éléments Fe et Mn est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches en minéraux ferro-magnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). De plus l'approche isotopique engagée dans la présente étude a montré que les éléments dissous dans les eaux souterraines de la masse d'eau « Nord Caraïbes » (9202) proviennent majoritairement de la lithologie. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour le **fer** et le **manganèse**. Cependant la présence effective des éléments Fe et Mn dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères de la masse d'eau (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Les concentrations en Ca et Mg sont relativement élevées mais ne dépassent pas respectivement 105 mg.L^{-1} (Source Morestin, Indice BSS 1168ZZ0053, Morne Rouge). A noter que cette valeur est anormalement élevée par rapport à la moyenne des concentrations mesurées sur ce point qui est de 20 mg.L^{-1} et 40 mg.L^{-1} (forage de Fond Lahaye, indice BSS 1177ZZ0161, Schœlcher). Comme pour le fer et le manganèse, ces éléments proviennent des interactions eau/roche. Les roches volcaniques drainées libèrent du **Ca et du Mg** en quantité supérieure aux autres roches silicatées mais en quantité bien inférieure aux roches carbonatées (Meybeck, 1986). Ainsi le **fond géochimique** pour ces deux éléments sera considéré comme **intermédiaire**.

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les éléments majeurs suivants :

- sodium $<110 \text{ mg.L}^{-1}$
- potassium $<12 \text{ mg.L}^{-1}$,
- sulfates $<250 \text{ mg.L}^{-1}$

et pour tous les éléments traces suivants (excepté le fer et le manganèse) :

- As $<10 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Al $<30 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Ba $<40 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- B $<500 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cu $<20 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$
- F $<300 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Zn $<50 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag $<$ Limite de quantification.

Pour les points proches du littoral, les concentrations en chlorures et en sodium dépassent ponctuellement 200 et 150 mg.L^{-1} respectivement. De la même manière on observe des concentrations en B et F (supérieures respectivement à 60 et $190 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$) supérieures aux valeurs attendues pour des aquifères dans des lithologies volcaniques (Meybeck, 1986). L'approche isotopique décrite précédemment a mis en évidence que l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé contrôle la composition en éléments dissous de ces eaux. Ainsi une zone à risque de fond géochimique **élevé en chlorures et en sodium** et **intermédiaire en bore et en fluor** est identifiée pour les eaux souterraines sous l'emprise potentielle du biseau salé (Illustration 21).

4.4. MASSE D'EAU NORD ATLANTIQUE

4.4.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Nord Atlantique » regroupe trois grands ensembles hydrogéologiques :

- Au nord les andésites, basaltes et hyaloclastites associées au volcanisme du Morne Jacob
- Au sud les basaltes de Vert Pré (volcanisme sous marin de Vauclin Pitault)
- Au sud est la presqu'île de la caravelle constituée d'andésites et de hyaloclastites oligocènes, très fortement altérées

Les aquifères associés présentent majoritairement une porosité de fissure et/ou de fracture et les nappes circulant dans ces formations sont le plus souvent captives. La pluviométrie sur cette masse d'eau est comprise entre 500 et 5000 mm/an, les plus forts cumuls ne s'observant que dans les hauteurs du bassin versant de la rivière du Lorrain. La Caravelle quand à elle présente une pluviométrie avec des cumuls inférieurs à 500 mm/an.

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent globalement toutes un **faciès bicarbonaté-calcique** sauf le point Anse Charpentier (Indice BSS : 1169ZZ0006, Marigot) présentant un faciès bicarbonaté sodique et les points Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain) et Source Carabin (Indice BSS : 1169ZZ0082, Lorrain) présentant un faciès sulfaté-calcique (Illustration 31).

La masse d'eau « Nord Atlantique » décrit des gammes (Illustration 32) de **concentrations faibles en :**

- **Ca** : de 0,25 à 0,75 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg. L⁻¹,
- **Mg** : de 0,1 à 0,5 mmol.L⁻¹ soit < 50 mg.L⁻¹,

et intermédiaire en :

- **Cl** : de 0,2 à 2 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg. L⁻¹,
- **Na** : de 0,4 à 2 mmol.L⁻¹ soit < 80 mg.L⁻¹,

Les valeurs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr décrivent une gamme de composition importante (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,7042-0,7072) (Illustration 34). Les compositions isotopiques en B décrivent également des valeurs contrastées ($\delta^{11}\text{B}$ = -3,8 et 31,9 ‰) et suggèrent une contribution de B provenant à la fois des aérosols marins via les eaux de pluie et de la lithologie (Illustration 35).

Ainsi **cette masse d'eau semble contrôlée majoritairement par des apports d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie et de la lithologie.** D'après les signatures isotopiques et les concentrations en Sr mesurées (Illustration 34), cette

masse d'eau est susceptible également d'intégrer de l'eau de mer via des interactions avec le biseau salé.

Les compositions isotopiques en H et O mesurées décrivent des valeurs basses comparativement à la totalité des valeurs observées pour les eaux souterraines de la Martinique (Illustration 33). Les variabilités saisonnières dans la source d'éléments dissous, tracées par les concentrations en éléments dissous et les signatures isotopiques en Sr sont peu prononcées. La variabilité de composition isotopique en H et O, notamment pour le point Fond Brulé (Indice BSS : 1169ZZ0084, Lorrain), peut être significative et traduire des apports d'eau de pluie pendant la période de recharge de l'aquifère sans que la proportion d'éléments dissous provenant des différentes sources ne varie de manière significative.

4.4.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau « Nord Atlantique » (9202), les données montrent des concentrations élevées en Fe et en Mn, supérieures respectivement à $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ en fer et à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn. Les valeurs maximales observées pour ces deux éléments sont de $630 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Fe et $1\,216 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn pour le point la Borelli (1174ZZ0088, Gros Morne).

L'origine des éléments Fe et Mn est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches minéraux ferro-magnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). De plus l'approche isotopique engagée dans la présente étude a montré que les éléments dissous dans les eaux souterraines de cette masse d'eau proviennent majoritairement de la lithologie. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour le **fer** et le **manganèse**. Cependant la présence effective de ces éléments dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères de la masse d'eau (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Les concentrations en Ca et en Mg considérées dans cette étude sont relativement élevées mais ne dépassent pas respectivement 31 et $9,2 \text{ mg.L}^{-1}$ (Point Fond Brulé, Indice BBS 1169ZZ0084, Le Lorrain). Comme pour le fer et le manganèse, ces éléments proviennent des interactions eau/roche. Les roches volcaniques drainées libèrent du **Ca** et du **Mg** en quantité supérieure aux autres roches silicatées mais en quantité bien inférieure aux roches carbonatées (Meybeck, 1986). Ainsi le **fond géochimique** pour ces deux éléments sera considéré comme **intermédiaire**.

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les éléments majeurs suivants :

- sodium $<80 \text{ mg.L}^{-1}$
- potassium $<12 \text{ mg.L}^{-1}$,
- chlorures $<60 \text{ mg.L}^{-1}$
- sulfates $<250 \text{ mg.L}^{-1}$

et pour tous les éléments traces suivants (excepté le fer et le manganèse le fluor et le bore) :

- Ba $<40 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cu $<20 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$
- Zn $<50 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag $<$ Limite de quantification.

Pour l'élément **Al** des concentrations **ponctuellement élevées** sont observées (allant jusqu'à $200 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$), compte tenu de la quantité de données disponibles il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances d'identifier une zone à risque de fond géochimique pour cet élément. De la même manière les **concentrations élevées** en **As** (allant jusqu'à $33 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$) ne permettent pas d'identifier une zone à risque pour cet élément car les seuils de quantification des données actuellement disponibles restent insuffisants.

Pour les points proches du littoral, les concentrations en chlorures et en sodium dépassent ponctuellement 200 et 150 mg.L^{-1} respectivement. De la même manière on observe des concentrations en B et F (supérieures respectivement à 60 et à $190 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$) dépassant les valeurs attendues pour des aquifères dans des lithologies volcaniques (Meybeck, 1986). L'approche isotopique décrite précédemment a mis en évidence que l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé contrôle la composition en éléments dissous de ces eaux. Ainsi une zone à risque de fond géochimique **élevé en chlorures et en sodium et intermédiaire en bore et en fluor** est identifiée pour les eaux souterraines sous l'emprise potentielle du biseau salé (Illustration 21).

4.5. MASSE D'EAU CENTRE

4.5.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Centre » regroupe trois grands ensembles hydrogéologiques :

- Au nord et à l'ouest les andésites et dacites émises par le Morne Jacob puis les pitons du Carbet.
- A l'est les hyaloclastites du volcanisme Vauclin-Pitault
- Au centre les basaltes de Vert Pré recouvert par des dépôts alluviaux dans la plaine du Lamentin
- Au Sud les andésites associées à la phase effusive de Rivière Pilote

Les aquifères associés présentent majoritairement une porosité de fissure et/ou de fracture et les nappes circulant dans ces formations sont le plus souvent captives. La pluviométrie sur cette masse d'eau est comprise entre 500 et 4000 mm/an, les plus forts cumuls ne s'observant que sur les pitons du Carbet. La majeure partie de la masse d'eau ne dépassant pas les 1500 mm/an.

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent l'ensemble des faciès chimiques sur le diagramme de Piper, ainsi qu'une large gamme (Illustration 31) de concentrations:

- **Ca** : de 0,2 à 1 mmol.L⁻¹ soit < 60 mg. L⁻¹,
- **Mg** : de 0,04 à 0,6 mmol.L⁻¹ soit < 50 mg.L⁻¹,
- **Cl** : de 0,2 à 3 mmol.L⁻¹ soit < 100 mg. L⁻¹,
- **Na** : de 0,3 à 3 mmol.L⁻¹ soit < 70 mg.L⁻¹,

Les valeurs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr décrivent également une large gamme de composition (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,7048-0,7070), avec comparativement aux autres points de la Martinique une contribution importante de Sr provenant de l'eau de pluie (Illustration 34). L'unique composition isotopique en B ($\delta^{11}\text{B} = 20,2\%$ pour le point d'indice BSS 1179ZZ0158) mesurée pour cette masse d'eau suggère un mélange de B provenant de l'eau de pluie, de la lithologie et de l'eau de mer (Illustration 35).

Pour les points où les concentrations en éléments dissous sont les plus basses, les eaux souterraines semblent majoritairement contrôlées par des **apports d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie et de la lithologie**. Cependant d'après les signatures isotopiques et les concentrations en Sr mesurées (Illustration 34), cette masse d'eau est susceptible d'intégrer, ponctuellement et avec des proportions moindres, de l'eau de mer.

Les eaux souterraines de la masse d'eau « Centre » présentent une variabilité saisonnière de l'origine de l'eau, traduite par des signatures isotopiques en H et O contrastées entre la saison sèche et la saison des pluies. Les variations de valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ suivent les variations saisonnières attendues pour les eaux de pluie. Pour le point Sarrault (Indice BSS 1179ZZ0158, Lamentin) une forte variabilité saisonnière

dans la source d'éléments dissous est également observée, avec une contribution de Sr provenant de la lithologie plus importante en saison des pluies. Ainsi les variabilités de composition géochimique observées au sein de la masse d'eau semblent à la fois contrôlées par des variabilités spatiales dans la lithologie et par des variabilités temporelles liées à la recharge de l'aquifère par les eaux de pluie.

4.5.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau «Centre» (9204), les données montrent des concentrations élevées en Fe et en Mn, supérieures respectivement à $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ (jusqu'à 14 mg.L^{-1} en Fe pour le point la Médaille, indice BSS 1173ZZ0072, Fort de France) et à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ (jusqu'à $3,6 \text{ mg.L}^{-1}$ en Mn pour le point la Médaille, indice BSS 1173ZZ0072, Fort de France).

L'origine des éléments Fe et Mn est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches en minéraux ferro-magnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). De plus l'approche isotopique engagée dans la présente étude a montré que les concentrations en éléments dissous des eaux souterraines de la masse d'eau «Centre» (9204) proviennent majoritairement de la lithologie. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour le **fer** et le **manganèse**. Cependant la présence effective de ces éléments dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères de la masse d'eau (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Les concentrations en Ca et Mg considérées dans cette étude sont relativement élevées mais ne dépassent pas respectivement 45 mg.L^{-1} (Point Bois Rouge Indice BSS 1179ZZ0157, Ducos) et 11 mg.L^{-1} (Vert Pré, indice BSS 1175ZZ0106, Le Robert). Comme pour le fer, ces éléments proviennent des interactions eau/roche. Les roches volcaniques drainées libèrent du **Ca** et du **Mg** en quantité supérieure aux autres roches silicatées mais en quantité bien inférieure aux roches carbonatées (Meybeck, 1986). Ainsi le **fond géochimique** pour ces deux éléments sera considéré comme **intermédiaire**.

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les éléments majeurs suivants :

- sodium $<70 \text{ mg.L}^{-1}$
- potassium $<12 \text{ mg.L}^{-1}$,
- sulfates $<250 \text{ mg.L}^{-1}$

et pour tous les éléments traces suivants (excepté le fer et le manganèse) :

- As $<10 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Al $<30 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Ba $<40 \mu\text{g.L}^{-1}$;

- Cu <20 $\mu\text{g.L}^{-1}$
- F<300 $\mu\text{g.L}^{-1}$
- Zn <50 $\mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag <Limite de quantification.

Pour les points proches du littoral, les concentrations en chlorures et en sodium dépassent ponctuellement 200 et 150 mg.L^{-1} respectivement. De la même manière ont observé des concentrations en B et F (supérieures respectivement à 60 et 190 $\mu\text{g.L}^{-1}$) dépassant les valeurs attendues pour des aquifères dans des lithologies volcaniques (Meybeck, 1984). L'approche isotopique décrite précédemment a mis en évidence que l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé contrôle la composition en éléments dissous de ces eaux. Ainsi une zone à risque de fond géochimique **élevé en chlorures et en sodium** et **intermédiaire en bore et en fluor** est identifiée pour les eaux souterraines sous l'emprise potentielle du biseau salé (Illustration 21).

4.6. MASSE D'EAU SUD CARAÏBES

4.6.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Sud Caraïbes » regroupe deux grands ensembles hydrogéologiques :

- A l'extrême Ouest les dépôts pyroclastiques et laves associées au volcanisme des Roches Genty et du Morne Réduit
- Sur la majorité du reste de la masse d'eau les andésites et brèches associées à la phase effusive de Rivière Pilote et au volcanisme fissural du Sud Martiniquais

Les aquifères associés présentent deux types de porosité : porosité de fissure et/ou de fracture au sein des andésites et dacites et porosité d'interstice au sein des pyroclastites. Les nappes circulant dans les pyroclastites et les brèches sont le plus souvent libres, tandis que les nappes circulant dans les andésites sont plutôt captives. Les cumuls pluviométriques sur cette masse d'eau sont généralement inférieurs à 1000 m/an.

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent globalement toutes un **faciès chloruré-sodique** sauf les points La Mauny (Indice BSS : 1183ZZ0024, Rivière Pilote) Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) et Fougainville (Indice BSS : 1183ZZ0052, Rivière Pilote) présentant un faciès sulfaté-calcique (Illustration 31).

La masse d'eau « Sud Caraïbes » présente ((Illustration 32) des **concentrations élevées en :**

- **Cl** : $>5 \text{ mmol.L}^{-1}$, soit $>200 \text{ mg.L}^{-1}$,
- **Na** : $>5 \text{ mmol.L}^{-1}$ soit $>150 \text{ mg.L}^{-1}$,
- **Ca** : jusqu'à 2 mmol.L^{-1} soit $>60 \text{ mg.L}^{-1}$,
- **Mg** : jusqu'à 2 mmol.L^{-1} soit $>50 \text{ mg.L}^{-1}$

Les concentrations en SO_4 sont plus élevées que sur le reste de la Martinique mais restent inférieures à 3 mmol.L^{-1} soit 250 mg.L^{-1} .

Les valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont élevées, de 0,7055 à 0,7080 et traduisent clairement une **contribution de Sr provenant de l'eau de mer via l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé** (Illustration 34).

Les compositions isotopiques et les concentrations en B mesurées pour cette masse d'eau (Illustration 35) suggèrent une contribution de B majoritairement d'origine lithologique pour le point Vatable (Indice BSS : 1181ZZ0132, Trois Ilets) et majoritairement d'origine marine pour le point Grande Anse (Indice BSS : 1181ZZ0131, Anses d'Arlet).

Ainsi la composition géochimique de cette masse d'eau semble **contrôlée de manière importante par des éléments dissous provenant de l'eau mer via l'interaction des eaux souterraines avec le biseau salé**.

Les compositions isotopiques en H et O mesurées décrivent également une large gamme de valeurs, couvrant presque la totalité des valeurs observées pour les eaux souterraines de la Martinique (Illustration 33). On observe des variabilités saisonnières prononcées dans la source d'éléments dissous, tracées par les concentrations en éléments dissous et les signatures isotopiques en Sr et dans l'origine de l'eau.

La variabilité de composition isotopique en O, notamment pour le point Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois îlets) et Grande Anse (Indice BSS 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) est significative et permettrait de tracer vraisemblablement les apports d'eau de pluie pendant la période de recharge de l'aquifère. Les points Vatable (Indice BSS 1181ZZ0132, Trois îlets), Grand Fond (Indice BSS 1186ZZ0118, Marin) et Stade communal (Indice BSS 1185ZZ0120, Ste Luce) présentent notamment un enrichissement en Sr provenant de l'eau de mer via l'interaction avec le biseau salé en saison des pluies (Illustration 26b). A l'inverse de ces points, le point Grande Anse (Indice BSS 1181ZZ0131, Anses d'Arlet) présente, d'après les compositions isotopiques en Sr, une contribution plus importante d'eau provenant de l'eau de pluie et d'éléments dissous provenant des interactions eau-roche pendant la saison des pluies.

4.6.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau «Sud Caraïbes» (9206), Les données montrent des **concentrations élevées** :

- **en Ca** supérieures à 60 mg.L⁻¹ (jusqu'à 106 mg.L⁻¹ pour le point La Mauny, indice BSS 1183ZZ0024, Rivière Pilote),
- **en Mg** supérieures à 50 mg.L⁻¹ (jusqu'à 69 mg.L⁻¹ pour le point Grande Anse, Indice BSS 1181ZZ0131, Les Anses d'Arlets),
- **en Na** supérieures à 150 mg.L⁻¹ (jusqu'à 303 mg.L⁻¹ pour le point Vatable, indice BSS 1181ZZ0132, Trois îlets) et
- **en Cl** supérieures à 200 mg.L⁻¹ (jusqu'à 530 mg.L⁻¹ pour le point Grande Anse, Indice BSS 1181ZZ0131, Les Anses d'Arlets).

L'approche isotopique a montré que les concentrations en éléments dissous des eaux souterraines de cette masse d'eau sont **contrôlées majoritairement par l'eau salée** via l'emprise du biseau salé, et/ou le mélange avec de l'eau de mer dite « fossile » et/ou libération d'éléments dissous via la dissolution de roches carbonatées. Ces différentes sources d'éléments dissous discutées pour chaque point de prélèvement et synthétisée en Annexe 2 permettent d'expliquer les concentrations élevées observées et permettent d'identifier un **fond géochimique élevé** pour les éléments **Ca, Mg, Na et Cl**. Ce fond géochimique est d'autant plus prononcé que l'on se rapproche de la zone d'emprise du biseau salé. C'est pour cette raison que cette masse d'eau est également concernée par une zone à risque de **fond géochimique élevé** pour les éléments **Na et**

Cl et intermédiaire pour les éléments **B** et **F** dans la zone d'emprise potentielle du biseau salé.

Les **concentrations en Fe et en Mn sont également élevées** et dépassent respectivement $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ (jusqu'à $2\,790 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Fe pour le point Dizac, indice BSS 1184ZZ0001, Le Diamant) et $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ (jusqu'à $2\,170 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Mn pour le point La Mauny, indice BSS 1183ZZ0024, Rivière Pilote). L'origine des éléments Fe et Mn est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches en minéraux ferro-magnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour le **fer** et le **manganèse**. Cependant la présence effective de ces éléments dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères de la masse d'eau (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les éléments majeurs suivants :

- potassium $<12 \text{ mg.L}^{-1}$,
- sulfates $<250 \text{ mg.L}^{-1}$

et pour tous les éléments traces suivants (excepté le fer et le manganèse) :

- As $<10 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Al $<30 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Ba $<40 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- B $<500 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Cu $<20 \mu\text{g.L}^{-1}$
- F $<300 \mu\text{g.L}^{-1}$
- Zn $<100 \mu\text{g.L}^{-1}$;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag $<$ Limite de quantification.

4.7. MASSE D'EAU SUD ATLANTIQUE

4.7.1. Différenciation géochimique

La masse d'eau « Sud Atlantique » regroupe trois grands ensembles hydrogéologiques :

- Au nord et au centre les hyaloclastites associées à la chaîne volcanique sous-marine de Vauclin Pitault.
- Au Sud, la Presqu'île de Sainte Anne, avec l'arc ancien les formations volcaniques oligocènes très fortement altérées.
- Également sur la Presqu'île de Sainte Anne les quelques formations calcaires.

Les aquifères associés présentent deux types de porosité : porosité de fissure et/ou de fracture au sein des hyaloclastites et porosité d'interstice et karstique au sein des calcaires. Les nappes circulant dans les calcaires sont le plus souvent libres, tandis que les nappes circulant dans les hyaloclastites sont plutôt captives. Les cumuls pluviométriques sur cette masse d'eau sont généralement inférieurs à 1000 m/an.

Les eaux souterraines de cette masse d'eau décrivent globalement toutes un **faciès bicarbonaté-calcique** sauf les points Grand Fond (Indice BSS : 1179ZZ0299, François) et Pontalery (Indice BSS : 1179ZZ0300, Robert) présentant un faciès chloruré-sodique et sulfaté-calcique (Illustration 31).

La masse d'eau « Sud Atlantique » présente des **concentrations élevées en** (Illustration 32) :

- **Cl** : > 5 mmol.L⁻¹ soit >200 mg.L⁻¹) et en
- **Na** : > 5 mmol.L⁻¹ soit >150 mg.L⁻¹

et décrit de **larges gammes de concentrations en** :

- **Ca** : de 0,75 à 3,25 mmol.L⁻¹ soit >60 mg.L⁻¹ et en
- **Mg** : de 0,02 à 2 mmol.L⁻¹ soit >50 mg.L⁻¹

Les valeurs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr mesurées pour la masse d'eau « Sud Atlantique » décrivent également une large gamme de composition (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,7047-0,7083), avec, comparativement aux autres points de la Martinique, une **contribution importante de Sr provenant de l'eau de mer** (Illustration 34). L'unique composition isotopique en B (δ¹¹B = 31,1‰ pour le point Grand Fond, Indice BSS 1186ZZ0118, Le Marin) suggère une contribution majoritaire de B provenant de l'eau de mer (Illustration 35).

Pour les points où les concentrations en éléments dissous sont les plus basses, les eaux souterraines semblent majoritairement contrôlées par des apports d'éléments dissous provenant de l'eau de pluie et de la lithologie, c'est le cas notamment du point La Victoire (Indice BSS : 1179ZZ0228, Le François) (Illustration 34).

Les eaux souterraines de cette masse d'eau présentent une variabilité saisonnière dans l'origine de l'eau et dans la source d'éléments dissous, tracées par les concentrations en éléments dissous et les signatures isotopiques en Sr. En effet les variations de valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ pour le point Grand Fond (Indice BSS : 1186ZZ0118, Marin) suivent les variations saisonnières attendues pour les valeurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurées pour les eaux de pluie.

Ainsi les variabilités de composition géochimique observées au sein de la masse d'eau semblent à la fois contrôlées par des variabilités spatiales liées à la contribution plus ou moins importante d'éléments dissous provenant du biseau salé et des variabilités temporelles liées à la fois à la recharge de l'aquifère par les eaux de pluie et des connections variables entre les eaux souterraines et les eaux du biseau salé suivant le régime hydrique de l'aquifère. Bien que la contribution d'éléments dissous provenant de l'altération de roches carbonatées ait été mise en évidence pour certains points de prélèvement des eaux souterraines, ce processus reste anecdotique.

4.7.2. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire

Pour la masse d'eau «Sud Atlantique» (9205), Les données montrent des **concentrations élevées supérieures à :**

- 60 mg.L⁻¹ en **Ca** (jusqu'à 282 mg.L⁻¹ pour le point Grand Fond, indice BSS 1179ZZ0299, Le François),
- 150 mg.L⁻¹ en **Na** (jusqu'à 225 mg.L⁻¹ pour le point Puyferrat, Indice BSS 1183ZZ0026, Le Vauclin),
- 200 mg.L⁻¹ en **Cl** (jusqu'à 378 mg.L⁻¹ pour le point Puyferrat, Indice BSS 1183ZZ0026, Le Vauclin) et
- 12 mg.L⁻¹ en **K** (jusqu'à 58 mg.L⁻¹ pour le point Grand Fond, indice BSS 1179ZZ0299, Le François).

L'approche isotopique a montré que les concentrations en éléments dissous des eaux souterraines de cette masse d'eau sont contrôlées majoritairement par l'eau de mer via l'emprise du biseau salé, et/ou le mélange avec de l'eau de mer dite « fossile » et/ou libération d'éléments dissous via la dissolution de roches carbonatées. Ces différentes sources d'éléments dissous discutées précédemment pour chaque point de prélèvement et synthétisé dans l'Annexe 2 permettent d'expliquer les concentrations élevées observées et permettent d'identifier un **fond géochimique élevé** pour les éléments **Ca, Cl, Na et K**. Ce fond géochimique est d'autant plus prononcé que l'on se rapproche de la zone d'emprise du biseau salé. C'est pour cette raison que cette masse d'eau, est également concernée par une zone à risque de **fond géochimique élevé** pour les éléments **Na et Cl** et intermédiaire pour les éléments **B et F** dans la zone d'emprise potentielle du biseau salé.

Les concentrations en Fe et en Mn sont élevées, elles dépassent respectivement 200 µg.L⁻¹ (jusqu'à 2 950 µg.L⁻¹ en Fe pour le point Puyferrat, Indice BSS 1183ZZ0026, Le Vauclin) et 50 µg.L⁻¹ (jusqu'à 1 264 µg.L⁻¹ en Mn pour ce même point). L'origine des

éléments Fe et Mn est attribuée aux interactions eau/roche. En effet les lithologies volcaniques locales drainées par les eaux souterraines sont riches en minéraux ferromagnésiens, notamment des pyroxènes (hypersthène, augite, olivine...) et amphiboles (amphiboles ferromagnésiennes, hornblende...). Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé** est affectée pour le **fer** et le **manganèse**. Cependant la présence effective de ces éléments dans les eaux souterraines dépend également du caractère plus ou moins captif des niveaux aquifères de la masse d'eau (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006).

Les concentrations en Mg mesurées sont relativement élevées mais dépassent rarement 40 mg.L⁻¹ (jusqu'à 45 mg.L⁻¹ pour le point Puyferrat, Indice BSS 1183ZZ0026, Le Vauclin). D'après l'approche isotopique engagée dans la présente étude, le Mg dans les eaux souterraines de cette masse d'eau peut provenir soit des interactions eau/roche (roches volcaniques ou carbonatées), soit de l'eau de mer via l'emprise du biseau salé, et/ou le mélange avec de l'eau de mer dite « fossile ». Les concentrations en Mg mesurées sont supérieures à celles attendues pour les roches silicatées mais bien inférieures à celles attendues pour des roches drainant des roches carbonatées (Meybeck, 1986). Ainsi le **fond géochimique** pour le **Mg** sera considéré comme **intermédiaire**.

Le fond géochimique dans les eaux souterraines est considéré comme faible pour les sulfates (<250 mg.L⁻¹) ainsi que pour les éléments traces suivants :

- As <10 µg.L⁻¹ ;
- B <500 µg.L⁻¹ ;
- Cu <20 µg.L⁻¹ ;
- Zn <100 µg.L⁻¹ ;
- Cd, Cr, Ni, Pb, Ag <Limite de quantification,

Pour les éléments Al et Ba des concentrations ponctuellement élevées sont observées (allant respectivement jusqu'à 200 et 200 µg.L⁻¹), compte tenu de la quantité de données disponibles il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances d'identifier une zone à risque de fond géochimique pour ces éléments. Pour le Baryum, il semble envisageable que cet élément soit associé à l'emprise du biseau salé et donc il est possible qu'il existe un fond géochimique élevé pour cet élément.

4.8. ILLUSTRATIONS

Les illustrations citées dans le chapitre 4 sont présentées ci-dessous :

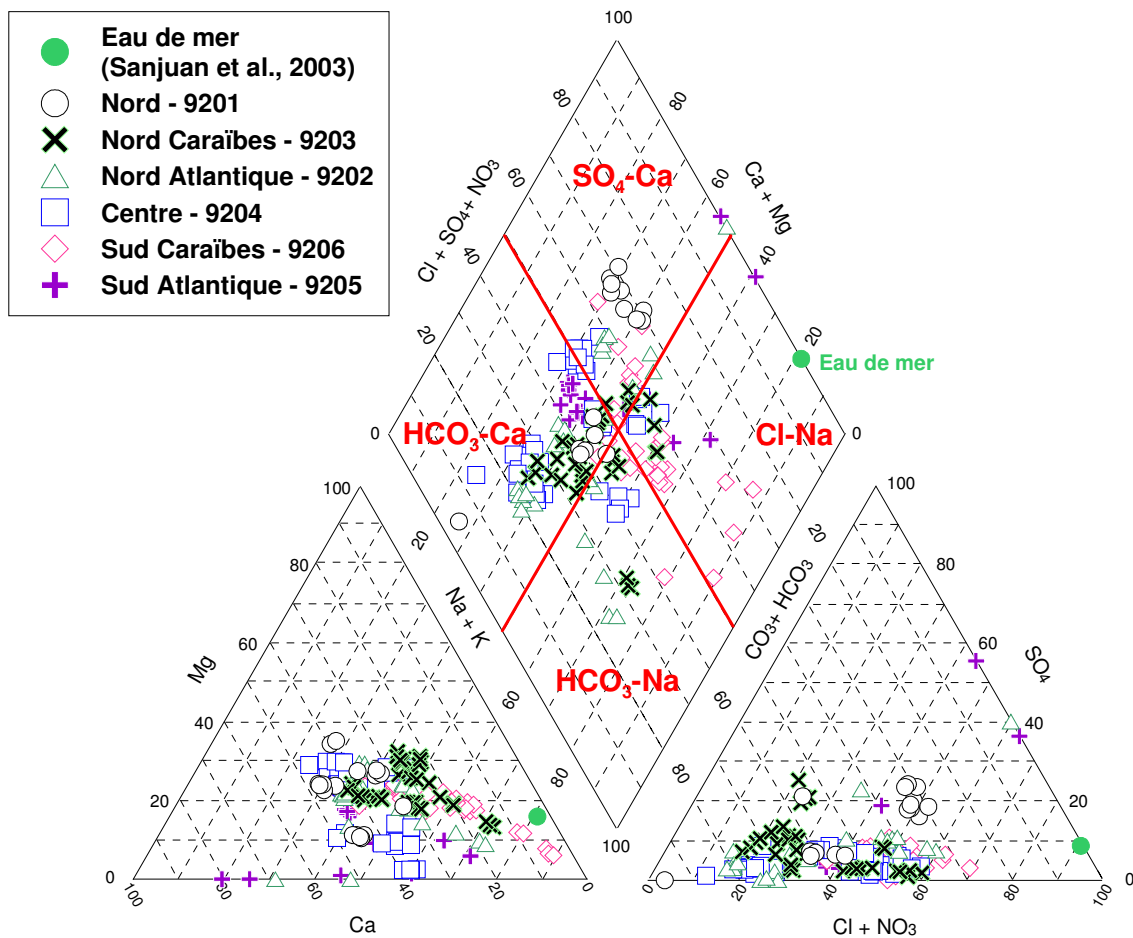


Illustration 31 : Diagramme de Piper pour toutes les campagnes de prélèvement depuis 2004 en fonction de la masse d'eau considérée.

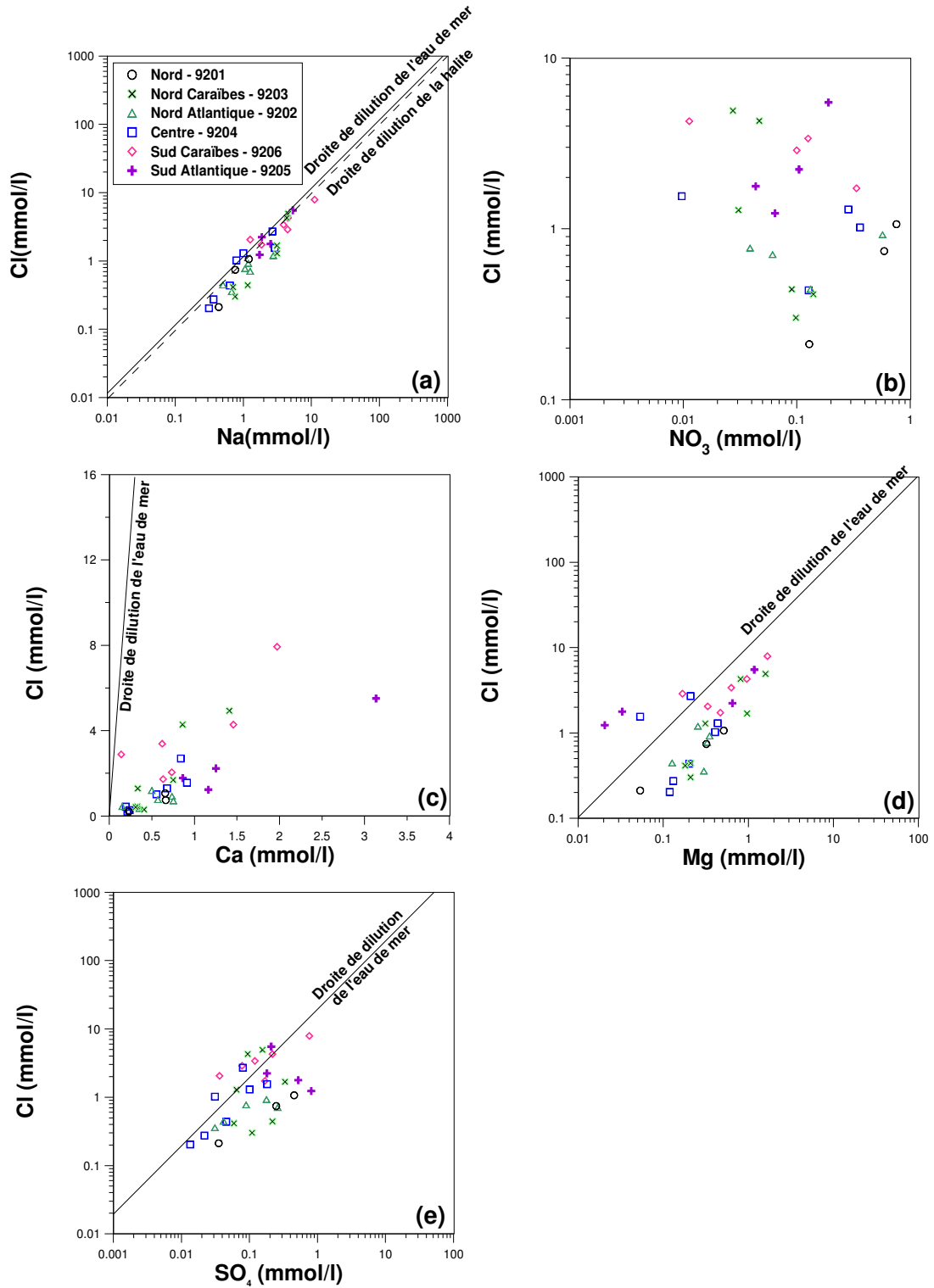


Illustration 32 : Cl vs. Na (a), Cl vs. SO₄ (b), Cl vs. NO₃ (c), Cl vs. Ca (d), Cl vs. Mg (e), Cl vs. Sr (f) pour la campagne de prélèvement d'avril 2006 pour les 6 masses d'eau de la Martinique.

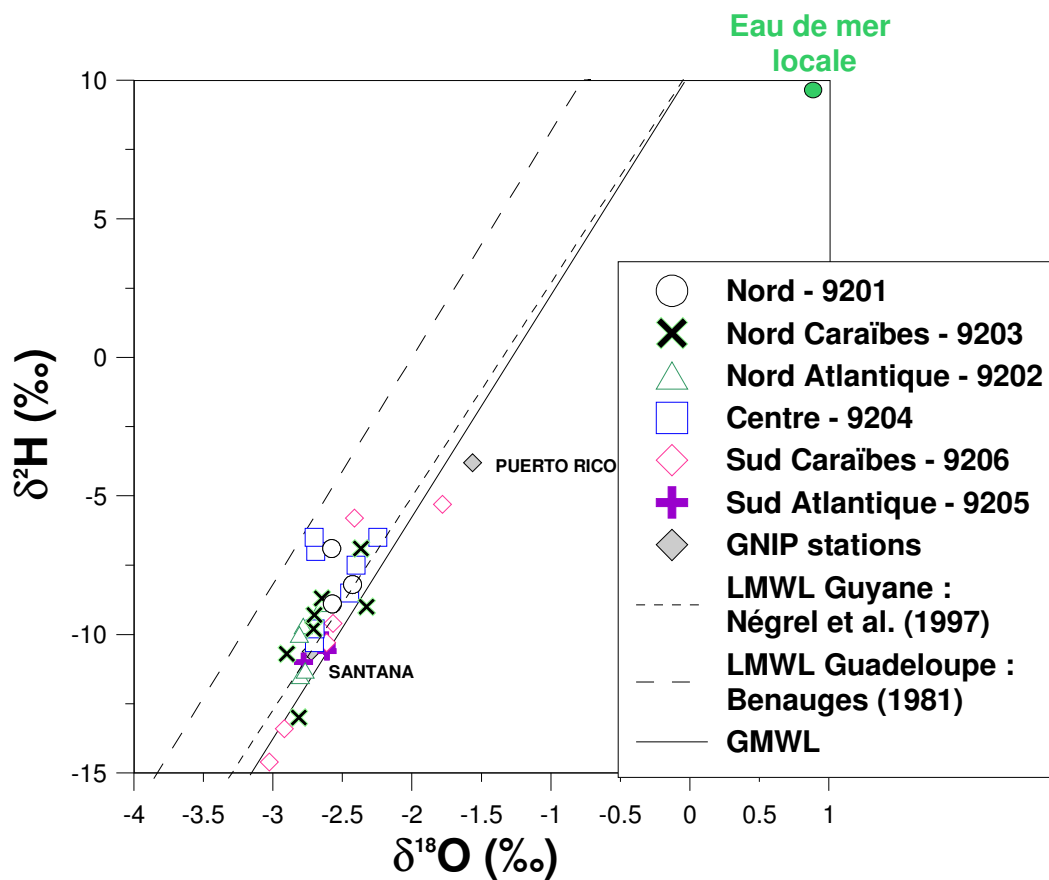


Illustration 33 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ pour les 6 masses d'eau de la Martinique.

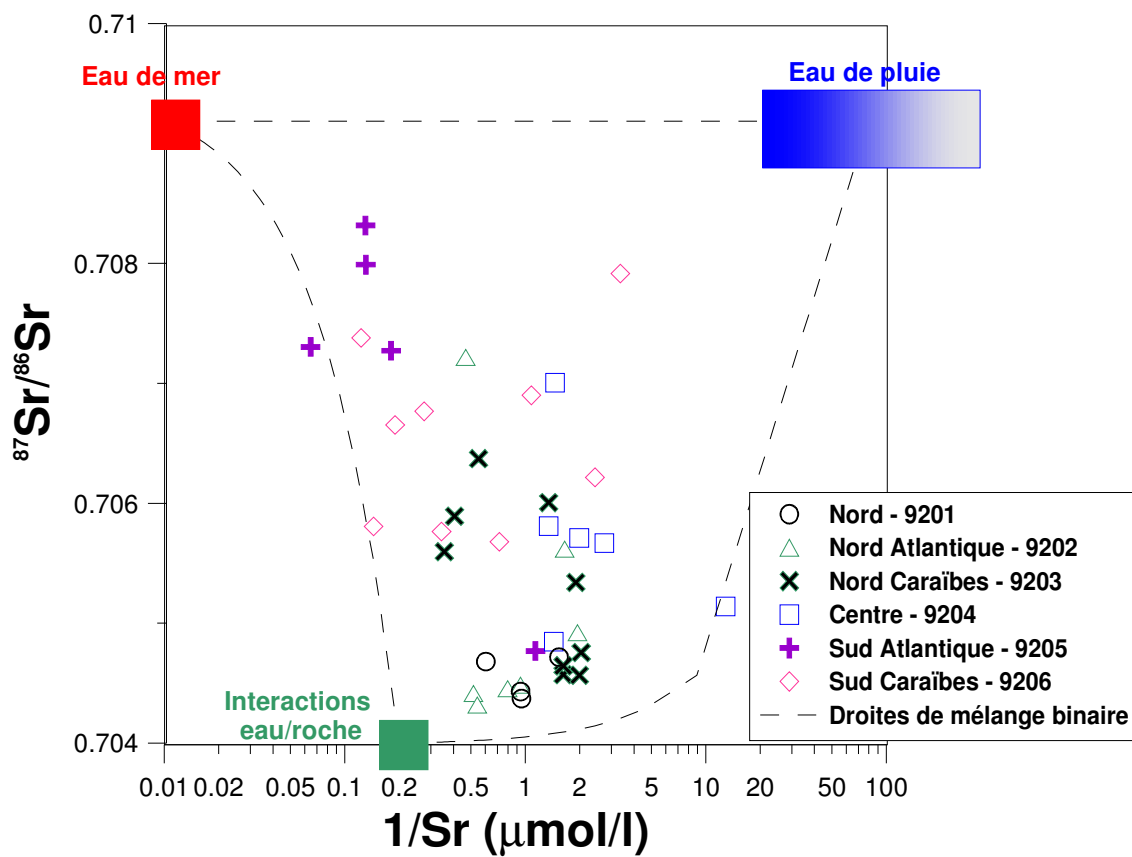


Illustration 34 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les 6 masses d'eau de la Martinique.

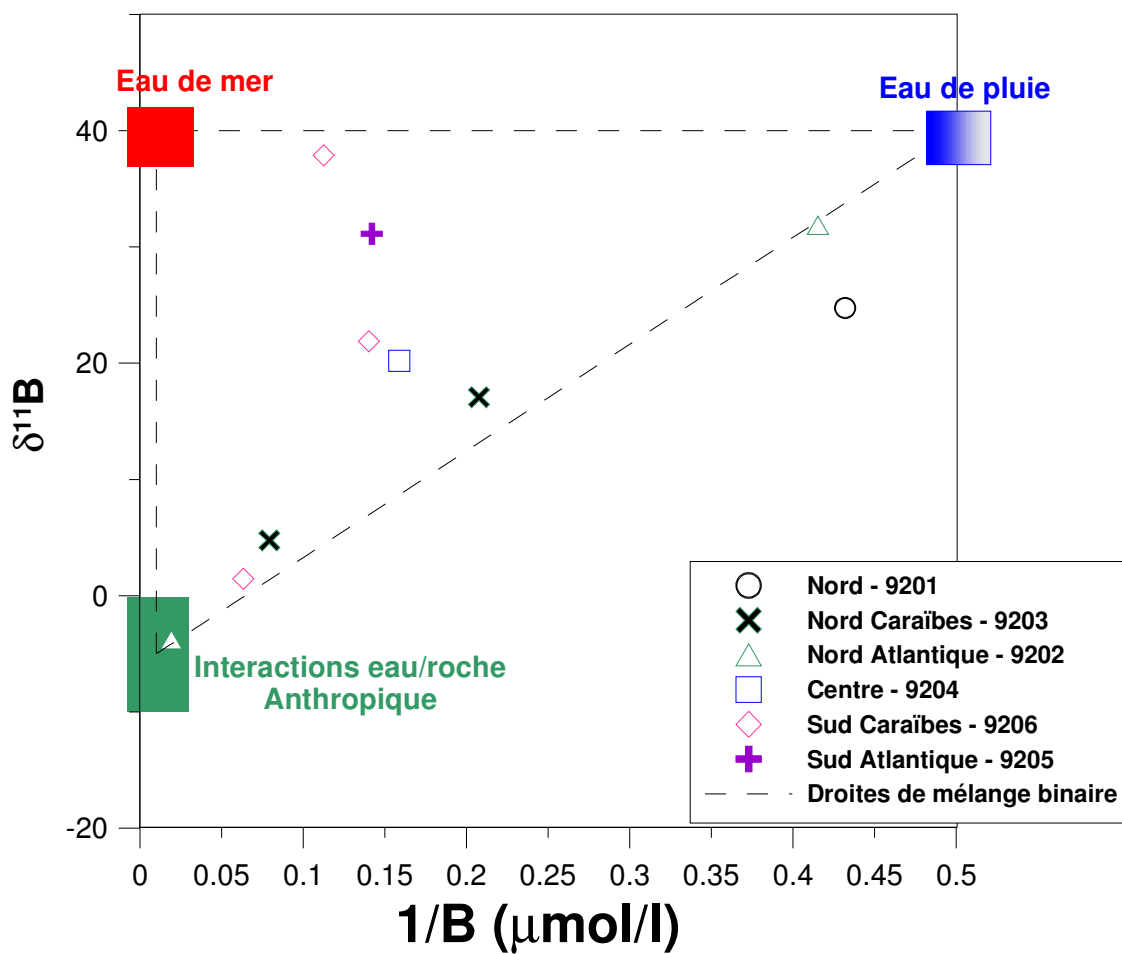


Illustration 35 : $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/B$ pour les 6 masses d'eau de la Martinique.

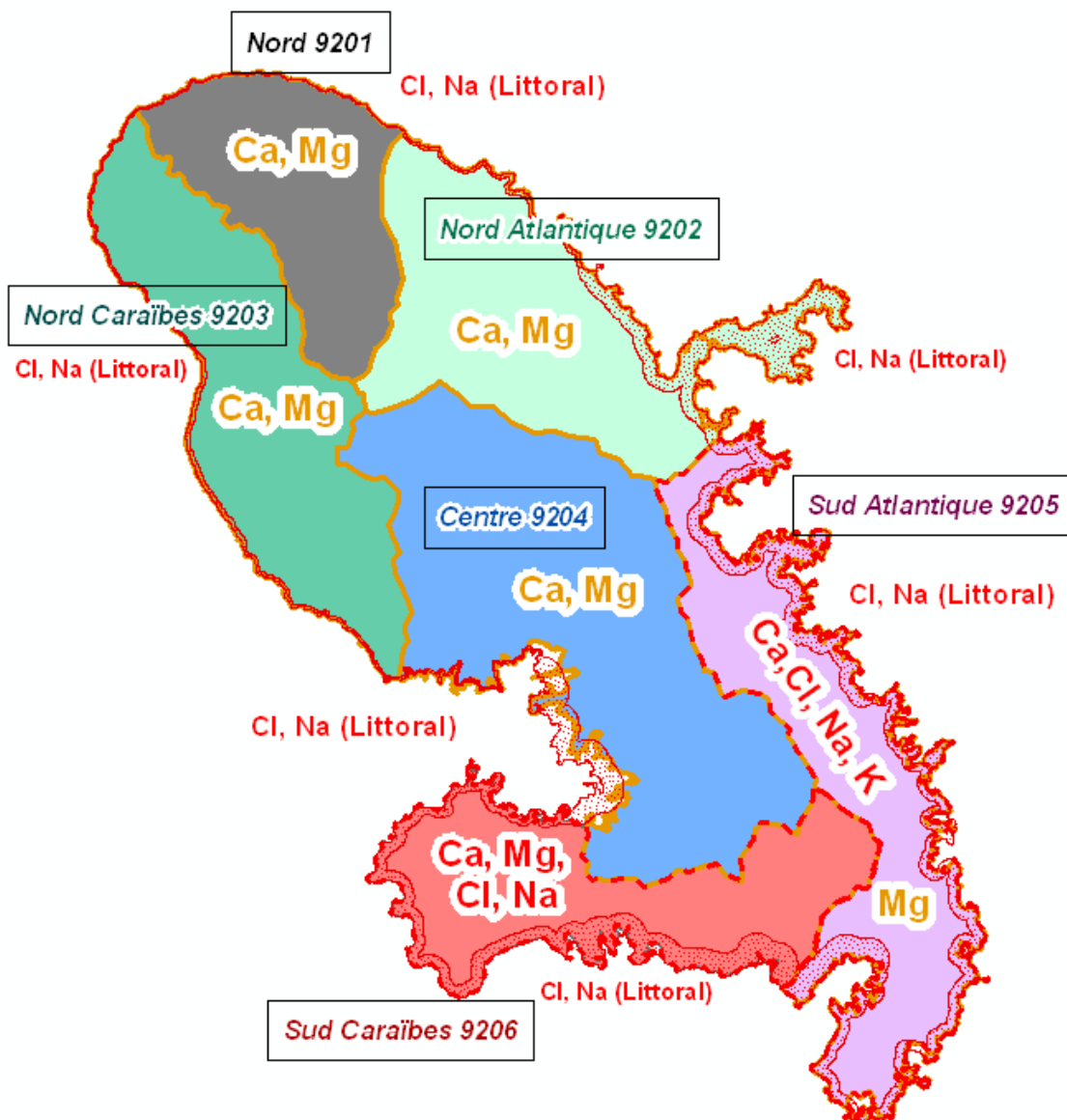


Illustration 36 : **Eléments majeurs** : zones à risque de fond géochimique élevé (en rouge) et intermédiaire (en orange) en éléments majeurs pour les eaux souterraines identifiées à partir de l'approche géochimique classique et isotopique proposée dans cette étude.

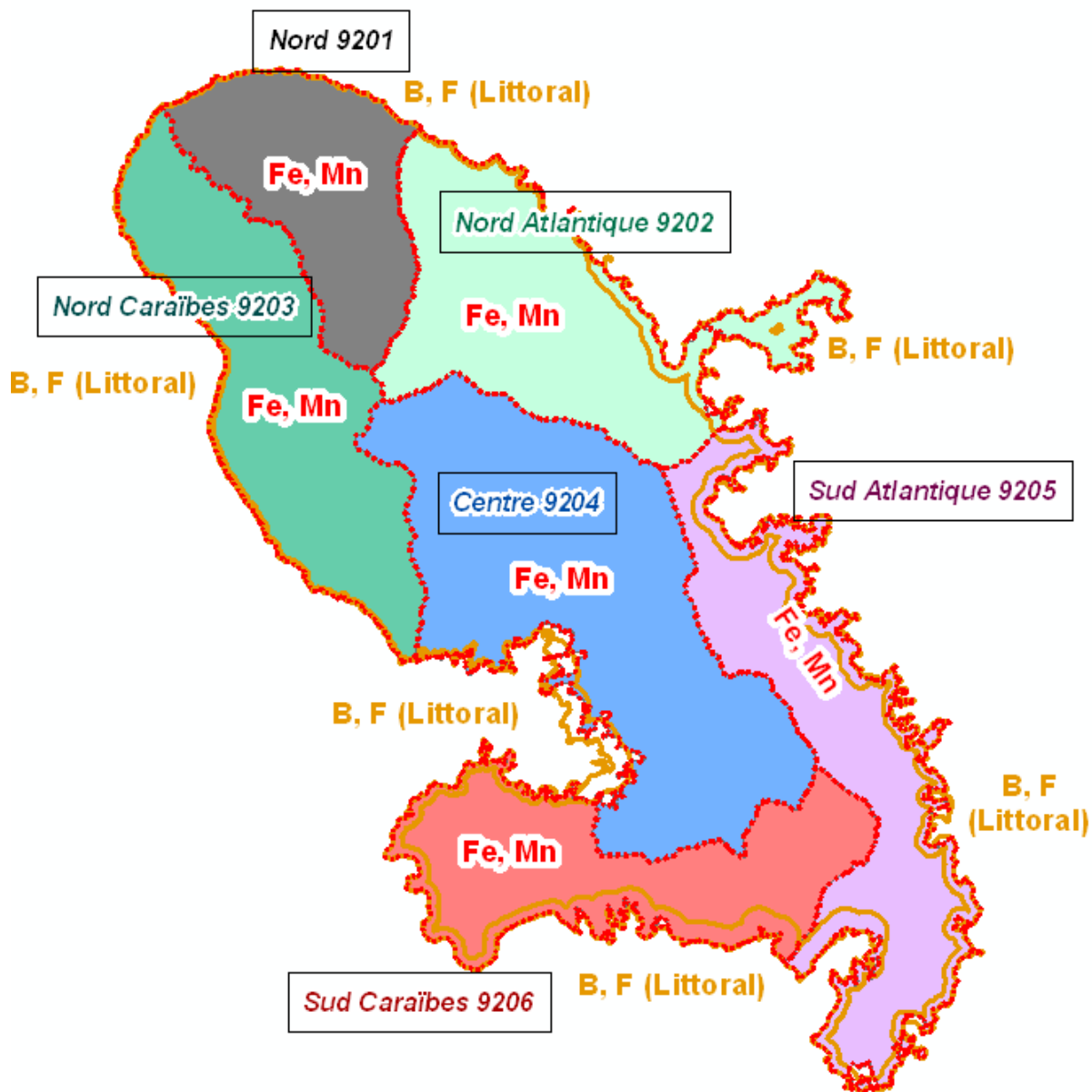


Illustration 37 : **Eléments traces** :Zones à risque de fond géochimique élevé (en rouge) et intermédiaire (en orange) en éléments traces pour les eaux souterraines identifiées à partir de l'approche géochimique classique et isotopique proposée dans cette étude.

5. Conclusion

Dans le but d'élaborer un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique, incluant l'étude de la qualité et de la vulnérabilité de la ressource, la Région Martinique et le BRGM se sont associés dans le cadre d'un projet de recherche. Le présent rapport correspond à la phase 1 : Evaluation et interprétation des caractéristiques géochimiques naturelles des eaux souterraines de la Martinique. La démarche s'est articulée suivant 3 étapes. La première étape a permis de réaliser la synthèse des données existantes sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique, notamment des données acquises par le BRGM depuis 2004 dans le cadre du suivi du réseau patrimonial de contrôle de la qualité des eaux souterraines (pour la DIREN, puis l'ODE), et celles de la DSDS. La deuxième étape correspond à l'acquisition de données nouvelles et spécifiques lors de deux campagnes de prélèvement, une en saison sèche (avril 2006) l'autre en saison des pluies (novembre 2006). L'objectif de ces campagnes était de disposer de données isotopiques (isotopes H et O de l'eau, isotopes du Sr et du B) pour des échantillons d'eaux souterraines représentatifs de l'ensemble des masses d'eau de la Martinique et pour deux régimes hydriques contrastés. La troisième étape a permis d'interpréter l'ensemble des données disponibles sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines de la Martinique.

Ce travail, appuyé sur une connaissance du contexte hydrogéologique et sur une stratégie d'échantillonnage appropriée, a permis de dégager les caractéristiques géochimiques générales des eaux souterraines, c'est-à-dire leur qualité et les origines de celle-ci, sur l'ensemble du territoire de la Martinique. Cette caractérisation met en évidence **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). Ces différentes sources contrôlent de manière variable, dans le temps et l'espace, la géochimie des eaux souterraines. L'analyse couplée de la géochimie élémentaire dite « classique » avec l'approche isotopique proposée (isotopes H et O de l'eau, isotopes du Sr et du B) conduit à l'identification l'origine de l'eau et des éléments dissous et de mettre en évidence différents comportements des eaux souterraines vis-à-vis des variations saisonnières du régime hydrique. Certains points présentent notamment peu de variabilité dans la source d'éléments dissous, l'origine de l'eau et les niveaux piézométriques. A l'inverse, entre la saison sèche et la saison des pluies, certains points voient tous ces paramètres varier fortement. **L'étude des variabilités spatiales et temporelles** de la géochimie des eaux souterraines aboutit à de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement et la dynamique des systèmes aquifères. La **différenciation géochimique** des eaux souterraines à l'échelle de la Martinique a ensuite été discutée afin de proposer des caractéristiques géochimiques générales **pour chaque masse d'eau**. Enfin **une identification des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire**, pour les secteurs géographiques où les données actuelles sont pertinentes et suffisamment abondantes, a été proposée.

De l'ensemble de cette approche on retiendra que (Illustration 38) :

- L'origine des éléments dissous pour les masses d'eau « Nord » (9201), « Nord Caraïbes » (9203) et « Nord Atlantique » (9202) semble contrôlée principalement par les interactions eau/roche (lithologies volcaniques). Pour ces masses d'eau des zones à risque de fond géochimique élevé en Fe et Mn et intermédiaire en Ca et Mg ont été identifiées. De plus, le long du littoral, il existe un risque de fond géochimique élevé en Na et Cl et intermédiaire en B et F lié à l'interaction possible des eaux souterraines avec le biseau salé.
- La part relative d'éléments dissous provenant des eaux de pluie est plus importante pour la masse d'eau « Centre » (9204) que pour les autres masses d'eau de la Martinique. Pour cette masse d'eau des zones à risque de fond géochimique élevé en Fe et Mn et intermédiaire en Ca et Mg ont été identifiées. De plus, le long du littoral, il existe un risque de fond géochimique élevé en Na et Cl et intermédiaire en B et F lié à l'interaction possible des eaux souterraines avec le biseau salé.
- Pour les masses d'eau « Sud Caraïbes » (9206) et « Sud Atlantique » (9205), la part relative d'éléments dissous provenant de l'eau de mer (soit via l'interaction avec de l'eau de mer fossile soit via l'interaction avec le biseau salé) est plus importante que pour les autres masses d'eau de la Martinique. Pour ces masses d'eau des zones à risque de fond géochimique élevé en Ca, Mg, Na, Cl, K, Fe et Mn. De plus, le long du littoral, il existe un risque de fond géochimique élevé en Na et Cl et intermédiaire en B et F lié à l'interaction possible des eaux souterraines avec le biseau salé.

D'autre part, les résultats de cette étude, grâce aux différents outils utilisés, améliorent la compréhension des hydrosystèmes :

- les **isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)** montrent d'une part comment les aquifères sont rechargés (cf. chapitre 3.2), et d'autre part que l'origine des eaux souterraines est majoritairement contrôlée par les précipitations, et les eaux souterraines ne sont pas affectées (ou du moins pas de façon significative) par des phénomènes géothermiques ni par l'évaporation. Ils permettent également de montrer que l'eau de mer n'a pas un impact majeur et généralisé. L'impact de la recharge par l'eau de pluie a également été mis en évidence par la chimie élémentaire (cf. chapitre 3.7).
- Les **isotopes du Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et du B ($\delta^{11}\text{B}$)** définissent l'origine des éléments dissous (cf. chapitre 3.3). Les isotopes du Strontium permettent également de mettre en évidence une contribution forte d'éléments dissous provenant de la lithologie. Les signatures isotopiques des eaux souterraines interagissant avec les nuées ardentes, par rapport aux autres roches volcaniques drainées, apparaissent les plus fortement contrôlées par la lithologie.
- La comparaison des isotopes (**$\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, Sr & B**) et de la chimie élémentaire sur deux saisons mettent en évidence des fonctionnements géochimiques différents selon les systèmes aquifères (cf. chapitre 3.6).

- les **isotopes du B** quant à eux sont révélateurs de pollutions anthropiques (cf. chapitre 3.3.2)

Dans certains cas des relations entre aquifères, sont identifiées par les isotopes du Strontium et du Bore. Ceci est souvent possible pour les aquifères superposés, mais n'a pas été mis en évidence avec les données disponibles dans le cadre de la présente étude. Ils pourraient néanmoins se révéler utiles dans des études de sites ou de cas particuliers ou des mélanges entre plusieurs réservoirs pourraient être suspectés (drainage d'une nappe superficielle par une nappe profonde par exemple).

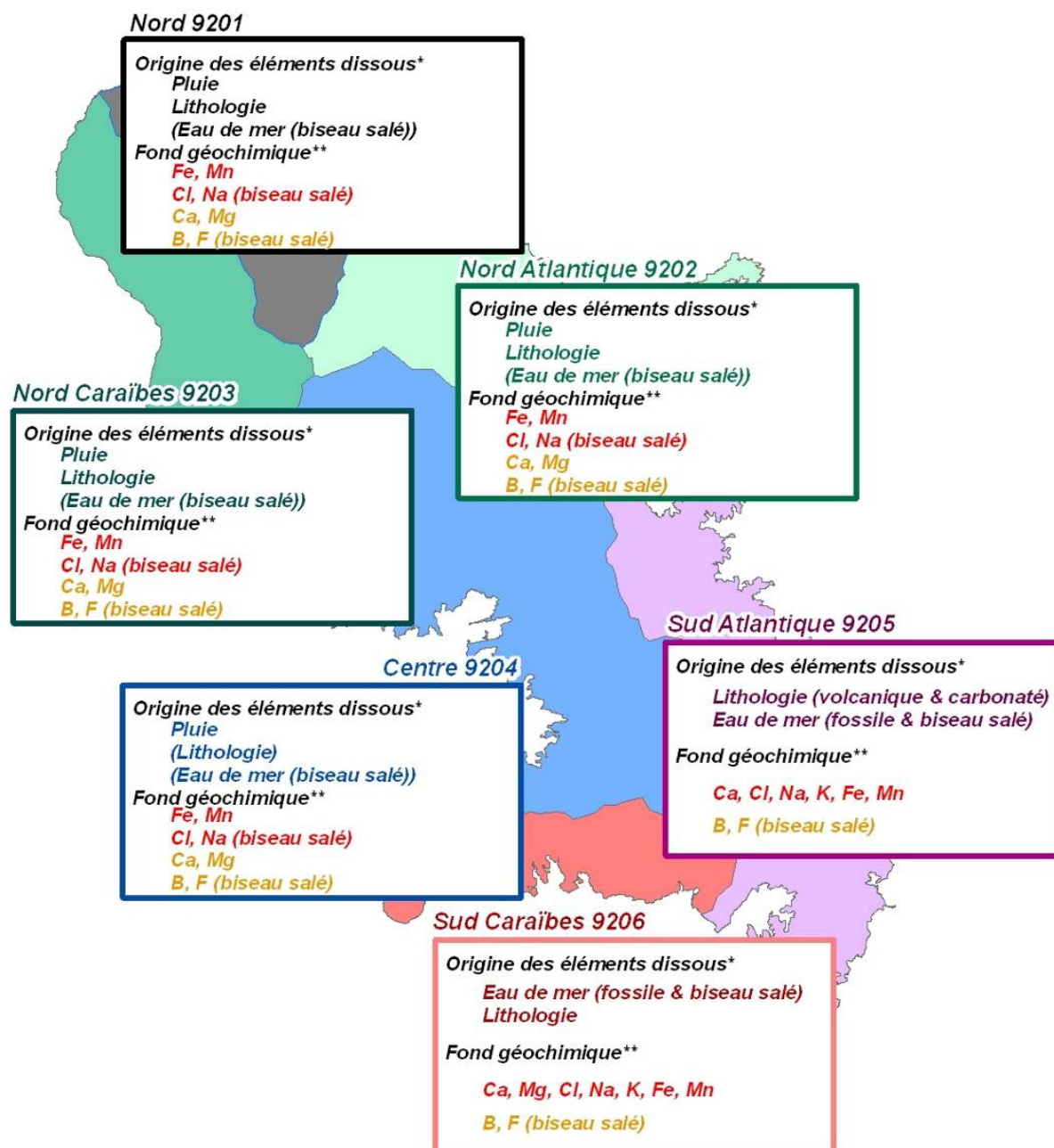
D'autre part, les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) peuvent, dans certains contextes (nappes anciennes captives, climat présentant des variations saisonnières de températures significatives notamment), être utilisés comme un outil de datation. En effet, des corrélations sont établies entre les variations annuelles de température et les variations de concentrations en isotopes stables mesurées, de sorte que la datation des eaux est possible.

Néanmoins, compte tenu des variations saisonnières de la chimie des eaux souterraines observées en Martinique et mises en évidence par les différents outils (cf. chapitres précédents), il apparaît que **les eaux souterraines sont relativement récentes** et donc que les temps de réactions des hydrosystèmes sont relativement courts (cycle hydrologique). D'autre part, compte tenu des faibles variations de température et des fortes pentes, les isotopes stables ne permettent pas une datation plus précise des eaux de Martinique. Ils ont néanmoins conduit à mieux appréhender les temps de résidence des eaux dans les systèmes aquifères.

Ainsi, la datation des eaux souterraines de la Martinique a été abordée, conjointement à la présente étude, avec d'autres outils, dans une autre étude réalisée par le BRGM pour la DIREN (Vittecoq et al., 2007, Rapport BRGM/RP-55844-FR). Celle-ci se rapporte à l'analyse conjointe des CFC, SF₆ et tritium et de la relation avec les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires : l'âge des eaux souterraines a pu être caractérisé (eau ancienne (<1962) ou récente (moins de 20 ans) ainsi que proportions de mélange) pour certains points (cf. Chapitre 3.8) et d'estimer les composantes d'eaux récentes et d'eaux anciennes dans les hydrosystèmes de la Martinique.

Pour conclure, fort des résultats obtenus dans la présente étude, la déclinaison de l'approche isotopique à une échelle plus locale (sites, points d'eau souterraine particuliers...) s'annonce efficace pour répondre aux interrogations des gestionnaires des ressources en eaux notamment concernant le fonctionnement hydrogéologique d'un site ou l'origine d'une pollution.

Un système d'information géographique, et ses bases de données associées ont été élaborés sur la caractérisation géochimique des eaux souterraines de Martinique, et donc leur qualité naturelle. Ils facilitent l'identification d'une part des données acquises et d'autre part des zones à risques de fond géochimique élevé.



* Origine des éléments dissous établie à partir de l'approche géochimique classique et isotopique (Ces origines sont listées par ordre décroissant d'importance relative).

** Fond géochimique en éléments dissous dans les eaux souterraines :

en rouge : **Fond géochimique élevé**

en orange : **Fond géochimique intermédiaire**

Illustration 38 : Origine des éléments dissous et zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire pour les eaux souterraines de la Martinique.

Masse d'eau	Majeurs/Traces	Quantité des données insuffisante	Qualité des données insuffisante	Fond géochimique faible ⁽¹⁾	Impossible de statuer ⁽¹⁾	Fond géochimique intermédiaire ⁽¹⁾	Fond géochimique élevé ⁽¹⁾
Nord Caraïbes - 9203	M	Hg, Se, Sb	As*, Cd*, Cr*, Ni*, Pb*, Sb*	Na<110, K<12, SO4<250		Ca<60, Mg<50	Cl, Na (ponctuel : emprise biseau salé)
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), Al<30, Ba<40, B<500, Cu<20, F<300, Zn<50	As, Hg, Se, Sb	B, F (ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50
Nord - 9201	M			Na<40, Cl<60, K<12, SO4<250		Ca<60, Mg<50	Cl, Na (ponctuel : emprise biseau salé)
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), Al<30, Ba<40, B<500, F<300, Zn<50	As, Hg, Se, Sb, Cu**	B, F (ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50
Nord Atlantique - 9202	M			Na<80, Cl<60, K<12, SO4<250		Ca<60, Mg<50	Cl, Na (ponctuel : emprise biseau salé)
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), Ba<40, Cu<20, F<300, Zn<50	As, Hg, Se, Sb	B, F(ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50
Centre - 9204	M			Na<70, Cl<100, K<12, SO4<250		Ca<60, Mg<50	Cl, Na (ponctuel : emprise biseau salé)
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), Al<30, Ba<40, B<500, Cu<20, F<300, Zn<50	As, Hg, Se, Sb	B, F(ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50
Sud Caraïbes - 9206	M			K<12, SO4<250			Ca>60, Mg>50, Cl >200, Na>150
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), Al<30, Ba<100, B<500, Cu<20, F<300, Zn<100	As, Hg, Se, Sb	B, F (ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50
Sud Atlantique - 9205	M			SO4<250		Mg<50	Ca>60, Cl >200, Na>150, K>12
	T			(Cd, Cr, Ni, Pb, Ag :<LQ), B<500, Cu<20, F<1000, Zn<50	As, Hg, Se, Sb	B, F(ponctuel : emprise biseau salé)	Fe>200, Mn>50

* Seuils de quantification médiocres pour se prononcer quant au risque de fond géochimique élevé ou intermédiaire

**La quantité des données et le caractère ponctuel des analyses ne permet pas de se prononcer quant au risque de fond géochimique

⁽¹⁾ Concentrations en mg.L⁻¹ pour les éléments majeures en µg.L⁻¹ pour les éléments traces

Illustration 39 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond géochimique élevé et intermédiaire pour les eaux souterraines

6.

Bibliographie

Baran N., Négrel Ph., Malcuit E. et al. (2006) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2005 : résultats et comparaison avec la 1^{ère} campagne de basses eaux (2004) et la 1^{ère} campagne de saison des pluies (2004). BRGM/RP-54717-FR, 101 p., 47 fig., 7 tab., 2 photos, 4 cartes, 2 ann.

Barth S. (1993) – Boron isotope variations in nature: a synthesis. *Geologische Rundschau* 82, 640-641.

Bassett R.L., Buszka P.M., Davidson G.R., et al. (1995) – Identification of groundwater solute sources using boron isotopic composition. *Environment Science and Technology* 29, 2915-2922.

Benauges S. (1981) – Etude géochimique et isotopique et circulation des eaux de source chaudes, sources froides et rivières aux abords du volcan de la Soufrière-Guadeloupe-. Thèse de 3^{ème} cycle Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 85p.

Berner E.K., Berner R.A. (1987) – The Global water cycle. *Geochemistry and environment*.- Prentice-Hall. 397 p.

Blum A., Brenot A., Chery L. et al. (2006a). – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 2. Caractérisation des secteurs à risque. Rapport BRGM RP-54530-FR, 137p + 3 annexes.

Brenot A., Blum A., Chery L. (2006). – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 3. Définition d'un programme d'acquisition de données. Rapport BRGM RP-54663-FR, 45 p+ 3 annexes.

Brenot A., Gourcy L., Allier D. et al. (2007). – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines. Rapport BRGM RP-55346-FR, 5 volumes.

Brenot A., Allier D., 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, 102p.

Casanova J., de Gramont H.M., Kloppmann W., et al. (1999) – Boron and strontium isotopic geochemistry of the Wadi Ahin catchement (Sultanate of Oman). *J. Conf. Abstr* 4, 557.

Casanova J., Négrel P., Kloppmann W., et al. (2001) – Origin of deep saline groundwaters in the Vienne granitoids (France): Constraints inferred from boron and strontium isotopes. *Geofluids* 1, 91-102.

Chetelat B., Gaillardet J., Freydisier R., et al. (2005) – Boron isotopes in precipitation : Experimental constraints and field evidence from French Guiana. *Earth and Planetary Sciences Letters* 235, 16-30.

Chery L. (1994) – Interprétation des résultats des analyses isotopiques dans le cadre de l'étude géochimique de la source carbogazeuse de Didier (Martinique). BRGM/R-37990, 34 p., 7 fig., 2 ann.

Comte J-P., Charguéron C., Lachassagne P. (2003) – Domaines hydrogéologiques et pré-délimitation des masses d'eau souterraines de la Martinique. BRGM/RP-52688-FR, 12p., 5 ann.

Comte J-P., Charguéron C., Négrel Ph. (2004) – Qualité des eaux souterraines de Martinique : état de référence pour un réseau de surveillance. BRGM/RP52997-FR, 59p., 21 fig., 12 tab., 4 ann.

Craig H. (1961) – Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133, 1702-1703.

Davidson J.P. (1986) – Isotopic and trace element constraints on the petrogenesis of subduction-related lavas from Martinique, Lesser Antilles. *Journal of Geophysical Research B* 6, 5943-5962.

DePaolo D.J. (1986) – Detailed record of the Neogene Sr isotopic evolution of seawater from DSDP site 590B. *Geology* 16, 103–106.

Fabriol R., Ouzounian G. (1985) – Prospection géothermique de la plaine du Lamentin (Martinique). Modèle hydrogéochimique. BRGM 85SGN 384 GTH, 28p.

Gaillardet J., Dupre B., Allègre C.J. (1997) – Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. *Chemical Geology* 142, 141-173.

Gaillardet J., Dupre B., Louvat P. et al. (1999) – Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* 159, 3-30.

Gislason S.R , Euster H.P. (1987) – Meteoric water-basalt interactions. I: A laboratory study. *Geochimica Cosmochimica Acta* 51: 2827-2840.

Grünberger O. (1989) – Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté – Massif du Piton des Neiges-Ile de La Réunion. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Orsay, France, p. 197.

Hildenbrand A., Marlin C., Conroy A., et al. (2005) – Isotopic approach of rainfall and groundwater circulation in the volcanic structure of Tahiti-Nui (French Polynesia). *Journal of Hydrology* 302, 187-208.

Hogan J.F., Blum J.D. (2003) – Boron and lithium isotopes as groundwater tracers: a study at the Fresh Kills Landfill, Saten Island, New York, USA. *Applied Geochemistry* 18, 615-627.

Kloppmann W., Négrel P., Casanova J., et al. (2001) – Boron and strontium isotopes in saline groundwaters in the North German Basin (Gorleben diapir). *Geochimica and Cosmochimica Acta* 65, 4087-4101.

Kloppmann, W., Widory, D., Pauwels, H., et al. (2005) – Inventaire transfrontalier de la qualité des eaux souterraines de la vallée du Rhin supérieur. Etude isotopique (N, B) de l'origine des nitrates. Rapport BRGM/RP-54028-FR, 76 p., 30 illustrations.

Leeman W.P., Tonarini S., Pennisi M., et al. (2005) – Boron isotopic variations in fumarolic condensates and thermal waters from Vulcano Island, Italy : implications for evolution of volcanic fluids. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 69, 143-163.

Lopoukhine M., Mouret C. (1977) – Etude géothermique des sources de la Martinique. BRGM 77ANT36.

Malcuit E., Vittecoq B., Baran N. et al. (2006) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison sèche 2006 : résultats et comparaison avec la campagne de saison des pluies 2005. BRGM/RP-54909-FR, 110 p., 39 ill., 3 cartes, 5 ann.

Marimoutou C. (2007) – Les sources thermales de Martinique. Bilan des connaissances actuelles, classification et interprétations des résultats. Rapport de Stage de Licence. 22p.

Meybeck M. (1986) – Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Sciences Géologiques Bulletin* 39, 3-77.

Mossadik H. (1997) – Les isotopes du bore, traceurs naturels dans les eaux. Mise au point de l'analyse en spectrométrie de masse à source solide et application à différents environnements. PhD Thesis, Université d'Orléans, Orléans.

Négrel P., Allegre C.J., Dupre B. et al. (1993) – Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios in river water: The Congo case. *Earth Planetary Science Letters* 120, 59-76.

Négrel P., Vittecoq B. (2005) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, 2^{ème} campagne 2004 (saison des pluies) : résultats et comparaison avec la 1^{ère} campagne de basses eaux. BRGM/RP-53838-FR, 63 p., 27 fig., 4 tab., 6 cartes, 3 ann.

Négrel P., Lachassagne P., Laporte P. (1997) – Chemical and isotopic characterization of rainwaters in Cayenne (French Guyana). *Compte Rendu Académie des Sciences* 324, 379-386.

Ollagnier S., (2007) – Contrôle de surveillance de la qualité des eaux souterraines de la Martinique relatif aux prescriptions de la Directive Cadre européenne sur l'Eau : Campagne de saison sèche 2007. BRGM/RP-55812-FR. 70 p., 50 ill., 2 ann.

Ollagnier S., Vittecoq B. (2007) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2006, Résultats et interprétation. Rapport BRGM/RP-55499-FR, 81p., 50 ill., 2 ann.

Palmer M. R., Slack J. F. (1989) – Boron isotopic composition of tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites. *Contribution Mineral Petrology* 103, 434-451.

Rad R., Louvat P., Gorge C. et al. (2006) – River dissolved and solid loads in the Lesser Antilles: New insight into basalt weathering processes. *Journal of geochemical exploration* 88, 308-312.

Rad R., Allègre C.J., Louvat P. (2007) – Hidden erosion on volcanic islands. *Earth and Planetary Science* 262, 109-124.

Sanjuan B., Brach M. (1997) – Etude hydrogéochimique du champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe). Rapport BRGM/R 39880 décembre 1997. 84 p.

Sanjuan B., Brach M., Foucher J.C. (2003) – Réévaluation du potentiel géothermique dans les régions de Morne Rouge – Montagne Pelée et du Diamant (Martinique) : étude géochimique. BRGM/RP-52547-FR, 80 p., 17 fig., 9 tabl., 1 ann.

Sonney R., Blum A., Chery L. (2005). – Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 1. Recueil des données et des informations. Rapport BRGM RP-54031-FR, 135 p.

Symonds R.B., Gerlach T.M., Reed M.H. (2001) – Magmatic gas scrubbing: implications for volcano monitoring. *Journal Volcanology and Geothermal Research* 108, 303-341.

Swihart G.H., Moore P.B. (1989) – A reconnaissance of the boron isotopic composition of tourmaline. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50, 1297-1301.

Tonani F. (1971) – La géochimie parmi les méthodes de prospection de l'énergie géothermique. *Ann. Mines Fr.* Mai 1971, 41.

Tonarini S., Leeman W.P., Ferrara G. (2001) – Boron isotopic variations in lava flows of the Aeolian volcanic arc, Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 110, 155-170.

Trumbull R.B., Chaussidon M. (1999) – Chemical and boron isotopic composition of magmatic and hydrothermal tourmalines from the Sinceni granite-pegmatite system in Swaziland. *Chemical Geology* 153, 125-137.

Vengosh A. (1992) – Boron isotope variations during brine evolution and water-rock interactions. In : *Water-Rock Interactions* (eds Kharaka YK, Maest AS). Balkema, Rotterdam, 965-967.

Vengosh A., Heumann K.G., Juraske S., et al. (1994) – Boron isotope application for tracing sources of contamination in groundwater. *Environment Science and Technology* 28, 1968-1974.

Vitoria L., Otero N., Soler A., et al. (2004) – Fertilizer characterization: isotopic data (N, S, O, C, and Sr). *Environment Science and Technology* 38, 3254-3262.

Vittecoq B., (2006) – Définition des réseaux de suivi de l'état quantitatif et du contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Martinique, conforme aux prescriptions de la Directive Cadre sur l'Eau. BRGM/RP-55098-FR, 55 p., 6 ill., 4 ann.

Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., et al. (2007) – Elaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR, 221 p., 87 ill., 8 ann.

Vittecoq B., Brugeron A., Ollagnier S., et al. (2008) – Evaluation des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la plaine du Lamentin : pompage d'essai de longue durée sur le forage 1179ZZ0069/LAF1. Rapport BRGM/RP-56246-FR.

Vittecoq B., Gourcy L., Baran N., (2007) – Datation des eaux souterraines de Martinique par l'analyse conjointe des CFC, SF6 et tritium et relation avec les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. Rapport BRGM/RP-55844-FR, 50 pages, 29 illustrations.

White R.S., Dupré B. (1986) – Sediment subduction and magma genesis in the Lesser Antilles; isotopic and trace element constraints. *Journal of Geophysical Research* 6, 5927-5941.

Williams (2000) – The geochemistry of Mt; Misery volcano, St. Kitts, Lesser Antilles. Ph.D. thesis, The Open University.

Westercamp D., Andreieff P., Bouysse P. et al. (1989) – Carte géologique au 1/50000 de la Martinique, notice explicative, 246p.

Annexe 1

Résultats des analyses isotopiques

H et O de l'eau, Sr et B

Caractérisation physico-chimique naturelle des eaux souterraines de la Martinique

Masse d'eau	Indice BSS	Commune	Lieu Dit	Unité régionale	$\delta^2\text{H}$ (‰)		$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$		$\delta^{11}\text{B}$ (‰)
					SS 2006	SP 2006	SS 2006	SP 2006	SS 2006	SP 2006	SS 2006
Nord - 9201	1166ZZ0026	Basse Pointe	Chalvet	Pelée Nord	-8,2		-2,4		0,70468		
	1166ZZ0023	Macouba	Source Grand Plage	Pelée Nord	-9,8		-2,7		0,70457	0,70476	4,8
	1168ZZ0055	Morne Rouge	Habitation Citron	Rivière Capot	-6,9		-2,6		0,70472		
	1168ZZ0054	Basse Pointe	Rivière Falaise	Rivière Capot	-8,9		-2,6		0,70443	0,70437	24,8
Nord Atlantique - 9202	1169ZZ0084	Lorrain	Fond Brulé	Lorrain-Marigot	-8,9	-10,4	-2,6	-2,7	0,70441	0,70432	31,9
	1169ZZ0006	Marigot	Anse Charpentier	Lorrain-Marigot	-9,7	-9,1	-2,8	-2,8	0,70445	0,70448	-3,8
	1175ZZ0153	Trinité	Morne Figue	Galion	-11,5		-2,8		0,70492		
	1175ZZ0154	Trinité	Le Galion	Galion	-11,3		-2,8		0,70722		
	1174ZZ0088	Gros Morne	La Borelli	Galion	-10		-2,8		0,70562		
Nord Caraïbes - 9203	1167ZZ0024	Prêcheur	Rivière du Prêcheur	Pelée Ouest	-6,9		-2,4		0,70457	0,70464	17,1
	1167ZZ0023	Saint Pierre	Rivière Blanche	Pelée Ouest	-9,8		-2,7		0,70457	0,70476	4,8
	1167ZZ0045	St Pierre	CDST	Pelée Ouest	-8,7		-2,6		0,70534		
	1173ZZ0082	Bellefontaine	Fond Laillet	Carbet	-13		-2,8		0,70601		
	1177ZZ0161	Schoelcher	Fond Lahaye	Schoelcher - Case Pilote	-10,7		-2,9		0,70560		
	1177ZZ0165	Schoelcher	Case Navire	Schoelcher - Case Pilote	-9,3		-2,7		0,70589		
Centre - 9204	1177ZZ0173	Case Pilote	Maniba	Schoelcher - Case Pilote	-9		-2,3		0,70637		
	1173ZZ0076	Fond Saint Denis	Source de l'Alma	Lézarde	-6,5	-8,7	-2,7	-2,9	0,70571		
	1174ZZ0089	Saint Joseph	Coeur Bouliki	Lézarde	-7	-7,3	-2,7	-2,7			
	1174ZZ0087	Saint Joseph	La Charmille	Lézarde	-8,5		-2,4		0,70567		
	1175ZZ0106	Gros Morne/Robert	Vert Pré / Usine Yoplait	Lézarde	-9,8		-2,7		0,70485		
	1179ZZ0158	Lamentin	Sarrault	Lézarde	-7,5	-8,4	-2,4	-2,5	0,70586	0,70514	20,2
	1179ZZ0070	Lamentin	Habitation Ressource	Lézarde	-6,5		-2,2		0,70581		
	1183ZZ0053	Saint Esprit	Source Caraïbe	Petit Bourg	-10,3		-2,7		0,70701		
	1179ZZ0282	Lamentin	Source La Frédée	Lézarde	-10,5		-2,8		0,70514		
Sud Atlantique - 9205	1186ZZ0118	Marin	Grand Fond	Marin	-10,6	-11,4	-2,6	-2,7	0,70799	0,70832	31,1
	1179ZZ0300	Robert	Pontalery	Robert	-10		-2,7		0,70727		
	1179ZZ0228	François	La Victoire	François	-10,4		-2,6		0,70477		
	1179ZZ0299	François	Grand Fond	François	-11		-2,8		0,70730		
Sud Caraïbes - 9206	1181ZZ0132	Trois Ilets	Vatable	Trois Ilets	-5,3	-5,6	-1,8	-2	0,70581	0,70665	1,5
	1181ZZ0131	Anses d'Arlet	Grande Anse	Anses d'Arlet	-9,6	-11,1	-2,6	-2,8	0,70738	0,70577	37,9
	1185ZZ0120	Ste Luce	Stade communal	Sainte Luce	-13,4	-13,2	-2,9	-2,9	0,70622	0,70792	21,9
	1183ZZ0024	Rivière Pilote	La Mauny	Rivière Pilote	-5,8	-6,9	-2,4	-2,5	0,70677		
	1168ZZ0052	Saint Pierre	source pecoul	Pelée Ouest	-10,3		-2,6		0,70690		
	1184ZZ0016	Diamant	Habitation Dizac	Diamant	-14,6		-3,0		0,70568		

SS 2006 : point analysé uniquement pour la campagne de saison sèche (avril 2006)

SS&SP 2006 : point analysé à la fois pour la campagne de saison sèche (avril 2006) et de saison des pluies (novembre 2006)

Annexe 2

Tableau et carte reportant l'origine des éléments dissous pour les points de prélèvement des eaux souterraines

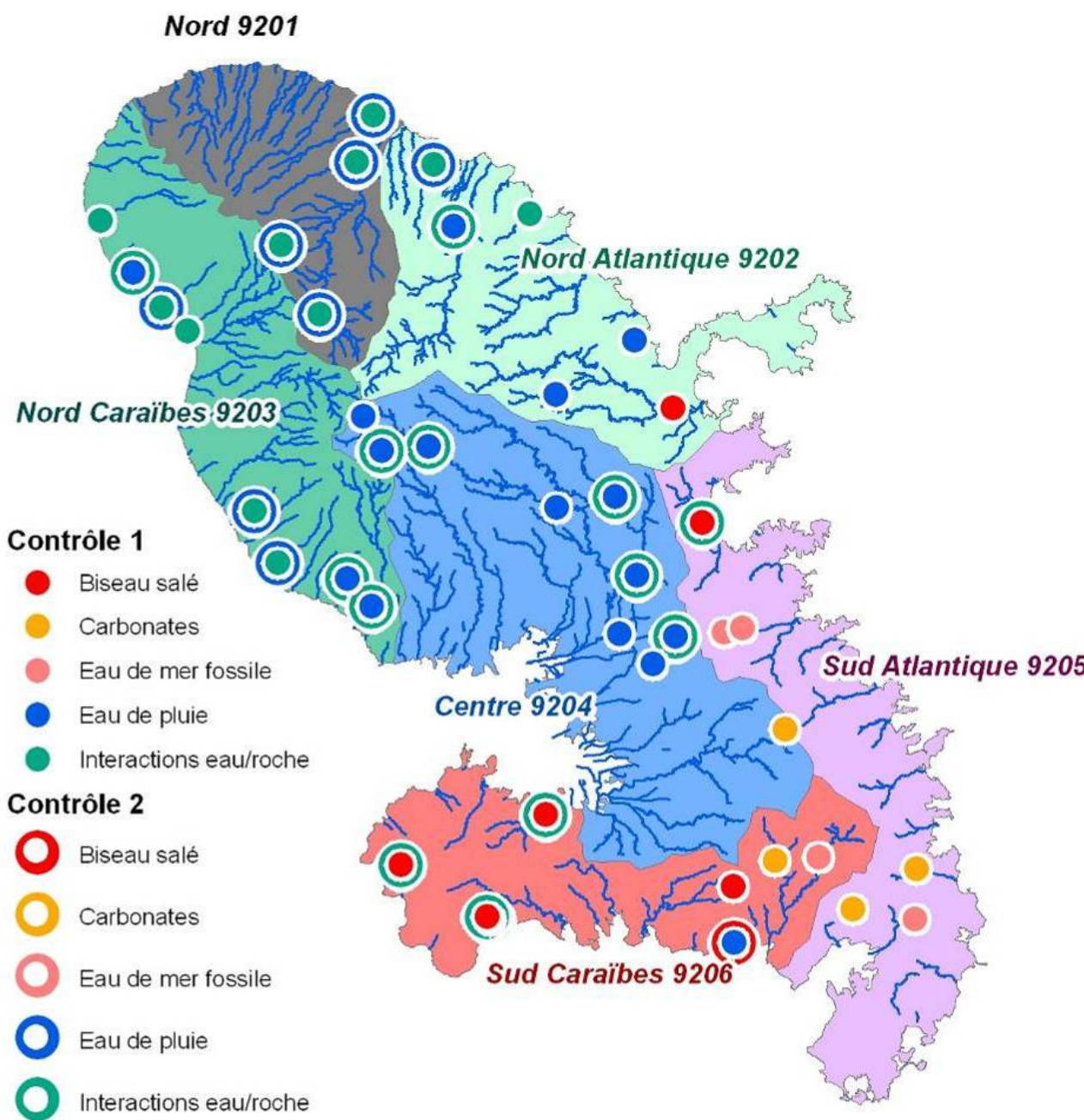
Caractérisation physico-chimique naturelle des eaux souterraines de la Martinique

Masse d'eau	Indice BSS	Commune	Lieu Dit	Variation spatiale		Var temporelle		Outils géochimiques et isotopiques									
				Contrôle 1	Contrôle 2	Saisonniers	Interannuelle	Ca/Na-Mg/Na	Cl/Na	Cl/Ca	Cl/Mg	Cl/B	Cl/Sr	iH etIO	iSr	iB	
Nord Caraïbes - 9203	1167ZZ0024	Prêcheur	Rivière du Prêcheur	Interactions eau/roche					X*	X*	X*		X*		X*	X*	
	1167ZZ0023	Saint Pierre	Rivière Blanche	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*		X*	X*, X**	
	1167ZZ0045	St Pierre	CDST	Interactions eau/roche	eau mer (biseau salé)					X*	X*		X*		X*		
	1167ZZ0037	Saint Pierre	Fond Canonville	eau de pluie/eau de mer	Interactions eau/roche				X*								
	1173ZZ0082	Bellefontaine	Fond Laillet	Interactions eau/roche	eau de pluie/eau de mer				X*	X*	X*		X*		X**		
	1177ZZ0161	Schoelcher	Fond Lahaye	eau de pluie/eau de mer	Interactions eau/roche				X*			X*	X**		X**		
	1177ZZ0165	Schoelcher	Case Navire	eau de pluie/eau de mer	Interactions eau/roche				X*			X*	X**		X**		
	1177ZZ0173	Case Pilote	Maniba	Interactions eau/roche	eau de pluie/eau de mer				X*	X*	X*		X*		X**		
Nord - 9201	1166ZZ0026	Basse Pointe	Chalvet	Interactions eau/roche	eau de pluie/eau de mer					X*	X*	X**	X*		X*		
	1166ZZ0023	Macouba	Source Grand Plage	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*		X*	X**	
	1166ZZ0019	Basse Pointe	Socco Gradis	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1168ZZ0055	Morne Rouge	Habitation Citron	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*		X*		
	1168ZZ0054	Basse Pointe	Rivière Falaise	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*		X*	X**	
	1168ZZ0044	Ajoupa Bouillon	forage grande savane	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1168ZZ0059	Ajoupa Bouillon	source marc cecile (trianon)	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1168ZZ0051	Ajoupa Bouillon	source mont pelé	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1168ZZ0046	Ajoupa Bouillon	Source Fonds Les Sources	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1173ZZ0065	Morne Rouge	Source Mont Gelé	Interactions eau/roche	eau de pluie				X*	X*	X*		X*				
	1168ZZ0037	Morne Rouge	Desgrottes	Interactions eau/roche (mx hydrothermaux?, geothermique?)	eau de pluie					X*	X*	X*		X*			
	1168ZZ0048	Basse Pointe	forage Demarre	Interactions eau/roche	eau de pluie					X*	X*	X*		X*			
1168ZZ0043	Basse Pointe	Forage Morne Balai	Interactions eau/roche						X*	X*	X*		X*				
Nord Atlantique - 9202	1169ZZ0084	Lorrain	Fond Brulé	Interactions eau/roche	eau de pluie							X*	X**	X*		X*	X**
	1169ZZ0082	Lorrain	Source Carabin	eau de pluie	Interactions eau/roche				X*				X*				
	1169ZZ0006	Marigot	Anse Charpentier	Interactions eau/roche	Anthropique pour le B	X**	X**					X*		X*		X*	X**
	1175ZZ0153	Trinité	Morne Figue	eau de pluie										X*		X*	
	1175ZZ0154	Trinité	Le Galion	eau mer (biseau salé)										X*		X*	
Centre - 9204	1174ZZ0088	Gros Morne	La Borelli	eau de pluie												X*	
	1173ZZ0076	Fond Saint Denis	Source de l'Alma	eau de pluie		X*								X*		X*	
	1174ZZ0089	Saint Joseph	Coeur Bouliki	eau de pluie	Interactions eau/roche				X*			X**		X*			
	1174ZZ0087	Saint Joseph	La Charmille	eau de pluie									X*	X*		X*	
	1175ZZ0106	Gros Morne/Robert	Vert Pré / Usine Yoplait	eau de pluie	Interactions eau/roche							X**		X*		X*, X**	
	1179ZZ0158	Lamentin	Sarrault	eau de pluie	Interactions eau/roche	X*							X*	X*		X*, X**	X*
	1179ZZ0070	Lamentin	Habitation Ressource	eau de pluie								X*		X*		X*	
	1173ZZ0072	Fort de France	La Medaille	eau de pluie	Interactions eau/roche				X*			X**		X*			
	1179ZZ0157	Ducos	Bois Rouge	eau de pluie										X*		X*(1)	
	1183ZZ0053	Saint Esprit	Source Caraïbe	carbonates									X*			X*	
	1179ZZ0282	Lamentin	Source La Frédée	eau de pluie	Interactions eau/roche											X*	
	1182ZZ0160	Rivière Salée	Nouvelle Citée	eau mer (fossile), geothermalisme? :eloigne cote									X*	X*			
Sud Caraïbes - 9206	1181ZZ0132	Trois Ilets	Vatable	eau de mer (biseau salé)	Interactions eau/roche	X*	X*		X*				X*, X**			X*	X**
	1181ZZ0131	Anses d'Ariet	Grande Anse	eau de mer (biseau salé)	Interactions eau/roche	X*	X*		X*				X*, X**			X*	X**
	1185ZZ0120	Ste Luce	Stade communal	eau de pluie	eau de mer (biseau salé)	X*			X*							X*	X**
	1185ZZ0121	Sainte Luce	Source du Riz	eau mer					X*		X*						
	1183ZZ0024	Rivière Pilote	La Mauny	carbonates		X*			X*			X*				X*	
	1183ZZ0052	Rivière Pilote	Fougainville	eau mer (fossile)		X*			X*		X*	X*				X*	
	1184ZZ0016	Diamant	Habitation Dizac	eau de mer (biseau salé)	Interactions eau/roche				X*		X*	X*, X**					
	1184ZZ0001	Diamant	Habitation Dizac	eau de mer (biseau salé)	Interactions eau/roche				X*		X*						
Sud Atlantique - 9205	1186ZZ0118	Marin	Grand Fond	carbonates					X*	X*		X*				X*	X*
	1179ZZ0300	Robert	Pontalery	eau de mer (biseau salé)	Interactions eau/roche (geothermique?)				X*	X**		X*				X*	
	1179ZZ0228	François	La Victoire	eau mer (fossile) :eloigne cote					X*		X*					X*	
	1179ZZ0299	François	Grand Fond	eau mer (fossile)					X*			X*				X*	
	1186ZZ0119	Marin	Cap Macré	eau mer (fossile) : altitude					X*		X*						
1183ZZ0026	Vauclin	Puyferrat	eau de mer (biseau salé)						X*	X*							

* Met en évidence l'influence du contrôle 1 sur la source d'éléments dissous des eaux souterraines

* *Met en évidence l'influence du contrôle 2 sur la source d'éléments dissous des eaux souterraines

(1) Vittecoq et al. (2008)



Annexe 3

Les outils isotopiques appliqués à la connaissance des ressources en eau en Martinique

L'Annexe 2 a détaillée pour chaque point la(les) source(s) majoritaire(s) d'éléments dissous et les outils géochimiques sur lesquels cette identification s'est appuyée. L'intérêt est d'avoir un aperçu de l'importance relative des différentes sources d'éléments dissous en replaçant chaque point au sein de l'ensemble des points étudiés dans cette étude. Outre un niveau de connaissance accru via les isotopes, cette étude permet à présent de donner des critères de choix des systématiques isotopiques en fonction des questions posées pour l'application de la DCE.

Les **isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)** permettent de tracer l'origine de la recharge à la fois de manière spatiale (zone de recharge) et temporelle, de mettre en évidence des hétérogénéités spatiales entre aquifères mais aussi au sein d'un même niveau aquifère. L'utilisation des isotopes stables peut également être appliquée pour mettre en évidence une dynamique de recharge récente de type saisonnière.

Les **isotopes du Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et du B ($\delta^{11}\text{B}$)** ont la **capacité de tracer l'origine** respectivement du Sr et du B, éléments qui peuvent venir des apports naturels (eau de pluie, interactions eau-roche) ou des apports anthropiques (principalement des engrais). Le Sr a par ailleurs la particularité d'être présent en quantité mesurable dans l'ensemble des lithologies et de présenter des signatures isotopiques contrastées entre des roches volcaniques et des roches carbonatées. L'étude des isotopes du Sr et du B permettent donc de répondre aux questions « **D'où vient le Sr et le B dissous dans les eaux souterraines ?, Ya t il des variations spatiales et/ou temporelles dans la source d'éléments dissous ?** ».

Le mélange de différents réservoirs d'eau présentant des signatures isotopiques en Sr et B contrastées aboutit à une signature isotopique finale caractéristique de la contribution respective de chaque réservoir. Ainsi les isotopes du Sr et du B sont capables de **tracer les mélanges entre les différents réservoirs d'eau** et de **calculer les proportions** de mélange de ces réservoirs. Ils permettent donc de répondre aux questions « **D'où viennent les eaux souterraines ?, Comment les eaux souterraines sont elles rechargées? Quelles sont les relations entre les différents niveaux aquifères ?** ». De cette connaissance en découle une meilleure **compréhension des circulations d'eau** au sein d'un aquifère.

Ces isotopes, et plus particulièrement les isotopes du B sont d'excellents traceurs des apports anthropiques. Les isotopes du B permettent notamment de distinguer une origine agricole d'une origine de type eaux usées pour la contamination des eaux souterraines ou des eaux de surface. Ainsi les isotopes du B et du Sr peuvent être utilisés sur des points particuliers d'eaux souterraines de la Martinique où les collectivités cherchent à comprendre l'origine des pollutions observées.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Martinique
Villa Bel Azur, 4 Lot. Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 - FORT DE FRANCE - France
Tél. : 05 96 71 17 70