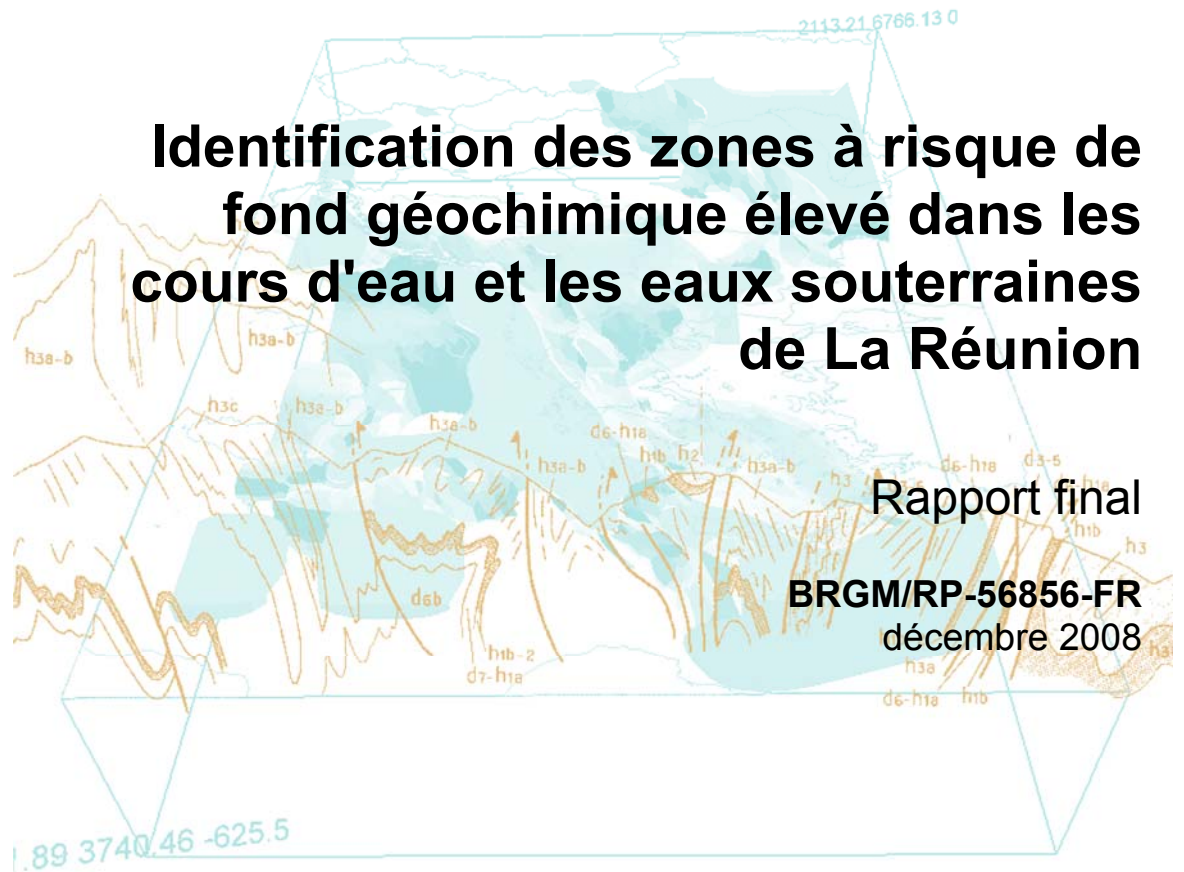




# Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de La Réunion



Rapport final

**BRGM/RP-56856-FR**  
décembre 2008



# Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de La Réunion

Rapport final

**BRGM/RP-56856-FR**  
décembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du  
BRGM 2008.Convention 61/08 ONEMA-BRGM 2008

**Lions J., Pinsons S., Aunay B.**

**Vérificateur :**

Nom : CHERY Laurence

Date : 15/01/2008

Signature :



**Approbateur :**

Nom : PENNEQUIN Didier

Date : 04/02/2009

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



**Mots clés :** La Réunion, éléments majeurs, éléments traces, fond géochimique, eaux de surface, eaux souterraines, Directive Cadre sur l'Eau.

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

Lions J., Pinson S., Aunay B. (2008) - Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de La Réunion. Rapport BRGM RP-56856-FR, 126 p.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

La **Directive Cadre sur l'Eau** (2000/60/CE) et sa **directive fille** de décembre 2006 (2006/118/CE) imposent aux Etats Membres d'évaluer l'état de leurs masses d'eau souterraine et de surface. L'évaluation du bon état chimique des masses d'eau nécessite de bien connaître les fonds géochimiques naturels de manière à distinguer les éléments traces naturellement présents dans le milieu de ceux résultant des activités humaines. Par ailleurs, un certain nombre d'éléments traces posent problème pour l'utilisation de la ressource pour l'usage « **alimentation en eau potable** » (AEP) par la présence, localement, de teneurs supérieures aux seuils imposés par la réglementation. Il est donc nécessaire d'apprécier les fluctuations ou variations des fonds géochimiques naturels pour ces éléments.

C'est dans ce contexte et pour répondre aux besoins de la DCE en matière d'identification des fonds géochimiques naturels dans les cours d'eau et les eaux souterraines que cette étude, financée dans le cadre de la convention 61/08 ONEMA-BRGM 2008, a été réalisée sur le territoire de la Réunion. Par éléments traces, on entendra ici tous les éléments considérés comme toxiques ou indésirables par la Directive « Eau potable » 98/60/CE et l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, à savoir : l'arsenic, le baryum, le bore, le fluor, le cadmium, le chrome, le mercure, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc, l'antimoine, le sélénium, l'aluminium, l'argent, le fer et le manganèse. Quatre de ces substances font également partie de la liste des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau. Il s'agit du cadmium, du nickel, du mercure et du plomb.

Une synthèse bibliographique des données existantes a d'abord été réalisée. Puis, après corrections et traitements statistiques des données brutes des concentrations en éléments majeurs et traces pour les eaux de surface et les eaux souterraines, l'ensemble des informations collectées a été croisé sur des supports cartographiques pertinents. L'objectif est de dégager des unités géologiques pouvant présenter des caractéristiques comparables en termes d'occurrence et de mobilisation des éléments majeurs et traces vers les eaux souterraines et les eaux de surface. L'aboutissement de ce travail consiste en la délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé en attribuant pour chaque zone un niveau de confiance (faible, moyen et élevé) rendant compte de la disparité des données disponibles. Pour les zones où le niveau de confiance est clairement insuffisant, des recommandations concernant la définition de futurs programmes pertinents d'acquisition de données ont été formulées.



## Sommaire

<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>11</b>
<b>Formule chimique de quelques minéraux.....</b>	<b>13</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>2 Quelles sont les données exploitées ?.....</b>	<b>17</b>
2.1 APPROCHE.....	17
2.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTEES .....	18
2.2.1 Objectif de la synthèse bibliographique.....	19
2.2.2 Stratégie employée pour la recherche bibliographique .....	19
2.3 LES DONNEES BRUTES EXPLOITEES .....	20
2.3.1 Les eaux souterraines .....	20
2.3.2 Les eaux de surface .....	22
2.3.3 Les analyses de sols .....	22
2.3.4 L'occupation des sols .....	23
<b>3 Présentation de la démarche appliquée et du contexte hydrogéochimique de la Réunion .....</b>	<b>25</b>
3.1 DEMARCHE .....	25
3.1.1 Synthèse bibliographique .....	25
3.1.2 Traitement des données brutes et analyse statistique .....	25
3.1.3 Bases de données.....	26
3.1.4 Représentation cartographique des données brutes.....	27
3.1.5 Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé.....	29
3.2 CONTEXTE HYDROGEOCHIMIQUE DE LA REUNION .....	32
3.2.1 Description générale de l'île de La Réunion.....	32
3.2.2 Fond géochimique des eaux .....	39
3.2.3 Sélection des analyses.....	42
<b>4 Les résultats de l'exploitation des données - Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé.....</b>	<b>45</b>
4.1 LES PLANEZES DE L'OUEST .....	45
4.1.1 Les eaux souterraines .....	48
4.1.2 Les eaux de surface .....	54

4.2 REGION NORD (LE PORT, LA POSSESSION, MAFATE) .....	56
4.2.1 Les eaux souterraines.....	58
4.2.2 Les eaux de surface.....	61
4.3 LES PLANEZES DU NORD ET DE L'EST.....	62
4.3.1 Les eaux souterraines.....	65
4.3.2 Les eaux de surface.....	69
4.4 PLAINE DES PALMISTES ET MASSIF DU PITON DE LA FOURNAISE.....	71
4.4.1 Les eaux souterraines.....	73
4.4.2 Les eaux de surface.....	75
4.5 CILAOS – SAINT PIERRE – LE TAMPON .....	77
4.5.1 Les eaux souterraines.....	79
4.5.2 Les eaux de surface.....	83
4.6 LISTES DES ZONES A RISQUE DE FOND GEOCHIMIQUE ELEVE .....	84
<b>5 Préconisations pour les futurs programmes d'acquisition de données .....</b>	<b>87</b>
5.1 SUPPORTS A ANALYSER POUR LES EAUX DE SURFACE .....	88
5.2 PERIODE D'ECHANTILLONNAGE ET FREQUENCE .....	89
5.2.1 Eaux souterraines .....	89
5.2.2 Eaux de surface .....	91
5.3 PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE .....	92
5.3.1 Phase dissoute des eaux de surface et des eaux souterraines.....	93
5.3.2 Phase particulaire des eaux de surface .....	96
5.3.3 Les sédiments de rivières .....	97
5.3.4 Les bryophytes.....	97
5.3.5 Traçabilité des opérations et mesures .....	98
5.3.6 Contrôles qualité .....	98
5.4 PROTOCOLE ANALYTIQUE .....	99
5.4.1 ETAAS (Spectrométrie d'absorption atomique par atomisation électrothermique) .....	99
5.4.2 ICP-AES (Spectrométrie par émission atomique par plasma induit) .....	99
5.4.3 ICP-MS (Spectrométrie de masse par plasma induit).....	100
5.4.4 Performances analytiques.....	100
<b>6 Conclusions.....</b>	<b>105</b>
<b>7 Bibliographie .....</b>	<b>109</b>



## Liste des figures

Figure 1 : Exemple de classes définies pour la représentation cartographique des données du support eau .....	28
Figure 2 : Niveau de confiance attribué aux zones susceptibles de présenter un fond géochimique élevé en fonction des données disponibles pour chaque secteur.....	30
Figure 3 : Comparaison des concentrations en nitrates vs. chlorures pour les analyses bancarisées dans ADES.....	43
Figure 4 : Diagramme de la concentration en sodium en fonction de celle en chlorures pour les stations bancarisées dans ADES.....	49
Figure 5 : Comparaison des gammes de linéarité et des seuils de quantification pour différentes techniques d'analyse de l'arsenic.....	101
Figure 6 : Reproductibilités inter-laboratoires obtenues pour les micopolluants métalliques prioritaires et sur la base de tests d'inter-comparaison français .....	102

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique moyenne des eaux de surface en fonction du type de lithologie drainée .....	17
Tableau 2 : Valeurs en $\mu\text{g.L}^{-1}$ proposées pour définir les classes de concentrations en éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines et de surface.....	29
Tableau 3 : Masses d'eau souterraines de La Réunion et code MESO.....	36
Tableau 4 : Associations géochimiques communes des roches ignées .....	40
Tableau 5 : Compilation des compositions géochimiques moyennes pour des roches ignées et sédimentaires .....	41
Tableau 6 : Compilation de compositions chimiques d'eaux de mer .....	42
Tableau 7 : Traitement statistique pour les stations de surveillance bancarisées dans ADES et présentant au moins une analyse en nitrates supérieure à $10 \text{ mg.L}^{-1}$ .....	44
Tableau 8 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs ouest du Piton des Neiges .....	47
Tableau 9 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères des flancs ouest du Piton des Neiges.....	47
Tableau 10 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs nord du Piton des Neiges .....	57
Tableau 11 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Mafate.....	57
Tableau 12 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères des flancs nord du Piton des Neiges.....	57
Tableau 13 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs est du massif du Piton des Neiges .....	64

Tableau 14 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Salazie. ....	65
Tableau 15 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines des flancs est du massif du Piton des Neiges. ....	65
Tableau 16 : Lithologie et principaux éléments associés à la plaine des Palmistes et au massif du Piton de la Fournaise .....	72
Tableau 17 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères du massif du Piton de la Fournaise et de la plaine des Palmistes. ....	73
Tableau 18 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs sud et ouest du massif du Piton de la Fournaise, du cirque de Cilaos et de la planèze Tampon. ....	78
Tableau 19 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Cilaos. ....	78
Tableau 20 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères localisés sur les flancs sud et ouest du massif du Piton de la Fournaise, du cirque de Cilaos et de la planèze Tampon. ....	79
Tableau 21 : recommandations sur le type de flacon à utiliser selon les éléments à analyser .....	95
Tableau 5 : Limites de quantification proposées dans le cadre du cahier des charges. du programme Aquaref.....	104

## Liste des annexes

Annexe 1 : Atlas de cartes « milieu/eaux souterraines et eaux de surface » (cf DVD associé au rapport).....	115
Annexe 2 : Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé .....	117
Annexe 3 : Coefficients de variation (CV) de reproductibilité de la profession "laboratoires accrédités analystes de l'eau", extraits des essais AGLAE .....	123

## Liste des abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ADES : Accès aux Données des Eaux Souterraines

AEP : Alimentation en Eau Potable

AGI : American Geologic Institute

BDAT : Base de Données des Analyses de Terre

BDETM : Base de Données sur les Eléments Traces Métalliques

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BSS : Banque du Sous-Sol

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CSA : Cambridge Scientific Abstracts

DAF : Direction de l'Agriculture et de la Forêt

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DCP : Spectrométrie à plasma diffusif

DIREN

DRASS : Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales

DRIRE

FOREGS : FORum of European Geological Survey

GIS-Sol : Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

ICP : Spectrométrie à plasma induit

ICP-MS : Spectrométrie de masse à plasma induit

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ONEMA : Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques

RNB : Réseau National de Bassin

RNES : Réseau National de connaissance des Eaux Souterraines

SEQ : Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau



## Formule chimique de quelques minéraux

Actinote :  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Aegyrine :  $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$

Andésine :  $(\text{Na, Ca})(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$

Anorthose :  $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$

Apatite :  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F,Cl})$

Arsénopyrite :  $\text{FeAsS}$

Augite :  $(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$

Azurite :  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$

Barytine :  $\text{BaSO}_4$

Biotite :  $\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F, OH})_2$

Blende : *cf.* Sphalérite

Bytownite :  $(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$

Calcédoine :  $\text{SiO}_2$

Chalcopyrite :  $\text{CuFeS}_2$

Cerussite :  $\text{PbCO}_3$

Cinabre :  $\text{HgS}$

Chalcocite :  $(\text{Mg,Al,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Chlorite :  $(\text{Mg,Al,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Chromite :  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$

Cordiérite :  $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$

Covellite :  $\text{CuS}$

Fluorine :  $\text{CaF}_2$

Dimorphite :  $\text{As}_4\text{S}_3$

Epidote :  $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$

Fluoroapatite :  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$

Galène :  $\text{PbS}$

Goethite :  $\text{FeO}(\text{OH})$

Grenat :  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$

Gypse :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Hématite :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Hornblende :  $(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$

Hypersthène :  $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$

Ilménite :  $\text{FeTiO}_3$

Labrador :  $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$

Lépidolite :  $\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$

Leucite:  $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$

Magnétite :  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Malachite:  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$

Melnikovite :  $\text{Fe}_2\text{S}_4$

Mispickel: *cf.* Arsenopyrite

Muscovite :  $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$

Oligoclase :  $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$

Olivine (Péridots) :  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$

Pigeonite :  $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$

Pyrite:  $\text{FeS}_2$

Pyrolusite :  $\text{MnO}_2$

Pyrrhotite:  $\text{Fe}_7\text{S}_8$

Réalgar:  $\text{AsS}$

Serpentine:  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$

Siderite:  $\text{FeCO}_3$

Sillimanite:  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$

Smithsonite:  $\text{ZnCO}_3$

Sphalérite:  $\text{ZnS}$

Staurotide:  $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6[\text{SiO}_4]_4(\text{O}, \text{OH})_2$

Topaze:  $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2$

Tourmaline :  $\text{Al}_6\text{Mg}_3\text{Na}[(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3, (\text{OH}, \text{F})_4]$

Zéolite :  $\text{Na}_{x_1}\text{Ca}_{x_2}\text{Mg}_{x_3}\text{Ba}_{x_4}\text{K}_{x_5}\text{Al}_{x_6}[\text{Si}_{x_7}\text{O}_{x_8}] \cdot x_9 \text{H}_2\text{O}$ , où  $x_1$  à  $x_9$  sont des entiers positifs ou nuls.

Zircon :  $\text{ZrSiO}_4$

# 1 Introduction

La mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE précise différentes exigences et notamment que « les Etats membres peuvent utiliser des typologies pour la caractérisation des eaux souterraines lorsqu'ils établissent des niveaux naturels pour ces masses d'eau souterraine » (Annexe II.2.2 de la DCE). Sa directive fille sur les eaux souterraines, 2006/118/CE du 12 décembre 2006, renforce cette nécessité de connaître les états de référence géochimique des masses d'eau souterraine. Les Etat Membres, et plus précisément les districts hydrographiques chargés de la mise en œuvre de la directive, devront en effet fournir pour chaque masse d'eau souterraine à risque des informations sur le bruit de fond géochimique (annexe II, partie A de la directive fille 2006/118/CE). Par fond géochimique on entendra ici les concentrations dans les eaux naturelles attribuables uniquement à une origine naturelle.

Pour les cours d'eau, les exigences sont les mêmes. L'évaluation du bon état chimique des cours d'eau nécessite de bien connaître les fonds géochimiques naturels de manière à distinguer les éléments naturellement présents dans le milieu de ceux résultant des activités humaines.

La mise en place ces dernières années de réseaux de mesure de la qualité des eaux souterraines en France, en particulier par les Agences de l'Eau, a montré combien il était difficile dans l'état actuel des connaissances d'évaluer les niveaux de référence géochimique des eaux des aquifères. L'élaboration du Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau ou SEQ (SEQ - cours d'eau et SEQ – eaux souterraines), qui servait notamment à traiter les données issues de ces réseaux, a confirmé cette difficulté. Il est donc nécessaire d'améliorer la connaissance de l'état de référence des eaux naturelles pour un certain nombre d'éléments minéraux (fond géochimique) afin de différencier un apport anthropique d'une présence naturelle, de prévoir l'évolution à court et long terme de la qualité des eaux et de fixer des objectifs de qualité ou de restauration pertinents dans la recherche du « bon état qualitatif » des masses d'eau souterraine et de surface (Directive Cadre sur l'Eau).

Il n'existe pas de réponse unique pour qualifier une eau de « bonne qualité ». La qualité d'une eau se définit à partir de l'usage que l'on en fait. On peut cependant évaluer la qualité de l'eau par rapport à son état d'origine. L'altération de l'état chimique d'une eau est ainsi évaluée par rapport à l'état naturel en mesurant les principaux paramètres physico-chimiques responsables de la dégradation : nitrates, micropolluants minéraux (arsenic, plomb,...), micropolluants organiques (pesticides, hydrocarbures aromatiques, polycycliques, composés organo-halogénés volatils,...). Par ailleurs, un certain nombre de ces éléments posent problème pour l'utilisation de la ressource pour l'usage « alimentation en eau potable » (AEP) au delà des seuils imposés par la réglementation, il est donc nécessaire d'apprécier les niveaux des fonds géochimiques naturels pour ces éléments.

C'est dans ce contexte et pour répondre aux besoins de la DCE en matière d'identification des fonds géochimiques naturels dans les cours d'eau et les eaux souterraines que cette étude, financée dans le cadre de la convention n°61/08 ONEMA-BRGM, a été réalisée sur le territoire de l'île de la Réunion. Cette étude s'intéresse aux éléments minéraux majeurs et traces. On entend ici par éléments majeurs le **calcium**, le **magnésium**, le **sodium**, le **potassium**, les ions **chlorures**, les ions **sulfates** et les **bicarbonates**. Les éléments traces pris en compte sont tous les éléments considérés comme toxiques ou indésirables par la directive « Eau potable » 98/60/CE et par son décret d'application en droit français (n°1220 du 20 décembre 2001) à savoir : l'**arsenic**, le **baryum**, le **bore**, le **fluor**, le **cadmium**, le **chrome**, le **mercure**, le **cuivre**, le **nickel**, le **plomb**, le **zinc**, l'**antimoine**, le **sélénium**, l'**aluminium**, l'**argent**, le **fer** et le **manganèse**. Quatre de ces substances font également partie de la liste des **substances prioritaires** de la Directive Cadre sur l'Eau. Il s'agit du **cadmium**, du **nickel**, du **mercure** et du **plomb**.

Cette démarche a été mise en œuvre sur le territoire de la Guadeloupe (Brenot et al., 2008, rapport : BRGM/RP-55709-FR) et de la Martinique (Lions et al. 2008, rapport BRGM/RP-56748-FR). Pour le territoire métropolitain national, l'identification des zones à risque de fond géochimique élevé a été réalisée lors de précédentes études du BRGM (Sonney et al., 2005, Blum et al., 2006, Brenot et al., 2006, Brenot et al., 2007 ; rapports : BRGM/RP-54031-FR, BRGM/RP-54030-FR, BRGM/RP-54663-FR et BRGM/RP-55346-FR,) mais uniquement sur les éléments traces, selon une méthodologie d'approche définie dans le guide méthodologique édité par le BRGM (2006).

La présente étude s'articule de la manière suivante :

- Synthèse bibliographique : recueil des données et des informations disponibles. Cette synthèse bibliographique a pour objectif de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible sur les niveaux de référence géochimique des hydrosystèmes de la Réunion.
- Interprétation des données brutes existantes. L'ensemble des données et des informations collectées sont croisées sur des supports cartographiques pertinents de manière à identifier, pour les cours d'eau du bassin comme pour les eaux souterraines, les secteurs à risque de concentrations naturelles en éléments minéraux.
- Délimitation des secteurs à risque de fond géochimique élevé. Au regard de tous ces résultats, une délimitation des secteurs à risque de fond géochimique élevé est réalisée en associant pour chaque zone identifiée un niveau de confiance en fonction de la pertinence des données disponibles. Cette approche par niveau de confiance vient compléter l'étude de Brenot et al. (2008) qui a délimité uniquement des zones de risque avec un niveau de confiance élevé. Dans cette étude, les zones présentant des éléments traces avec un niveau de confiance plus faible sont également identifiées.



## 2 Quelles sont les données exploitées ?

### 2.1 APPROCHE

La démarche concernant l'identification des fonds géochimiques a été initiée en France par les travaux de Meybeck (1984), s'intéressant à l'étude de petits bassins versants monolithologiques. L'idée était de s'affranchir des contraintes spatiales (diversité lithologique, éventuels apports anthropiques) afin de tester l'influence de plusieurs paramètres (végétation, température, conditions physico-chimiques, ...) sur l'altération et donc sur la mobilisation des éléments constitutifs des roches vers la phase dissoute et la phase particulaire. Dans le Tableau 1, sont reportées les concentrations chimiques moyennes des eaux de rivières mondiales et de rivières sur de petits bassins français en fonction du type de lithologie drainée (Meybeck, 1984).

Type de roche unité	N*	SiO <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Σ+ meq.L <sup>-1</sup>	Ca mg.L <sup>-1</sup>	Mg mg.L <sup>-1</sup>	Na mg.L <sup>-1</sup>	K mg.L <sup>-1</sup>	Cl mg.L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> mg.L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> mg.L <sup>-1</sup>
<b>Rivières mondiales</b>										
Roches plutoniques	11	8	0.14	1.6	0.18	0.87	0.27			
Roches volcaniques	24	21.7	0.7	6.5	2.16	4.8	1.33			
Roches métamorphiques	18	9.9	0.27	2.8	0.72	1.15	0.86			
Roches détritiques non carbonatées	16	7	0.2	2.2	0.58	0.85	0.27			
Roches détritiques et calcaires	17	5.1	2.5	39.5	5.4	1.31	0.7			
Evaporites	13	7	18	61.2	17.3	310.5	3.5	479	112.3	131.8
<b>Petits bassins français</b>										
Roches plutoniques et métamorphiques	30	9	0.85	0.96	0.53	1.91	0.36		1.8	9
Roches volcaniques	54	12.8	0.435	3.14	1.98	2.3	0.54		0.42	26
Roches détritiques non carbonatées	47	9.6	0.5	4.8	1.8	2.1	0.82		5.3	2.3
Roches détritiques et calcaires	60	6.4	3.55	64.6	3.2	0.82	0.41		4.26	213.3
Evaporites	6	8	20	248	84	13.8	1.56	21.3	720	268

\* Nombre d'échantillons considérés pour calculer les valeurs médianes

Tableau 1 : Composition chimique moyenne des eaux de surface en fonction du type de lithologie drainée (Meybeck, 1984)

Cette approche concernait l'étude des eaux de surface et a été, par la suite, élargie par d'autres auteurs à l'étude des eaux souterraines avec les récentes exigences de la DCE.

La présente étude s'inscrit dans la continuité des travaux du BRGM sur le fond géochimique qui se sont attachés à mettre en évidence les principaux mécanismes qui contrôlent les échanges chimiques entre l'eau et la matrice aquifère. Ces travaux ont permis d'élaborer et de mettre à disposition une méthode qui propose de prédire la qualité naturelle d'une eau dans un aquifère en un lieu donné, à partir de la connaissance de ses caractéristiques lithologiques et physico-chimiques. Cette étude méthodologique réalisée entre 1999 et 2001 par le BRGM et qui a fait l'objet d'un rapport en cinq volumes : Blum et al. (2002) se trouve synthétisée dans un Guide Technique « Qualité naturelle des eaux souterraines – Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français » édité par le BRGM (2006).

Les résultats de cette étude sont présentés en trois grands volets (BRGM, 2006) :

- Une synthèse bibliographique sur les mécanismes d'acquisition des caractères chimiques des eaux ainsi qu'une synthèse des connaissances sur les éléments majeurs et traces : leur occurrence sur le territoire national, les lithologies ou contextes géologiques associés.
- Une méthode visant à déterminer le fond géochimique naturel d'un aquifère et à établir la liste des conditions et informations nécessaires à sa mise en œuvre.
- Une étude statistique des données chimiques existantes dans les différents réseaux de mesure des eaux à l'échelle nationale.

La méthode pratique développée (Blum et al., 2002 ; BRGM, 2006) permet d'aborder la détermination du fond géochimique d'un aquifère en mettant en relation les connaissances acquises sur le contexte géologique (lithologie et minéralisations associées) et les conditions physico-chimiques de l'aquifère. Parmi les processus les plus importants pris en compte dans cette méthode, on retiendra :

- Les interactions eau-roche,
- Les phénomènes d'apports par les pluies liés à la proximité d'eau de mer : intrusion saline, eaux saumâtres de bord de mer,
- Le confinement (caractère plus ou moins captif) des eaux,
- Les drainances ou interactions entre aquifères.

La démarche adoptée dans cette étude tient compte de la méthodologie précédemment énoncée et s'articule ainsi suivant plusieurs phases. La première phase de l'étude est constituée par **la synthèse des études existantes pour le territoire de la Réunion**. La deuxième phase vise à rassembler les **données brutes** disponibles et à les interpréter **en fonction du contexte géologique et des pressions anthropiques** identifiées en s'appuyant sur un support cartographique pertinent. Enfin la dernière phase de ce travail aboutit à l'élaboration de la **carte des zones à risque de fond géochimique élevé** pour l'ensemble du territoire de la Réunion.

## 2.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTEES

Une recherche bibliographique a permis de recueillir les références les plus pertinentes pour documenter le fond géochimique en éléments majeurs et traces. Bien que l'étude ne concerne que le territoire de la Réunion, cette recherche a parfois porté sur d'autres zones géographiques, présentant des contextes géologiques similaires (possibilité de transposer les résultats obtenus à des contextes géologiques équivalents).

### **2.2.1 Objectif de la synthèse bibliographique**

L'objectif de cette synthèse bibliographique est d'identifier la part des concentrations en éléments majeurs et traces observées pour les eaux souterraines et les eaux de surface imputable à une origine naturelle. Une bonne connaissance du contexte géologique pouvant aboutir à des concentrations anormalement élevées dans les eaux est donc primordiale. Les notices de cartes géologiques et autres références bibliographiques détaillant la composition minéralogique et chimique des roches présentes ainsi que leurs minéralisations associées sont exploitées à cet effet. Les références permettant de documenter les conditions physico-chimiques du milieu (pH, Eh...) et d'appuyer une éventuelle mise en solution de certains éléments présents dans les roches vers les eaux naturelles sont également recherchées. Les références s'intéressant à la gîtologie ont également été consultées.

Cette synthèse bibliographique offre la possibilité d'appuyer par la suite l'interprétation des données brutes sur les eaux naturelles mais également de documenter des secteurs mal ou non couverts par ces données en réalisant une analyse prédictive.

### **2.2.2 Stratégie employée pour la recherche bibliographique**

#### ***Liste des bases de données consultées***

Les sites Internet de certains organismes publics peuvent renfermer une liste détaillée d'ouvrages, de revues, de thèses, de publications scientifiques, ou de données brutes dont il est possible de consulter les références bibliographiques ou bien même, dans certains cas, de les consulter directement. Cette liste constitue une base de données. Les principales bases de données et types de documents interrogés sont :

- Base CSA (Cambridge Scientific Abstracts) :

Elle commercialise une cinquantaine de bases de données thématiques produites par CSA ou des éditeurs associés dans plusieurs disciplines. Ont été choisis :

- Géoref, base spécialisée en Sciences de la Terre, réalisée par l'AGI (American Geologic Institute) ;
  - Environmental Sciences and Pollution Abstracts (depuis 1981), produit par CSA et qui concerne en particulier les domaines environnementaux ;
  - Aqualine, depuis 1960, plus spécialisé dans le domaine de l'eau.
- Base SCIENCE DIRECT : 1900 revues et publications scientifiques.
  - Base des rapports du BRGM. L'interrogation a porté sur la totalité des rapports publics disponibles au BRGM. Pour information, l'ensemble des références dont l'accès est public est disponible sur le site du BRGM (<http://www.brgm.fr>).

- Carte géologique de synthèse au 1/100 000 de la Réunion avec notamment la notice explicative géologique qui décrit les formations et les minéralisations associées.

### ***b) Recherche bibliographique : thèmes et mots clefs***

Les documents consultés ont été triés en conservant les thématiques « Hydrochimie », « Hydrogéologie » et « Gîtologie ». Les mots clefs employés pour cette recherche sont les suivants :

En français :

Réunion, eau, eau souterraine, aquifère, eau de surface, cours d'eau, métaux, élément trace, métaux lourds, fond géochimique, chimie, géochimie, pollution, concentration, minéralisation, contamination, mine, gisement, minerai, filon, gîte, sable, granite, métamorphique, calcaire, alluvions, argiles, basalte, volcanisme, calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfates, chlorures, nitrates, aluminium, antimoine, argent, arsenic, baryum, cadmium, chrome, cuivre, fer, fluor, manganèse, mercure, nickel, phosphore, plomb, sélénium, zinc...

En anglais :

Réunion, water, groundwater, aquifer, surface water, metals, heavy metals, trace element, rare earth element, geochemical baseline, chemistry, geochemistry, pollution, concentration, mineralization, contamination, deposit, ore, dyke, sand, granite, clay, limestone, volcanism, calcium, magnesium, sodium, potassium, sulfates, chlorides, nitrates, aluminium, antimony, arsenic, barium, cadmium, chromium, copper, fluorine, iron, lead, manganese, mercury, nickel, selenium, silver, zinc...

## **2.3 LES DONNEES BRUTES EXPLOITEES**

### **2.3.1 Les eaux souterraines**

#### ***Banque de données ADES***

Une extraction de données issues de la base nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES), correspondant à des analyses en éléments majeurs et traces sur eaux brutes, a été réalisée en octobre 2008.

Les données qualitatives bancarisées dans ADES pour les eaux souterraines de la Réunion sont essentiellement issues du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de l'Office de l'Eau de La Réunion, du contrôle sanitaire effectué par la DRASS sur les captages AEP (Banque SISE-Eaux), des données acquises par le Service Géologique Régional, des données publiées par l'Université et des données ANTEA.

Le suivi réalisé sur les eaux souterraines par l'Office de l'Eau a porté sur 26 points d'eau surveillés de manière continue ou non entre avril 2004 et novembre 2007. Les données portent sur la mesure des paramètres physico-chimiques et l'analyse des éléments majeurs, des métaux (Fe, Mn et Al), des polluants organiques et pesticides.

Pour le suivi effectué par la DRASS, la fréquence et le type d'analyse sont définis dans le Code de la Santé Publique. Les données bancarisées dans ADES correspondent au suivi sanitaire réalisé sur 64 stations (ESO) réparties sur l'île entre janvier 1999 et septembre 2007.

Les données extraites de la base ADES, tout producteur confondu, correspondent à la période 1993 à novembre 2007. Le nombre de points où des analyses sont disponibles reste donc limité. Ainsi pour pallier au manque important de données référencées dans ADES et recouvrir toute l'étendue géographique de la Réunion, d'autres sources de données brutes ont été bancarisées :

### ***Données DRASS***

Les données actuellement non bancarisées dans ADES ont fait l'objet d'une demande complémentaire auprès de la DRASS. Ces résultats ont été pris en compte dans les interprétations, il s'agit du suivi de 86 stations (forage et sources) correspondant à la période novembre 1998 à septembre 2008.

Les données issues des points d'eau « eau de surface » identifiés comme source ont également été bancarisées dans la table « eau souterraine ». Cela concerne une trentaine de stations de suivi, essentiellement localisées dans le secteur des Avirons.

### ***Données Études – Emergence***

Les résultats d'analyses obtenus dans le cadre de l'inventaire hydrogéochimique des sources et nappes de la Réunion effectué de 1983 à 1994 par le BRGM ont été bancarisés dans ADES et ont été valorisés dans le cadre de la présente étude. Les données correspondent aux analyses des éléments majeurs, du fer, du manganèse et de l'aluminium lorsque les données étaient disponibles. Débutée en 1983, l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la Réunion a été arrêtée en 1994. Cette étude a permis de constituer un état initial de la chimie des eaux souterraines et de définir un réseau « qualité des émergences » constitué de 16 points de prélèvements en sources et un réseau « qualité des eaux de nappes » comportant 19 puits, forages et piézomètres.

Cette étude a permis de disposer d'informations hydrochimiques relatives à 525 points d'eau, soit 1023 analyses. La synthèse de cette étude (BRGM, 1994) conclut, entre autres, sur les points suivants :

- Les eaux souterraines présentent des teneurs très inférieures aux limites ou références de qualité<sup>1</sup>, sauf pour plusieurs cas particuliers (sources thermominérales et sources littorales)
- Les eaux souterraines sont très faiblement minéralisées
- Sur la majeure partie des points d'observation, les teneurs en calcium, en nitrates et en chlorures ont tendance à augmenter sur la période 1983-1994.

### **2.3.2 Les eaux de surface**

#### ***Réseau DCE – Données Office de l'Eau***

Le réseau de suivi de la qualité des eaux des rivières se compose de 34 stations. Il couvre les 13 grandes rivières pérennes de l'île et leurs principaux affluents selon une répartition amont aval.

Le suivi consiste en la mesure des paramètres physico-chimiques in situ (T, pH, Eh, conductivité, oxygène dissous) et en l'analyse des éléments majeurs et traces en solution.

#### ***Données DRASS***

Par ailleurs, 114 captages d'eau de surface sont suivis d'un point de vue qualitatif dans le cadre du contrôle sanitaire exercé par la Direction de la Santé et du Développement Social (DRASS) sur les captages AEP et les sources. La fréquence d'analyse varie de 1 à 12 fois par an en fonction de l'importance des volumes captés et les mesures portent sur de nombreux paramètres : organoleptiques, physico-chimiques, bactériologiques, métaux lourds, pesticides, hydrocarbures. Ainsi ces stations renseignent sur la qualité des cours d'eau dans leur partie amont.

Les données identifiées comme portant sur des sources ont été bancarisées dans la table « eau souterraine » (ESO) bien qu'elles soient renseignées comme « eau de surface » (ESU) par la DRASS.

### **2.3.3 Les analyses de sols**

Les teneurs en éléments dans les sols peuvent donner des renseignements précieux pour l'identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments majeurs et traces dans les eaux naturelles. Cependant, il faut rester vigilant quant à la pertinence de ces données pour identifier des fonds géochimiques. En effet, dans le cas de sols à forte pression agricole, la composition chimique des sols est significativement modifiée par les amendements agricoles.

---

<sup>1</sup> Uniquement sur les paramètres analysés

Cette étude s'appuie sur les récents travaux de Laperche et al. (2008) portant sur la cartographie des teneurs en éléments traces métalliques sur les sols de La Réunion. Les éléments analysés sur 74 échantillons de sol répartis sur l'ensemble de l'île sont As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et Hg.

#### **2.3.4 L'occupation des sols**

L'interprétation fiable des données sur les eaux naturelles pour décrire les fonds géochimiques d'un secteur géographique nécessite une bonne connaissance des contraintes anthropiques locales. En effet les concentrations en éléments traces, en particulier dans les eaux de surface, peuvent être fortement influencées par la contribution d'eaux provenant du lessivage de sols agricoles, urbains ou industriels. Ainsi l'occupation des sols agricoles, mise en relation avec les types d'amendements susceptibles d'être pratiqués suivants les cultures, permet d'identifier les concentrations élevées en éléments traces non imputables au fond géochimique local. Les données issues de la carte de l'occupation du sol (CIRAD) et de la base de données des cultures en 2007 (DAF REUNION) ont été exploitées dans cet objectif.





## 3 Présentation de la démarche appliquée et du contexte hydrogéochimique de La Réunion

### 3.1 DEMARCHE

#### 3.1.1 Synthèse bibliographique

Les données bibliographiques collectées sont synthétisées sous la forme de deux tableaux, l'un détaillant la lithologie associée aux aquifères et les principaux éléments présents dans la lithologie, l'autre présentant les caractéristiques de ces aquifères et proposant une analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux.

#### 3.1.2 Traitement des données brutes et analyse statistique

Avant de procéder à l'analyse statistique des données existantes pour les différents programmes d'acquisition, un traitement des données brutes a été effectué. Ce traitement a été nécessaire du fait de l'hétérogénéité des données d'un producteur de données à l'autre (hétérogénéités d'unités, de seuils de quantification, de dates de prélèvement, de protocoles d'échantillonnage... mais aussi hétérogénéités liées à des objectifs différents d'un producteur à l'autre). L'objectif est de corriger et/ou d'éliminer les analyses clairement aberrantes. Volontairement, le traitement des données choisi dans le cadre de cette étude reste restreint afin de ne pas niveler artificiellement la variabilité des valeurs rencontrées. En effet cette variabilité est porteuse de sens en termes de fond géochimique. Les étapes du traitement des données sont chronologiquement les suivantes :

- **Etape 1 : Homogénéisation des unités** : toutes les concentrations en éléments majeurs sont reportées en  $\text{mg.L}^{-1}$  et toutes les concentrations en éléments traces sont reportées en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ .
- **Etape 2 : Correction des erreurs d'unité systématiques** : des erreurs d'unité systématiques ont été détectées pour le fluor et l'aluminium. Pour le fluor, les valeurs supérieures à 100000 sont divisées par 1000 pour obtenir les concentrations « réelles » en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Pour l'aluminium, les valeurs inférieures à 1 ont été multipliées par 1000 pour obtenir les concentrations « réelles » en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ .
- **Etape 3 : Traitement statistique des données** : la valeur minimale, maximale et la moyenne ainsi que l'écart-type et le nombre de prélèvements N ont été calculés pour chaque station d'échantillonnage considérée.

- **Etape 4 : Elimination des stations de prélèvement où des erreurs non corrigibles ont été identifiées** : quel que soit l'élément considéré, un point de prélèvement est éliminé si le ratio de la valeur maximale sur la valeur minimale en ce point est supérieur à 9999. En effet on considère que dans ce cas une erreur a été commise lors de la bancarisation des données. Cette erreur ne correspond pas à une simple erreur d'unité car elle n'a pas pu être corrigée par le traitement précédent (correction des erreurs d'unités). L'origine de cette erreur est donc autre et ne peut être corrigée de manière fiable. Ainsi la station de prélèvement est éliminée.
- **Etape 5 : Correction des erreurs d'unité non-systématiques** : Après traitement statistique, si les valeurs minimales et maximales quantifiées ne sont pas du même ordre de grandeur que le seuil de quantification de l'élément considéré, les erreurs d'unités sont corrigées. Ces erreurs d'unité répétitives ont été détectées principalement pour les éléments fer et manganèse.

### 3.1.3 Bases de données

Quatre bases de données ont été constituées à partir des données brutes décrites au paragraphe (2.3) :

- **ESU** : rassemble toutes les données relatives aux eaux de surface (ESU) acquises par l'Office de l'Eau et la DRASS dans le cadre de leurs programmes d'acquisition de données et, celles reportées dans les études ponctuelles bancarisées (Annexe 1).
- **ESO** : rassemble toutes les données relatives aux eaux souterraines (ESO), issues de la base de données ADES, acquises par l'Office de l'Eau, la DRASS, le Brgm dans le cadre de leurs programmes d'acquisition de données et, celles reportées dans les études ponctuelles bancarisées (Annexe 1).
- **SOL** : rassemble les données acquises durant l'étude de Laperche et al. 2008.
- **Carto** : rassemble tous les supports cartographiques :
  - carte géologique au 1/100 000
  - carte de l'occupation du sol en 2003 (CIRAD) et la base de données des cultures en 2007 (DAF REUNION)
  - référentiel masses d'eau souterraine (emprise spatiale et leur nom)
  - repères spatiaux (communes, cours d'eau)

Pour les bases de données ESU et ESO, les tables dénommées « Max » présentent les stations où des concentrations ont été quantifiées, alors que les tables dénommées « Min » présentent les stations où les concentrations sont inférieures aux seuils de quantification ou nulles.

### 3.1.4 Représentation cartographique des données brutes

#### *a) Objectif*

A partir des données recueillies sur les éléments majeurs et traces dans les eaux naturelles, **une représentation cartographique** est réalisée de manière à identifier les secteurs à risque de fond géochimique élevé. A ce stade, il ne s'agit que d'une représentation graphique des données collectées avec un objectif double : (1) fournir une **géodatabase** immédiatement consultable sur Arcview et Arcreader regroupant l'ensemble des bases de données décrites précédemment : ESU, ESO, SOL et Carto ; (2) éditer un **atlas de cartes** pour les 8 éléments majeurs ou traces les plus pertinents.

Les concentrations en éléments majeurs et traces mesurées pour les eaux souterraines et les eaux de surface sont reportées sur un support cartographique rassemblant :

- Les résultats des analyses chimiques sur les eaux souterraines et les eaux de surface représentées par un figuré distinct.
- La carte géologique.
- Le référentiel masses d'eau souterraine et eau de surface.

Le croisement des données de concentrations en éléments majeurs et traces avec les formations géologiques cartographiées permet de dégager des **unités géologiques** pouvant présenter des caractéristiques comparables en termes d'occurrence en ces **éléments dans les eaux souterraines et les eaux de surface**.

#### *b) Choix des figurés et des classes*

Les concentrations en **éléments majeurs et traces** obtenues sur les eaux naturelles, issues de différentes sources de données (ADES, DRASS, Office de l'Eau) sont représentées avec une symbologie homogène. Pour chaque station, seule la **valeur maximale de concentration quantifiée** est représentée afin de visualiser un risque ponctuel maximal. Pour les stations où aucune concentration pour un élément donné n'a été quantifiée, on représente le **meilleur seuil de quantification** (le plus bas) de toutes les analyses réalisées sur cette station. Pour chaque station d'échantillonnage, les **symboles « rose clair à rouge »** correspondent à la **concentration maximale quantifiée** (couleur de remplissage allant du rose clair au rouge suivant une gamme de concentration croissante) et les **symboles « blancs et grisés »** représentent les valeurs inférieures aux seuils de quantification (couleur de remplissage grisée pour les points où les seuils de quantification considérés sont médiocres ou lorsque la valeur est nulle et ne permet pas de qualifier le point d'échantillonnage).

Quelque soit le programme d'acquisition considéré, **4 classes de concentrations** sont considérées pour la représentation cartographique des données, ce qui implique la définition de **3 valeurs pour limiter ces classes** (Figure 1).

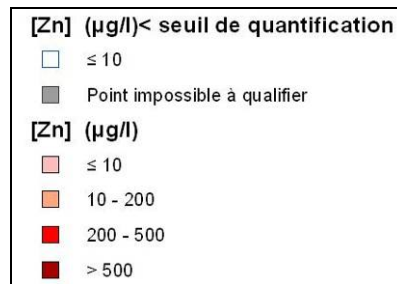


Figure 1 : Exemple de classes définies pour la représentation cartographique des données du support eau

La **1ère valeur** de limite de classe correspond, (1) pour les éléments majeurs, au seuil de quantification des analyses réalisées communément au laboratoire d'analyse du BRGM et (2) pour les éléments traces, au seuil de quantification médian considéré dans l'étude fond géochimique sur le territoire métropolitain (Brenot et al., 2007). Si le seuil de quantification de l'analyse est inférieur à la 1<sup>ère</sup> valeur de classe, les analyses seront considérées comme satisfaisantes et les résultats inférieurs au seuil de quantification seront représentés par un figuré blanc. Si le seuil de quantification de l'analyse est supérieur à la 1<sup>ère</sup> valeur de classe, les analyses seront considérées comme ininterprétables et le point mesuré comme impossible à qualifier (figuré grisé).

Pour la **2ème valeur** de limite de classe, il est proposé de prendre la valeur moyenne des concentrations des eaux de rivières mondiales drainant des roches volcaniques pour les éléments majeurs (Tableau 1) afin de s'adapter au contexte lithologique particulier de la Réunion. Pour les éléments traces c'est le centile 90 des valeurs du FOREGS qui est retenu (comme proposé par Brenot et al., (2007) pour l'étude fond géochimique sur le territoire métropolitain). Si cette valeur est supérieure aux seuils de quantification et/ou si cette valeur ne permet de discriminer les données pour le territoire de la Réunion, on se donnera la liberté d'adapter la 2ème valeur, afin de pouvoir correctement cartographier les variations de concentrations.

La **3ème valeur** de limite de classe est définie par la limite de qualité pour les substances chimiques dans l'eau destinée à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales (norme relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine correspondant à l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine ou par la Norme de Qualité Environnementale (NQE) si cette dernière est inférieure à la limite de qualité pour un élément donné (cas du plomb par exemple). Pour les éléments ne disposant pas de limite de qualité ni de NQE, comme le sodium, les chlorures, les sulfates, les références de qualité (définies dans l'annexe II-B de l'arrêté du 11 janvier 2007) seront considérés. Pour les éléments où aucune limite de qualité, NQE ou niveau guide n'existe, comme pour l'argent et le potassium des valeurs arbitraires sont fixées ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour Ag et  $12 \text{mg.L}^{-1}$  pour K). Ci-dessous sont présentées les valeurs prises en compte (Tableau 2).

		1ère valeur de classe = Seuil de quantification des données	2ème valeur de classe	3ème valeur de classe = limite de qualité (ou NQE ou valeur guide)
Majeurs (mg.L <sup>-1</sup> )	Ca	6,5*	65	270
	Mg	2,16*	21.6	50
	Na	4,8*	48	150 <sup>(4)</sup>
	Cl	0.1	25 <sup>(4)</sup>	200
	K	0.5	1,33*	12 <sup>(1)</sup>
	SiO2	0.5	24,5*	50 <sup>(4)</sup>
	SO4	0.5	25 <sup>(4)</sup>	250
	Traces indésirables (µg.L <sup>-1</sup> )	Al	10	111**
Ag		1	***	10 <sup>(1)</sup>
Ba		5	66**	700
B		50	60**	1000
Cu		2	***	2000
Fe		50	100 <sup>(5)</sup>	200
Mn		6	20 <sup>(5)</sup>	50
F		10	190**	1500
PO4		10	267 <sup>(4)</sup>	5000 <sup>(1)</sup>
Zn		10	100 <sup>(5)</sup>	500 <sup>(4)</sup>
Sb		1	***	5
Traces toxiques (µg.L <sup>-1</sup> )		As	1	2.7**
	Cd <sup>(3)</sup>	1	***	5
	Cr	2	***	50
	Hg <sup>(3)</sup>	0.1	***	1
	Ni	1	4.6**	20
	Pb	1	***	7,2 <sup>(2)</sup>
	Se	5	***	10

\* Composition chimique moyenne des rivières mondiales drainant des roches volcaniques (Meybeck, 1984)

\*\* centile 90 des données FOREGS acquises sur le territoire de la France métropolitaine

\*\*\* à choisir

<sup>(1)</sup> Limite de qualité non documentée par le décret 2007-49 du 11 janvier 2007

<sup>(2)</sup> NQE car NQE inférieure à la limite de qualité pour cet élément

<sup>(3)</sup> Limite de qualité car la NQE est inférieure au seuil de quantification des données pour ces éléments

(Cd=0.008 µg.L<sup>-1</sup> ; Hg=0.05 µg.L<sup>-1</sup>)

<sup>(4)</sup> Niveau guide de concentration

<sup>(5)</sup> Valeur choisie dans le cadre de cette étude

Tableau 2 : Valeurs en µg.L<sup>-1</sup> proposées pour définir les classes de concentrations en éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines et de surface.

### 3.1.5 Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé

#### a) Méthodologie

La délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé s'appuie sur l'ensemble des données collectées, bibliographiques et données brutes.

L'interprétation de l'ensemble des données disponibles permet d'aboutir à une délimitation des zones à risque pour l'emprise d'une masse d'eau. Lorsque la répartition des points de prélèvement le permet, ce risque peut être attribué à une entité hydrogéologique plus petite que celle de la masse d'eau. Le risque de fond géochimique élevé attribué à chaque masse d'eau ou partie de masse d'eau est reporté en Annexes 4 et 5.

Le risque est identifié indépendamment pour les eaux de surface et les eaux souterraines. De manière générale l'interprétation des données sur les eaux de surface présente plusieurs difficultés. Tout d'abord, le manque certain de données, tant en nombre d'éléments analysés qu'en stations échantillonnées, rend délicat la délimitation des zones à fond géochimique élevé. Par ailleurs, le réseau de mesure considéré est souvent de pertinence très moyenne pour l'identification d'un fond géochimique en éléments traces. En effet, les contraintes anthropiques associées aux points d'échantillonnage sont souvent importantes. Les périodes de prélèvement peuvent être très variables (hautes eaux/basses eaux), ce qui rend parfois difficile les comparaisons inter-campagnes en raison d'apports anthropiques ou particuliers provenant du lessivage des sols généralement importants lors des évènements de crue.

### **b) Niveau de confiance**

Si dans certains secteurs les données sont abondantes (nombreux résultats d'analyse, publications expliquant l'origine de l'élément) et permettent d'affirmer avec certitude qu'un risque de fond géochimique élevé existe, d'autres secteurs présentent peu de données et seule une approche « prédictive » basée sur les connaissances acquises dans des contextes géologiques équivalents (BRGM, 2006) permet de délimiter le risque. Ainsi suivant les zones considérées, l'abondance et la densité des données disponibles sont variables. Afin de rendre compte de cette disparité, une **estimation du niveau de confiance** attribué à chaque zone est donc proposée. Trois niveaux de confiance ont été définis. A titre d'exemple, quelques uns de ces critères sont détaillés dans la Figure 2.

Niveau de confiance attribué	Données disponibles
Faible	<p style="text-align: center;">Aucune donnée (mais connaissance d'un contexte géologique équivalent) ou Analyses chimiques (ESU+ESO)</p>
Moyen	<p style="text-align: center;">Bibliographie et connaissance d'un contexte géologique équivalent</p>
Elevé	<p style="text-align: center;">Bibliographie et Analyses chimiques (ESU+ESO) ou Connaissance d'un contexte géologique équivalent et Analyses chimiques (ESU+ESO)</p>

Figure 2 : Niveau de confiance attribué aux zones susceptibles de présenter un fond géochimique élevé en fonction des données disponibles pour chaque secteur.

A titre d'exemple un niveau de **confiance faible** sera attribué à une zone où les données disponibles sont inexistantes ou pour lesquelles les stations de prélèvement actuellement considérées (analyses chimiques ESU+ESO disponibles) ne sont pas pertinentes. A l'inverse les zones identifiées avec un niveau de **confiance élevé** correspondent à des zones où à la fois les analyses chimiques et la bibliographie ou la

connaissance d'un contexte géologique équivalent et les analyses chimiques permettent de documenter ce risque.

La Figure 2 ne couvre pas tous les cas de figure rencontrés dans l'interprétation des données et l'attribution d'un niveau de confiance pour une zone à risque de fond géochimique élevé. C'est pour cette raison que le choix du niveau de confiance attribué est justifié au cas par cas dans ce rapport. De plus, un tableau de synthèse en Annexe 4 résume pour chaque zone le type de données pris en compte pour attribuer le niveau de confiance.

### ***c) Difficultés inhérentes à la zone géographique considérée***

La quantité d'analyses en éléments majeurs et traces disponibles pour le territoire de la Réunion est très variable suivant le secteur géographique considéré. Ainsi, le domaine littoral est plutôt bien représenté grâce aux suivis de la DRASS et de l'Office de l'Eau. On note cependant que le secteur du massif de la Fournaise (plaine des Palmistes, Tampon, Saint Benoit) est mal représenté. A l'inverse pour le domaine d'altitude (planèzes et Cirques), les données sur les émergences renseignent sur les éléments majeurs mais pas sur les éléments traces.

La seule approche possible dans ce cas est une analyse prédictive à partir de la connaissance de la géologie locale documentée à partir des cartes géologiques au 1/50 000 (Billard, 1974). Cependant dans le contexte particulier des roches volcaniques, cette approche est particulièrement délicate car les interactions eau-roche sont peu documentées dans la littérature comparativement aux roches carbonatées et aux roches plutoniques.

### ***d) Représentation cartographique des zones à risque***

La **délimitation des zones à risque** est représentée sur deux supports cartographiques distincts en Annexe 2, un pour les eaux souterraines et l'autre pour les eaux de surface. A chaque zone délimitée sont associés le niveau de confiance (faible, moyen ou élevé) et la liste des éléments concernés.

### ***e) Précautions d'usage***

Compte tenu de l'échelle de travail et de la grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations naturelles en éléments majeurs et traces, les cartes des zones à risque de fond géochimique élevé doivent être utilisées avec précaution.

La délimitation d'une zone à risque de fond géochimique élevé pour l'élément X, ne garantit **nullement que cet élément soit présent en tout point de cette zone**. En effet la présence d'un élément à des teneurs naturellement élevées est bien souvent liée à la présence de filons minéralisés. Dans ce cas, le risque est important à proximité d'un filon et peut être totalement absent quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres plus loin dans la même formation.

Ces cartes sont des documents de synthèse de l'étude et leur objectif est de guider l'utilisateur vers les zones **susceptibles** de contenir tel ou tel élément. La lecture des cartes ne doit pas être isolée et doit s'accompagner des commentaires et interprétations reportés dans le **rapport**. Ceci est nécessaire pour mieux apprécier la nature des concentrations rencontrées ainsi que l'origine de l'élément.

Dans la perspective de définition du bon état chimique des eaux de surface et des eaux souterraines demandée par la Directive Cadre sur l'Eau, ce document permet :

- d'identifier les éléments susceptibles d'être présents à l'état naturel en concentration significative. A l'inverse, il est ainsi également possible de lister les éléments dont on peut prévoir l'absence à l'état naturel dans les eaux du bassin. Pour ces éléments, toute présence dans le milieu aquatique concerné pourra alors être attribuée à une pollution.
- de localiser les masses d'eau concernées par des occurrences naturelles. Ce point est essentiel pour définir les seuils de bon état des masses d'eau de surface et des masses d'eau souterraine.
- de disposer d'arguments sur l'origine d'un élément lorsque, comme l'exige la Directive fille sur les eaux souterraines, il conviendra de justifier pourquoi une mesure dépasse les valeurs seuils de bon état. La Directive fille sur les eaux souterraines précise en effet qu'une masse d'eau n'est en bon état que si les concentrations sont inférieures aux valeurs seuils de bon état en tout point du réseau de surveillance. Si sur un point, les résultats dépassent les valeurs seuils, il conviendra alors de déterminer par des « enquêtes appropriées » si ce dépassement justifie une dégradation de la masse d'eau dans sa totalité (selon l'extension de cette dégradation, son origine, son impact sur les eaux de surface associées...). Dans ce cadre, la carte des zones à risque de fond géochimique élevé représente un outil pertinent pour justifier l'origine d'une anomalie.

## 3.2 CONTEXTE HYDROGEOCHIMIQUE DE LA REUNION

### 3.2.1 Description générale de l'île de La Réunion

#### *Contexte géographique*

La Réunion est l'île la plus occidentale de l'archipel des Mascareignes, comprenant la Réunion, Maurice et Rodrigues. La Réunion est une île volcanique formée de deux volcans accolés, le Pitons des Neiges, au Nord-Ouest, éteint, culminant à 3069 m et celui de la Fournaise au Sud-Est, en activité, culminant à 2631 m. Le volcan de la Fournaise est, actuellement, l'un des volcans les plus actifs sur Terre.

Le massif du Piton des Neiges occupe près des deux-tiers de l'île. Il présente à son sommet trois larges excavations sub-circulaires, profondes de plus de 1000 m, aux parois abruptes (remparts) : ce sont les cirques de Mafate, Cilaos et Salazie. Il existait un quatrième cirque entre Cilaos et Salazie : le cirque des Marsouins, presque



entièrement comblé par des coulées. L'intérieur des cirques est en majeure partie occupé par des formations détritiques de type avalanche de débris (MVTERRE, 2008). Près de la côte, les pentes du massif du Piton des Neiges se terminent soit par des plaines alluviales ou des plages, soit par des falaises abruptes pouvant atteindre 200 m de hauteur.

Le massif du Piton de la Fournaise s'est édifié sur les pentes Sud-Est du massif du Piton des Neiges. Son sommet est marqué par les traces de deux importants effondrements ce qui confère à la cavité une forme en U ouvert sur la mer. Au centre de cette dépression s'est édifié le Piton de la Fournaise. Les pentes du massif se terminent généralement par des falaises de plusieurs dizaines de mètres. Il existe également une petite plaine alluviale entre Saint Benoit et Sainte Rose.

Entre les deux massifs, les laves de nombreux petits pitons ont donné naissance à la plaine des Cafres et à la Plaine des Palmistes.

Le climat de la Réunion se caractérise par un climat tropical humide de régime océanique, soumis à l'alizé du Sud-Est pendant la saison froide et à la mousson du Nord-Est pendant la saison chaude. La pluviométrie varie de 0.5 m (coté ouest-« sous-le-vent ») à plus de 9 m/an au Piton de la Fournaise. La caractéristique de la Réunion est constituée par l'intensité des précipitations : la Réunion détient tous les records mondiaux de précipitation entre 12 heures (1170 mm) et 15 jours (6083 mm). Ces dépressions tropicales ou cyclones, malgré les risques naturels qu'elles entraînent, apportent également une quantité d'eau essentielle pour la réalimentation de l'île en eau souterraine et l'approvisionnement des rivières.

### ***Contexte géologique***

L'origine du volcanisme de La Réunion est complexe : bien que positionné sur une ancienne ride d'accrétion océanique d'âge paléocène (66 Ma) mais aujourd'hui inactive, la construction de l'édifice volcanique de La Réunion serait due à l'activité de l'un des plus gros points chauds du globe. La partie émergée de La Réunion, n'est que l'apex du volcan-bouclier construit au cours des 2 derniers millions d'années.

L'histoire de l'édification de La Réunion a fait l'objet de différents travaux sans pour autant trouver un consensus (Billard, 1974 ; Stieltjes, 1994 ; Andre et Cruchet, 1995) et peut être synthétisée comme suit.

Après un stade sous-marin, le premier Piton des Neige a émergé de l'océan il y a 2 millions d'années. Dans les formations actuellement exondées, les plus anciennes sont des agglomérats et des brèches basaltiques que l'on rencontre surtout dans le fond des cirques vraisemblablement témoins de la phase sous-marine puis amenées en position émergées par un soulèvement ultérieur. A l'émersion, se sont épanchées des coulées de **basalte à olivine et d'océanites** qui constituent l'ossature du massif (phases I et II pour Billard, 1974 ou séries des océanites). Ensuite, on observe une

phase d'érosion du volcan bouclier avec la formation de zéolites<sup>2</sup>. Vraisemblablement au cours de cette période calme s'opère une différenciation magmatique menant à la **série des laves alcalines différenciées** des phases suivantes (phases III et IV pour Billard (1974) ou séries différenciées). Le chimisme de cette différenciation magmatique suit un schéma d'évolution classique évoluant vers un pôle acide et alcalin avec un enrichissement en silice, sodium, potassium et un appauvrissement en magnésium, fer et calcium. Bien que ces laves différenciées soient majoritaires à l'affleurement, elles ne représentent qu'une faible proportion à l'échelle du massif. La genèse morphologique des cirques et du cœur du massif du Piton des Neiges est fortement associée au phénomène de coulées de débris qui résulte d'une déstabilisation due au volcanisme ou à l'érosion. Actuellement, le massif du Piton des Neiges est éteint.

En ce qui concerne le volcan actif, sur la base de considérations structurales, et en particulier grâce à l'existence d'une discontinuité majeure au sein des formations anciennes du Piton de la Fournaise, deux stades d'édification sont proposés (Bachèlery et Mairine, 1990; Bachèlery et Lénat, 1993). Le premier (> 0,5 Ma à 0,15 Ma) correspond à l'édification du Bouclier ancien. Le second, ou Bouclier récent (< 0,15 Ma), fait référence, dans ses grandes lignes, au volcan actuel.

Les laves qu'il émet sont depuis le début de son activité et encore actuellement des **basaltes et des océanites** ayant des faciès peu diversifiés (Billard, 1974).

Quant à la migration de l'activité du Piton des Neiges au Piton de la Fournaise, elle serait plus liée à la structure de l'édifice lui-même et à l'activité des chambres magmatiques crustales qu'au mouvement des plaques océaniques ou à l'activité directe du point chaud (Stieltjes, 1994).

Les formations superficielles sont essentiellement présentes à l'exutoire des principaux cours d'eau. Dans les régions de Saint André, Saint Denis, le Port, Saint Louis, il existe des plaines littorales constituées par l'accumulation d'alluvions fluviatiles dans les zones de Piémont, certaines pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur (plaine de la rivière du Mât, plaine des Galets au Port).

### ***Contexte hydrogéologique***

Le fonctionnement hydrodynamique de la Réunion reste discuté même lorsque les investigations hydrogéologiques s'appuient sur de nombreuses observations (réalisées en galerie, sur forages ou au niveau des émergences) complétées ou non par des mesures issues de méthodes indirectes (hydrochimie, géophysique). Le détail des différentes théories, notamment la continuité hydraulique de la nappe de base en relation avec la distribution des perméabilités, ne sera pas abordé dans le cadre de la présente étude.

---

<sup>2</sup> Tectosilicates hydratés d'Al, Na, Ca, accessoirement K, Ba.

A La Réunion, on distingue des contextes différents associés d'une part au domaine littoral et d'autre part au domaine d'altitude.

Le domaine littoral regroupe les aquifères constitués de roches volcaniques ou détritiques (formations alluviales). Ces aquifères appartiennent au « complexe aquifère de la nappe de base » qui s'étend tout autour de l'île (Frissant et al., 2006). Ces aquifères sont facilement exploitables par forage en raison des faibles profondeurs auxquelles l'eau est accessible. Sur la côte ouest cet aquifère présente un gradient hydraulique très faible. Les nappes d'eau douce interagissent avec les eaux marines définissant des secteurs d'invasion marine dont la géométrie peut être complexe. Ces intrusions salines sont fréquentes dans l'ouest de l'île, région sous le vent, caractérisées par une faible pluviométrie et de faibles charges hydrauliques.

Le domaine d'altitude présente des aquifères profonds qui sont rarement recoupés par des forages. L'existence de circulation d'eau souterraine est cependant mise en évidence par la présence de nombreuses sources sur l'ensemble du relief de l'île. Certaines nappes sont dites « perchées » car elles ne sont pas en continuité hydraulique avec les nappes du domaine littoral tandis que certaines appartiendraient également au « complexe aquifère de la nappe de base ». Ces nappes ont de forts gradients hydrauliques.

Les émergences sont nombreuses à la Réunion et peuvent être classées selon trois catégories : les sources des remparts qui apparaissent au niveau des formations imperméables, les sources des pentes externes du massif du Piton des Neiges qui témoignent des paléo-pentes et celles de fond de cirque (Join, 1991).

De part son contexte volcanique, La Réunion constitue un site privilégié du point de vue des phénomènes hydrothermaux comme en témoigne la présence des eaux hydrothermales dans les trois cirques au niveau des grands accidents.

### ***Délimitation des masses d'eau souterraine***

Un découpage a été proposé lors de l'élaboration du SDAGE dans le cadre de la DCE définissant 16 masses d'eau souterraine pour l'île de la Réunion.

Dans le cadre de cette étude, afin de limiter le découpage, les masses d'eau seront regroupées en cinq domaines : les flancs ouest du Piton des Neiges, la région Nord, les flancs est du Piton des Neiges, la plaine des Palmistes et les flancs est et sud du piton de la Fournaise et le tampon, Saint Pierre et Cilaos.

Secteurs définis dans l'étude	Nom des masses d'eau souterraine	Code national	Code européen
<b>Planèzes est du piton des Neiges</b>	Aquifère St Denis	L001	FR_L001
	Aquifère Ste Marie Ste Suzanne	L002	FR_L002
	Aquifère Saint André Bras Panon Salazie	L003	FR_L003
	Aquifère St Benoit	L004	FR_L004
<b>Plaine des palmistes et piton de la Fournaise</b>	Aquifère Plaine des palmistes	L005	FR_L005
	Aquifère Ste Rose	L006	FR_L006
	Aquifère St Philippe	L007	FR_L007
	Aquifère St Joseph	L008	FR_L008
<b>Tampon Saint Pierre et Cilaos</b>	Aquifère Petite Ile St Pierre Le Tampon	L009	FR_L009
	Aquifère Entre-Deux Cilaos	L010	FR_L010
<b>Planèzes ouest du piton des Neiges</b>	Aquifère Etang Salé - St Louis	L011	FR_L011
	Aquifère St Leu Les Avirons	L012	FR_L012
	Aquifère Trois Bassins	L013	FR_L013
	Aquifère St Gilles	L014	FR_L014
	Aquifère St Paul	L015	FR_L015
<b>Région Nord</b>	Aquifère Le Port La Possession	L016	FR_L016

Tableau 3 : Masses d'eau souterraines de La Réunion et code MESO

### **Contexte hydrochimique général de la Réunion**

Les eaux souterraines de la Réunion, émergences et nappes souterraines, sont très faiblement minéralisées (30 à 260 mg.L<sup>-1</sup>) avec des teneurs en silice relativement abondantes (30 mg.L<sup>-1</sup> en moyenne), ce qui est caractéristique des contextes volcaniques jeunes. Le faciès chimique de ces eaux est relativement variable :

- Le faciès prépondérant est magnésocalcique rencontré sur les pentes externes des deux massifs volcaniques.
- Les faciès calco-sodique ou magnésosodique apparaissent en bordure du domaine constitué par les pentes externes et localement dans les cirques.
- Le faciès sodique est caractéristique du milieu littoral.
- Le faciès chloruré indique l'influence marine.
- Le faciès sulfaté apparaît au niveau des grandes structures d'érosion (cirques et remparts).

Plusieurs études sur les faciès hydrochimiques ont porté sur les eaux de La Réunion dont celle de Join (1991). Cette étude propose la classification suivante :

- Les sources des Bas : les eaux sont relativement homogènes et équilibrées en Mg/Ca/Na avec quelques sources marquées par un pôle sodique lié à l'influence marine.

- Les sources des Hauts : les cations sont répartis de manière moins homogène avec une tendance marquée vers le pôle calco-magnésien et une influence du pôle chlorure.
- Les sources des Cirques : les eaux sont marquées par un pôle sodique non accompagné par une influence du pôle chlorure.

Les eaux de la Réunion ont également été classées selon 7 groupes hydrochimiques déterminés à partir des principaux paramètres physico-chimiques des eaux (Mauroux et Chavinier 1994). Cette étude classe les eaux selon trois grands groupes :

- Les eaux « jeunes » peu minéralisées plus ou moins soumises aux embruns et à l'évaporation (distinction sur la minéralisation et les teneurs en chlorures).
- Les eaux « moins jeunes », plus minéralisées témoins d'un séjour plus ou moins long dans le milieu basaltique.
- Les eaux « singulières » qui présentent une minéralisation élevée signature soit d'une contamination marine (chlorures), soit d'un thermalisme (sulfates, sodium), soit d'une contamination anthropique (nitrates).

### ***Contexte pédologique***

Doelsch et al. (2006b) ont proposé une carte simplifiée de la pédologie de La Réunion et distingue trois domaines, celui de la Fournaise, du Piton des Neiges et celui des formations superficielles.

- L'altération des roches du Piton de la Fournaise est très peu avancée et aboutit à la quasi-inexistence de sol (Raunet, 1991). Ces sols jeunes et moins évolués, développés le plus souvent sur des matériaux cendrés correspondent à la classe des andosols (Doelsch et al., 2006a).
- Le Piton des Neiges a subi une altération plus marquée en raison de l'ancienneté des formations volcaniques. La variété des contextes géoclimatiques a conduit à une diversification des types de sols contrôlée par l'altitude et l'exposition aux alizés (Doelsch et al., 2006a). On rencontre donc des andosols qui ont évolué vers des sols bruns (Cambisol) en zone plus sèche ou vers des sols ferrallitisés (Ferralsol) en région humide. Dans les zones d'altitude on rencontre des podzols.
- Enfin, sur les formations superficielles, on peut rencontrer des sols jeunes de type andosol ou plus évolués de type ferralsol et également des sols peu évolués de type alluviaux (Fluvisol).

### ***Éléments traces métalliques des sols***

A La Réunion, de nombreux sols, développés sur des matériaux volcaniques présentent des teneurs élevées en nickel, chrome, cuivre, mercure et zinc (Doelsch et al., 2006a et 2006b ; Laperche et al., 2008). Les études menées par Doelsch et al.

(2006a, 2006b et 2006c) et Collin (2008) ont montré que le **chrome** et le **nickel** sont d'origine naturelle, issus de l'héritage des roches mères altérées. La présence de chrome et de nickel dans les sols volcaniques est liée à l'enrichissement des roches ultramafiques et mafiques<sup>3</sup> en ces deux éléments traces (Selinus et al., 2005). A La Réunion cela se traduit par un enrichissement des séries des océanites en ces deux éléments (Doelsch et al. 2006a). Ainsi, les teneurs les plus élevées sont rencontrées dans les sols du Piton de la Fournaise et dans les coulées anciennes du Piton des Neiges, c'est-à-dire dans les sols développés sur les formations volcaniques les plus basiques (basalte à olivine et océanites) (Doelsch et al., 2006a ; Laperche et al., 2008). Les sols les moins enrichis, développés sur les laves différenciées sont corrélés avec des teneurs moins élevées dans les séries différenciées de fait moins basiques (Doelsch, 2006a).

Le **mercure** peut également être mesuré dans les sols de la Réunion, son origine est également naturelle mais il serait accumulé suite aux retombées atmosphériques de cet élément lors des émissions volcaniques du Piton de la Fournaise qui est encore en activité. Le **cadmium** a également été mesuré en quantité plus élevée dans les sols cultivés et son origine serait anthropique et liée aux pratiques agricoles (Doelsch et al., 2006a). La présence de **plomb** dans certaines analyses de sols est également attribuée aux activités humaines polluantes (Doelsch et al., 2006a).

Bien que la présence de **zinc** et de **cuivre** pourrait être également associée au fond géochimique et donc à la composition des roches mères, il faut conclure avec précaution quand à l'origine de ces éléments car ils sont également associés aux pratiques agricoles et notamment à l'épandage du lisier de porc (Laperche et al., 2008 ; Doelsch, 2004).

La mobilité des éléments traces présents dans les sols a été étudiée par Collin et Doelsch (2008). Mis à part un échantillon qui a révélé une mobilité du nickel supérieure à 20 µg.L<sup>-1</sup>, l'ensemble des autres échantillons et éléments étudiés (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd) ont montré une mobilité inférieure aux seuils d'investigations (Collin et Doelsch 2008).

### ***Les eaux de surface***

Pour le massif du Piton des Neiges, quatre grandes rivières pérennes drainent l'eau des cirques et rejoignent la mer par d'étroits défilés creusés dans les flancs du massif. Il s'agit de la rivière des Galets (Mafate), la rivière Saint-Etienne (Cilaos), la rivière des Marsouins, la rivière du Mât (Salazie). Outre ces rivières, d'autres cours d'eau (rivière, ravine ou bras) entaillent profondément les pentes du massif.

Les flancs du Piton de la Fournaise sont profondément entaillés par des cours d'eau dont les principaux sont : au Sud, la rivière des Remparts et la rivière Langevin, à l'Est, la rivière de l'Est.

---

<sup>3</sup> Roche mafique : roche riche en minéraux ferromagnésiens (olivine)

De manière générale, les rivières de la région au vent (au Nord et à l'Est de l'île), sont pérennes avec un débit annuel moyen pouvant atteindre plusieurs mètres cubes par seconde. Celles de la région sous le vent (l'Ouest) peuvent tarir pendant la saison sèche.

Compte-tenu de la géographie de l'île de la Réunion, il est possible de distinguer différents facteurs qui contrôlent le réseau hydrographique. Le premier facteur est la pluviométrie avec un climat insulaire typique, le versant « au vent » très arrosé et le versant « sous le vent » avec des précipitations très inférieures. Le deuxième facteur discriminant est la géomorphologie des bassins versants des rivières, avec les bassins drainant les cirques d'altitude, avec un écoulement « convergent » dans les canyons et des bassins ruisselant sur les planèzes (ou en ravines).

### **3.2.2 Fond géochimique des eaux**

Les éléments dissous dans l'eau renseignent sur les processus de minéralisation des eaux souterraines et permettent de mettre en évidence les différents processus, notamment les enrichissements naturels, anthropiques ou géothermaux ou encore l'influence de l'eau de mer.

Le contexte géologique et hydrogéologique particulier des terrains volcaniques favorise certains processus contrôlant le fond géochimique en éléments majeurs et traces des eaux naturelles. Parmi les plus importants, on retiendra :

#### ***a) Les interactions eau-roche***

En contexte volcanique, l'interaction des eaux avec la lithologie conduit à la mise en solution des éléments présents dans les minéraux constituant les roches volcaniques. Par exemple, on peut s'attendre à un enrichissement des eaux en calcium et sodium du fait de la déstabilisation des plagioclases présent dans les roches volcaniques, principalement dans les basaltes et les andésites. Les pyroxènes et l'olivine sont susceptibles de libérer du magnésium et du fer. La présence d'olivine favorise également la mise en solution de silice (Grunberger, 1989). Le tableau 3 présente les principales associations décrites pour les roches volcaniques. Pour comparaison, les teneurs en éléments traces dans les roches volcaniques et sédimentaires sont présentées dans le Tableau 5.

Hoareau et al. (2005) ont également mis en évidence que l'altération d'un basalte est incongruente et contrôlée par des différences de vitesses et d'intensité de dissolution en fonction de la nature des phases minérales et de leur compositions. La nature des éléments libérés sera fonction de leur répartition dans les différentes phases minérales des roches basaltiques (verre, mésostase, phénocristaux). Le sodium et le potassium sont plus mobiles lorsqu'ils sont situés dans des cristaux tandis que le calcium et le magnésium sont plus mobiles lorsqu'ils sont situés dans la mésostase.

Ces interactions sont d'autant plus fortes à hautes températures i.e. pour les édifices actuels à récents. Les verres volcaniques sont également beaucoup plus réactifs

pendant l'altération que les autres roches silicatées (Gislason et Eugster, 1987). Ainsi la mobilisation des éléments de ces roches vers la phase dissoute des eaux naturelles se trouve accentuée notamment à la Martinique et à la Guadeloupe où l'altération chimique des terrains volcaniques est particulièrement importante (Rad et al., 2006). A l'inverse, de part leur jeunesse relative les formations volcaniques de La Réunion sont peu altérées ce qui limite le transfert des éléments des formations vers les eaux naturelles.

Le temps de contact entre l'eau et la roche est également un facteur contrôlant les échanges entre phases. A La Réunion, ce facteur n'est pas favorable à la minéralisation des eaux. En effet, du fait des gradients altitudinaux des zones d'infiltration et de la nature des roches, les vitesses d'écoulement sont rapides (BRGM, 1994) et les temps de séjour sont courts (Grunberger, 1989), ceci est d'autant plus marqué pour les aquifères des Hauts.

Plusieurs études ont également montré le rôle que jouent les interactions eau-sol sur le faciès hydrochimique des eaux. Ainsi, hors contexte géothermal, le CO<sub>2</sub> présent dans les eaux souterraines serait principalement d'origine biogénique plutôt que lithologique, les roches carbonatées étant peu répandues sur l'île de la Réunion. Les sources thermales des cirques témoignent de l'activité géothermale persistante du volcan dont les fortes teneurs en carbonates confirment qu'un apport de CO<sub>2</sub> profond est possible de manière discrète dans les aquifères. En bord de mer, les aquifères libres se situent souvent au contact des sables détritiques à éléments coralliens. Ceci rend possible l'intervention du réservoir carbonate marin dans la minéralisation carbonatée des eaux (Grunberger, 1989). Par ailleurs, Grunberger (1989) met en évidence que la canne à sucre est probablement un pôle essentiel de la minéralisation des eaux côtières qui induit une augmentation des carbonates, un apport de nitrates et probablement en sulfates.

<b>Roches</b>	<b>Association</b>
Éléments généralement associés	Si-Al-Fe-Mg-ca-Na-K-Ti-Mn-Cr-V-Zr-Hf-Terres Rares-Th-U-Sr-Ba-P-B-Be-Li-Sn-Ga-Nb-Ta-W-Halides
Associations spécifiques	
Roche ignée felsique	Si-K-Na
Roche ignée alcaline	Al-Na-Zr-Ti-Nb-Ta-F-P-Ba-Sr-Terres Rares
Roche ignée mafique	Fe-Mg-Ti-V
Roche ignée ultramafique	Mg-Fe-Cr-Ni-Co
Pegmatites	Li-Be-B-Rb-Cs- Terres Rares -Nb-Ta-U-Th
Feldspaths potassiques	K-Rb-Ba-Pb
Minéraux potassiques	K-Na-Rb-Cs-Tl
Minéraux ferromagnésiens	Fe-Mg-Mn-Ni-Co-Cu-Zn

Tableau 4 : Associations géochimiques communes des roches ignées (Selinus et al. 2005)



	Hg ( $\mu\text{g.kg}^{-1}$ )	Pb ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Cd ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Cr ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Ni ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	As ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Cu ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )	Zn ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )
<b>Roches ignées</b>								
Ultramafique	4	1	0.1	1600	2000	1	10	50
Mafique	13	6	0.2	170	130	2	87	105
Intermédiaire	21	15	0.1	22	15	2	30	60
<b>Roches sédimentaires</b>								
Grès	57	14	0.02	120	3	1	15	16
Calcaire	46	16	0.05	7	13	2	4	16
Argiles	270	80	0.2	423	29	9	45	130

Tableau 5 : Compilation des compositions géochimiques moyennes pour des roches ignées et sédimentaires (Turekian et Wedepohl, 1961 et Faust et Aly, 1981 dans Selinus et al. 2005).

### b) Les interactions eau-gaz

Les gaz émis dans le contexte volcanique peuvent présenter des composés du soufre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) ; des composés du fluor (F, HF,  $\text{SiF}_4$ ) ; de l'acide chlorhydrique (HCl) ; des composés du carbone (CO,  $\text{CO}_2$ ) ; des chlorures ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ) ; du mercure ; de l'hydrogène ; de l'hélium ; du radon ; du méthane (Selinus et al., 2005 ; Bagnato et al. 2008) . Les eaux naturelles interagissant avec ces gaz sont susceptibles de collecter les 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.

### c) Les intrusions salines

Les phénomènes maritimes liés à la proximité d'eau de mer : embruns marins, intrusion saline, eaux saumâtres de bord de mer.

Les eaux de pluie prélevées à La Réunion ont été documentées par Grunberger (1989) et présentent des concentrations moyennes en calcium de  $1.72 \text{ mg.L}^{-1}$ , en magnésium de  $0.27 \text{ mg.L}^{-1}$ , en sodium de  $1.31 \text{ mg.L}^{-1}$  et en potassium de  $0.44 \text{ mg.L}^{-1}$  ; en chlorures  $4.27 \text{ mg.L}^{-1}$  ; en silice  $0.95 \text{ mg.L}^{-1}$ . Grunberger (1989) montre que les teneurs en sodium et chlorures ont une origine océanique exclusive, leurs teneurs diminuant en s'éloignant du littoral. L'auteur suggère un enrichissement de la minéralisation des eaux de pluie par des apports solides, notamment dans les secteurs les plus secs.

En raison du caractère insulaire de La Réunion, les eaux souterraines sont localement influencées par la composition chimique de l'eau de mer (Frissant et al., 2005b). 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. Dans cette zone, des échanges sont possibles entre les eaux souterraines et l'eau de mer. Les concentrations des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité  $35 \text{ g.L}^{-1}$  sont présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Nordstrom et al., 1979).

Eau de mer	Na	K	Ca	Mg	Sr	Cl	HCO3	SO4	NO3	SiO2	PO4
mg.Kg <sup>-1</sup>	10768	399	412	1292	8.14	19353	142	2712	0.29	4.28	0.06
	Ba	Br	B	F	Fe	Mn	Al	Zn	As	Cu	Ni
mg.Kg <sup>-1</sup>	0.02	67.3	4.45	1.39	0.002	0.0002	0.002	0.0049	0.004	0.0007	0.0017

Tableau 6 : Compilation de compositions chimiques d'eaux de mer (Nordstrom et al. 1979).

A la Réunion plusieurs paramètres ont été identifiés par Frissant et al. (2005b) comme influençant les intrusions salines.

- Influence des précipitations, les intrusions salines sont principalement localisées sur une zone où la hauteur de précipitation est inférieure à 1 m/an. Ainsi la côte Est de La Réunion bénéficie d'une recharge suffisante pour repousser les intrusions salines. Sur la côte ouest de la Réunion, la recharge des aquifères exploités est trop faible pour s'opposer aux intrusions salines.
- Influence des modalités d'exploitation, la surexploitation des aquifères aurait également un impact indéniable sur les intrusions salines (Sainte-Marie, Saint Louis)
- Influence de la morphologie du littoral, les forages recoupant un éventuel biseau salé sont principalement localisés à l'arrière d'une côte rocheuse, contexte réputé favorable aux intrusions salines. Cependant, l'influence du littoral ne semble pas être un facteur des plus influents à la Réunion car des forages localisés à l'arrière de côte non rocheuse sont également concernés.
- Influence du contexte géologique, ce facteur n'a pas été mis en évidence dans l'étude de Frissant et al. (2006), cependant des faciès détritiques (Le Port) ou volcaniques (Sainte-Marie, Petite-Ile) sont soupçonnés. De plus, les faciès d'anciens étangs littoraux peuvent aussi expliquer des teneurs élevées en chlorures (l'Etang-Salé)

Au-delà du mécanisme d'intrusion saline au sens physique du terme, on peut également souligner l'existence d'une influence de l'océan qui peut se manifester par :

- des flux salés ascendants ou descendants
- des interactions avec des eaux de surface salées (étangs)
- des interactions avec des sols chargés en sel (ancienne lagune)

Ainsi à La Réunion, les eaux de la façade ouest sont les plus soumises à l'aléa intrusion saline. Parmi celles-ci quatre communes sont plus touchées que les autres : Le Port, Saint-Paul, Trois Bassins et Saint-Louis.

### 3.2.3 Sélection des analyses

Pour mettre en évidence le fond géochimique naturel, une sélection des analyses est habituellement appliquée. Celle-ci consiste à éliminer les échantillons pour lesquels les

teneurs en nitrates sont supérieures à un seuil défini arbitrairement, compris entre 10 et 15 mg.L<sup>-1</sup>, afin de s'affranchir de l'influence anthropique sur le chimisme des eaux. Pour l'étude nationale, les eaux issues de l'hydrothermalisme et les eaux « salées » des aquifères côtiers n'ont également pas été prises en compte.

A la Réunion, compte-tenu du nombre limité de données, les échantillons contenant des nitrates n'ont pas été éliminés. Les échantillons issus de la base ADES et des données de type « Etude » sont présentés dans le graphique de la Figure 3, illustrant la forte influence agricole sur les masses d'eau. Sur les 77 stations bancarisées dans ADES, 26 présentent au moins une analyse en nitrates supérieure à 12 mg.L<sup>-1</sup> (Tableau 7) et seulement 10 points d'eau présentent des concentrations maximales supérieures à 20 mg.L<sup>-1</sup>. Ces stations sont localisées principalement dans les masses d'eau suivantes : « Aquifère saint Denis (LO-001), « Aquifère Petite Ile Saint Pierre le Tampon » (LO-009), « Aquifère Entre Deux » (LO-010), « Aquifère Etang Salé » (LO-011), « Aquifère des Trois Bassins » (LO-013) et « Aquifère Saint Paul » (LO-015) et « Aquifère le Port, La Possession » (LO-016). Les points d'eau avec des concentrations moyennes supérieures à 12 mg.L<sup>-1</sup> marquent une contamination durable. Le forage de Bon Coin, non bancarisé dans ADES (12263X0061/F1, La Possession) présente des teneurs record en nitrates avec une concentration moyenne de 90.4 mg.L<sup>-1</sup> et une concentration maximale de 120 mg.L<sup>-1</sup>.

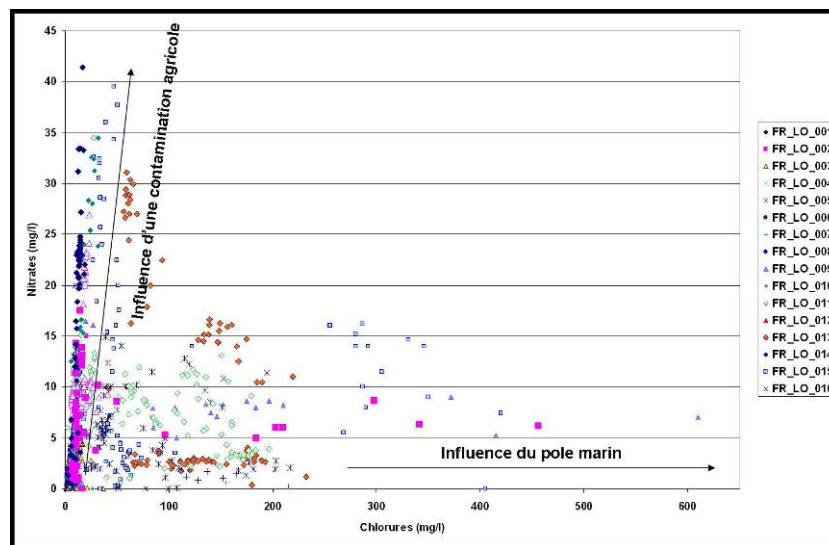


Figure 3 : Comparaison des concentrations en nitrates vs. chlorures pour les analyses bancarisées dans ADES (1999 à 2007).

Code Masse eau	CODE_BSS	Moyenne	Min	Max	Écart Type	Compte de valeurs
FR_LO_001	12271X0057/F5	<b>31.22</b>	21.1	41.42	6.45	8
	12271X0060/FORAGE	<b>15.56</b>	6.82	27.14	6.86	8
	12264X0016/P	<b>21.77</b>	12.8	24.82	2.72	31
FR_LO_002	12271X0065/F	11.71	2.3	17.57	4.47	8
	12271X0030/F	9.26	6	14.37	2.83	7
FR_LO_009	12288X0045/F5	<b>21.88</b>	18.11	26.9	2.22	13
	12288X0085/F	9.63	6.3	10.8	1.12	26
FR_LO_010	12288X0062/PIB-6	<b>29.09</b>	24	34.44	3.72	9
	12288X0075/F	8.34	3.8	23.83	7.79	6
	12288X0048/F6	10.52	0.01	16.6	5.73	16
FR_LO_011	12288X0076/FC2	<b>18.03</b>	5.04	34.5	11.21	6
	12287X0035/F	11.69	5.5	21.3	4.09	32
	12287X0038/P2	7.06	0.47	16.01	3.88	25
	12288X0017/F	9.91	4.2	13.3	2.52	21
	12283X0058/F3	8.61	1.1	13.13	3.96	8
FR_LO_013	12265X0025/F1	<b>26.48</b>	17.86	31.1	3.88	18
	12266X0056/F1-BIS	<b>14.05</b>	9.28	16.6	2.21	19
	12265X0033/S6	<b>13.05</b>	9.83	16.26	4.55	2
FR_LO_014	12266X0049/P	8.53	6.7	15.14	2.58	12
FR_LO_015	12266X0040/F	<b>14.01</b>	0.9	22.49	5.69	11
	12262X0166/F5-TER	<b>14.00</b>	14	14		1
FR_LO_016	12262X0189/F	11.94	7.61	20	2.58	20
	12262X0175/F6	<b>13.53</b>	10.13	19.84	3.26	7
	12263X0050/P	10.16	7.1	14.9	2.50	8
	12262X0416/PZA	11.40	10	12.8	1.98	2
	12263X0044/P	10.40	7.98	12.8	1.73	8

Tableau 7 : Traitement statistique pour les stations de surveillance bancarisées dans ADES et présentant au moins une analyse en nitrates supérieure à 10 mg.L<sup>-1</sup> (prélèvements entre 1999 et 2007).

Ainsi lors de l'interprétation en termes de fond géochimique, il faut garder en mémoire l'existence d'une influence anthropique. Cependant, à la Réunion, les caractéristiques naturelles se prêtent plutôt bien à une atténuation de la migration de cette espèce. En effet plusieurs études ont montré la bonne capacité de la canne à sucre à assimiler les nitrates et le faible risque de les voir lixivier dans le sol et le sous-sol (Saint Macary et al. 2003). De plus, les sols andésitiques locaux possèdent également de bonnes capacités d'échange anionique permettant de fixer les nitrates (Raunet, 1991). Ainsi, une contamination des eaux par les engrais pourrait ne pas être marquée par la présence de nitrates dans les eaux.

Compte-tenu du contexte volcanique et insulaire de l'île, les eaux hydrothermales et celles influencées par la présence d'intrusions salines sont conservées dans l'étude car ces pôles permettent de renseigner sur les faciès chimiques naturels des eaux de la Réunion.

## **4 Les résultats de l'exploitation des données - Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé**

Afin de permettre la présentation des résultats de façon plus synthétique, les résultats seront présentés par domaines hydrogéologiques regroupant plusieurs masses d'eau souterraines afin de limiter le découpage dans le cadre de la présente étude :

- PLANEZES DE L'OUEST
- REGION NORD (LE PORT, LA POSSESSION, MAFATE)
- PLANEZES DU NORD ET DE L'EST
- PLAINE DES PALMISTES ET MASSIF DE LA FOURNAISE
- CILAOS – ST PIERRE

Ces domaines regroupent chacun plusieurs masses d'eau pouvant avoir des contextes hydrogéologiques et hydrochimiques différents notamment les planèzes et les aquifères côtiers ainsi que les eaux des cirques. A l'inverse, un même contexte hydrochimique pourra être défini sur plusieurs domaines du fait d'un contexte géochimique comparable.

Bien qu'il existe un découpage hydrologique pour les eaux de surface, les eaux de surface seront présentées selon le découpage des masses d'eaux souterraines, cela afin de présenter de manière globale les eaux souterraines et les eaux de surface par secteur. En effet, la démarche actuelle vise à traiter les eaux souterraines et les eaux de surface de manière globale car ces eaux interagissent entre elles.

### **4.1 LES PLANEZES DE L'OUEST**

Les planèzes de l'Ouest regroupent de jeunes formations géologiques associées au Piton des Neiges affleurant dans un contexte de précipitations relativement faibles. Elles présentent un réseau dense de petites ravines non pérennes, disposées radialement avec des bassins versants étirés et de faible superficie.

On a regroupé dans ce secteur les masses d'eau souterraine (St Paul, St Gilles, Trois Bassins, St Leu-les Avirons, Etang-Salé, St-Louis) qui correspondent aux nappes stratégiques de la rivière des Galets, de St Paul, de la ravine St Gilles, de la côte Ouest et de la plaine du Gol. Les principaux cours d'eau de la région sont la rivière des Galets et la ravine Saint Gilles

Quatre formations géologiques affleurent : les coulées volcaniques des phases II et III affleurent dans les fonds des ravines les plus profondes, les coulées volcaniques et pyroclastiques de la phase IV sont majoritaires à l'affleurement. Localement on rencontre des formations alluviales anciennes (graviers, galets basaltiques) comme à Saint-Leu et des alluvions fluvio-marines remaniées en zone littorale (Pointe au Sel, Pointe des Châteaux).

La nappe littorale est contenue soit dans les formations de la phase II, soit de la phase III et s'étend dans les formations alluvionnaires fluviales ou marines. Généralement la nappe est libre mais elle peut être maintenue captive par les formations pyroclastiques de la phase IV.

Ce secteur est exposé aux intrusions marines de façon préoccupante. Dans ce contexte, les intrusions salines peuvent être dues à des surexploitations chroniques de la nappe (Saint Louis) ou à la faible recharge des aquifères (Trois Bassins) (Frissant et al. 2005b).

Les travaux de Frissant et al. (2006); Billard (1974) et Hoareau et al. (2005) ont permis de décrire les minéraux et éléments associés aux principales lithologies rencontrées sur les flancs ouest du Piton des Neiges (Tableau 8).

Une analyse prédictive des éléments majeurs et traces susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines est proposée dans le Tableau 9.

Secteurs Aquifères	Lithologie	Série magmatique	Principaux minéraux	Eléments présents	Références
Planèzes Ouest du Piton des Neiges	Formations volcaniques (laves, scories et tufs)	Série des océanites PN	olivine (altération en iddingsite, zéolites) clinopyroxènes, plagioclases	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974 ; Hoareau et al. 2005
		Série différenciée PN	plagioclases (labrador, bytownite), pyroxène (pigeonite), (olivine)	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si	
Etang-Salé	Sable dunaire basaltique, sable gréseux		olivine, augite, titano-magnétite, argiles	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974
Aquifères littoraux (St Leu, St Gilles, st Paul)	Alluvions récentes, anciennes et fluvio-marines		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974
	Formations volcaniques	Série des océanites PN	olivine, clinopyroxène, plagioclase, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974
Série différenciée PN		plagioclase, clinopyroxène, magnétite, (olivine)	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si		
St Gilles	Avalanche de débris		olivine, feldspath, zéolites	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si	Billard 1974
plaine du Gol	Alluvions fluviomarines et anciennes		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974
	Formations volcaniques (laves, scories et tufs)	Série des océanites PN	olivine, clinopyroxène, plagioclase, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974
Série différenciée PN		plagioclase, clinopyroxène, magnétite, (olivine)	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si		

Tableau 8 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs ouest du Piton des Neiges (PN : massif du Piton des Neiges)

Secteurs Aquifères	Intrusion saline	faciès	Eléments traces susceptibles d'être présents	
			Déduits de l'analyse prédictive	Signalés dans la bibliographie
Planèzes Ouest du Piton des Neiges	Domaine altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	
Etang-Salé	préoccupant	Sodique et chloruré	Fe, Mn, B, F	Na, Cl
Aquifères littoraux de la côte Ouest (St Leu, St Gilles, st Paul)	préoccupant	Magnésio-calcique à sodique et chloruré	Fe, Mn, B, F	Na, Cl

Tableau 9 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères des flancs ouest du Piton des Neiges.

### 4.1.1 Les eaux souterraines

#### *a) Synthèse bibliographique*

Les aquifères des planèzes du massif du Piton des Neiges sont principalement formés par des pyroclastites qui favorisent les échanges eau/roche. D'après la lithologie (Frissant et al. 2006; Billard 1974; Hoareau et al. 2005), les eaux sont susceptibles de s'enrichir en fer, en calcium, en magnésium et en sodium du fait de la présence des minéraux altérés tels que l'olivine (Mg, Fe), des plagioclases (Ca, Na), des pyroxènes (Ca, Fe, Mg) et des feldspaths alcalins (K, Na).

Les minéraux tels que l'olivine, les pyroxènes ou les argiles peuvent également contenir du manganèse qui peut se substituer avec le magnésium ou le fer (Wedepohl et al., 1970). Le fer et le manganèse ont un comportement comparable du fait de leur participation aux réactions d'oxydo-réduction (Hem et al. 1985). Dans les environnements réducteurs, ces éléments présentent une forte solubilité qui explique leur présence dans les eaux souterraines captives. Dans des environnements soumis à l'altération de surface, ces éléments sont mobilisés sous forme particulière.

#### *b) Délimitation des zones à risque*

Le secteur des planèzes de l'Ouest du massif du Piton des Neiges est relativement bien renseigné pour la composition des eaux, en termes d'éléments majeurs, au niveau des aquifères côtiers de Saint Paul, de Trois Bassins et de la Plaine du Gol ainsi que les émergences dans le secteur des Avirons et de Saint Louis.

En fonction des temps de parcours des eaux dans la roche, on note un enrichissement des eaux. Ainsi, les émergences localisées sur les planèzes Ouest sont peu minéralisées et leurs teneurs en éléments dissous augmentent d'amont en aval. On note cependant que les concentrations en calcium et magnésium considérées dans cette étude sont relativement faibles. Les roches volcaniques libèrent du calcium et du magnésium (Hoareau et al. 2005) mais en relativement faible quantité. Des concentrations plus élevées en calcium et magnésium sont cependant observées au niveau des eaux sous influence marine.

Plusieurs points d'eau localisés dans les aquifères littoraux montrent une plus forte minéralisation liée à l'influence des eaux marines. La Figure 4 permet d'illustrer les corrélations entre les concentrations en sodium et en chlorures dans les eaux souterraines telles que bancarisées dans ADES.

Ainsi, dans le secteur de Saint Paul, le forage des Trois Chemins (12262X0166/F5-TER, Saint Paul) présente des teneurs atteignant 92 mg.L<sup>-1</sup> en **sodium** et 122 mg.L<sup>-1</sup> en **chlorures**. Le secteur nord de l'aquifère de Saint Paul, à proximité de la Rivière des Galets, montre également une minéralisation plus forte; les eaux de la source Moulin à Eau (12262X0150/HY, Saint Paul) atteignent des valeurs maximales de 420 mg.L<sup>-1</sup> en chlorures, 25 mg.L<sup>-1</sup> en **calcium**, 34.5 mg.L<sup>-1</sup> en **magnésium**, 10.5 mg.L<sup>-1</sup> en **potassium** et 700 µg.L<sup>-1</sup> en **fluor**.



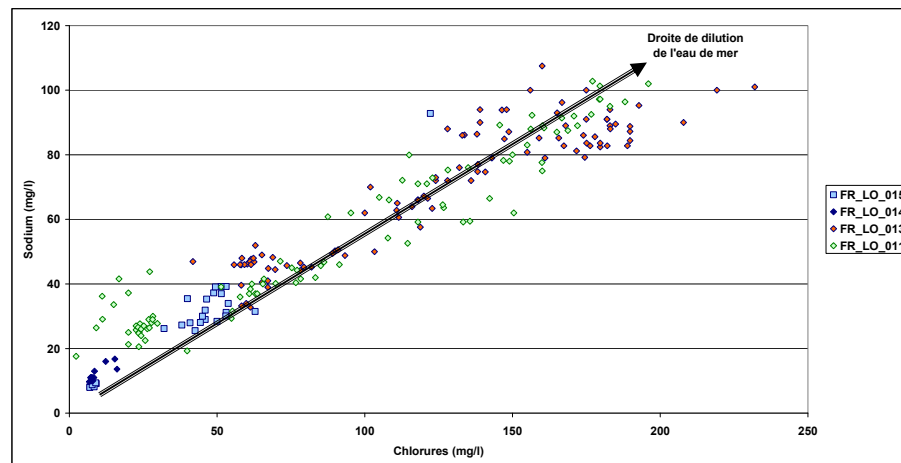


Figure 4 : Diagramme de la concentration en sodium en fonction de celle en chlorures pour les stations bancarisées dans ADES et appartenant aux masses d'eau : Aquifère Etang Salé - St Louis (FR\_L011) ; Aquifère Trois Bassins (FR\_L013) ; Aquifère St Gilles (FR\_L014) ; Aquifère St Paul (FR\_L015).

Au niveau des brèches de Saint Gilles, le forage de la DRASS FR9 (12265X0054/S7, Saint Paul) présente des eaux dont les concentrations atteignent 332 mg.L<sup>-1</sup> en chlorures, 148.5 mg.L<sup>-1</sup> en sodium, 56.58 mg.L<sup>-1</sup> en sulfates, 40.97 mg.L<sup>-1</sup> en calcium, 49.91 mg.L<sup>-1</sup> en magnésium et 96 µg.L<sup>-1</sup> en **bore**.

L'aquifère des Trois Bassins montre un enrichissement des eaux littorales en sodium, et en chlorures sur l'ensemble des piézomètres. Les concentrations en sodium sont comprises entre 49 mg.L<sup>-1</sup> pour les moins concentrées (Forage les Filaos-Hermitage, 12265X0025/F1, Saint Paul) et 101 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage de Fond Petit Louis (12266X0078/F9, Saint Leu). Pour les chlorures, les concentrations sont comprises entre 63 mg.L<sup>-1</sup> pour la station piézométrique (12265X0033/S6, Saint Paul) et 232 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage de Fond Petit Louis (12266X0078/F9, Saint Leu). Ce point d'eau présente également des teneurs atteignant 33.9 mg.L<sup>-1</sup> en sulfates, 36 mg.L<sup>-1</sup> en calcium et 21 mg.L<sup>-1</sup> en magnésium. Les eaux du forage FRH5 (12266X0124/FRH5, Saint Paul) présentent des teneurs en **sulfates** et en **bore** atteignant respectivement 39.3 mg.L<sup>-1</sup> et 88 µg.L<sup>-1</sup>. Ces eaux résultent bien d'un mélange avec de l'eau de mer vis-à-vis des concentrations en sodium et chlorures.

Dans le secteur de l'Etang Salé, les points d'eau en zone littorale montrent tous un enrichissement en chlorures et en sodium avec des teneurs maximales en sodium comprises entre 55 mg.L<sup>-1</sup> pour le point d'eau le plus au sud (Puits du Gol C, 12287X0064/P-C, Saint Louis) et 102 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage Le Brule (12283X0060/F5, Les Avirons) et des concentrations en chlorures comprises entre 128 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage Marengo (12287X0040/F10, Etang Salé) et 208 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage Pacifique (12283X0058/F3, Etang Salé). Ce dernier forage montre des valeurs en magnésium atteignant 27.2 mg.L<sup>-1</sup>. Ces eaux résultent bien d'un mélange avec de l'eau de mer vis-à-vis des concentrations en sodium et chlorures.

Les puits de la plaine du Gol (12287X0061/P1, 12287X0062/P2, 12287X0064/P-C,) montrent également des valeurs maximales autour de 26 mg.L<sup>-1</sup> en calcium, de 26 mg.L<sup>-1</sup> en magnésium et 16.7 mg.L<sup>-1</sup> en potassium. Les teneurs maximales en sulfates sont comprises entre 22 et 30 mg.L<sup>-1</sup>. Ces eaux résultent bien d'un mélange avec de l'eau de mer vis-à-vis des concentrations en sodium et chlorures.

Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé en chlorures, sodium et sulfates** est attribuée aux secteurs soumis à des intrusions salines. Ce risque est attribué avec un **niveau de confiance élevé**. Dans ces secteurs on s'attend également à un enrichissement en **magnésium, bore et fluor** qui sont également associés aux influences marines.

Témoin du contexte volcanique, les eaux du secteur contiennent des concentrations en **silice** élevées comprises entre 29 mg.L<sup>-1</sup> (forage Le Brule, 12283X0060/F5, Les Avirons) et 70 mg.L<sup>-1</sup> (Forage COCO, 12288X0076/C2, Saint Louis). Ces teneurs sont ainsi supérieures à la concentration moyenne (22.4 mg.L<sup>-1</sup>) des eaux drainant des formations volcaniques telle que défini par Meybeck (1984). Ainsi **une zone à risque de fond géochimique élevé en silice** a été identifiée avec un **niveau de confiance élevé**.

On note également un enrichissement des eaux en **potassium** qui sont supérieures à la concentration moyenne des eaux drainant des roches volcaniques (1.3 mg.L<sup>-1</sup>, Meybeck, 1984) sans pour autant dépasser le seuil de qualité (12 mg.L<sup>-1</sup>). Cet enrichissement à l'échelle de l'île de La Réunion est observé dans les eaux des cirques et des aquifères côtiers, en pied de coulées, notamment là où les eaux sont en contact avec des formations volcaniques de la série différenciée. Ces séries sont plus alcalines et libèrent donc plus de potassium (Hoareau et al. 2005). Ainsi les émergences drainant le secteur des Avirons, formé par des roches de la série des océanites, sont moins potassiques et présentent des concentrations inférieures au seuil défini par Meybeck (1984). Ainsi une zone à risque de fond géochimique faible en potassium est attribuée aux eaux drainant les formations volcaniques de la série différenciée.

Dans le secteur de Saint Louis, on note des concentrations très élevées en **sulfates** (77.9 mg.L<sup>-1</sup>) et en **bore** (60 µg.L<sup>-1</sup>) pour le forage COCO (12288X0076/C2). Cependant ce point d'eau est affecté par des teneurs élevées en nitrates (34.3 mg.L<sup>-1</sup>) abondant dans le sens d'une contamination anthropique.

Pour l'**aluminium** on note de fortes teneurs dans les eaux pour plusieurs forages, la source Asile (120 µg.L<sup>-1</sup>, 12266X0032/HY, Saint Paul), le piézomètre Hermitage N6 (150 µg.L<sup>-1</sup>, 12265X0033/S6, Saint-Paul), le forage ravine sèche (200 µg.L<sup>-1</sup>, 12283X0058/F3, Etang Salé). En outre, on note qu'une émergence localisée sur la plaine, la source Lesquelin aval (12283X0023/HY) présente des eaux atteignant 120 µg.L<sup>-1</sup>.

L'altération des minéraux alumino-silicatés (plagioclases, olivines, amphiboles) conduit à la mobilisation de l'aluminium qui, peu soluble, précipite sous forme secondaire (argile, hydroxydes d'aluminium) (Hem et al. 1985). Malgré cela, cet élément peut être

présent en quantité importante sous forme particulière dans les eaux souterraines. On attribue donc une zone à risque de fond géochimique faible pour l'aluminium.

Pour le **manganèse**, les eaux présentent des teneurs inférieures aux seuils de quantification sur l'ensemble du secteur à l'exception de la source Deschenez (12283X0013/HY, Etang Salé) dont les eaux peuvent atteindre  $200 \mu\text{g.L}^{-1}$  en manganèse. Par contre, on rencontre des eaux très concentrées en **fer** sur l'ensemble du secteur. Dans le secteur de Saint Paul, le Puits Bouillon (12262X0146/P6) présente des concentrations en fer atteignant  $360 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Pour le secteur des Trois Bassins, trois forages dépassent le seuil de qualité pour le fer, le forage le Blanchard ( $870 \mu\text{g.L}^{-1}$ ; 12266X0083/F6), le forage Fond Petit Louis ( $1410 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12266X0078/F9) et le forage de Petite Ravine ( $220 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 1266X0053/F2). Dans le secteur de l'Etang Salé, le forage Le Brule présente des eaux dépassant la norme de qualité ( $610 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12283X0060/F5). Les sources des Avirons présentent des concentrations en fer comprises entre 20 et  $430 \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Le fer est un des constituants des minéraux ferromagnésiens (olivine) et des oxydes (ilménite, magnétite). Sa solubilité est soumise aux réactions redox. En milieu fermé, réducteur, sa mobilité est accrue et le fer peut atteindre de fortes concentrations en solution. Sa présence est une des caractéristiques des aquifères captifs. En milieu ouvert, oxydant, cet élément est peu soluble et a tendance à précipiter sous forme d'hydroxydes ou à co-précipiter ou à s'adsorber sur les particules argileuses. Ainsi, dans les environnements soumis à l'altération le fer peut être mobile sous forme particulière, de manière similaire aux particules contenant de l'aluminium (Hem et al. 1985). Ainsi, on attribue donc **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer avec un niveau de confiance élevé**.

Le manganèse est souvent présent dans les minéraux conjointement au fer (Hem et al. 1985). Le nombre d'occurrences est limité cependant, lorsqu'il s'exprime dans les eaux les concentrations sont supérieures au seuil de qualité. Ainsi, on définit **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le manganèse avec un niveau de confiance moyen** car compte-tenu du nombre limité d'occurrences, il est difficile d'en définir l'emprise spatiale.

Les eaux du puits Grande Ravine (12266X0036/F, Trois-Bassins) contiennent de l'**arsenic** (jusqu'à  $18 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et une analyse présentant du **sélénium** ( $13 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ces deux éléments sont présents en quantité supérieures aux seuils de qualité respectifs ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ils pourraient être associés à une contamination agricole via les engrais, cependant les teneurs en nitrates sont inférieures à  $3 \text{mg.L}^{-1}$ . Par contre, ce forage est concerné par une contamination en pesticides (Diren Réunion, 2005). Ce point d'eau est également localisé à l'aval de la décharge de Cocâtre. Ainsi il n'est pas possible de conclure sur une origine naturelle pour ces éléments.

Les teneurs en **cadmium, mercure et antimoine** sont inférieures aux limites de quantification respectives. On note cependant, ponctuellement la présence d'éléments avec des teneurs inférieures aux limites de qualité.

L'aquifère des Trois Bassins présente trois forages dont les eaux contiennent des traces de **plomb** le forage Trou d'eau ( $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12266X0056/F1-BIS) ; le forage le Blanchard ( $4 \mu\text{g.L}^{-1}$ ; 12266X0083/F6) et le Fond Petit Louis ( $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12266X0078/F9). D'après l'étude d'Aunay et Gourcy (2007), menée sur le secteur de l'Antenne 4, le forage Le Blanchard est peu influencé par les activités anthropiques et par des apports directs d'eau de surface. A l'inverse le forage de la ravine Trou d'eau est influencé par des apports anthropiques ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ). Ces trois forages, n'ayant pas une influence anthropique systématique, permettent d'envisager une origine naturelle du plomb. Ces eaux présentent des pH relativement élevé ( $> 7.5$ ), domaine pour lequel l'oxyde de plomb est plus soluble (BRGM, 2006).

Dans le secteur des Avirons, les sources Dechesnez (12283X0013/HY) et Bananes (12283X0024/HY) présentent également des traces de **plomb** (jusqu'à  $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) occasionnelles. Le plomb se substitue principalement au potassium, au strontium et au baryum, on le trouve ainsi en trace dans des minéraux potassiques tels que les feldspaths ou les micas. Le plomb est également présent en moindre quantité dans les pyroxènes ( $0.3$  à  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$  Pb) ou les plagioclases ( $1$ - $70 \text{ mg.kg}^{-1}$  Pb), (Wedepohl et al. 1974). Pour les quelques données disponibles, une corrélation entre le plomb en solution et le potassium suggère une origine naturelle. Par ailleurs, le plomb est un élément peu soluble, et sa présence si elle s'avère être d'origine naturelle serait à associer à une mobilisation sous forme particulière. Ce qui expliquerait les occurrences ponctuelles.

Les concentrations en plomb sont égales à la limite de qualité pour cet élément ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et supérieures à la norme de qualité environnementale ( $7.2 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Aussi, une étude dédiée pourrait être envisagée afin de qualifier plus précisément le niveau de risque de fond géochimique et de discriminer l'influence anthropique d'une origine naturelle. De plus à l'heure actuelle il n'est pas possible de déterminer les valeurs minimales du fond géochimique car les seuils de quantification des analyses effectuées ne sont pas connus.

Le forage de Fond Petit Louis (12266X0078/F9, Saint Leu) présente des teneurs en **arsenic** atteignant  $7 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Les sources des Avirons (Bananes, Dussac, Forcade et Cadet) présentent des traces d'arsenic comprises entre  $6$  et  $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Le forage Pacifique (12283X0058/F3, Etang Salé) présente des eaux contenant jusqu'à  $8 \mu\text{g.L}^{-1}$  d'arsenic. Au niveau de l'Etang salé, une analyse de sol (sable à olivine vert) montre également de fortes teneurs en arsenic ( $54 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). L'arsenic est généralement associé au fer et il est présent naturellement dans les minéraux tels que la magnétite et l'ilménite ( $2.7$  à  $41 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Wedepohl et al. 1974) présents dans les basaltes tel que décrit dans l'analyse prédictive. Une mobilisation particulière de ces éléments, conjointement au fer et au manganèse pourrait donc expliquer l'occurrence d'arsenic dans les eaux.

A l'heure actuelle, il n'est pas possible de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique en arsenic pour ce secteur. Compte-tenu des concentrations en arsenic parfois supérieures à la limite de qualité, une étude dédiée pourrait être envisagée afin de qualifier plus précisément le niveau de risque géochimique et de discriminer l'influence anthropique d'une origine naturelle.

Les eaux du forage COCO (12288X0076/C2) contiennent également de l'arsenic ( $13 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et du zinc ( $13 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cependant ce forage est sous influence anthropique, confirmée par les teneurs en nitrates (jusqu'à  $28 \text{mg.L}^{-1}$ ).

L'aquifère de l'étang Salé présente trois forages dont les eaux contiennent des traces de **chrome**, Forage Le Brule (12283X0060/F5,  $2 \mu\text{g.L}^{-1}$ ); Forage Pacifique (12283X0058/F3,  $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et Forage Marengo (12287X0040/F10,  $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ces trois forages drainent les planèzes ouest du Piton des Neiges et sont localisés à l'aval d'un secteur dont les sols présentent de fortes teneurs en chrome ( $1468 \text{mg.kg}^{-1}$ , Laperche et al. 2008). Dans ce secteur, cet élément pourrait avoir une origine naturelle, en effet les océanites sont enrichies en chrome et les sols sont enrichis naturellement (Doelsch et al. 2006a). Dans les sols de La Réunion, le chrome est présent sous forme de chromite, associé aux oxydes de fer et également complexé avec la matière organique (Doelsch et al. 2006c) Les eaux présentent des concentrations inférieures à la limite de qualité. On attribue donc un risque de fond géochimique faible au domaine.

Pour le **nickel**, le puits du Gol A présente des eaux contenant des traces ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12287X0061/P1, Saint Louis) ainsi que les eaux du puits Bouillon ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12262X0146/P6, Saint-Paul). Seulement deux analyses sont disponibles pour chacun des points d'eau, ainsi il n'est pas possible de conclure sur le fond géochimique pour cet élément. Cet élément est naturellement présent dans les roches mafiques et notamment dans les océanites (Selinus et al. 2005, Doelsch et al. 2006a) mais la mobilité du nickel est beaucoup plus réduite que celle des autres métaux comme le zinc. Aussi, lorsqu'il est complexé, par exemple sur les hydroxydes de fer, sur les argiles ou la matière organique, sa mobilité augmente.

Pour le **cuivre et le zinc**, quelques points d'eaux dispersés sur le domaine présentent des teneurs comprises pour le cuivre entre 2 et  $7 \mu\text{g.L}^{-1}$  atteignant exceptionnellement  $53 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la source Deschenez (12283X0013/HY) et pour le zinc entre 2 et  $66 \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Le cuivre et le zinc, sont deux éléments associés dans les roches aux minéraux ferromagnésiens (Selinus et al. 2005). Sur l'île de la Réunion, les laves issues de la série d'océanites sont riches en ces deux éléments (Doelsch et al. 2006a). Leurs concentrations montrent cependant une faible solubilité, le cuivre est très peu mobile sous forme dissoute, il est cependant mobilisable sous forme particulaire. Ces deux éléments font également partie des éléments minéraux nécessaires à la croissance de la canne, ils peuvent donc être utilisés sur les parcelles concernées par la culture de canne (Fauconnier, 1991).

Les occurrences en ces deux éléments dans les eaux souterraines ne semblent pas associées à l'activité agricole. Ainsi compte-tenu de la répartition du cuivre et du zinc dans les eaux, on attribue au domaine une zone à risque de fond géochimique faible pour ces deux éléments. Cependant des teneurs plus élevées dans les eaux souterraines devront être envisagées comme ayant une origine anthropique.

#### 4.1.2 Les eaux de surface

Le réseau hydrographique de ce domaine appartient au versant sud-ouest du Piton des Neiges et rassemble des ravines à écoulement non permanent à l'exception de la ravine Saint Gilles qui est pérenne.

##### *a) Synthèse bibliographique*

Pas de données dans la littérature sur la présence d'éléments traces dans les eaux de surface.

##### *b) Délimitation des zones à risque*

Les données disponibles pour ce secteur sont localisées sur la ravine Saint Gilles et dans le secteur des sources des Avirons. Deux données ponctuelles de l'Office de l'Eau sont également disponibles au niveau de l'Étang Saint Paul (eaux saumâtres voire marines) et de la ravine l'Ermitage (Saint Paul).

Les eaux de surface du secteur des Avirons (ravines et sources) sont peu minéralisées et contiennent 5 à 8 mg.L<sup>-1</sup> de calcium, 3 à 7 mg.L<sup>-1</sup> de magnésium, 5 à 7 mg.L<sup>-1</sup> de sodium, 8 à 11 mg.L<sup>-1</sup> de chlorures, 0.5 à 1 mg.L<sup>-1</sup> de potassium et de 0 à 6 mg.L<sup>-1</sup> de sulfates. Pour les cations, les concentrations observées appartiennent à la gamme des concentrations moyennes proposées par Meybeck (1984) pour des eaux drainant des roches volcaniques.

Les eaux de la ravine saint Gilles sont plus minéralisées avec des teneurs atteignant en calcium 18 mg.L<sup>-1</sup>, en magnésium (10.5 mg.L<sup>-1</sup>), en sodium (20 mg.L<sup>-1</sup>), en chlorures 22 mg.L<sup>-1</sup>, en potassium 2.8 mg.L<sup>-1</sup>. Globalement la minéralisation augmente vers l'embouchure de la ravine. Ces teneurs sont supérieures à la gamme des concentrations moyennes proposées par Meybeck (1984). En effet dans ce secteur, du fait des faibles pluies, les eaux de surface sont plus minéralisées que les eaux de surface des versants « au vent ».

Ponctuellement, tant dans le secteur des Avirons que pour les eaux de la ravine Saint Gilles, les teneurs en **fer** dépassent la référence de qualité (200 µg.L<sup>-1</sup>). Jusqu'à 240 µg.L<sup>-1</sup> pour Azema Amont (12283X0062/HY, Les Avirons) et 460 µg.L<sup>-1</sup> pour la station Verrou (12265X0035/HY, Saint Paul). Les concentrations dans les eaux de la Ravine Saint Gilles dépassent également la limite de qualité vis-à-vis du **manganèse** (jusqu'à 200 µg.L<sup>-1</sup>). Les teneurs en **aluminium** quand à elles ne dépassent pas 160 µg.L<sup>-1</sup>.

Le fer et le manganèse sont également des constituants des minéraux aluminosilicatés. Leur solubilité est contrôlée par les réactions redox. En milieu ouvert ces deux éléments sont peu solubles et ont tendance à précipiter sous forme d'hydroxydes ou co-précipiter ou s'adsorber sur les particules argileuses. Ainsi, dans les environnements soumis à l'altération, ces deux éléments peuvent être mobiles sous forme particulaire, de manière similaire aux particules contenant de l'aluminium (Hem

et al. 1985). Même lorsque ces éléments sont dosés sur des eaux filtrées, la filtration ne suffit pas à éliminer entièrement les phases particulaires. Aussi, une fraction parfois majoritaire de ces éléments est mesurée bien qu'ils soient présents sous forme particulaire. En effet, l'aluminium est très peu soluble et la fraction mesurée proviendrait essentiellement de l'entraînement mécanique des minéraux aluminosiliceux, dont les argiles. Le fer et le manganèse sont également peu solubles dans les systèmes ouverts dont les eaux de surface du fait des conditions d'oxydoréduction. Ainsi la fraction mesurée proviendrait principalement des oxy-hydroxydes et des argiles.

Les teneurs en fer, en manganèse et en aluminium se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et le temps avec des dépassements qui correspondent à des pics brutaux. Ces produits sont issus de l'altération pédoclimatique et/ou hydrothermale du substratum volcanique et sont facilement mobilisables. Les fortes teneurs en aluminium, en fer et en manganèse seraient donc liées aux phénomènes d'érosion naturels.

Les teneurs en **chrome, cadmium, mercure, nickel, sélénium et antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification qui sont parfois trop élevés pour déterminer un niveau de fond géochimique.

On note également la présence d'arsenic, de plomb, de cuivre et de zinc dans les eaux de surface dont les concentrations restent inférieures aux limites de qualité.

Pour l'**arsenic**, les eaux du bassin Malheur présentent des teneurs atteignant  $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Des traces de **plomb** ( $4 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de **cuivre** ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) sont également mesurées dans les eaux de la station Azema Amont. On note également la présence de **zinc** dans les eaux de la station Bras de Jeanne ( $15 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) dans le secteur des Aviron et pour le secteur de Saint Gilles dans les eaux du Bassin Malheur ( $14 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et du Bassin des Aigrettes ( $9 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). La présence de ces quatre éléments a également été soulignée dans les eaux souterraines associées à ces secteurs avec une origine naturelle possible. Ces éléments sont présents naturellement dans les formations volcaniques et les sols de la Réunion (Doelsch et al. 2006a). Le plomb et le cuivre étant peu solubles, leur mobilisation est attendue sous forme particulaire. Ces deux éléments ont la caractéristique de s'absorber de manière plus importante que les autres métaux dans les sols. Ils ont notamment de fortes affinités avec la matière organique. Le plomb peut également s'adsorber sur les argiles et les (hydr)oxydes de fer et de manganèse (Laperche et al. 2004). Ainsi on attribue une zone à risque de fond géochimique faible pour l'arsenic, le plomb, le cuivre et le zinc.

On note des concentrations ponctuelles en **bore** supérieures à  $50 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour les eaux du Bassin Malheur et du Bassin des Aigrettes dans le secteur de la ravine Saint Gilles. Ces pics correspondent à la période de mars 2005, à laquelle correspond également un pic des concentrations en nitrates ( $17.5$  et  $20.2 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivement). Ceci suggère donc une contamination anthropique bien que le bore puisse avoir une origine géologique ou marine. On rappelle que les eaux marines peuvent atteindre des concentrations en bore de l'ordre de  $4.45 \text{ mg.L}^{-1}$  (Nordstrom et al. 1979), tandis que

pour des eaux de pluie en contexte insulaire, on peut mesurer par exemple des concentrations de l'ordre de  $21 \mu\text{g.L}^{-1}$  à la Martinique (Baran et al. 2006).

## **4.2 REGION NORD (LE PORT, LA POSSESSION, MAFATE)**

Ce secteur comprend la Plaine des Galets, le cirque de Mafate, les planèzes de la Possession et la Montagne.

Le cirque de Mafate est constitué par différentes brèches d'avalanche de débris remaniant les formations zéolitisées de la phase I et recoupées par des dykes. Ce cirque est drainé par la rivière des Galets.

Au sein de la Plaine des Galets, constituée par un cône alluvial, on rencontre un complexe aquifère comprenant plusieurs nappes, notamment la nappe stratégique de la rivière des Galets. Les formations alluviales reposent sur un substratum volcanique appartenant au massif du Piton des Neiges (laves massives et formations pyroclastites). Les planèzes contiennent également des aquifères qui alimentent le système aquifère de la plaine des Galets et les sources en contrebas (source Denise et Blanche alimentées par la nappe du plateau de Dos D'Ane).

Les travaux de Frissant et al. (2006); Billard (1974), Hoareau et al. (2005) ont permis de décrire les minéraux et éléments associés aux principales lithologies rencontrées sur les flancs nord du Piton des Neiges (Tableau 10).

Les caractéristiques des eaux thermales rencontrées dans le cirque de Mafate sont présentées dans le Tableau 11.

Une analyse prédictive des éléments majeurs et traces susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines est proposée dans le Tableau 12.



Secteurs	Lithologie	Série magmatique	Principaux minéraux	Eléments présents	Minéralisation associée	Références
Plaine des Galets	Alluvions		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si		Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
	Coulées basaltiques et pyroclastites	Série des océanites PN	olivine, zéolites, pyroxènes, iddingsite, plagioclases et clinopyroxènes	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si		Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
		Série différenciée PN	feldspath (labrador, bytownite), olivine, pyroxène (pigeonite)	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si		
Planèzes	Coulées basaltiques et pyroclastites	Série des océanites PN	olivines (altération en iddingsite), zéolites, pyroxènes, plagioclases et clinopyroxènes	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si	MgCO <sub>3</sub> , pyrite associée aux zéolites	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
		Série différenciée PN	feldspath (labrador, bytownite), olivine, pyroxène (pigeonite)	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si		
Cirque de Mafate	Coulées basaltiques et pyroclastites (ignimbrites), Brèches d'avalanche et éboulis	Série des océanites PN	olivine, zéolites, pyroxènes, iddingsite, plagioclases et clinopyroxènes	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Al, Si		Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
		Série différenciée PN	olivine, pyroxène, plagioclase	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si		Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
	Dyke et sills	Gabbros et syénites	olivine, clinopyroxènes, plagioclases, magnétite	Ca, Na, Fe, Mn, Mg, Si		Frissant et al. 2006

Tableau 10 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs nord du Piton des Neiges (PN : massif du Piton des Neiges)

Secteurs	Source	Faciès hydrochimique des eaux	Eléments associés	Références
Mafate (rivière des Galets)	Source sulfureuse de la rivière des Galets	Eaux sulfureuses (H <sub>2</sub> S)	SO <sub>4</sub>	Billard 1974 ; Rocher 1988

Tableau 11 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Mafate.

Secteurs	Intrusion saline	Faciès	Eléments traces susceptibles d'être présents	
			Déduits de l'analyse prédictive	Signalés dans la bibliographie
Plaine des Galets	Préoccupante	Magnésio-calcique à sodique et chloruré	Fe, B, F	Na, Cl
Planèzes	Domaine altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	
Cirque de Mafate	Domaine altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	

Tableau 12 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères des flancs nord du Piton des Neiges.

## 4.2.1 Les eaux souterraines

### a) Synthèse bibliographique

Les aquifères des planèzes sont principalement formés par des laves et des pyroclastites qui favorisent les échanges eau/roche. D'après la lithologie (Frissant et al. 2006; Billard 1974; Hoareau et al. 2005), les eaux sont susceptibles de s'enrichir en fer, en calcium, en magnésium et en sodium du fait de la présence des minéraux altérés tels que des pyroxènes (Ca, Fe, Mg), des plagioclases (Ca, Na) et de l'olivine (Mg, Fe).

Les minéraux tels que l'olivine, les pyroxènes ou les argiles peuvent également contenir du manganèse qui peut se substituer avec le magnésium ou le fer (Wedepohl et al., 1970). Ces deux éléments ont un comportement comparable dans des environnements soumis à l'altération du fait de leur participation aux réactions d'oxydo-réduction (Hem et al. 1985).

Le secteur du Port est exposé aux intrusions salines et aux remontées d'eaux saumâtres par drainance au sein du complexe aquifère des Galets (Frissant et al. 2005b).

Le cirque de Mafate possède une source sulfureuse dont les eaux ont été analysées par Lopoukhine et Slieltjes (1978). Les eaux de cette source contiennent beaucoup de chlorures ( $78 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et de sulfates ( $43 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ainsi que du fer ( $1.7 \text{ mg.L}^{-1}$ ), du fluor ( $450 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ), de la silice ( $52 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et relativement peu de carbonates ( $15.7 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3$ ), de calcium ( $4.6 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et de magnésium ( $0.3 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

### b) Délimitation des zones à risque

Pour ce domaine, les eaux souterraines localisées à l'aval des coulées et dans la plaine des Galets sont bien renseignées, par contre peu de données sont disponibles sur les eaux du Cirque de Mafate, notamment pour les éléments indésirables et toxiques. Le secteur de la Montagne ne fait pas l'objet de suivi mais quelques données sont disponibles dans la base de données « étude » sur les émergences.

On note cependant que les concentrations en calcium et magnésium considérées dans cette étude sont relativement faibles. Les roches volcaniques libèrent du calcium et du magnésium (Hoareau et al. 2005) mais en faible quantité. Des concentrations plus élevées en calcium et magnésium sont cependant observées au niveau des eaux sous influence marine.

Les aquifères de la zone littorale présentent donc des eaux plus minéralisées que les eaux d'altitude. Les concentrations en **calcium** atteignent  $35 \text{ mg.L}^{-1}$  pour le forage F5 Plaine des Galets (12262X0168/F5) et  $36.9 \text{ mg.L}^{-1}$  pour le forage F4 (12262X0048/F4). Ces deux forages sont influencés par les remontées d'eaux saumâtres qui contaminent la nappe moyenne (Frissant et al. 2005b). Pour le **magnésium** quelques

concentrations élevées se distinguent dans le secteur ; le forage des Lataniers (22.5 mg.L<sup>-1</sup>, 12263X0040/F, La Possession), le puits de la ravine à Marquet (26.7 mg.L<sup>-1</sup>, 12263X0044/P, La Possession) et le Forage Omega (28.8 mg.L<sup>-1</sup>, 12262X0186/F, Saint Paul).

Dans les eaux de la nappe alluviale, les teneurs en **sodium** et en **chlorures** sont très élevées en rive droite de la Rivière des Galets. Pour ces deux éléments, les eaux souterraines sont majoritairement supérieures à 50 mg.L<sup>-1</sup> atteignant pour le sodium 135 mg.L<sup>-1</sup> et pour les chlorures 222 mg.L<sup>-1</sup> pour les eaux du forage Mounien (12262X0087/P-20, La Possession). Les teneurs en **sulfates** sont également plus élevées en plaine avec des valeurs majoritairement supérieures à 16 mg.L<sup>-1</sup> atteignant 31.5 mg.L<sup>-1</sup> pour le Forage Mounien (12262X0087/P-20, La Possession). On note également pour les forages de la Plaine de Galets, des teneurs maximales atteignant en chlorures 174 mg.L<sup>-1</sup> et en sulfates 25.5 mg.L<sup>-1</sup> pour le forage F2 (12262X0135/F2) et 111 mg.L<sup>-1</sup> en chlorures et 18.9 mg.L<sup>-1</sup> en sulfates pour le forage F5 (12262X0168/F5). Le puits de la ravine à Marquet présente également des teneurs en chlorures et en sulfates élevées, respectivement 177 mg.L<sup>-1</sup> et 28.3 mg.L<sup>-1</sup> (12263X0044/P, La Possession).

Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé en chlorures, sodium et sulfates** est attribuée aux secteurs soumis à des intrusions salines. Ce risque est attribué avec un **niveau de confiance élevé**. Dans ces secteurs on s'attend également à un enrichissement en **magnésium, bore et fluor** qui sont également associés aux intrusions salines.

Les teneurs en **silice** dans les eaux souterraines sont élevées, témoin du contexte volcanique, et sont comprises entre 28 mg.L<sup>-1</sup> (Forage le Grand Coin, 12263X0061/F1, La Possession) et 78 mg.L<sup>-1</sup> Forage FRH15, 12262X0272, Saint Paul). Ainsi **une zone à risque de fond géochimique élevé en silice** a été identifiée avec un **niveau de confiance élevé**.

On note également un enrichissement des eaux en **potassium** avec des teneurs supérieures à la concentration moyenne des eaux drainant des roches volcaniques (1.3 mg.L<sup>-1</sup>, Meybeck, 1984) sans pour autant dépasser le seuil de qualité (12 mg.L<sup>-1</sup>). Cet enrichissement à l'échelle de l'île de La Réunion est observé dans les eaux des cirques et des aquifères côtiers, en pied de coulées, notamment là où les eaux sont en contact avec des formations volcaniques de la série différenciée. Ces séries sont plus alcalines et libèrent donc plus de potassium (Hoareau et al. 2005). Ainsi les émergences drainant l'aquifère perché dans le secteur de la Montagne, constitué de laves de la série des Océanites sont moins potassiques et présentent des concentrations inférieures au seuil défini par Meybeck (1984). Ainsi une zone à risque de fond géochimique faible en potassium est attribuée aux eaux drainant les formations volcaniques de la série différenciée.

Les teneurs en **aluminium** dans les eaux souterraines sont faibles, majoritairement inférieures à 40 µg.L<sup>-1</sup> avec un point atteignant 100 µg.L<sup>-1</sup> (Forage F3, 12262X01636/F3). On attribue donc une zone à risque de fond géochimique faible pour l'aluminium.

Les concentrations en **fer** sont également inférieures au seuil de qualité ( $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) à l'exception de deux points dont les valeurs maximales atteignent  $760 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour le Forage des Lataniers (12263X0040/F) et  $250 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour les eaux du puits de la ravine à Marquet (12263X0044/P). Le forage de Grand Coin (12263X0061/F1) présente également des eaux concentrées en fer (jusqu'à  $370 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Les eaux du forage des Lataniers et de la source Galets Ronds (12263X0016/HY) présentent également du manganèse en concentrations supérieures aux limites de qualité, respectivement  $600$  et  $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Compte-tenu du comportement du fer et du manganèse dans les eaux souterraines (voir page 51), on attribue **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer et le manganèse**. Ce risque est attribué avec **un niveau de confiance élevé** pour le fer et avec **un niveau de confiance moyen** pour le manganèse car l'emprise spatiale est mal définie compte tenu du nombre limité d'occurrences.

Les teneurs en **cadmium, chrome, mercure, nickel et antimoine** sont inférieures aux limites de quantification respectives. On note cependant, ponctuellement la présence de certains éléments traces mais en concentrations inférieures aux limites de qualité.

Pour **l'arsenic**, deux forages de la plaine des Galets (Puits d'exploitation-12262X0135/F2 ; Forage Omega-12262X0189/F) présentent des concentrations comprises entre  $6$  et  $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Le forage Omega est concerné par des pollutions anthropiques confirmées par la présence de nitrates (jusqu'à  $20 \text{mg.L}^{-1}$ ). On souligne que le secteur du Port (Rivière des Galets) est concerné par des pollutions industrielles liées à la présence de plusieurs sites industriels. Par ailleurs, l'arsenic est présent naturellement dans les minéraux tels que la magnétite et l'ilménite (Wedepohl et al. 1974) présents dans les basaltes. Une mobilisation particulière de ces minéraux peut donc être responsable de la présence d'arsenic dans les eaux. Ainsi il n'est pas possible de conclure sur l'origine de cet élément.

Par ailleurs, à la base des coulées deux points d'eaux présentent également des traces d'arsenic entre  $6$  et  $9 \mu\text{g.L}^{-1}$  (ravine à Marquet-12262X0044/F1 ; Puits Samy-12263X0050/P) pour lesquels l'arsenic est associé à la présence de nitrates avec des concentrations supérieures à  $10 \text{mg.L}^{-1}$  suggérant une origine agricole. Il n'est donc pas possible de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique pour cet élément.

On note également la présence de **sélénium** ( $6 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) dans les eaux du puits de la ravine à Marquet. Pour ces deux éléments les teneurs sont faibles et inférieures aux seuils de qualité ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). L'arsenic et le sélénium sont deux éléments qui peuvent être associés tant en contexte naturel lorsqu'ils sont associés aux sulfures qu'aux produits phytosanitaires et aux engrais (engrais séléniés). Les eaux de la source de Galets Ronds (12263X0016/HY) présentent également de fortes teneurs en nitrates ( $72 \text{mg.L}^{-1}$ ) et des traces de sélénium ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Du fait de la forte activité anthropique du secteur, confirmée par les teneurs en nitrates, il est difficile de conclure sur une origine naturelle de l'arsenic.

Pour le **plomb**, on notera la présence de traces dans les eaux de la source Denise ( $2 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12263X0013/HY) et du forage Omega ( $4 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12262X0186/F).

Plusieurs points d'eau présentent des eaux contenant des traces de **cuivre** avec des teneurs comprises entre 3 et 6  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , au niveau de la source Denise et de la source des Galets Ronds et des forages de la plaine des Galets (Forage Balthazar-12263X0087/F ; Puits de la rivière des Galets-12262X16 ; Forage Omega-12262X0186/F). Des traces de **zinc** sont également mesurées (2 à 10  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) dans les forages localisés à la base des coulées, sur la source des Galets Ronds et sur le forage de Grand Coin.

Les eaux de la Ravine à Marquet sont prélevées dans une galerie, ces eaux sont issues de l'aquifère de Grand Coin (terrains détritiques) et du ruissellement effectif que quelques mois dans l'année. L'étude réalisée par Frissant et al. (2005a) sur les sources Denis et Blanche a mis en évidence une influence anthropique liée à la dissolution de fertilisants sur le plateau du Dos D'âne. Les eaux du forage de Grand Coin (12263X0061/F1) en sont les témoins avec leur enrichissement en Mg (13  $\text{mg.L}^{-1}$ ),  $\text{NO}_3$  (55  $\text{mg.L}^{-1}$ ) et Cl (17  $\text{mg.L}^{-1}$ ). Pour ce forage, les teneurs bancaisées dans la base de données de la DRASS peuvent atteindre 120  $\text{mg.L}^{-1}$  en nitrates.

L'aquifère du Plateau du Dos D'âne alimente les sources de Blanche et Denise entraînant leur contamination en nitrates (Frissant et al., 2005). Ainsi, l'ensemble des eaux souterraines drainant le plateau du Dos D'âne et leur exutoire dont la rivière des Galets et la ravine à Marquet et d'autre part les eaux de la plaine des Galets sont influencées par les activités anthropiques empêchant de conclure sur l'origine naturelle des éléments traces observés. En effet, les fertilisants peuvent être source de métaux (Fe, Cu, Zn) et d'arsenic (As) dans un contexte géologique et pédologique enrichi en ces éléments (Doeslch et al. 2006a).

#### **4.2.2 Les eaux de surface**

Le réseau hydrographique de ce domaine regroupe les ravines et rivières qui drainent le cirque de Mafate notamment la Rivière des Galets et celles qui drainent le plateau du Dos D'Ane (Ravine à Marquet) dont l'écoulement est non permanent.

##### ***a) Synthèse bibliographique***

Pas de données dans la littérature sur la présence d'éléments traces dans les eaux de surface.

##### ***b) Délimitation des zones à risque***

Les données disponibles pour ce secteur sont localisées dans le cirque de Mafate (Bras Sainte Suzanne, deux ravines dans le secteur des Orangers) et sur le plateau du Dos D'âne et trois stations de l'Office de l'Eau réparties le long de la rivière des Galets.

Les eaux drainant le cirque de Mafate, sont peu minéralisées et contiennent 8 à 16  $\text{mg.L}^{-1}$  de calcium, 6 à 7  $\text{mg.L}^{-1}$  de magnésium, 6 à 7  $\text{mg.L}^{-1}$  de sodium, 2 à 13  $\text{mg.L}^{-1}$  de chlorures, 0.4 à 2.3  $\text{mg.L}^{-1}$  de potassium et de 0 à 4  $\text{mg.L}^{-1}$  de sulfates. Les teneurs en silice sont comprises entre 22 et 53  $\text{mg.L}^{-1}$ . Pour les cations et la silice,

les concentrations observées appartiennent à la gamme des concentrations moyennes proposées par Meybeck (1984) pour des eaux drainant des roches volcaniques.

Les concentrations en **manganèse** dans les eaux des stations suivies par la DRASS sont inférieures à la limite de quantification. Pour le **fer**, on note ponctuellement jusqu'à  $810 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Ces deux éléments ne sont pas suivis par l'Office de l'Eau, on ne dispose donc pas de données sur les eaux de la rivière des Galets. Pour l'**aluminium** les teneurs dans les eaux de la rivière des Galets s'échelonnent entre  $20 \mu\text{g.L}^{-1}$  et  $180 \mu\text{g.L}^{-1}$ , d'amont en aval.

Compte-tenu du comportement **du fer, du manganèse et de l'aluminium** dans les eaux de surface (voir page 54) et du contexte lithologique, on attribue une **zone à risque de fond géochimique élevé** pour ces trois éléments, le manque de données conduit à attribuer ce risque **avec un niveau de confiance moyen**.

Les teneurs en **arsenic, chrome, cadmium, mercure, nickel, plomb, sélénium, manganèse et antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification qui parfois sont trop élevés ou indéterminées pour qualifier un niveau de fond géochimique.

On note la présence de **cuivre** et de **zinc** dans les eaux de la station Fougères (respectivement  $4 \mu\text{g.L}^{-1}$  et  $220 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et du zinc dans les eaux de la station Barois Dos D'Ane ( $12 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). La station Fougères présente des teneurs en zinc exceptionnellement élevées dont l'origine serait anthropique. Ces deux éléments sont présents naturellement dans les formations volcaniques et les sols de la Réunion (Doelsch et al. 2006a). Ainsi, pour ces deux éléments, on attribue aux eaux de surface une zone à risque de fond géochimique faible. De fortes concentrations devront cependant être envisagées comme ayant une origine anthropique.

### 4.3 LES PLANEZES DU NORD ET DE L'EST

Ce secteur est situé sur le versant nord du massif du Piton des Neiges. Il comprend les secteurs de Saint Denis, Sainte Marie, Saint André, Bras Panon, Saint Benoit, le cirque de Salazie et le plateau du Bélouve.

Des coulées volcaniques des différentes phases du Piton des neiges, des tufs et des cendres affleurent dans les planèzes du secteur et les dépôts volcano-sédimentaires forment la bordure littorale. La plaine littorale correspond aux cônes de déjection des ravines et des rivières Saint Denis, des Pluies, de Sainte Suzanne et de la Rivière du Mât.

Le cirque de Salazie est le résultat d'une succession de phénomènes érosifs, volcaniques et tectoniques principalement intervenus au cours de l'édification du massif du Piton des Neiges. La dépression est remplie par des formations bréchiques (issues de formations différenciées et du substratum ancien) et des coulées d'ignimbrites et de laves différenciées et elle est recoupée par des intrusions (Dyke et sills). Le cirque de Salazie est drainé par la Rivière du Mât et de nombreuses sources sont réparties sur le cirque (fond de cirque, pieds de remparts) dont certaines sont thermo-minérales (Hell-Bourg, sources pétrifiantes). Rocher (1988) parle également

d'activité fumerollienne fossile pour laquelle des fluides de type sulfaté acide seraient à l'origine des altérations fumerolliennes observées et qui témoignent de la migration de phases gazeuses d'origine magmatique ( $H_2S$  et  $CO_2$ ).

Une synthèse hydrogéologique sur le cirque de Salazie a été réalisée par Moulin et Lebon (2002). Les coulées de la phase III et IV constituent des axes de drainage potentiels sur les planèzes, tandis que les terrains anciens constituent des systèmes aquifères complexes avec des alternances d'alluvions anciennes et de basaltes (Moulin et Lebon, 2002).

Les aquifères du littoral, notamment les nappes stratégiques de Saint Denis et de la Rivière du Mât sont situés dans les formations détritiques et volcaniques et sont alimentés par les aquifères d'altitude, les précipitations et les ravines. La nappe de la plaine du Mât appartient à un système aquifère complexe avec la présence d'un aquifère supérieur contenu dans les formations alluviales et d'un aquifère inférieur contenu principalement dans les formations volcaniques.

Les travaux de Frissant et al. (2006); Billard (1974), Hoareau et al. (2005) et de Demange et al. (1989) ont permis de décrire les minéraux et éléments associés aux principales lithologies rencontrées sur les flancs est du massif du Piton des Neiges (Tableau 13).

Les caractéristiques des eaux thermales rencontrées dans le cirque de Salazie sont présentées dans le Tableau 14.

Une analyse prédictive des éléments majeurs et traces susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines est proposée dans le Tableau 15.

Secteurs aquifères	Lithologie	Série magmatique	Principaux minéraux	Eléments présents	Références	
Zone littorale de la côte nord et Plaine du Mât	Formations alluviales et fluviomarines		Olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg Ca, Na, Si, Al	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974	
	Formations volcaniques	Série des océanites PN	Olivines, zéolites, oxydes de fer, plagioclases et clinopyroxènes	Fe, Mn, Mg Ca, Na, Si, Al		
		Série différenciée PN	Plagioclase (labrador, bytownite), olivine, clinopyroxène (pigeonite)	Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Si		
Planèzes du massif du Piton des Neiges (domaine d'altitude)	Coulées basaltiques et pyroclastites (scories et tufs)	Série des océanites PN	Olivines, zéolites, oxydes de fer, plagioclases et clinopyroxènes	Fe, Mn, Mg Ca, Na, Si, Al	Frissant et al. 2006; Billard 1974	
		Série différenciée PN	Plagioclase (labrador, bytownite), olivine, clinopyroxène (pigeonite)	Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Si		
Cirque de Salazie	Alluvions anciennes		Olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg Ca, Na, Si, Al	Frissant et al. 2006; Billard 1974, Rocher 1988	
	Coulées basaltique et d'ignimbrites	Série des océanites PN	Olivines, zéolites, oxydes de fer, plagioclases et clinopyroxènes	Fe, Mn, Mg Ca, Na, Si, Al		
		Série différenciée PN	Plagioclase (labrador, bytownite), olivine, clinopyroxène (pigeonite)	Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Si		
	Formations détritiques	Dépôts gravitaires	Olivines serpentinisées, plagioclases, pyroxènes, magnétite	Fe, Mn, Ca, Na, Mg, Si, Al	Billard 1974, Rocher 1988	
	Dykes et sills	Syénites		Feldspath, biotite, clinopyroxènes, amphiboles, biotites, oxydes Fe, quartz	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974, Rocher 1988
			Trachytes	Feldspaths alcalins, plagioclases, amphiboles, olivines, apatite, quartz, clinopyroxènes, oxydes Fe	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn, Si	Billard 1974, Rocher 1988
Gabbros, Péridots			Olivine, plagioclases, pyroxène, oxydes	Fe, Mn, Mg Ca, Na	Billard 1974, Rocher 1988	
Plateau du Bélouve	Tufs et coulées de trachytes	Série différenciée PN	Feldspaths alcalins (anorthose), plagioclases (andésine, oligoclase), clinopyroxènes, oxydes Fe-Mn, amphiboles, quartz	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn, Si	Frissant et al. 2006; Billard 1974, Rocher 1988	

Tableau 13 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs est du massif du Piton des Neiges (PN : massif du Piton des Neiges)



Secteur	Sources	Faciès hydrochimique des eaux	Gaz associés	Minéralisations associées	Éléments associés	Référence
Cirque de Salazie	Sources thermominérales (sources pétrifiantes de Grand Sable et de Bachelier, source Manouilh, source rivière du Mât)	Bicarbonaté magnésien et calcique	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Carbonates, sulfates, hydroxydes de Fer, argiles, silice	Fe, Mn, CO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , Si	Billard 1974 ; Rocher 1988 ; Demange et al. 1989 ; Moulin et Lebon 2002
	Hell Bourg	Alcaline de type carbonaté sodique			Fe	Rocher 1988

Tableau 14 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Salazie.

Secteurs Aquifères	Intrusion saline	faciès	Éléments traces susceptibles d'être présents	
			Déduits de l'analyse prédictive	Signalés dans la bibliographie
Zone littorale de la côte nord et Plaine du Mât	Pas d'intrusion saline observée	Magnésio-calcique à sodique et chloruré	Fe, Mn	
Planèzes du massif du Piton des Neiges	domaine d'altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	
Cirque de Salazie	domaine d'altitude	Bicarbonaté magnésien à tendance sodi-potassique Bicarbonaté calco-magnésien Bicarbonaté magnésien issu de la dilution d'eau thermo-minérale	Fe, Mn	
Plateau du Bélouve	domaine d'altitude	Bicarbonaté calco-magnésien	Fe, Mn	

Tableau 15 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines des flancs est du massif du Piton des Neiges.

### 4.3.1 Les eaux souterraines

#### a) Synthèse bibliographique

Sur les planèzes, la minéralisation des eaux augmente d'amont en aval selon l'intensité des interactions eau-roche et les eaux côtières sont bien moins minéralisées que celles de la côte ouest du fait de la moindre influence chimique de l'Océan.

Le cirque de Salazie présente plusieurs sources thermo-minérales essentiellement localisées sur les flancs Nord et Est du Piton des Neiges: La source Manhouil, la source Rivière du Mât et la source de la Ravine Fouquet qui présentent des concentrations en calcium entre 154 et 163 mg.L<sup>-1</sup> ; magnésium entre 66 et 79 mg.L<sup>-1</sup>. D'après Lopoukhine et Stieljes (1978) ces eaux sont ferreuses et contiennent de 2.6 à 3.3 mg.L<sup>-1</sup> de fer et du strontium (0.9 à 1 mg.L<sup>-1</sup>). Les eaux de la source Rivière du Mât

et de la source de la Ravine Fouquet contiennent également de fortes teneurs en sulfates, respectivement  $170 \text{ mg.L}^{-1}$  et  $38 \text{ mg.L}^{-1}$ . La source de l'îlet de la Mare d'Affouches, les sources pétrifiantes de la ravine Bachelier et de la ravine Grand Sable présentent des eaux moins minéralisées que les précédentes. La source de l'îlet de la Mare d'Affouches présente également un enrichissement en potassium ( $10.1 \text{ mg.L}^{-1}$ ), en fluor ( $1.55 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et en sulfates ( $56 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

D'après les campagnes de Grunberger (1989), les eaux du cirque de Salazie sont très peu sulfatées (de la limite de quantification à  $3.5 \text{ mg.L}^{-1}$ ) à l'exception du secteur de Roche Plate ( $17.5 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et de la roche Jacquot et au voisinage du village de Salazie ( $7 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Moulin et Lebon (2002) citent des concentrations élevées en sulfates ( $44 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pour la source du Bras des Fleurs Jaunes (12275X0016/HY), il s'agit d'une source de fond de cirque présentant parfois des traces d'activités anthropiques.

Il n'existe pas de données sur les éléments traces dans les eaux de Salazie, on note cependant que Rocher (1988) a effectué des analyses sur des dépôts de carbonates prélevés au niveau des émergences thermales actuelles. Ces analyses ont révélé la présence de nickel (jusqu'à  $177 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), de chrome ( $231 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), de cuivre (jusqu'à  $50 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), de zinc (jusqu'à  $130 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), d'arsenic (jusqu'à  $32 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), de baryum (jusqu'à  $409 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) et de plomb (jusqu'à  $28 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). La présence de ces éléments est en accord avec la composition des roches de la Réunion. Le chrome, le nickel, le cuivre et le zinc ont également été caractérisés dans les sols (Doelsch et al. 2006a) et sont naturellement présents dans les roches volcaniques basiques et ultrabasiques (Selinus et al. 2005). L'arsenic est associé à la pyrite qui a été observée dans des dépôts hydrothermaux du massif du Piton des neiges et notamment dans le cirque de Salazie (Rançon 1985, Demange et al. 1989). Le plomb et le baryum auquel il peut se substituer sont présents dans les feldspaths et les micas. (Wedepohl et al. 1974).

La source de Bras Cabot, témoin de l'activité thermo-minérale au sein du cirque des Marsouins, présente des eaux encore plus minéralisées que celles du cirque de Salazie (jusqu'à  $170 \text{ mg.L}^{-1}$  en calcium ;  $346 \text{ mg.L}^{-1}$  en magnésium,  $17 \text{ mg.L}^{-1}$  en potassium). D'après Lopoukhine et Stieljes (1978) ces eaux sont également riches en fer ( $1.6 \text{ mg.L}^{-1}$ ), en fluor ( $720 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et en bicarbonates ( $2769 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3$ ).

### ***b) Délimitation des zones à risque***

Les concentrations en calcium et magnésium considérées dans cette étude sont relativement faibles. Les roches volcaniques libèrent du calcium et du magnésium mais en faible quantité. Des concentrations élevées en calcium et magnésium sont cependant observées pour les eaux thermo-minérales du cirque de Salazie et des Marsouins et au niveau des eaux sous influence marine.

Sur la côte est de la Réunion, l'influence d'intrusions salines n'a jamais été signalée à l'exception d'une suspicion pour le forage F2 Gillot (12271X0058/F2, Sainte-Marie) Frissant et al. (2005b). Ce forage présente des concentrations élevées en sodium ( $98 \text{ mg.L}^{-1}$ ), en chlorures ( $446 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et en sulfates ( $60 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Ainsi une **zone à risque de fond géochimique faible en chlorures et en sodium** est attribuée aux aquifères alluviaux (rivière des Pluies et Rivière du Mât).

Comme pour l'ensemble des eaux souterraines de l'île, les concentrations en **silice** sont très élevées avec des concentrations comprises entre 23 mg.L<sup>-1</sup> (Carreau Coton, 12271X0050/F5, Sainte Marie) et 74 mg.L<sup>-1</sup> (Trinité, 12264X0265/FORAGE, Saint Denis). Ainsi **une zone à risque de fond géochimique élevé en silice** est attribuée à l'ensemble des aquifères avec **un niveau de confiance élevé**.

On note également un enrichissement des eaux en **potassium** avec des teneurs supérieures à la concentration moyenne des eaux drainant des roches volcaniques (1.3 mg.L<sup>-1</sup>, Meybeck, 1984) sans pour autant dépasser le seuil de qualité (12 mg.L<sup>-1</sup>). Cet enrichissement est observé à l'échelle de l'île de La Réunion, notamment là où les eaux sont en contact avec des formations volcanique de la série différenciée. Ces séries sont plus alcalines et libèrent donc plus de potassium (Hoareau et al. 2005). A l'inverse, les émergences drainant l'aquifère perché dans le secteur de la Roche Ecrite et de la rivière du Mât, drainant des formations volcaniques de la série des Océanites sont moins potassiques et présentent des concentrations inférieures au seuil défini par Meybeck (1984). Ainsi une zone à risque de fond géochimique faible en potassium est attribuée aux eaux drainant les formations volcaniques de la série différenciée (Cirque de Salazie, Planèzes et aquifères littoraux).

Pour l'**aluminium**, les concentrations sont inférieures au seuil de qualité (200 µg.L<sup>-1</sup>), l'ensemble des points d'eau présente des concentrations majoritairement comprises entre 70 et 80 µg.L<sup>-1</sup> à l'exception des forages Ilet Quinquina (12271X0049/F4) et Rivière des Pluies (1271X0015) pour lesquels la concentration atteint ponctuellement 150 µg.L<sup>-1</sup>. On attribue donc aux aquifères des planèzes, une zone à risque de fond géochimique faible pour l'aluminium.

Pour le **fer**, un certain nombre de points d'eau dépassent le seuil de qualité (200 µg.L<sup>-1</sup>). Les points sont répartis sur les planèzes est (série différenciée du Piton des Neiges), dans le cirque de Salazie (260 µg.L<sup>-1</sup>, Source Mare à Goyave) et en plaine alluviale pour les forages F2 Gillot (12271X0058/F2, Sainte Marie) et Harmonie (45577X0102, Saint Benoit). Pour le **manganèse** la source Mare à Goyave présente également des teneurs supérieurs à la limite de qualité et atteignant (200 µg.L<sup>-1</sup>).

Compte-tenu du comportement du fer dans les eaux souterraines (voir page 51), on attribue donc **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer** avec **un niveau de confiance élevé**.

Le manganèse est souvent présent dans les minéraux conjointement au fer (Hem et al. 1985). Le nombre d'occurrences est limité, cependant, lorsqu'il s'exprime dans les eaux les concentrations sont supérieures au seuil de qualité. Ainsi, on définit **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le manganèse** avec **un niveau de confiance moyen** car compte-tenu du nombre limité d'occurrences, il est difficile d'en définir l'emprise spatiale.

Les teneurs en **nickel**, **sélénium** et **antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification sur tout le secteur.

Dans le secteur de Saint André les forages de Terre Rouge 1 (12272X0050/F2-BIS) et de Sainte Vivienne (12272X0051/F1-BIS) présentent des traces de **zinc** (3 à 7  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ce secteur est peu affecté par une contamination en nitrates cependant il est concerné par la culture de la canne. Il n'est donc pas possible de confirmer une origine naturelle de cet élément bien qu'il soit présent dans les roches et de nature mobile. Malgré cela, du zinc est observé dans les sources du cirque de Salazie (19  $\mu\text{g.L}^{-1}$  source des Trois Cascades et 9  $\mu\text{g.L}^{-1}$  source Mare à Goyave). Ainsi compte-tenu du contexte général de l'île et de son occurrence dans le cirque de Salazie on attribue une zone à risque de fond géochimique faible pour le zinc.

Le forage carreau coton Sainte-Marie (12271X0050/F5) présente également des traces de **chrome** (3  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cette occurrence ponctuelle spatialement et temporellement ne permet pas de conclure sur le fond géochimique pour cet élément.

Le forage Les Cafés (12271X0065/F, Sainte-Marie) localisé également dans les formations détritiques (tufs) présente des traces de **plomb** (jusqu'à 4  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de zinc (38  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Le forage la Découverte (12271X0052/F2) recoupant également ces tufs, contient également des traces de plomb en solution (jusqu'à 5  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cependant compte-tenu du contexte anthropique, il n'est donc pas possible de confirmer une origine naturelle de cet élément bien qu'il soit présent dans les roches. Cet élément est cependant peu mobile, une mobilisation d'origine naturelle serait à envisager sous forme particulière. De plus le plomb est présent à l'état de trace dans les minéraux de type micas, amphibole, feldspath dans lesquels il se substitue au potassium, au baryum ou au strontium (Wedepohl, 1970).

Le secteur de Bagatelle présente trois forages suivis dans le cadre de la surveillance des Installations Classées localisés à proximité du forage des Trois Frères (12272X0072/F) suivi par la DRASS. Ces forages dont les eaux contiennent des traces de **cadmium** (jusqu'à 2.9  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), de **chrome** (jusqu'à 27  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), de **mercure** (0.1  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), de **plomb** (jusqu'à 4  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), de **zinc** (jusqu'à 360  $\text{mg.L}^{-1}$ ) et de **cuivre** (20  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). La présence entre autres de cadmium et de mercure dans les eaux souterraines de ce secteur indique clairement une origine anthropique des métaux. Le forage des Trois Frères (12272X0072/F) présente des traces en ces métaux (plomb, zinc, chrome) et les teneurs en **arsenic** atteignent la limite de qualité (10  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Bien que certains éléments comme le zinc ou l'arsenic puissent avoir une origine naturelle, il n'est pas possible de les discriminer.

### 4.3.2 Les eaux de surface

Le réseau hydrographique de ce domaine regroupe les ravines et rivières qui drainent les versants nord intermédiaires, les versants au vent et le cirque de Salazie. Les principaux cours d'eau surveillés sont la rivière Saint-Denis, la rivière des Pluies, la rivière Sainte-Suzanne, la rivière du Mât, la rivière des Roches et la rivière des Marsouins.

#### *a) Synthèse bibliographique*

Pas de données dans la littérature sur la présence d'éléments traces dans les eaux de surface.

#### *b) Délimitation des zones à risque*

Pour les cations (Ca, Mg, Na, K) et la silice, les concentrations observées dans les eaux de surface des ravines des planèzes du nord et de l'est appartiennent à la gamme des concentrations moyennes proposées par Meybeck (1984) pour des eaux drainant des roches volcaniques. Du fait des fortes précipitations sur ces versants, les eaux sont légèrement moins minéralisées que celles drainant les versants ouest. Les eaux de la rivière des Pluies, de la rivière Saint Denis et de la rivière du Mât sont cependant minéralisées avec des concentrations en éléments majeurs supérieures aux valeurs proposées par Meybeck (1984). Les formations volcaniques libèrent ces éléments en quantités supérieures aux autres roches silicatées mais ces teneurs restent faibles comparées aux quantités libérées dans les eaux de surface sur d'autres îles volcaniques telles que la Guadeloupe et la Martinique (Rad et al. 2007).

Les concentrations en **manganèse**, en **fer** et en **aluminium** dans les eaux de surface dépassent les limites et références de qualité respectives en différents points de surveillance répartis sur l'ensemble des versants nord et est. Par exemple on note jusqu'à 600  $\mu\text{g.L}^{-1}$  en aluminium pour les eaux de la rivière des Roches, 230  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière des Pluies et du Mât., 270  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière sainte Suzanne. Pour le fer, on enregistre jusqu'à 2380  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière des Pluies, 1042  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de Bras Canot, 340  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière du Mât, 870  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière sainte Suzanne. Pour le manganèse, on note jusqu'à 200  $\mu\text{g.L}^{-1}$  pour le Bras des Lianes ; Grand Bras ; rivière Saint Denis.

Les teneurs en fer, en manganèse et en aluminium se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et le temps avec des dépassements qui correspondent à des pics brutaux. Ces produits sont issus de l'altération pédoclimatique et/ou hydrothermale du substratum volcanique et sont facilement mobilisables (voir page 54). Ainsi, on attribue une **zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer, le manganèse et l'aluminium avec un niveau de confiance élevé**.

Les teneurs en **cadmium et antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification qui parfois sont trop élevés ou indéterminées pour qualifier un niveau de fond géochimique.

On note la présence d'**arsenic** dans les eaux de surface sur plusieurs stations dispersées sur l'ensemble des versants étudiés parfois supérieures à la limite de qualité ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ainsi, on note des teneurs atteignant  $7 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la rivière Saint Denis et  $8 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de la DRASS de Bras Maho. On note également jusqu'à  $16 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour le Bras Douyere dans le secteur de Sainte Suzanne,  $7 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station des Citronniers pour la rivière du Mât médian, et jusqu'à  $18 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station Grand Bras à l'amont de la rivière des Roches. Autant certaines stations sont localisées sur des secteurs agricoles, autant d'autres sont à l'amont suggérant une origine naturelle de cet élément qui est souvent associé au fer sous forme de sulfures ou d'oxydes (ilménite, magnétite). Cependant-compte tenu du nombre limité de données et d'occurrences il est difficile de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique.

Pour le **plomb**, plusieurs secteurs présentent des occurrences en cet élément. On note 2 à  $4 \mu\text{g.L}^{-1}$  de plomb dans les eaux de surface des ravines de la planèze est (Sainte-Marie),  $6 \mu\text{g.L}^{-1}$  dans les eaux de la rivière Saint Denis. Cependant-compte tenu du nombre limité de données et d'occurrences il est difficile de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique.

Dans le cirque de Salazie, les eaux présentent également du plomb, jusqu'à  $6 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station Mathurin dans le secteur de la Mare à Martin, et jusqu'à  $9 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de la ravine des Merles en amont de la rivière des Fleurs Jaunes, dans le secteur le Grand Sable. Le cirque de Salazie est sujet à des remontées d'eaux hydrothermales qui peuvent contenir des éléments traces, tels que décrit par Rocher (1988). En effet, l'auteur a analysé des dépôts associés aux émergences (froides et chaudes) et il a quantifié de  $10 \text{mg.kg}^{-1}$  (pour la source froide) à  $\text{mg.kg}^{-1}$  en plomb dans ces dépôts carbonatés principalement composés de calcite. Cependant-compte tenu du nombre limité de données et d'occurrences il est difficile de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique. Du fait du contexte hydrothermal du cirque de Salazie, on attribue à défaut une zone à risque de fond géochimique faible pour cet élément.

La présence de **nickel** sur deux stations, sur le captage de la rivière des Pluies suivi par la DRASS une concentration élevée de  $71 \mu\text{g.L}^{-1}$  supérieure à la limite de qualité ( $20 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) est enregistrée. Sur la rivière Saint Denis, la concentration maximale atteint  $6 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Ces deux occurrences ponctuelles appartenant à des gammes différentes ne permettent de conclure sur le fond géochimique. D'autant plus que la rivière des Pluies est fortement perturbée par les activités anthropiques.

Pour le **chrome**, on note la présence de cet élément dans les eaux de la rivière Saint Denis ( $6 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), de la rivière des Pluies ( $11 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), du Bras Douyere ( $17 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de la rivière du Mât ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) avec des concentrations inférieures à la limite de qualité ( $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cet élément pourrait avoir une origine naturelle, en effet les océanites sont riches en chrome et les sols de La Réunion sont enrichis naturellement (Doelsch et al. 2006a, Laperche et al. 2008). Dans les sols de La Réunion, le chrome est présent sous

forme de chromite, associé aux oxydes de fer et également complexé avec la matière organique (Doelsch et al. 2006c). Aussi les eaux de surface sont susceptibles de drainer cet élément sous forme particulaire. On attribue donc un risque de fond géochimique faible.

On note également, la présence ponctuelle de **sélénium** ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) sur la station Les Citronniers de la rivière du Mât. Cette occurrence est associée à celle de l'arsenic, ces deux éléments peuvent effectivement être associés tant en contexte naturel lorsqu'ils sont associés aux sulfures qu'aux produits phytosanitaires et aux engrais (engrais sélénés).

Pour la majeure partie des points de surveillance sur les eaux de surface des versants nord et est, on note la présence de **zinc** et de **cuivre** atteignant  $23 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour les deux éléments. On note également quelques valeurs exceptionnellement élevées pour le zinc atteignant  $164 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station Bras des Merles (Saint Denis),  $47 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour le Bras Douyere (Sainte Suzanne),  $51 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de la ravine Charpentier (Sainte Marie). Ces deux éléments sont présents dans les sols et les roches de La Réunion (Laperche et al. 2008 ; Doelsch et al. 2006a) mais ils sont également associés aux épandages de lisiers et à la culture de la canne. Compte-tenu de la large distribution de ces deux éléments dans les eaux de surface tant en amont qu'en aval, on attribue un risque de fond géochimique faible.

On souligne également la présence ponctuelle de **bore** ( $212 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) dans les eaux de la station Laverdure (Saint Denis). Ceci traduit probablement une contamination anthropique ponctuelle. En effet, bien que cet élément puisse être présent naturellement dans les eaux, une grande variabilité vers des teneurs fortes n'exclut pas une pollution (lessives, engrais). Le bore peut, en effet, avoir une origine marine ou géologique. Cet élément est entre autre associé aux roches magmatiques, le bore se substituant au silicium notamment dans les micas, les amphiboles.

#### **4.4 PLAINE DES PALMISTES ET MASSIF DU PITON DE LA FOURNAISE**

La planèze de la Plaine des Palmistes correspond à la zone de transition entre les massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise.

On note la présence d'un cône alluvial au débouché de la rivière de l'Est, il existerait également un ancien cône de déjection avec des intercalations d'alluvions anciennes et de coulées de laves.

Le massif de la Fournaise est subdivisé en plusieurs secteurs, la planèze de St Rose, l'Enclos du Volcan et la planèze Sud entaillée par deux rivières pérennes, la Rivière Langevin et la rivière des Remparts. Cette dernière est guidée par les limites d'effondrements de la partie Est du massif du Piton de la Fournaise.

Il y a trois nappes stratégiques : la nappe de la rivière de l'Est, la nappe du domaine aquifère du massif de la Fournaise et la nappe de la plaine des Palmistes. L'aquifère principal de la plaine des Palmistes est localisé dans une vaste paléo-vallée.

Les travaux de Frissant et al. (2006); Billard (1974) et Hoareau et al. (2005) ont permis de décrire les minéraux et éléments associés aux principales lithologies rencontrées sur les flancs est du Piton de la Fournaise et de la plaine des Palmistes (Tableau 16).

Une analyse prédictive des éléments majeurs et traces susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines est proposée dans le Tableau 17.

Secteurs Aquifères	Lithologie	Série magmatique	Principaux minéraux	Eléments présents	Références
Plaine des Palmistes	Alluvions anciennes		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si, Al	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
	Coulées basaltiques	Série des océanites PF (Phase actuelle)	Olivines, plagioclases, clinopyroxènes, oxydes Fe-Mn	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si	Billard 1974
	Coulées basaltiques et scories	Série des océanites PF (Phase II et III)	Olivines, plagioclases, clinopyroxènes, oxydes Fe-Mn	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si	Billard 1974
	Coulées différenciées	Série alcaline Anté-Fournaise	Feldspaths, pyroxènes, olivines	Ca, Na, K, Fe, Mn, Mg, Si	Billard 1974
Massif du Piton de la Fournaise (Planèze de St- Rose, L'Enclos du Volcan, Planèze Sud)	Coulées et bancs scoriacées	Série des océanites PF (Phases IV et V)	Olivine, plagioclases, clinopyroxènes, oxydes Fe-Mn	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
Les remparts	Coulées volcaniques et scories/cendres	Série différenciée Anté-Fournaise	Feldspaths alcalins, plagioclases, pyroxènes, olivines	Ca, Na, K, Fe, Mn, Mg, Si	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
		Série des océanites PN et PF (phase III)	Olivines, plagioclases, clinopyroxènes, oxydes Fe-Mn	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si	
Nappe littorale (St Philippe)	Coulées basaltiques	Série des océanites PF (Phases III et IV)	Olivines, plagioclases, pyroxènes, oxydes Fe-Mn	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974
Nappe littorale (St Joseph)	Alluvions récentes		Olivines, plagioclases, pyroxènes, oxydes Fe-Mn	Ca, Na, K, Fe, Mn, Mg, Si, Al	Frissant et al. 2006 ; Billard 1974

Tableau 16 : Lithologie et principaux éléments associés à la plaine des Palmistes et au massif du Piton de la Fournaise (PF : Piton de la Fournaise ; PN : Piton des Neiges)



Secteurs Aquifères	Intrusion saline	Faciès	Eléments traces susceptibles d'être présents
			Déduits de l'analyse prédictive
Plaine des Palmistes	Eloigné de la côte	Magnésocalcique	Fe, Mn
Massif du Piton de la Fournaise (Planèze de St-Rose, L'Enclos du Volcan, Planèze Sud)	Domaine d'altitude	Magnésocalcique	Fe, Mn
Les remparts	Domaine d'altitude	Magnésocalcique	Fe, Mn
Nappe littorale de la côte Sud (St Philippe à St Pierre)	Préoccupant	Magnésosodique	Fe, Mn, B, F
Nappe littorale de la côte est (St Benoit à St Rose)	Préoccupant	Magnésocalcique	Fe, Mn, B, F

Tableau 17 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères du massif du Piton de la Fournaise et de la plaine des Palmistes

#### 4.4.1 Les eaux souterraines

##### a) Synthèse bibliographique

Pas de données dans la littérature sur la présence d'éléments traces dans les eaux souterraines du secteur considéré.

##### b) Délimitation des zones à risque

Ce domaine présente très peu de points de surveillance, notamment dans la plaine des Palmistes, les données sur les émergences sont également plus restreintes.

L'étude statistique des données montre que les eaux de ce secteur sont peu minéralisées avec des teneurs en calcium, en magnésium et en sodium inférieures à 12 mg.L<sup>-1</sup>. Les teneurs en chlorures sont inférieures à 8 mg.L<sup>-1</sup> pour la cote est et à 14 mg.L<sup>-1</sup> pour la côte sud dans le secteur de Saint-Joseph. Ainsi, les concentrations en calcium, en magnésium et en sodium considérées dans cette étude sont relativement faibles. Les roches volcaniques libèrent du calcium, du magnésium et du sodium mais en faible quantité. Des concentrations plus élevées sont cependant observées pour les eaux sous influence marine.

Seul le secteur des puits du Baril (12297X0013/PUITS) et des Anglais (12297X0016/HY) présente une minéralisation plus forte en magnésium (21.3 mg.L<sup>-1</sup>), sodium (80 mg.L<sup>-1</sup>), chlorures (105 à 164 mg.L<sup>-1</sup>) et potassium (8 mg.L<sup>-1</sup>). Cette minéralisation traduit une influence locale des eaux marines dans ce secteur. Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé en chlorures, sodium et sulfates** est attribuée localement. Ce risque est attribué avec un **niveau de confiance élevé**. Dans

ce secteur on s'attend également à un enrichissement en **magnésium, bore et fluor** qui sont également associés aux intrusions salines.

Les teneurs en **silice** sont élevées sur tout le domaine, lié à la nature volcanique des roches, les concentrations mesurées sur les différents points d'eau sont comprises entre 31 mg.L<sup>-1</sup> (Forage Chemin Severe, 12277X0053/F, Saint Benoit) et 52.6 mg.L<sup>-1</sup> (Forage 12297X0018/F, Saint Philippe). Ainsi **une zone à risque de fond géochimique élevé en silice** a été identifiée avec **un niveau de confiance élevé**.

On note également un enrichissement des eaux en **potassium** avec des concentrations supérieures à la concentration moyenne des eaux drainant des roches volcaniques (1.3 mg.L<sup>-1</sup>, Meybeck, 1984) sans pour autant dépasser le seuil de qualité (12 mg.L<sup>-1</sup>). La dispersion des points ne permet pas de délimiter ce fond géochimique. Les émergences drainant l'îlet Patience, aquifère perché dans le secteur de la Roche écrite et de la rivière du Mât, drainant des formations volcaniques de la série des Océanites sont moins potassiques et présentent des concentrations inférieures au seuil défini par Meybeck (1984). Les eaux des émergences de la rivière des Remparts drainant les séries différenciées anté-Fournaise, sont également plus potassiques. Ainsi une zone à risque de fond géochimique faible en potassium est attribuée aux eaux drainant les formations volcaniques de la rivière des Remparts ainsi que les planèzes du massif du Piton de la Fournaise.

La source de Bonne Espérance (12278X0002/HY, Sainte Rose) présente des eaux concentrées en **manganèse** et **aluminium** atteignant 180 µg.L<sup>-1</sup> pour ces deux éléments. On trouve également du manganèse dans les eaux des sources Toinette (200 µg.L<sup>-1</sup>, 12278X0001/HY, Saint Benoit) et Les trois Sources (250 µg.L<sup>-1</sup>, 12296X0013/HY, Saint Joseph). Pour ce domaine, peu d'analyses sur le fer sont disponibles. Les eaux des sources Reilhac (12292X0002/HY), Anse Cascade (12294X0003/HY) les eaux du puits Lebon (12296X0048/F, Saint Joseph) présentent une concentration ponctuellement élevée de **fer**, le reste du suivi montre des teneurs comprises entre 10 et 100 µg.L<sup>-1</sup>.

Compte-tenu du nombre limité d'analyses pour le fer, le manganèse et l'aluminium, il est difficile de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique. Le contexte lithologique confirme la présence de ces éléments mais le caractère récent des formations volcaniques limite l'altération qui est un facteur favorable à leur mobilisation. Ainsi, il est difficile de prévoir si dans le domaine aquifère du massif de la Fournaise ces éléments sont susceptibles d'être mobiles ou non bien que présents.

Le long des remparts on peut s'attendre à une origine naturelle du fer et du manganèse liée à la présence des séries différenciées anté-Fournaise ou aux formations alluviales des Remparts.

Ainsi, on attribue au domaine **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer et manganèse** avec **un niveau de confiance moyen** compte tenu du nombre limité d'analyses et de l'emprise spatiale mal définie.

Pour les éléments traces : **arsenic**, **cadmium**, **chrome**, **mercure**, **baryum**, **antimoine**, les teneurs sont inférieures aux seuils de quantification respectifs. On note cependant, ponctuellement la présence de certains éléments traces mais avec des teneurs inférieures aux limites de qualité.

Sur le forage « Basse vallée les Hauts » (12297X0018/F, Saint Philippe), on note la présence ponctuelle de traces de **nickel** ( $4 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de **cuivre** ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) sur un échantillon analysé. Cette occurrence ponctuelle ne permet pas de conclure sur un fond géochimique. Ce forage présente également des eaux pour lesquelles la présence de **bore** est régulière atteignant ponctuellement  $66 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Le bore, non associé à des chlorures ( $7.5 \text{mg.L}^{-1}$ ), serait donc d'origine anthropique plutôt que marine. Les rejets de bore dus aux activités humaines demeurent fortement liés aux rejets d'eaux usées, notamment domestiques car les détergents contiennent du borate de sodium. L'origine anthropique est confirmée par la présence d'orthophosphates en ( $0.2 \text{mg.L}^{-1}$ ) associés au bore.

Des traces de **cuivre** sont également observées à la source Anse Cascade ( $12 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et dans les eaux de la source Cazala ( $7 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12296X0005/HY-1).

On note malgré tout que plusieurs points d'eau du domaine présentent des traces de **zinc** entre 3 à  $9 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Cet élément, présent dans les roches mafiques et facilement mobile dans les eaux, il a ainsi probablement une origine naturelle lorsqu'il est présent en faible concentration. On est également en zone agricole (cane à sucre), une origine anthropique est à envisager bien que les teneurs en nitrates, lorsqu'elles existent, soient faibles (inférieures à  $2 \text{mg.L}^{-1}$ ). Les teneurs en zinc peuvent atteindre  $19 \mu\text{g.L}^{-1}$  dans le secteur des Remparts (Puits Delbon 1, 12296X0068/F3, Saint Joseph) et  $40 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour les eaux de la source Reilhac (12292X0002/HY, le Tampon). Cette source présente également des eaux contenant des traces de **plomb** ( $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Seulement deux analyses sont disponibles sur ce point d'eau, ainsi il n'est pas possible de conclure sur le fond géochimique pour cet élément.

Du fait de la large dispersion des points contenant des traces de **cuivre** et de **zinc** et en tenant compte du comportement des ces deux éléments dans les eaux (voir page 53), on attribue une zone à risque de fond géochimique faible pour cet élément.

Dans le secteur de Saint Joseph, le puits Lebon (12296X0048/F) présente un prélèvement avec une concentration en **sélénium** supérieure à la limite de qualité ( $18 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cette occurrence ponctuelle ne permet pas de conclure sur un fond géochimique particulier. De plus, ce puits est concerné par une contamination en pesticides (DIREN Réunion, 2005).

#### 4.4.2 Les eaux de surface

Le réseau hydrographique de ce domaine regroupe la ravine sèche et la rivière de l'est qui drainent les versants au vent et la rivière des Remparts et la rivière Langevin qui drainent les versants sud du piton de la Fournaise.

### **a) Synthèse bibliographique**

Dans la littérature on trouvera les travaux de Rad et al. (2007) pour lesquels plusieurs analyses sur les éléments majeurs ont été réalisées sur des échantillons prélevés rivière des Remparts, rivière Langevin et rivière de l'Est. Pour ces rivières les concentrations en sodium sont comprises entre 4 et 7.6 mg.L<sup>-1</sup>, pour le magnésium entre 2.7 et 4 mg.L<sup>-1</sup>, pour le potassium entre 1.2 et 2.2 mg.L<sup>-1</sup> et le calcium entre 3.7 et 6.6 mg.L<sup>-1</sup>. Les teneurs en HCO<sub>3</sub> sont comprises entre 48 et 51 mg.L<sup>-1</sup>. Cette étude conclut que sur un taux d'altération par les eaux de surface et de subsurface pour le massif du piton de la Fournaise comparable au taux déterminé pour le massif de la Soufrière (Guadeloupe) mais largement inférieur au taux calculé pour la Montagne Pelée (Martinique).

### **b) Délimitation des zones à risque**

Pour les cations (Mg, Na, K) et la silice, les concentrations observées dans les eaux de surface sont supérieures aux concentrations moyennes proposées par Meybeck (1984) pour des eaux drainant des roches volcaniques. Pour le calcium les concentrations sont comparables aux valeurs proposées par Meybeck (1984). Les formations volcaniques libèrent ces éléments en quantités supérieures aux autres roches silicatées mais ces teneurs restent faibles comparées aux quantités libérées dans les eaux de surface sur d'autres îles volcaniques telles que la Guadeloupe et la Martinique (Rad et al. 2007).

Les concentrations en **manganèse**, en **fer** et en **aluminium** dans les eaux de surface dépassent ponctuellement les limites et références de qualité respectives en différents points de surveillance répartis sur l'ensemble des versants nord et est.

Les teneurs en fer, en manganèse et en aluminium se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et le temps avec des dépassements qui correspondent à des pics brutaux. Ces produits sont issus de l'altération pédoclimatique et/ou hydrothermale du substratum volcanique et sont facilement mobilisables (voir page 54). Compte-tenu du contexte global de La Réunion, on attribue une **zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer, le manganèse et l'aluminium avec un niveau de confiance moyen** car l'emprise spatiale est mal définie du fait du nombre limité d'analyses.

Les teneurs en **chrome**, **cadmium**, **mercure**, **sélénium**, et **antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification qui parfois sont trop élevés ou indéterminées pour qualifier un niveau de fond géochimique.

Dans le secteur sud du Tampon, les eaux de la station Argamasse contiennent ponctuellement jusqu'à 8 µg.L<sup>-1</sup> d'**arsenic** et 4 µg.L<sup>-1</sup> de **plomb**. Cette occurrence localisée ne permet pas de conclure sur le niveau de risque de fond géochimique compte tenu du nombre limité de données. Cependant, ces deux éléments sont également observés dans les secteurs voisins, de l'arsenic à Petite-Ile et du plomb dans le secteur du Bras de la Plaine.

On note la présence de **cuivre** dans les eaux de Ravine Sèche ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de la rivière de l'Est ( $7 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) ainsi qu'à la station Argamasse ( $11 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) suivie par la DRASS. Du **zinc** est également rencontré dans les eaux de surface de la rivière de l'Est (jusqu'à  $12 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), à l'amont de la rivière Langevin ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) à la station Grand Galets suivie par la DRASS. Ces deux éléments sont présents naturellement dans les formations volcaniques et les sols de la Réunion (Doelsch et al. 2006a). Les valeurs observées restent dans les gammes rencontrées sur l'ensemble des eaux de surface de La Réunion avec un risque de fond géochimique faible. On distingue également deux stations avec des teneurs maximales exceptionnelles ( $2440 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) à la station Argamasse et  $455 \mu\text{g.L}^{-1}$  à la station Vallée de ravine Sèche. Ces valeurs sont exceptionnelles et ne permettent pas de conclure sur un risque de fond géochimique élevé.

#### **4.5 CILAOS – SAINT PIERRE – LE TAMPON**

Ce domaine regroupe la planèze de Petite-île située sur le flanc sud du massif du Piton de la Fournaise, la plaine de Pierrefonds, la planèze du Tampon sur le flanc ouest du massif du Piton de la Fournaise et la plaine des Cafres qui, dans le prolongement de la plaine des Palmistes, marque l'alignement correspondant à la zone d'ensellement des deux massifs volcaniques. Ce secteur regroupe également le Cirque de Cilaos drainé par le Bras de Cilaos et l'Entre-Deux, situé sur le flanc est du massif du Piton des Neiges, drainé par le Bras de la Plaine.

Ce secteur comprend la rivière pérenne de St-Etienne accompagnée par la nappe alluviale et la nappe stratégique de Pierrefonds, localisée dans un système aquifère complexe contenu dans les formations volcaniques ou alluviales.

Les travaux de Billard (1974), Lacquement et al. (2005) et Frissant et al. (2006) ont permis de décrire les minéraux et éléments associés aux principales lithologies rencontrées sur les flancs sud et ouest du massif du Piton de la Fournaise, de Cilaos et de la plaine des Cafres (Tableau 18).

Les caractéristiques des eaux thermales rencontrées dans le cirque de Cilaos sont présentées dans le Tableau 19.

Une analyse prédictive des éléments majeurs et traces susceptibles d'être présents dans les eaux souterraines est proposée dans le Tableau 20.

Secteurs Aquifères	Lithologie	Série magmatique	Principaux minéraux	Eléments présents	références
Planèze sud (Petite-Ile)	Coulées volcaniques	Série des océanites PF (phases III et IV)	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg, Ca, Na	Billard 1974, Frissant et al. 2006
Plaine de Pierrefonds (Rivière St Etienne)	Alluvions anciennes et récentes		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite, argiles	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si, Al	Billard 1974, Frissant et al. 2006
Plaine des Cafres-Tampon (Partie occidentale)	Coulées basaltiques, brèches et scories	Série des océanites PN (phases I et II)	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg, Ca, Na	Billard 1974, Frissant et al. 2006
Plaine des Cafres-Tampon (Partie orientale)	Coulées volcaniques et scories	Série des océanites PF (phases III et IV)	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg, Ca, Na	Billard 1974, Frissant et al. 2006
Tufs de St Pierre	Tufs, basaltes et alluvions	Phase terminale PN	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite, argiles	Fe, Mn, Mg, Ca, Na	Billard 1974, Frissant et al. 2006
Planèze de l'Entre-Deux	Coulées de basaltes et scories (dykes et sills)	Série des océanites PN	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite	Fe, Mn, Mg, Ca, Na	Billard 1974, Frissant et al. 2006
		Série différenciée PN	plagioclases, clinopyroxènes, magnétite, olivine	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn	
Cirque de Cilaos	Alluvions		olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite, argiles	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si, Al	Billard 1974, Lacquement 2005, Frissant et al. 2006
	Partie inférieure : Coulées basaltiques	Série des océanites PN	olivine, pyroxène, plagioclase, magnétite, zéolites, chlorites	Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Si, Al	
	Partie supérieure : Coulées différenciées et scories	Série différenciée PN	plagioclases, clinopyroxènes, magnétite, olivine	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn	
	brèches (gravitaires et pyroclastiques), coulées de débris et alluvions	Série différenciée PN	plagioclases, clinopyroxènes, magnétite, olivine	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn	
	Dyke et sills : complexe intrusif de Bras Rouge	Syénites, gabbros	Plagioclase, clinopyroxène, feldspaths alcalins, apatite, amphibole brune, olivine, ilménite	Ca, Na, K, Mg, Fe, Mn	

Tableau 18 : Lithologie et principaux éléments associés sur les flancs sud et ouest du massif du Piton de la Fournaise, du cirque de Cilaos et de la planèze Tampon.

Secteurs	Sources	Faciès hydrochimique des eaux	Eléments associés	Minéralisations associées	
Cirque de Cilaos	Therms de Cilaos (Bras Rouge)	Faciès majoritairement bicarbonaté-calcique	CO <sub>2</sub> , Fe	Carbonates, sulfates, argiles, oxyde de fer	Frissant et al. 2003 ; Rocher 1988, Lacquement et al. 2005
	Source Aval sentier du Taïbit	Excès d'alcalins et de chlorures (26 mg/l)	SO <sub>4</sub>		Rocher 1988, Lopoukhine et Stieltjes 1978
	Source Bras Benjoin	Magnésio-calcique sulfatées	Fe, SO <sub>4</sub>		Lopoukhine et Stieltjes 1978

Tableau 19 : Caractéristiques hydrochimiques et éléments associés aux sources thermales du cirque de Cilaos.

Secteurs Aquifères	Intrusion saline	Faciès	Eléments traces susceptibles d'être présents	
			Déduits de l'analyse prédictive	Signalés dans la bibliographie
Nappes de Pierrefonds	Moins préoccupant	Magnésio-sodique		Na,Cl
Cirque de Cilaos	Domaine d'altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	Fe, Mn
Bras de la Plaine et Entre Deux	Domaine d'altitude	Mixte	Fe, Mn	
Planèze Tampon	Domaine d'altitude	Magnésio-calcique	Fe, Mn	

Tableau 20 : Analyse prédictive des occurrences en éléments majeurs et traces dans les eaux des aquifères localisés sur les flancs sud et ouest du massif du Piton de la Fournaise, du cirque de Cilaos et de la planèze Tampon.

#### 4.5.1 Les eaux souterraines

##### a) Synthèse bibliographique

Le cirque de Cilaos présente des eaux thermo-minérales qui émergent au niveau des dykes et des cours d'eau dans le secteur de Bras Rouge (Lacquement et al., 2005) et Bras Benjoin d'après Lopoukhine et Stieltjes (1978). Ces eaux, d'origine météorique, se sont infiltrées dans la partie sommitale du massif du Piton des Neiges. Au cours de leur circulation au sein du massif, probablement à la faveur des fissures et failles, les eaux ont acquis leur minéralisation (Lacquement et al. 2005). Le cirque présente également des émanations de gaz principalement composées de CO<sub>2</sub>.

Les eaux des thermes de Cilaos (Source Irénée) atteignent 284 mg.L<sup>-1</sup> en calcium, 150 mg.L<sup>-1</sup> en magnésium et 11.4 mg.L<sup>-1</sup> en potassium. Les eaux sont également très fortement concentrées en fer (8.1 mg.L<sup>-1</sup>) et en manganèse (800 µg.L<sup>-1</sup>) et contiennent de l'aluminium (100 µg.L<sup>-1</sup>). Lopoukhine et Stieltjes (1978) mesurent de fortes teneurs en sulfates (84 mg.L<sup>-1</sup>) et pas de fluor dans les eaux de la source Irénée. La source Véronique à proximité ainsi que la source du bras Benjoin présentent également des eaux très concentrées en fer et manganèse ainsi que de l'aluminium pour les eaux de la source Véronique pour laquelle des données sont disponibles (Lopoukhine et Stieltjes, 1978). Bien qu'aucune n'analyse des éléments traces dans les eaux ne soit disponible, Rocher (1988) a analysé un dépôt de calcite associé aux eaux thermales froides subactuelles. Il a ainsi pu quantifier la présence de traces de zinc (24 mg.kg<sup>-1</sup>); de strontium (386 mg.kg<sup>-1</sup>), de baryum (77 mg.kg<sup>-1</sup>), de plomb (25 mg.kg<sup>-1</sup>), de nickel (16 mg.kg<sup>-1</sup>) et de cuivre (11 mg.kg<sup>-1</sup>).

## **b) Délimitation des zones à risque**

Ce domaine dispose de peu de points de surveillance de la qualité des eaux. Ces points sont majoritairement localisés dans la plaine de Pierrefonds et Saint Pierre. Quelques données sont également disponibles pour le cirque de Cilaos et le secteur Bras de la plaine et Entre-Deux.

Ainsi, les concentrations en calcium, en magnésium et en sodium considérées dans ce secteur sont relativement faibles. Les roches volcaniques libèrent du calcium, du magnésium et du sodium mais en faible quantité (Hoareau et al. 2005). Des concentrations plus élevées sont cependant observées pour les eaux thermo-minérales du cirque de Cilaos et pour les eaux des aquifères sous influence marine.

Les eaux de l'aquifère de Pierrefonds ainsi que les eaux des aquifères côtiers (Saint Pierre et Petite-île) sont plus minéralisées que les eaux souterraines des planèzes. L'influence des intrusions marines est particulièrement visible au niveau de la source de Manapany (12296X0031/HY), de la source Grand Bois (122950034), de la source de Bassin Bleu (12288X0058/HY) et de la source Ravine Dabord (12288X0069/HY) pour lesquels les concentrations en **chlorures** sont comprises entre 210 et 415 mg.L<sup>-1</sup>. L'influence marine au niveau de la plaine de Pierrefonds est marquée au niveau de Saint Louis avec des teneurs en chlorures comprises entre 40 et 70 mg.L<sup>-1</sup> pour les forages COCO (12288X0062/PIB-6 ; 12288X0048/F6 ; 12288X0079/F1) et Palissade (12288X0075/F).

Ainsi une **zone à risque de fond géochimique élevé en chlorures, sodium et sulfates** est attribuée aux secteurs littoraux sensibles aux intrusions salines (Petite Ile, Pierrefonds, Saint Pierre). Ce risque est attribué avec un **niveau de confiance élevé**. Dans ces secteurs on s'attend également à un enrichissement en **magnésium, bore et fluor**.

Un excès en sulfates (32.5 mg.L<sup>-1</sup>) et calcium (28.4 mg.L<sup>-1</sup>), non associé à une influence marine est observé pour les eaux du forage des Aloes (12288X0032/3-8-F3, Saint Louis). Les eaux sont également plus carbonatées. A proximité, La source des Songes (12284X0056/HY) présente les mêmes caractéristiques avec des teneurs élevées en sulfates (38.7 mg.L<sup>-1</sup>) et en nitrates (24.8 mg.L<sup>-1</sup>), ainsi que du bore (112 µg.L<sup>-1</sup>). Le **bore** lorsqu'il n'est pas d'origine naturelle est un marqueur des eaux usées. Compte-tenu du fond géochimique en bore des eaux qui est faible, ce secteur semble soumis à des apports anthropiques.

Les eaux drainant les planèzes sont concentrées en **silice**, entre 24 et 70 mg.L<sup>-1</sup> et supérieures à la concentration moyenne (22.4 mg.L<sup>-1</sup>) des eaux drainant des formations volcaniques tel que défini par Meybeck (1984). Les eaux de la nappe alluviale, dans le secteur de Pierrefonds sont moins concentrées (24 à 28 mg.L<sup>-1</sup>) tandis que les plus concentrées concernent le forage de la Palissade et le forage COCO 1. Ainsi **une zone à risque de fond géochimique élevé en silice** a été identifiée avec un **niveau de confiance élevé**.



On note également un enrichissement des eaux en **potassium** avec des concentrations supérieures à la concentration moyenne des eaux drainant des roches volcaniques ( $1.3 \text{ mg.L}^{-1}$ , Meybeck, 1984) sans pour autant dépasser le seuil de qualité ( $12 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Cet enrichissement est observé notamment là où les eaux sont en contact avec des formations volcaniques de la série différenciée. Ces séries plus alcalines contiennent donc plus de potassium susceptible d'être libéré (Hoareau et al. 2005). Ainsi les eaux drainant le secteur oriental de la planèze du Tampon et celui de l'Entre Deux, formés par des basaltes non différenciés, sont peu potassiques. A l'inverse, les eaux du cirque de Cilaos et du Bras de Cilaos qui drainent les coulées différenciées du Piton des Neiges sont potassiques et présentent des concentrations supérieures au seuil défini par Meybeck (1984). Ainsi une zone à risque de fond géochimique faible en potassium est attribuée aux eaux drainant les formations volcaniques de la série différenciée.

Pour ce domaine, les teneurs en **fer** sont variables avec localement plusieurs points d'eau dont les teneurs sont supérieures à la référence de qualité ( $200 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Ainsi, les eaux de la source Hoareau (12296X0018/HY, Saint Joseph) présentent des teneurs en fer atteignant  $310 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ . Dans le secteur de l'Entre Deux, la source Armagasse (12284X0031/HY) présente des eaux atteignant  $520 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$  en fer, et dans le cirque de Cilaos, la source de la Gueule Rouge présente des eaux atteignant  $310 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ . Les eaux du forage Fredeline (12288X0088/F, Saint Pierre) contiennent du fer atteignant exceptionnellement une teneur de  $480 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Compte-tenu du comportement du fer dans les eaux souterraines (voir page 51), on attribue donc **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer avec un niveau de confiance élevé**.

Pour le **manganèse**, on note également le dépassement de la limite de qualité ( $50 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ) au niveau de la source de la ravine Charrier ( $200 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12295X0013/HY-2, Petite Ile) et dans le secteur de l'Entre Deux (source Samary, source des Hirondelles, source Bras Long). Le manganèse est souvent présent dans les minéraux conjointement au fer (Hem et al. 1985). Le nombre d'occurrences est limité cependant, lorsqu'il s'exprime dans les eaux les concentrations sont supérieures à la limite de qualité. On attribue **une zone à risque de fond géochimique élevé pour le manganèse**, compte tenu du nombre réduit d'analyses et de l'emprise spatiale mal définie, on attribue ce risque avec **un niveau de confiance moyen**.

Pour les éléments traces **cadmium, chrome, mercure, antimoine et sélénium** les teneurs sont inférieures aux seuils de quantification respectifs. On note ponctuellement la présence de certains éléments traces mais en concentrations inférieures aux limites de qualité.

Le forage COCO 1 présente des traces d'**arsenic** ( $7 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de plomb. Le forage COCO CGE présente dans les eaux du **nickel** (jusqu'à  $10 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ), du fer (jusqu'à  $460 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ), du **plomb** ( $5 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ), du **zinc** ( $15 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et des traces de **cuivre** ( $3 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Cependant les eaux de ces forages sont sous influence anthropique avec des teneurs en nitrates atteignant  $34.4 \text{ mg.L}^{-1}$  pour le forage COCO 1.

On trouve cependant des traces d'**arsenic** en plusieurs points d'eau, dans les eaux de la ravine Charrier ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), à la source Argamasse ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et la source Vierge ( $6 \mu\text{g.L}^{-1}$ ; 12284X0040/HY). Autant la ravine Charrier est dans un contexte agricole, autant les sources de l'Entre-Deux et de Cilaos sont dans des environnements naturels de manière similaire aux sources des Avirons qui présentent également des traces d'arsenic. Par défaut, on attribue au cirque de Cilaos et au secteur de l'Entre-Deux une zone à risque de fond géochimie faible pour l'arsenic. Cependant compte-tenu des occurrences en arsenic dans le secteur des Avirons et dans les aquifères de la côte ouest, et des concentrations relativement proches de la limite de qualité, il n'est pas possible de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique. En effet, l'arsenic est présent naturellement dans les minéraux tels que la magnétite et l'ilménite ( $2.7$  à  $41 \text{ mg.kg}^{-1}$ , Wedepohl et al. 1974) présents dans les basaltes. Une mobilisation particulière de ces minéraux pourrait donc expliquer la présence de cet élément dans les eaux mais l'arsenic est également présent dans les produits utilisés dans l'agriculture. Ainsi, une étude dédiée pourrait être envisagée afin de qualifier le niveau de risque de fond géochimique et discriminer l'influence anthropique d'une origine naturelle.

Le forage Fredeline (12288X0088/F, Saint Pierre) présente deux analyses réalisées sur les traces dont une a révélé la présence de zinc ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et de **plomb** ( $2 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). On rencontre également des traces de plomb ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) dans les eaux de la source Samany (12291X0010/HY, Le Tampon) et de la source des Hirondelles ( $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ , 12291X0007/HY), présence également observée à la source du Reilhac pour le secteur du Tampon et sur les sources des Avirons (Planèzes Ouest). Compte-tenu des occurrences ponctuelles pour cet élément, il n'est pas possible de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique. Le plomb pourrait avoir une origine naturelle. En effet, le plomb se substitue principalement au potassium, au strontium et au baryum, on le trouve ainsi en traces dans des minéraux potassiques tels que les feldspaths ou les micas. On note ainsi pour les données disponibles une corrélation entre le plomb et le potassium en solution. Le plomb est également présent en moindre quantité dans les pyroxènes ( $0.3$  à  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$  Pb) ou les plagioclases ( $1-70 \text{ mg.kg}^{-1}$  Pb), (Wedepohl et al. 1974). Cependant le plomb est un élément peu soluble, et sa présence si elle s'avère être d'origine naturelle serait à associer à une mobilisation sous forme particulière. Dans le secteur étudié, les concentrations en plomb dans les eaux sont proches de la limite de qualité pour cet élément. Aussi, une étude dédiée pourrait être envisagée afin de qualifier plus précisément le niveau de risque de fond géochimique et de discriminer l'influence anthropique d'une origine naturelle.

Plusieurs points d'eau répartis sur l'ensemble du domaine (Entre-Deux, Tampon, Cilaos) présentent des traces de **cuivre** et de **zinc** dans les eaux, respectivement entre  $5$  et  $15 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour le cuivre et entre  $5$  et  $31 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour le zinc. Compte-tenu de la répartition du cuivre et du zinc dans les eaux et du comportement dans les eaux de ces deux éléments (voir page 53), on attribue au domaine une zone à risque de fond géochimique faible pour ces deux éléments. Cependant des teneurs plus élevées dans les eaux souterraines devront être envisagées comme ayant une origine anthropique.

## 4.5.2 Les eaux de surface

Le réseau hydrographique de ce domaine regroupe les ravines à écoulement non permanent drainant les planèzes ouest du Piton de la Fournaise (le Tampon) et les rivières drainant le cirque de Cilaos (Bras de Cilaos) et l'Entre Deux (Bras de la Plaine).

### *a) Synthèse bibliographique*

Pas de données dans la littérature sur la présence d'éléments traces dans les eaux de surface.

### *b) Délimitation des zones à risque*

Pour les cations, Ca, Mg, Na, K et la silice, les concentrations observées dans les eaux de surface des ravines des planèzes ouest et drainant le cirque de Cilaos et l'Entre-Deux sont supérieures aux valeurs proposées par Meybeck (1984). On notera que les eaux drainant la planèze du Tampon sont moins potassiques que les eaux drainant les formations différenciées du massif du Piton des Neiges.

Les concentrations en **manganèse**, en **fer** et en **aluminium** dans les eaux de surface peuvent dépasser ou égaler les limites et références de qualité respectives en différents points de surveillance répartis sur l'ensemble des versants nord et est.

Les teneurs en fer, en manganèse et en aluminium se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et le temps avec des dépassements qui correspondent à des pics brutaux. Ces produits sont issus de l'altération pédoclimatique et/ou hydrothermale du substratum volcanique et sont facilement mobilisables (voir page 54). On attribue une **zone à risque de fond géochimique élevé pour le fer, le manganèse et l'aluminium avec un niveau de confiance moyen** car l'emprise spatiale est mal définie en raison du nombre limité de données disponibles.

Les teneurs en **cadmium, chrome, mercure, nickel, sélénium et antimoine** sont inférieures aux seuils de quantification qui parfois sont trop élevés ou indéterminés pour qualifier un niveau de fond géochimique.

On note la présence d'**arsenic** dans les eaux de surface dans le secteur amont de Petite-Ile avec des occurrences ponctuelles atteignant  $5 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de Grand Ruisseau (12296X0076/HY),  $13 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station de la ravine Manapany (12296X0031/HY),  $14 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station Denis Leveueur (12295X0039/HY) et  $14 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour la station Bras sec Parc à Mouton (12296X0026/HY). Parmi ces quatre stations, seule Ravine Manapany n'est pas affectée par la présence de nitrates. Ces occurrences très localisées suggèrent une récurrence de la présence d'arsenic dans les eaux. Toutes ces sources émergent dans les formations basaltiques de la série du bouclier ancien cependant compte-tenu du contexte anthropique des stations situées à l'aval et du nombre limité d'analyses il n'est pas possible de statuer sur le niveau de risque du fond géochimique.

Pour le **plomb**, plusieurs secteurs présentent des occurrences en cet élément. Dans le secteur de Petite Ile, la station Bras Sec Parc à Mouton présente une occurrence en plomb ( $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Du fait de la présence de nitrates sur cette station il n'est pas possible de conclure sur une origine naturelle. Dans le secteur du Bras de la Plaine, les stations Bras de la Plaine (12291X0012/HY) et Pompage Bras de la Plaine (12291X0013/F) présentent des occurrences de plomb atteignant respectivement  $16 \mu\text{g.L}^{-1}$  et  $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Ces deux stations présentent moins de  $2.7 \text{ mg.L}^{-1}$  de nitrates au maximum. Dans la partie amont du bras de la Plaine, les sources des Hirondelles et Samary présentent également des occurrences de plomb. Aussi un fond géochimique pour le plomb est à envisager pour ce secteur. Compte-tenu du nombre limité de données il n'est pas possible de statuer sur le niveau de risque mais une étude dédiée pourrait être envisagée car les occurrences sur la station du Bras de la Plaine dépassent la limite de qualité ( $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ).

Dans le cirque de Cilaos, les eaux présentent également du **plomb**, jusqu'à  $10 \mu\text{g.L}^{-1}$  pour les eaux de la rivière Bras des Calumets (12284X0035/HY). Le cirque de Cilaos est le lieu de circulation d'eaux hydrothermales qui peuvent contenir des éléments traces, tels que décrit par Rocher (1988). En effet, l'auteur a analysé un dépôt de calcite associé aux émergences et il a ainsi quantifié  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  de plomb mais pas d'arsenic. Du fait du contexte hydrothermal du cirque de Cilaos on attribue une zone à risque de fond géochimique faible pour le plomb.

Pour la majeure partie des points de surveillance sur les eaux de surface des versants ouest de Petite-Ile, du Bras de la Plaine et du cirque de Cilaos, on note la présence de **zinc** et de **cuivre** atteignant respectivement  $41 \mu\text{g.L}^{-1}$  et  $14 \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Les occurrences en ces deux éléments dans les eaux de surface ne semblent pas être associées à l'activité agricole. Ainsi compte-tenu de la répartition du cuivre et du zinc dans les eaux de surface, on attribue au domaine une zone à risque de fond géochimique faible pour ces deux éléments. Des teneurs plus élevées dans les eaux souterraines devront être envisagées comme ayant une origine anthropique.

#### **4.6 LISTES DES ZONES A RISQUE DE FOND GEOCHIMIQUE ELEVE**

## Eaux souterraines

Secteurs	Localisations géographiques et édifices	Quantité de données insuffisante	Qualité de données insuffisante*	Fond géochimique faible	Impossible de statuer***	Fond géochimique élevé et niveaux de confiance		
						Elevé	Moyen	Faible
Flancs ouest du Piton des Neiges	Planèzes Ouest du Piton des Neiges	Tous les éléments		Ca, Mg, K, Al ;Cu, Zn, As		Si, Fe	Mn	
	Etang-Salé	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, Mg, K, (Ba, B, F) Al, As, Cu, Zn	As, Cr	Si, Fe + influence Océan (Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> )	Mn	
	Aquifères de la côte Ouest (St Leu, St Gilles, St Paul)		Tous les éléments traces	Ca, Mg, Na, K, (Ba, B, F) Al, Cu, Zn	As, Pb	Si, Fe + Influence Océan (Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> )	Mn	
Region Nord	Plaine des Galets	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, Mg (B, F), Al, Cu, Zn	As	Si, Fe + Influence Océan (Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> )	Mn	
	Planèzes nord	Tous les éléments		Ca, Mg, K, Al, Zn		Si, Fe	Mn	
	Cirque de Mafate	Tous les éléments traces		Ca, Mg, K, Al	Cu, Zn	Si, Fe, K	Mn	
Flancs est du Piton des Neiges	Aquifères de la côte nord et Plaine du Mât	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, Mg, Na, K, HCO <sub>3</sub>	Cr	Si, Fe	Mn	
	Planèzes Est du Piton des Neiges	Tous les éléments		Ca, Mg, K, Al, Zn	Cu	Si, Fe	Mn	
	Cirque de Salazie		Tous les éléments traces	Ca, Mg, Na, K, HCO <sub>3</sub> , Al, F, SO <sub>4</sub> , Zn		Si, Fe	Mn	
Plaine des Palmistes et flancs est et sud du Piton de la Fournaise	Plaine des Palmistes	Tous les éléments		Ca, Mg, Zn	Pb, Cu	Si	Fe, Mn	
	Massif du Piton de la Fournaise (Planèze de St-Rose, L'Enclos du Volcan, Planèze Sud)	Tous les éléments		Ca, Mg, Na, K, Zn	Cu	Si	Fe, Mn	
	Les Remparts		Tous les éléments traces	Ca, Mg, Al, F, Cu, Zn		Si	Fe, Mn	
	Nappe littorale de la côte est (St Benoit à St Rose)	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, Mg, Cu, Zn		Si	Fe, Mn	
	Nappe littorale de la côte sud (St Philippe à St Pierre)	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, Mg, (F, B), Cu, Zn		Si + Influence Océan (Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> )	Fe, Mn	
Tampon, Saint Pierre et Cilaos	Planèze Tampon	Tous les éléments		Ca, Cu, Zn	As, Pb	Si	Fe, Mn	
	Nappes de Pierrefonds	Ag, Ba	Tous les éléments traces	Ca, (B, F), Cu, Zn	As	Si, Fe + Influence Océan (Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> )	Mn	
	Cirque de Cilaos		Tous les éléments traces	Al, Ca, Mg, Na, K, F, SO <sub>4</sub> , As, Cu, Zn		Si, Fe	Mn	
	Bras de la Plaine et Entre Deux		Tous les éléments traces	Ca, Mg, As, Cu, Zn	Pb	Si, Fe	Mn	

\*seuils de quantification trop élevés ou non définis pour se prononcer quant au risque de fond géochimique

\*\* Occurrence ponctuelle et/ou influence anthropique sur les points d'eau concernés empêchant de se prononcer sur le risque de fond géochimique

## Eaux de surface

Secteurs définis dans l'étude	Localisations géographiques	Principaux cours d'eau	Quantité de données insuffisante	Qualité de données insuffisante*	Fond géochimique faible	Impossible de statuer**	Fond géochimique élevé et niveaux de confiance		
							Elevé	Moyen***	Faible
Flancs ouest du Piton des Neiges	Versants sous le vent	Ravine St Gilles		Tous les éléments traces	Ca, Mg, Na, K, Zn		Si, Fe, Mn, Al		
		Secteur des planèzes (Les Avirons)	Tous les éléments traces		Ca, Mg, Na, K, Zn		Si	Fe, Mn, Al	
Région Nord	Versants sous le vent et cirque	Rivière des Galets	Tous les éléments		Ca, Mg, Na, K	Cu, Zn	Si	Fe, Mn, Al	
		Cirque de Mafate	Tous les éléments traces		Ca, Mg, Na, K	Cu, Zn	Si	Fe, Mn, Al	
Flancs est du Piton des Neiges	Versants nord intermédiaires et Versants au vent	Rivière St Denis, Rivière des Pluies, Rivière Ste Suzanne, Rivière St Jean, Rivière du Mat, Rivière des Roches, Rivière des Marsouins		Tous les éléments traces	Mg, Ni, Cr, Cu, Zn	As, Pb	Si, Fe, Mn, Al		
		Cirque de Salazie		Tous les éléments traces	Ca, Mg, Na, K, Pb, Zn	Pb	Si, Fe, Mn, Al		
Plaine des Palmistes et flancs est et sud du Piton de la Fournaise	Formations volcaniques récentes	Rivière de l'Est, Rivière Langevin, Rivière des Remparts	Tous les éléments		Ca, Mg, Na, K, Cu, Zn		Si	Fe, Mn, Al	
Tampon, Saint Pierre et Cilaos	Versants sous le vent et cirque	Bras de la Plaine, Bras de Cilaos, Rivière St Etienne	Tous les éléments traces		Ca, Mg, Na, K, SO4, Cu, Zn	Pb	Si	Fe, Mn, Al	
		Cirque de Cilaos	Tous les éléments traces		Ca, Mg, Na, K, SO4, Cu, Zn	Pb	Si	Fe, Mn, Al	
		Planèzes du Tampon (Petite Ile)	Tous les éléments		Ca, Mg, Na, K, Cu, Zn	As	Si	Fe, Mn, Al	

\*Seuils de quantification trop élevés ou non définis pour se prononcer quant au risque de fond géochimique

\*\* Occurrence ponctuelle et/ou influence anthropique possible sur certains points d'eau concernés empêchant de se prononcer sur le risque de fond géochimique naturel

\*\*\* Emprise spatiale mal définie

## 5 Préconisations pour les futurs programmes d'acquisition de données

Suivant le niveau de confiance (ou connaissance) attribué à chaque zone identifiée comme présentant un fond géochimique élevé (Annexe 3), les futurs programmes d'acquisition de données en éléments majeurs et traces répondront à différentes finalités :

- Si le niveau de confiance est **faible** : l'objectif est d'**identifier** clairement le risque de fond géochimique élevé à partir de données de concentrations en éléments traces pour les eaux naturelles dans les zones où les données disponibles sont inexistantes ou pour lesquelles les stations de prélèvement actuellement considérées ne sont pas pertinentes.
- Si le niveau de confiance est **moyen** : l'objectif est de **préciser** l'ampleur de ce risque, en effet dans ce cas de figure les données existent mais sont clairement insuffisantes pour valider le risque de fond géochimique élevé.
- Si le niveau de confiance est **élevé** : l'objectif est d'**estimer** des valeurs seuils pour lesquelles les concentrations sont attribuables à un fond géochimique en éléments traces.

Afin de satisfaire ces différents objectifs, des recommandations concernant les futurs programmes d'acquisition de données en éléments traces dans les eaux naturelles sont formulées dans cette partie. Ces recommandations sont pour parties issues des premières préconisations émises par le laboratoire AQUAREF. Elles concernent notamment, le choix des supports à analyser pour les eaux de surface, la période et la fréquence d'échantillonnage, le protocole d'échantillonnage et le protocole analytique.

Le laboratoire national de référence de l'eau et des milieux aquatiques AQUAREF a été créé en 2007, dans le but de renforcer la qualité et les compétences dans le domaine de la surveillance des milieux aquatiques. Ses actions portent (i) sur le prélèvement et l'échantillonnage avec l'harmonisation des pratiques, le développement de la démarche qualité, des essais d'inter-comparaison et des méthodologies d'estimation des incertitudes ; (ii) le développement et l'optimisation des méthodes d'analyses chimiques et de bioindication pour répondre aux critères de performance de la DCE ; (iii) le soutien à la qualité des données avec la mise en cohérence des pratiques des laboratoires d'analyses chimiques et d'hydrobiologie avec les exigences de performance requises par l'Europe ; (iv) le développement scientifique et technologique sur les problèmes des produits émergents.

Dans le cadre du laboratoire AQUAREF, un cahier des charges pour l'échantillonnage et l'analyse des éléments traces en vue d'acquérir des données pour définir les bruits

de fond géochimique est en cours de diffusion. Il concerne les eaux de surface continentales et les eaux souterraines (Ghestem et al., 2008).

## 5.1 SUPPORTS A ANALYSER POUR LES EAUX DE SURFACE

En raison du nombre moins important de stations étudiées pour les eaux de surface par rapport aux eaux souterraines, un effort tout particulier doit être mené à l'avenir pour l'analyse des éléments majeurs et traces afin de pouvoir identifier convenablement les zones à risque de fond géochimique élevé. Pour les éléments majeurs, l'analyse de la phase dissoute est tout à fait pertinente pour l'identification et la quantification du fond géochimique. En revanche pour les éléments traces d'autres supports analytiques (sédiments, bryophytes...) peuvent être considérés bien que seules les concentrations en éléments traces obtenues sur la **phase dissoute** des eaux de surface présentent l'avantage de pouvoir être **directement comparées aux concentrations mesurées pour les eaux souterraines**. Par ailleurs, si l'objectif du programme d'investigation est d'**estimer des valeurs seuils** pour lesquelles les concentrations sont attribuables à un fond géochimique en éléments traces, l'analyse de la **phase dissoute** doit être **privilégiée** car elle permet d'évaluer directement ces valeurs **sans induire de biais par le calcul de valeurs** de concentrations en éléments traces dans la phase dissoute à partir de données disponibles sur d'autres supports analytiques (MES, sédiments, bryophytes). Les analyses de concentrations en éléments traces sur la phase dissoute des rivières seront réalisées sur des **eaux filtrées** tel que précisé dans la DCE (voir les recommandations concernant le protocole d'échantillonnage).

L'analyse d'autres supports (phase particulaire, sédiments de rivières, bryophytes) pourra également fournir des informations pertinentes pour identifier les zones présentant des fonds géochimiques élevés et déterminer les limites d'emprise de ces secteurs.

Les concentrations en éléments traces mesurées sur les **sédiments** sont tout à fait pertinentes pour **préciser et localiser** l'ampleur du risque de fond géochimique élevé pour les zones où le **niveau de confiance** attribué aux zones délimitées reste **faible ou moyen** (Figure 2). En effet ce support présente l'avantage d'intégrer la variabilité spatiale et temporelle d'un même site de prélèvement, tout en étant faiblement sensible aux pollutions ponctuelles qui pourraient masquer le signal naturel.

L'analyse des teneurs en éléments traces sur **bryophytes**, classiquement utilisée pour la surveillance de la contamination des eaux par les micropolluants métalliques, permet certes d'identifier des zones présentant un fond géochimique élevé mais ces données sont **limitées pour quantifier ce fond**. Les bryophytes, en tant que bio-moniteurs et bio-indicateurs reconnus pour les éléments traces dans les milieux aquatiques, permettent d'intégrer une grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations dans l'eau (Nimis et al., 2002). Il est clairement établi qu'il existe une relation linéaire entre les concentrations en éléments traces dans les bryophytes et les concentrations dans l'eau (Mouvet, 1986). Cependant, cette relation de proportionnalité est variable et dépend étroitement des conditions physico-chimiques du milieu aquatique considéré. L'établissement de relations précises permettant de déduire les concentrations dans



l'eau à partir des concentrations dans les bryophytes s'avère donc délicat. En d'autres termes, il semble difficile de comparer les concentrations obtenues sur bryophytes **avec les normes en vigueur sur phase dissoute**. Par ailleurs les bryophytes sont particulièrement sensibles pour enregistrer des pollutions ponctuelles. En effet la **dynamique de relargage** des éléments traces assimilés par les bryophytes après une exposition à des concentrations élevées est **lente**, avec des durées plusieurs fois supérieures aux durées d'accumulation et ne s'accompagne pas d'une perte complète du métal initialement accumulé. Même après plusieurs semaines de relargage, les mousses conservent encore le signal de leur contamination initiale, ce qui rend leur utilisation plus appropriée pour détecter des pollutions accidentelles que pour estimer un fond géochimique pour les éléments traces étudiés. L'utilisation des données obtenues sur les bryophytes est donc limitée à **la caractérisation de l'ampleur et de l'étendue spatiale** d'une zone à risque de fond géochimique élevé.

La phase particulière des eaux de rivières peut également permettre d'**identifier** l'ampleur du risque de fond géochimique élevé. Cependant ce support est plus délicat à interpréter car contrairement aux sédiments de rivières et aux bryophytes, les concentrations en éléments traces dans les particules en suspension ont un faible pouvoir intégrateur et sont donc des concentrations très variables avec le contexte géologique local, le régime hydrique et la période d'échantillonnage considérée.

## **5.2 PERIODE D'ECHANTILLONNAGE ET FREQUENCE**

De manière générale pour une même station de prélèvement, les concentrations en éléments majeurs et traces peuvent varier fortement selon la période d'échantillonnage considérée. En effet que l'on soit en période de hautes eaux ou de basses eaux, une année sèche ou une année humide, les interactions eau-roche ainsi que les éventuels effets de drainance se trouvent alors modifiés.

### **5.2.1 Eaux souterraines**

#### ***a) Généralités***

Les mesures actuellement disponibles pour les eaux souterraines sont relativement nombreuses, cependant sur chaque point, peu de campagnes de prélèvements sont réalisées. L'augmentation des fréquences de prélèvements est donc un élément essentiel pour améliorer la connaissance des fonds géochimiques. La Directive ne fournit aucune précision sur la fréquence nécessaire pour le contrôle de surveillance. Par contre le cahier des charges pour l'évolution des réseaux de surveillance des eaux souterraines en France a retenu deux niveaux d'analyse correspondant à des fréquences de mesures et à des groupes de paramètres différents : (i) une analyse de type « photographique » réalisée tous les 6 ans qui s'applique à une liste complète de paramètres et permet de disposer d'un état complet de la masse d'eau et (ii) des analyses 1 à 2 fois par an des principaux paramètres (paramètres physico-chimique in situ, éléments majeurs, MES, matières organiques oxydables, silice et certains micropolluants organiques). Ainsi, ce protocole ne préconise pour les éléments traces minéraux qu'une analyse tous les 6 ans. Et bien qu'aujourd'hui les agences de l'eau

aient décidé d'augmenter les prélèvements sur certains points et pour certains éléments, les efforts doivent être poursuivis pour que les données permettent d'apprécier plus précisément les niveaux naturels de chaque élément.

### ***b) Nappes libres***

En ce qui concerne la saisonnalité des prélèvements pour les nappes libres, la recommandation minimale est de réaliser deux prélèvements par an : un à la « saison sèche » et un à la « saison des pluies ». Les régimes hydrogéologiques ne sont toutefois pas si binaires, deux mesures supplémentaires pour atteindre 4 prélèvements par an seraient alors un minimum. Il est important de noter que le prélèvement réalisé en saison sèche est essentiel dans la perspective de définir une valeur seuil de bon état d'une masse d'eau souterraine. C'est en effet à cette période, alors que la recharge par une eau pauvre en éléments majeurs et traces est minimale, que l'effet des interactions eau – roche est le plus significatif. L'impact des cyclones et des fortes crues est également à prendre en compte à la Réunion. Dans le cas des nappes alluviales, il est essentiel de pouvoir apprécier ces variations saisonnières en particulier si des effets de vase et/ou de berges existent. L'étude menée par Garcia et al. (1994) dans un champ captant de la vallée du Lot illustre les variations du potentiel redox et du manganèse induites par un effet de berge. C'est ainsi qu'au début de l'été, une augmentation de la matière organique dissoute dans l'eau du Lot liée à l'eutrophisation du système est observée. Au niveau de la berge, cette matière organique est minéralisée ce qui entraîne une baisse de la teneur en oxygène dissous puis du potentiel redox. Dans ce milieu devenu réducteur, le manganèse est mobilisé et sa concentration augmente dans l'eau. Au-delà de l'aspect saisonnier, ces observations rappellent que, dans le cas des nappes alluviales, comme dans le cas des nappes karstiques et volcaniques, il serait judicieux que les prélèvements en eaux souterraines, sur sources et en eaux de surface soient réalisés à la même date et dans le même secteur.

### ***c) Nappes captives***

Pour les nappes captives de la Réunion, dont la réalimentation est plus lente et moins sensible aux variations saisonnières, un prélèvement annuel est suffisant. En revanche, lorsque la présence d'un élément en concentrations significatives est identifiée, il est recommandé de ne pas attendre 5 ans pour réaliser de nouvelles analyses. Dans ce cas, un prélèvement par an permettrait d'une part de confirmer la persistance de l'élément et d'autre part de mieux comprendre son évolution. Si après quelques années de suivi, les concentrations sont stables alors la fréquence peut être ramenée à un prélèvement tous les 5 ans.

En conclusion, la fréquence et la période de prélèvement pour les eaux souterraines devront dépendre du type de nappe et en particulier du caractère libre ou captif de celle-ci. Pour optimiser les fréquences de prélèvements, il serait utile de mener une étude plus détaillée des variations saisonnières et inter-annuelles des concentrations naturelles en éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines en s'attachant

particulièrement à identifier les relations entre les variations et les caractéristiques de chaque type de nappe et de chaque élément.

## 5.2.2 Eaux de surface

### *a) Phase dissoute et phase particulaire*

Les périodes de prélèvement considérées pour l'ancien Réseau National de Bassin (RNB) peuvent être très variables (hautes eaux/basses eaux), ce qui rend parfois délicates les comparaisons inter-campagnes. En effet la concentration en éléments traces dans la phase dissoute et la phase particulaire des eaux de surface dépend très étroitement du régime hydrique de la rivière. En période de hautes eaux le signal est généralement dilué. Par ailleurs, lors des événements pluvieux on peut observer une modification significative des sources d'éléments traces vers les rivières. En effet lors des crues, un lessivage superficiel important peut entraîner une remobilisation des éléments traces provenant des aérosols marins et des amendements agricoles accumulés dans les sols. Par ailleurs, les eaux drainant des districts miniers peuvent contribuer plus fortement aux flux d'éléments dissous et particuliers des rivières pendant ou immédiatement après les périodes de crue. Ainsi les concentrations en éléments traces dans les eaux de rivières peuvent varier significativement au cours d'un même événement pluvieux. Afin de caractériser le fond géochimique à partir de la concentration en éléments traces dans ces eaux de rivières, il est donc souhaitable d'effectuer les prélèvements en dehors de ces événements de crue.

Ainsi, la période d'échantillonnage la plus favorable pour caractériser les fonds géochimique est la **période de basses eaux**, afin de garantir un signal suffisant pour l'analyse (signal peu dilué) et en **veillant à ne pas intégrer des événements de crue** (contrainte anthropique réduite). La date d'échantillonnage pourra être choisie sur la base des données quantitatives disponibles sur les eaux de surface. Les stations de jaugeage étudiées dans le cadre de la banque HYDRO ([www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)) peuvent entre autre permettre de déterminer une date de prélèvement correspondant à une période suffisamment longue de débits stables en régime de basses eaux. A la Réunion, la fin de la « saison sèche » devrait être une période favorable à cet échantillonnage.

En prenant en compte ces précautions, les concentrations en éléments traces pour les eaux de surface ne devraient, à priori, pas varier de manière significative selon la date de prélèvement considérée. La prise en compte **uniquement de campagnes de prélèvement réalisées en basses eaux**, réalisées 1 à 2 fois par an, semble donc tout à fait suffisante pour évaluer précisément le fond géochimique pour les éléments traces. **Au total 5 campagnes de prélèvement**, étalées sur plusieurs années, semblent suffisantes pour compléter les informations existantes sur le fond géochimique en éléments traces en intégrant une variabilité infra-station due au régime hydrique de la rivière. Cette stratégie d'échantillonnage **rend compte des concentrations maximales ou extrêmes rencontrées**. Par rapport à une valeur moyenne, la prise en compte de ces valeurs extrêmes présente l'avantage de renseigner sur les conditions hydrologiques exceptionnelles qui peuvent aboutir à une concentration naturelle élevée en éléments traces.

## ***b) Sédiments de rivière***

Pour le prélèvement de sédiments de rivières la **période d'échantillonnage n'influence que très faiblement** les concentrations en éléments traces mesurées. En effet les sédiments permettent de moyenner des dépôts sur plusieurs années. La réalisation des campagnes de prélèvement en basses eaux présente deux avantages. Le premier est de faciliter l'accès aux zones de dépôts dans le lit des rivières. Le deuxième est de pouvoir coupler ces prélèvements avec les campagnes réalisées pour étudier la phase dissoute des rivières. Afin de diminuer les coûts analytiques des investigations concernant le fond géochimique des eaux de surface, l'analyse des éléments traces pour **3 campagnes réalisées en basses eaux** est suffisante en raison de la faible variabilité des concentrations en fonction du régime hydrique de la rivière. Par ailleurs, la finalité de ces analyses n'est pas d'estimer des valeurs seuils, contrairement à l'analyse de la phase dissoute, et ne justifie donc pas un nombre plus important de campagnes.

## ***c) Bryophytes***

L'échantillonnage de bryophytes est réalisé préférentiellement en **période de basses eaux, en milieu de période d'étiage** pour éviter que les mousses ne soient fortement recouvertes d'un feutrage algal dont le développement est favorisé par la température élevée de l'eau, les concentrations importantes en éléments eutrophisants et l'ensoleillement important (Mouvet, 1986). Le prélèvement doit être effectué dans des conditions qui garantissent l'immersion des mousses afin de permettre l'intégration des concentrations en éléments traces dans les eaux de rivières durant toute l'année. Ce type de prélèvement permet d'**identifier le risque de fond géochimique** pour une zone peu documentée et correspond donc aux **premières étapes du programme d'investigation**. Ainsi, il ne semble **pas nécessaire de multiplier les campagnes** de prélèvement. Il est suffisant de prendre en compte une seule campagne en multipliant les stations d'échantillonnage, car l'objectif n'est pas de caractériser la variabilité des concentrations en éléments traces au sein d'une même station, mais de documenter spatialement la présence d'un fond géochimique élevé dans des secteurs où la contamination anthropique n'existe pas.

## **5.3 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE**

L'étape d'échantillonnage constitue une **étape critique du processus d'analyse** des éléments majeurs et traces. En effet notamment pour l'analyse des éléments traces, les erreurs de mesures imputables à la contamination des échantillons peuvent être importantes comparées aux incertitudes analytiques. Selon la matrice analysée (phase dissoute, particules en suspensions, sédiments de rivières, bryophytes), le degré de difficulté de l'analyse est variable. Il impose en effet des contraintes non seulement pour l'analyse, mais également pour les étapes de préparation des échantillons.

Par ailleurs les éléments traces sont **très sensibles aux processus d'adsorption et de désorption**. Afin de garantir la bonne représentativité de la mesure réalisée, il est nécessaire de minimiser ces pertes ou ces ajouts. En effet les éléments traces peuvent

s'adsorber sur les **parois des flacons** d'échantillonnage ou sur les **particules en suspension** si ces eaux naturelles ne sont pas filtrées.

Dans cette partie sont rappelées les principales précautions à prendre pour chaque matrice prélevée afin de garantir une contamination minimale des échantillons.

### **5.3.1 Phase dissoute des eaux de surface et des eaux souterraines**

La phase dissoute d'une eau naturelle correspond à tous les éléments dissous présents dans l'eau après filtration à 0.45 µm. L'analyse des éléments majeurs et traces dans la phase dissoute des eaux naturelles nécessite des étapes de **filtration, choix du flaconnage, acidification et conservation à 4°C**.

Afin de réaliser un prélèvement représentatif et non biaisé du milieu considéré, on se référera pour les eaux souterraines au guide technique AFNOR FD T90-523-3 : "Guide de prélèvement pour le suivi la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 3 : Prélèvement d'eau souterraine", et pour les eaux de surface au guide technique AFNOR FD T90-523-1 : "Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 3 : Prélèvement d'eau de surface".

#### ***a) Matériels de prélèvement***

Pour les eaux souterraines, les différents types de pompe utilisables sont décrits dans le guide T90523-3 [12]. Les tuyaux utilisés pour le pompage devront être dédiés aux opérations de prélèvement pour l'estimation du fond géochimique ou au minimum n'être utilisés que pour des eaux naturelles non contaminées. Ils seront en matériau inerte et ne devront pas apporter de contamination. Avant chaque campagne et avant la première utilisation les tuyaux de pompe seront nettoyés à l'acide nitrique dilué (1 %), rincés à l'eau ultrapure et conservés dans un sac plastique hermétiquement fermé jusqu'à l'utilisation sur le terrain.

Pour les eaux de surface, le matériel de prélèvement utilisé ne doit pas contenir de pièces métalliques. En particulier l'usage d'un seau en métal n'est pas autorisé. Le matériel utilisé sera dédié aux opérations de prélèvement pour l'estimation du fond géochimique ou au minimum n'être utilisé que pour des eaux naturelles non contaminées. Avant chaque campagne et avant la première utilisation le matériel sera nettoyé à l'acide nitrique dilué (1 % v/v), rincé à l'eau ultra pure et conservé à l'abri de toute contamination jusqu'à l'utilisation sur le terrain.

Le matériel de prélèvement sera rincé au moins deux fois avec l'eau à prélever avant utilisation.

#### ***b) Purge et échantillonnage***

Le préleveur devra disposer dans la mesure du possible de la coupe de l'ouvrage et de ces caractéristiques (diamètre, profondeur, équipement, ...). La mesure du niveau piézométrique sera systématiquement réalisée avant pompage ainsi que, dans la mesure du possible la mesure de la profondeur totale de l'ouvrage (l'indication de cette

grandeur peut également être donnée par la coupe de l'ouvrage). Ces grandeurs permettent notamment de calculer le volume de l'ouvrage et de connaître le nombre de volumes d'ouvrage vidangés pendant la phase de purge.

La purge de l'ouvrage sera réalisée comme décrit en 4.6 du guide T90523-3. Sauf impossibilité technique liée à un assèchement de l'ouvrage, le critère de fin de purge sera la stabilisation des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température, oxygène dissous).

En phase d'échantillonnage, la pompe sera positionnée au niveau de l'aquifère à prélever, au milieu de la zone crépinée. Si exceptionnellement on ne dispose pas d'information sur la coupe de l'ouvrage, on se placera si possible, à 1 m environ du fond de l'ouvrage.

Pour les eaux de surface, un prélèvement ponctuel sera réalisé. Sauf impossibilité, l'échantillonnage sera réalisé à une profondeur d'environ 30 cm sous la surface.

### ***c) Filtration de l'échantillon***

L'échantillon collecté sera immédiatement filtré sur le terrain en évitant dans la mesure du possible de passer par un flacon ou récipient intermédiaire pour limiter les risques de contamination.

Le système de filtration sera de préférence constitué d'une seringue jetable (en polypropylène par exemple) et d'un filtre jetable de porosité nominale 0,45 µm (par exemple en acétate de cellulose). L'ensemble du dispositif de filtration devra être exempt de contamination. Avant chaque filtration, l'ensemble du dispositif (seringue et filtre) sera rincé avec une aliquote de l'échantillon.

Pendant les opérations de filtration, de préparation du flaconnage, de conditionnement, le port de gants jetables non talqués est obligatoire (les gants talqués sont susceptibles de contenir de fortes teneurs en Zn).

### ***d) Flaconnage***

Compte tenu des concentrations très faibles recherchées, une attention particulière sera portée par le laboratoire et l'équipe de prélèvement à l'absence de contamination des flacons. L'équipe de prélèvement devra se conformer aux recommandations du laboratoire pour ce qui concerne le flaconnage utilisé (type de flacons, volume, ...).

Excepté s'il peut être démontré que les flacons sont exempts de contamination pour les niveaux de teneurs recherchés, les flacons seront systématiquement nettoyés au laboratoire avant. Les flacons devront être transportés à l'abri de toute contamination.

Le flacon sera rincé au moins deux fois avec l'eau à prélever (eau filtrée) avant prélèvement définitif de l'échantillon à analyser.

Les recommandations suivantes sont des recommandations classiques concernant le type de flacon à utiliser pour les analyses de fluor, d'éléments traces et de mercure. Elles ne se substituent pas aux recommandations du laboratoire en charge des analyses.

Eléments traces hors mercure	flacon plastique en PE (polyéthylène) PP (polypropylène), HDPE (Polyéthylène Haute Densité) ou PTFE (Téflon).
Mercure	flacon en polytétrafluoroéthylène (PTFE), éthylène-propylène perfluoré (FEP), verre borosilicaté ou quartz
Fluorures	flacon plastique en PE (polyéthylène).

Tableau 21 : recommandations sur le type de flacon à utiliser selon les éléments à analyser (Ghestem et al., 2008).

### e) Conditionnement

Le prestataire devra se conformer aux préconisations du laboratoire. Dans tous les cas (sauf pour les fluorures), un ajout de conservateur sera fait de préférence immédiatement sur site **après filtration de l'échantillon** ou au laboratoire dans les 24 h suivant le prélèvement.

Classiquement, les agents de conservation à ajouter sont les suivants :

- HNO<sub>3</sub> à 0,5 % (v/v) pour les métaux hors mercure (le pH final de l'échantillon doit être inférieur à 2 et peut être vérifié sur une aliquote séparée).
- Ajout de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/HNO<sub>3</sub> pour le mercure

Le type d'acide utilisé lors des procédures de préparation des échantillons peut avoir d'importantes conséquences lors de la phase d'analyse des échantillons (Hoenig, 2001). Il est clairement établi que pour toutes les techniques de spectrométrie de masse, **l'acide nitrique supra-pur constitue l'acide le plus pertinent**. La présence d'acide chlorhydrique n'induit pas de problèmes particuliers pour les analyses par ICP-AES (spectrométrie par émission atomique par plasma induit). Cependant son utilisation est à proscrire pour les technique ETAAS (spectrométrie d'absorption atomique par atomisation électrothermique) en raison de la formation de composés chlorés et d'interférences spectrales et/ ou d'interférences liquide/vapeur. Pour les mesures par ICP-MS (spectrométrie de masse par plasma induit), l'utilisation **d'acide chlorhydrique** est également **indésirable**. Cet acide est en particulier responsable d'une **interférence isobarique pour l'élément arsenic**, aboutissant à une surestimation des concentrations en arsenic dans l'échantillon analysé. L'utilisation **d'acide sulfurique** est également **à éviter**.

La qualité des réactifs utilisés sera déterminée par le laboratoire en charge des analyses et sera choisie de façon à assurer que les limites de soient vérifiées (il est fortement recommandé d'utiliser des réactifs spécifiques pour analyses de traces).

## ***f) Conservation des échantillons***

Les échantillons seront conservés après prélèvement et conditionnement à une température de  $5 \pm 3^\circ\text{C}$  et à l'abri de la lumière (pour empêcher les interactions possibles avec la matière organique), afin de diminuer la cinétique des réactions qui pourraient modifier les concentrations en éléments majeurs et traces dans la phase dissoute.

### **5.3.2 Phase particulière des eaux de surface**

Les méthodes d'échantillonnage des MES sont généralement basées sur la filtration de larges volumes d'eau ou la centrifugation en raison de l'importante quantité de matériel nécessaire pour l'analyse des éléments traces. Ces méthodes de séparation des MES sont relativement complexes (risques de contamination des échantillons et d'adsorption) et l'équivalence de ces techniques doit être vérifiée (tailles différentes des particules séparées par centrifugation et par filtration).

#### ***a) La filtration***

La filtration des échantillons d'eaux naturelles afin de prélever les particules en suspension, est généralement réalisée sur le terrain. Cependant, par soucis de commodité ces filtrations ont parfois lieu au laboratoire. La filtration est réalisée à  $0.45 \mu\text{m}$  avec des filtres en acétate de cellulose qui sont conservés par la suite dans des boîtes de Pétri.

#### ***b) La décantation***

Les larges volumes d'eau sont laissés décantés dans des bidons en général pendant 3 jours. Puis l'eau claire de surface (jusqu'à quelques centimètres du fond : un peu au dessus de la limite eau claire - eau chargée) est éliminée sans perturber le milieu à l'aide d'une pompe à vide manuelle. Les fonds de bidons sont transvasés dans un grand Becher et laissés à nouveau décanter pendant 3 jours. L'eau claire de surface est à nouveau éliminée et transvasée avec les particules dans un flacon. Ce concentré est ensuite déshydraté à l'étuve avant analyse.

#### ***c) Le choix du flaconnage***

Dans le cas où les filtrations ont lieu au laboratoire pour récupérer les MES, le choix du flaconnage constitue une étape importante dans le conditionnement des échantillons. Il est préférable de conserver les échantillons dans des flacons en polyéthylène **sans ajouter aucun agent de conservation** afin de ne pas aboutir à la désorption des éléments traces adsorbés sur les particules en suspension vers la phase dissoute.



### 5.3.3 Les sédiments de rivières

Pour les cours d'eau dont les berges sont susceptibles de s'effondrer et d'intégrer en partie des horizons de sol, les sédiments de rivières sont préférentiellement prélevés au milieu de la rivière. Pour les zones présentant un faible relief et pour lesquels les sédiments de milieu de rivière sont susceptibles d'être enrichis en quartz et appauvris en argiles, l'échantillonnage sera réalisé sur les sédiments fins déposés sur les bords pendant les épisodes de crue. Les sédiments de rivières doivent être prélevés à l'aide d'une spatule non métallique afin d'éviter les contaminations en éléments traces. Tout l'équipement servant à l'échantillonnage est au préalable rincé avec l'eau de rivière. Les sédiments sont ensuite conservés dans des sacs en polyéthylène jusqu'à leur conditionnement au laboratoire (séchage, tamisage).

Afin de permettre la comparabilité des échantillons de sédiments entre sites de prélèvement il est important de réaliser un **tri granulométrique**. Deux méthodes de tamisage sont généralement employées. La première est réalisée en phase humide et sépare la fraction fine **inférieure à 63 µm** avec l'eau collectée sur la station de prélèvement (Förstner et Wittmann, 1981). La deuxième méthode sépare à sec les sédiments et isole la fraction **inférieure à 2 mm**.

Au sein d'un même site de prélèvement, les différences d'énergie des flux d'eau et les variations locales des paramètres sédimentologiques des environnements de dépôt peuvent induire une **variabilité spatiale significative** pour les concentrations en éléments traces dans les sédiments de rivières. L'analyse de la fraction fine (<63 µm) des sédiments, qui minimise les effets dus à la variabilité de la taille grain, permet de réduire significativement la variabilité au sein d'un même site de prélèvement. Cependant de nombreuses études, notamment l'étude de Birch et al. (2001), montre que la variabilité spatiale à petite échelle, pour un site d'échantillonnage donné, est significative par rapport à la variabilité analytique. La variance totale attribuable à la fois à l'incertitude analytique et à la variabilité du terrain pour l'analyse de sédiments de taille normalisée inférieure à 63µm peut représenter jusqu'à 20-35% pour les environnements les plus dynamiques en milieu fluviatile. Ainsi l'effort actuellement engagé pour améliorer la précision analytique n'est que partiellement justifié car une partie importante de la variance totale d'une analyse est imputable à la variabilité spatiale des concentrations en éléments traces dans l'environnement de dépôt (Birch et al., 2001). Il est donc important et nécessaire de multiplier des prises d'échantillons au sein d'un même site de prélèvement afin d'évaluer cette variabilité.

### 5.3.4 Les bryophytes

Comme pour tout prélèvement biologique, des conditions rigoureuses doivent être respectées pour l'échantillonnage des bryophytes afin de garantir une bonne représentativité et bonne répétabilité des analyses réalisées. Dans ce paragraphe sont rappelées les principales précautions à prendre. Le prélèvement des bryophytes est réalisé le plus profondément possible dans les cours d'eau afin de garantir l'immersion totale des spécimens même au cours de l'étiage le plus marqué. Seules les parties sommitales des mousses sont prélevées afin d'éviter d'éventuelles contaminations métalliques dans le cas de certains supports (ponts, barges...). Par ailleurs

l'accumulation de métaux par les mousses ne peut se faire que par des phénomènes de surface essentiellement par les feuilles. On aura donc intérêt, lors du prélèvement, à éliminer les parties défeuillées en faveur des touffes avec feuillage afin de travailler sur un support plus riche naturellement en éléments traces. La stratégie d'échantillonnage privilégiera des transects longitudinaux et transversaux qui auront beaucoup plus de représentativité qu'un échantillon ponctuel. Par ailleurs, dans la mesure où il existe des fonctions de transferts et d'accumulation en éléments traces différentes suivant les espèces de bryophytes considérées, il est souhaitable, dans la mesure du possible, de considérer les mêmes espèces sur l'ensemble du bassin de l'Agence de l'eau afin de permettre une inter-comparaison efficace des concentrations. Les spécimens prélevés doivent être soigneusement nettoyés avec l'eau de la rivière échantillonnée. Les bryophytes sont ensuite conditionnés dans un sachet en papier ou en plastique, en ayant vérifié au préalable l'absence d'éléments métalliques sur ces supports afin d'écartier toute contamination. Au laboratoire les échantillons sont séchés à 60°C à l'étuve en évitant une nouvelle fois tout contact avec toute surface ou support métallique. Pour plus de détails concernant les précautions à prendre lors de l'échantillonnage, on peut consulter l'étude de Mouvet (1986).

### **5.3.5 Traçabilité des opérations et mesures**

L'ensemble des opérations de terrain sera consigné sur une fiche de prélèvement (cf. fiche de prélèvement des documents FD T90523-3 et FD T90523-1 – annexe A).

Les éléments à renseigner sur la fiche de prélèvement sont précisés par Ghestem et al. (2008). Ces informations porteront, entre autres, sur les caractéristiques du prélèvement (localisation, date, purge, préleveur,...) et du conditionnement (flaconnage, mode de filtration, ...), sur les conditions météorologiques et hydrologiques pour les eaux de surface (crue, étiage par exemple).

### **5.3.6 Contrôles qualité**

Les étapes d'échantillonnage sont peu soumises au contrôle qualité. Compte tenu de la sensibilité des résultats à l'ensemble des opérations de terrain, des contrôles qualité devront être mis en place pour ces campagnes destinées à estimer le bruit de fond géochimique (Ghestem et al. 2008). 10 % des échantillons d'une campagne seront prélevés en double et analysés. Ce prélèvement en double inclura la répétition de la phase de prélèvement, de filtration et de conditionnement de l'échantillon (le même jour avec le même opérateur). Un blanc de terrain sera réalisé pour chaque série de 10 prélèvements. Par exemple ce blanc sera réalisé de la façon suivante dans le cas d'une filtration avec seringue et filtre : prélèvement d'eau ultra pure à la seringue dans les mêmes conditions que les échantillons (notamment après rinçage de la seringue) ; filtration de cette eau à travers un filtre après rinçage du filtre comme pour les échantillons, conditionnement et transport de l'échantillon blanc de la même façon que les échantillons (flaconnage, acide, glacière, ...).

La valeur de ce blanc « terrain » devra être inférieure à la limite de quantification de la méthode et de préférence être inférieure à la moitié de cette limite de quantification.

## **5.4 PROTOCOLE ANALYTIQUE**

Suivant le type de matrice analysée, phase dissoute, phase particulaire, sédiments de rivières ou bryophytes, la minéralisation des échantillons peut être nécessaire. En effet quelque soit l'échantillon et les méthodes analytiques considérées les éléments majeurs et traces sont analysés sous la forme d'éléments en solution. A titre d'exemple, le dosage d'éléments traces sur bryophytes nécessite au préalable un nettoyage fin de l'échantillon au laboratoire (Mouvet, 1986) et une attaque acide afin d'aboutir à une minéralisation totale de la matière organique des mousses. Ces étapes de préparation des échantillons justifient le coût plus élevé de ce type d'analyse. A l'extrême, l'analyse de la phase dissoute des eaux ne nécessite aucune étape préalable, à part éventuellement une pré-concentration ou une dilution des échantillons. Une fois minéralisés les échantillons sont analysés indifféremment, quelque soit leur matrice d'origine. Cette partie a pour objectif de donner une vision synthétique des trois principales méthodes analytiques utilisées classiquement pour la détermination des teneurs en élément majeurs et traces.

### **5.4.1 ETAAS (Spectrométrie d'absorption atomique par atomisation électrothermique)**

La spectrométrie par absorption atomique est une méthode de dosage d'éléments chimiques basée sur la mesure de réduction d'intensité de radiations photoniques dues à l'absorption sur l'élément analysé. Les radiations photoniques analysées pour chaque élément permettent de déduire directement la concentration de cet élément dans l'échantillon. La détermination d'éléments traces par ETAAS présente des inconvénients, notamment pour l'analyse des éléments arsenic et sélénium pour lesquels la présence de nickel induit un biais analytique (Hoenig, 2001). Cette méthode est certifiée par la norme en vigueur EN ISO 15586. A cette technique on privilégie actuellement la méthode de mesure par ICP-MS qui présente une meilleure précision analytique (Thomas, 2003).

### **5.4.2 ICP-AES (Spectrométrie par émission atomique par plasma induit)**

La spectrométrie par émission atomique par plasma induit est une méthode de dosage d'éléments chimiques basée sur la mesure de l'intensité de l'émission de radiations photoniques émises par des atomes ou des molécules dans un plasma. Un atome excité produit un rayonnement énergétique caractéristique, le spectre, qui est composé de plusieurs raies spectrales d'énergies différentes. Chaque élément chimique possède un spectre énergétique propre et déterminé. Le principe de la spectrométrie d'émission est d'exciter les différents atomes d'un échantillon et de décomposer le spectre polychromatique ainsi obtenu. Ceci permet d'y repérer les spectres des différents éléments présents. L'intensité des raies permet alors de déterminer les concentrations de ces éléments. Cette méthode est certifiée par la norme en vigueur EN ISO 11885.

### 5.4.3 ICP-MS (Spectrométrie de masse par plasma induit)

La spectrométrie de masse utilise les masses atomiques caractéristiques de chaque élément : une source énergétique génère d'abord des ions monovalents positifs, qui sont séparés dans un champ électrostatique selon leur rapport masse/charge (noté  $m/z$ ). Chaque élément chimique ayant un rapport  $m/z$  caractéristique, le comptage des ions correspondant permet de déterminer la concentration de cet élément dans l'échantillon. Le nébuliseur et la torche à plasma de l'ICP-MS fonctionne de la même façon que pour l'ICP-AES. Cependant, on s'intéresse cette fois au flux d'ions créé, et non au spectre énergétique. La qualité des mesures réalisées par cette méthode est certifiée par la norme en vigueur EN ISO 17294-2. De manière générale la technique d'ICP-MS présente de meilleures précisions analytiques que la technique de mesure par ICP-AES.

### 5.4.4 Performances analytiques

#### *a) Les différentes techniques analytiques*

Suivant les **éléments analysés** et les **gammes de concentration mesurées**, l'une ou l'autre des techniques analytiques utilisées pour les éléments traces devient plus pertinente en termes de performances analytiques. En effet, pour certains éléments, une méthode analytique comme l'ETAAS présente une **gamme de linéarité** plus réduite (2 à titre d'exemple pour l'arsenic, Figure 5) que l'ICP-MS (10 à titre d'exemple pour l'arsenic, Figure 5). Ce résultat signifie que le signal mesuré pour cet élément par ICP-MS reste directement proportionnel à la concentration en cet élément dans l'échantillon pour une gamme de concentration plus grande. Cette technique permet donc de quantifier l'arsenic de manière précise pour des concentrations plus contrastées.

Par ailleurs les **limites de quantification** sont également **variables suivant les techniques** analytiques utilisées. La Figure 5 permet de rendre compte de cette variabilité pour l'analyse de l'arsenic entre les techniques d'ICP-MS, ICP-AES, FAAS (spectrométrie d'absorption atomique par flamme) et ETAAS.

Il est préconisé pour réduire ces incertitudes d'analyser les concentrations en éléments traces suivant **une même technique analytique** et en choisissant **un laboratoire unique**. La méthode par ICP-MS présente actuellement les meilleurs résultats en tenant compte à la fois de la justesse et de la précision des analyses et des limites de quantification. Il est néanmoins indispensable de comparer les résultats analytiques obtenus sur des matériaux de références par les laboratoires candidats afin de choisir rigoureusement l'organisme prestataire des analyses en éléments traces.

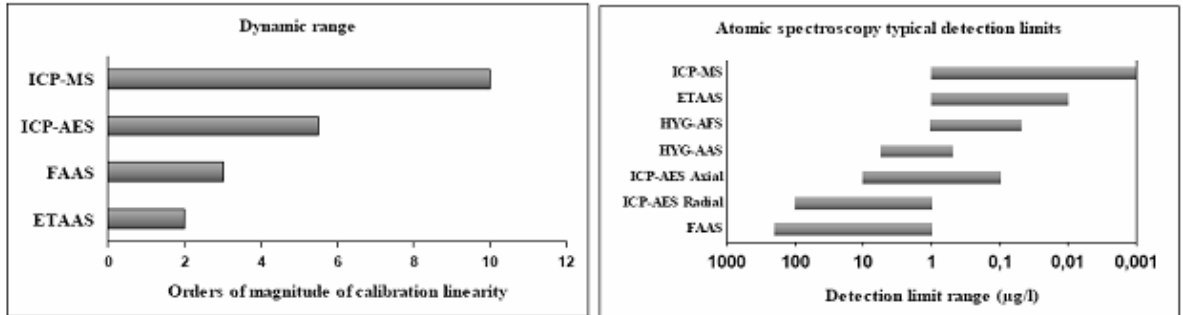


Figure 5 : Comparaison des gammes de linéarité et des seuils de quantification pour différentes techniques d'analyse de l'arsenic (Thomas, 2003).

### b) Comparaisons inter-laboratoires

Afin de garantir la qualité des mesures il est nécessaire d'utiliser des matériaux de référence certifiés pour l'analyse des eaux dites « naturelles ». Des méthodes standard d'analyse ont été développées et l'analyse d'**échantillons de référence** permet d'établir la **précision** de la mesure et de vérifier la **justesse** de l'analyse. Des échantillons de référence sont désormais disponibles pour de nombreux types de matrices d'eaux naturelles (Quevauviller, 2002). A titre d'exemple de nombreux laboratoires utilisent l'échantillon de référence d'eau de rivière SLRS-4 (NRC-CNRC, Canada), certifié pour l'analyse des eaux de rivières peu salines (Yeghicheyan et al., 2001). En revanche pour les eaux salines (saumures), aucune méthode standard n'est actuellement disponible et la détermination des éléments traces métalliques pour ces échantillons nécessite des traitements spécifiques pour obtenir des limites de détection suffisamment basses (étapes de pré-concentration, élimination des sels). Seules un petit nombre de méthodes ont été développées dans ce domaine (Chiffolleau et al., 2002).

Dans le cadre de la DCE, afin de permettre la classification des masses d'eaux naturelles sur des critères communs au sein des états membres, les résultats analytiques obtenus pour les différents pays doivent être comparables. Aussi l'organisation de campagnes d'inter-comparaison à l'échelle européenne pour la mesure des éléments traces est primordiale. Ces campagnes ont pour objectif d'évaluer l'incertitude analytique imputable aux différences entre laboratoires. Cette approche permet de tester la justesse des analyses et d'évaluer la qualité et la performance analytique des laboratoires considérés. Pour la France, les principaux programmes d'inter-comparaisons sont réalisés par l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Il a réalisé des tests d'inter-comparaison entre 1999 et 2002 sur les éléments traces prioritaires, pour trois méthodes d'analyses confondues (EN ISO 15586 pour ETAAS, EN ISO 11885 pour ICP-AES, EN ISO 17294-2 pour ICP-MS), en fonction de la gamme de concentration analysée (Coquery et al., 2005). Ces résultats montrent que la précision est généralement acceptable pour des eaux dans lesquelles les concentrations sont importantes (de l'ordre du mg.L<sup>-1</sup>). Dans ces gammes, la reproductibilité (CV, coefficient de Variation) est inférieure à 10% pour le cadmium, le plomb et le nickel, et inférieure à 20% pour le mercure (Figure 6).

Cependant, les gammes des concentrations généralement observées lorsque l'on s'intéresse comme ici aux fonds géochimiques dans les eaux sont au moins 10 fois inférieures aux gammes étudiées dans cette étude comparative. Ainsi, comme le soulignent les auteurs, de nouveaux essais inter-laboratoires visant à évaluer ces incertitudes pour des concentrations plus faibles seraient souhaitables.

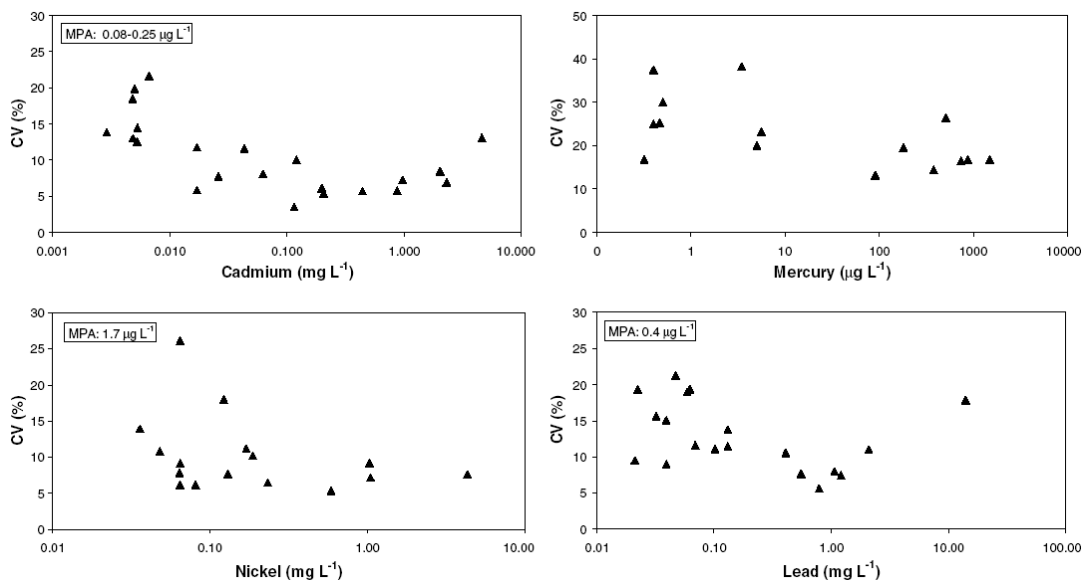


Figure 6 : Reproductibilités inter-laboratoires obtenues pour les micopolluants métalliques prioritaires et sur la base de tests d'inter-comparaison français (Coquery et al., 2005).

D'autres essais inter-laboratoires ont été réalisés dans le cadre du projet AGLAE (Association Générale des Laboratoires d'Analyse en Environnement) et ont permis de dégager des incertitudes analytiques figurant en Annexe 4. A titre d'exemple, les coefficients de variation de reproductibilité (CV<sub>R</sub>) pour le cadmium, le mercure, le nickel et le plomb sont de 20%, 17%, 20% et 12%, respectivement pour des concentrations égales à 2.5 µg.L<sup>-1</sup>, 1 µg.L<sup>-1</sup>, 10 µg.L<sup>-1</sup> et 20 µg.L<sup>-1</sup>. Le programme AQUAREF prévoit également une étude d'inter-comparaison.

Compte tenu des gammes de concentrations en éléments traces mesurées pour la caractérisation des fonds géochimiques, les tests d'inter-comparaison entre laboratoires montrent qu'il est **primordial de disposer de techniques analytiques optimales pour les faibles concentrations**. Compte tenu des différentes études comparatives réalisées pour l'analyse des éléments traces, la **technique d'analyse par ICP-MS présente les meilleurs résultats** pour les faibles concentrations (Figure 6).

### c) Limites de quantification exigées

Ce point est un point délicat qui devra être discuté et faire l'objet d'un consensus avant le lancement de campagnes d'analyses. Un choix est à faire sur le niveau d'exigence sur les résultats. Deux options sont envisageables (Ghestem et al. 2008).

La première option consiste à exiger des laboratoires et des préleveurs les limites de quantification les plus basses possibles compte tenu des techniques et méthodes existantes. Cette option correspondrait à une réelle étude d'estimation des bruits de fond géochimique sans lien avec l'utilisation particulière de ces bruits de fond pour le calcul des NQE. Cette option engendrerait des coûts importants.

La deuxième option consiste à exiger des performances en lien avec l'objectif d'utilisation des bruits de fond dans le calcul des NQE. On peut par exemple vouloir identifier les bruits de fond dont l'impact sur la norme de qualité environnementale soit inférieur à 20% (on peut envisager d'autres valeurs comme 10%, 5% mais pour beaucoup d'éléments, les contraintes d'échantillonnage et d'analyses deviennent alors très fortes). Cette option pourrait conduire à revoir les listes de paramètres à suivre : ainsi cette valeur de 20% conduirait à une LQ de 10 ng/l pour le mercure ce qui rend quasiment inutile la recherche de fond géochimique pour cet élément à ce niveau de concentration.

Dans le cadre du programme AQUAREF, Ghestem et al. (2008) proposent des limites de quantification (LQ) en se basant sur la seconde option. Ces valeurs sont regroupées dans le Tableau 22 et doivent être estimées suivant la norme XPT90 210 (1999) (cette norme est en cours de révision). Elles sont fixées pour la plupart en se basant sur le tiers de la valeur seuil environnementale. Pour certains éléments, compte tenu de la valeur élevée de la valeur seuil, la LQ exigée est basée sur des performances classiques des appareils d'analyse actuels.

Ces limites de quantification ne constituent pas les limites de quantification les plus basses possibles mesurables avec les appareils actuels. Elles constituent des limites de quantification qui permettront de détecter des niveaux de bruit de fond significatifs par rapport aux normes de qualité environnementale définies pour les substances prioritaires dans la directive DCE 2008/105/CE du 16 décembre 2008 et pour les substances pertinentes dans la circulaire DCE 2007/23 du 7 mai 2007.

Nom de la substance	Code SANDRE	LQ (µg/l)	Origine LQ
Aluminium	1370	10	(1)
Antimoine	1376	0.5	(1)
Argent	1368	0.01	NQE/5
Arsenic	1369	0.5	(1)
Baryum	1396	1	(1)
Bore	1362	1	(1)
Cadmium	1388	0.015	NQE/5
Chrome	1389	0.7	NQE/5
Cuivre	1392	0.3	NQE/5
Fer	1393	10	(1)
Fluorures	1391	100	(1)
Manganèse	1394	1	(1)
Mercuré	1387	0.01	NQE/5
Nickel	1386	0.4	(1)
Plomb	1382	0.08	(1)
Sélénium	1385	0.2	NQE/5
Zinc	1383	0.6 µg/l (dureté <24mg/l CaCO <sub>3</sub> ) 1.5 µg/l (dureté <24mg/l CaCO <sub>3</sub> )	NQE/5

Tableau 22 : Limites de quantification proposées dans le cadre du cahier des charges. du programme AQUAREF (Ghestem et al. 2008). (1) valeurs inférieures à NQE/5 mais accessibles sans précaution analytique ou liée à un échantillonnage excessif.



## 6 Conclusions

La présente étude s'articule de la manière suivante :

- Synthèse bibliographique : recueil des données et des informations disponibles.

Cette synthèse bibliographique a permis de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible des informations relatives au fond géochimique des hydrosystèmes du territoire de la Réunion.

- Interprétation des données brutes existantes.

L'ensemble des données et des informations collectées ont été croisées sur des supports cartographiques pertinents de manière à identifier, pour les cours d'eau et pour les eaux souterraines, les secteurs à risque de concentrations naturelles élevées en éléments majeurs et traces. Un traitement des données brutes, afin de corriger notamment les erreurs d'unité, a été réalisé avant de procéder à l'analyse statistique des données. A l'issue de ce travail, quatre bases de données ont été constituées : **ESU**, rassemblant toutes les données relatives aux eaux de surface ; **ESO**, rassemblant toutes les données relatives aux eaux souterraines ; **Carto** : rassemblant tous les supports cartographiques. A partir de ces bases, **une représentation cartographique** a été proposée. Les données sur les eaux souterraines et les eaux de surface ont été reportées respectivement sur les cartes « **milieu/eaux souterraines et eaux de surface** » (Annexe 2) afin de dégager des **unités géologiques** pouvant présenter des caractéristiques comparables en termes d'occurrence en **éléments majeurs et traces dans les eaux souterraines et les eaux de surface**.

- Délimitation des secteurs à risque de fond géochimique élevé.

La délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé s'est appuyée sur l'ensemble des données collectées, bibliographiques et données brutes. Au regard de tous ces résultats, une délimitation des secteurs à risque de fond géochimique élevé est proposée (Annexe 3). La répartition des points de prélèvement ne permet pas d'attribuer ce risque à une entité hydrogéologique plus petite que celle de la masse d'eau. Le risque est identifié pour les eaux de surface et les eaux souterraines sur des supports cartographiques indépendants. Si dans certains secteurs les données sont abondantes et permettent d'affirmer avec certitude qu'un risque de fond géochimique élevé existe, d'autres secteurs présentent peu de données et seule une approche « prédictive » basée sur les connaissances acquises dans des contextes géologiques équivalents (BRGM, 2006) permet de délimiter le risque. Afin de rendre compte de cette disparité, une **estimation du niveau de confiance** attribué à chaque zone a été proposée suivant 3 niveaux de confiance (faible, moyen et élevé).

Pour les eaux souterraines de l'île de La Réunion, les minéralisations des eaux considérées dans cette étude sont relativement faibles. Les roches volcaniques de la Réunion libèrent du **calcium, du magnésium, du potassium et du sodium** généralement en quantité supérieures aux teneurs moyennes définies par Meybeck (1984) pour des eaux de surface drainant des roches volcaniques. Des concentrations, plus élevées sont observées pour les eaux sous influence marine ainsi que pour les eaux thermo-minérales des cirques de Cilaos et Salazie.

Il est également possible de distinguer l'enrichissement des eaux en **silice** qui marque les interactions eau/roche. En effet, l'ensemble des eaux souterraines présentent des teneurs en silice supérieures à la teneur moyenne des eaux drainant des roches volcaniques proposée par Meybeck (1984). On attribue donc **un risque de fond géochimique élevé** pour cet élément avec un **niveau de confiance élevé**.

Dans les zones sous influence marine, aquifères de la côte ouest et de l'Etang salé, on attribue pour **les chlorures, le sodium un risque de fond géochimique élevé avec un niveau de confiance élevé**. Dans les zones affectées par des intrusions salines, on s'attend également à la présence de **sulfates, de bore et de fluor** éléments qui sont associés au faciès marin.

L'analyse prédictive laissait attendre la présence de fer et de manganèse dans les eaux souterraines. Pour le **fer** on attribue un **risque de fond géochimique élevé avec un niveau de confiance élevé** pour le domaine du Piton des Neiges. Ce risque est élargi au domaine du piton de la Fournaise avec un niveau de confiance moyen du fait du nombre limité de données. Pour le **manganèse**, compte-tenu du nombre limité d'analyses et des seuils de quantification indéterminés, on attribue **une zone à risque de fond géochimique élevé avec un niveau de confiance moyen** pour le domaine du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise. On peut s'attendre à la présence de fer et de manganèse dans les aquifères captifs et semi-captifs du fait de sa mobilité plus grande dans les environnements fermés. Dans les systèmes ouverts, on peut s'attendre à une mobilisation sous forme particulaire de manière similaire à l'aluminium (Hem, 1985).

Pour les eaux de surface, du fait de l'altération pédoclimatique du substratum volcanique, on s'attend à la mobilisation particulaire des éléments associés aux roches aluminosilicatées dont l'aluminium, le fer et le manganèse. Les éléments mobilisés sous forme particulaire se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et le temps avec des dépassements qui correspondent à des pics brutaux. On définit ainsi une zone à **risque de fond géochimique élevé pour le fer, l'aluminium et le manganèse**. Ce risque est attribué avec un **niveau de confiance élevé** pour les versants est de la Réunion. Pour les versants ouest, du fait du nombre réduit d'analyses et des précipitations moins intenses, on attribue ce risque avec un **niveau de confiance moyen**.

Pour la détermination de risques de fond géochimique pour les **éléments traces** dans les eaux souterraines et les eaux de surface, il n'est pas possible de statuer. En raison d'une part des seuils de quantifications trop élevés et du nombre d'analyses réduit et d'autre part de la localisation des points d'eau qui se trouvent parfois dans des zones

anthropiques (zone agricole ou urbaine ou à proximité de sites industriels). Ainsi, il n'est pas possible de confirmer pour tous les secteurs un risque de fond géochimique élevé pour les éléments traces. Malgré cela on peut s'attendre à la présence de **zinc** et de **cuivre** qui peuvent être associés aux activités agricoles mais qui sont également présents dans les roches volcaniques de La Réunion. Par ailleurs, localement on a pu noter l'occurrence de **plomb**, d'**arsenic** et de **chrome** dont l'origine serait naturelle et leur mobilisation possible sous forme particulière.

- Préconisations pour les futurs programmes d'acquisition de données.

La disparité des données disponibles et des niveaux de confiance attribués aux zones à risque de fond géochimique élevé montre clairement la nécessité de compléter et d'améliorer la connaissance existante. En gardant à l'esprit cet objectif, cette partie vise à formuler les recommandations concernant la définition de futurs programmes d'acquisition de données pertinents.

Suivant le niveau de confiance (ou connaissance) attribué à chaque zone identifiée comme présentant un fond géochimique élevé, les futurs programmes d'acquisition de données notamment pour les éléments traces répondront à différentes finalités : identifier (niveau de confiance faible), préciser (niveau de confiance moyen) ou estimer (niveau de confiance élevé) le fond géochimique. Les recommandations concernant les futurs programmes d'acquisition de données, formulées ici, concernent notamment, le choix des supports à analyser pour les eaux de surface, la période et la fréquence d'échantillonnage, le protocole d'échantillonnage et le protocole analytique.

Plus précisément, pour le territoire de la Réunion, du fait de la faible quantité des données sur les éléments traces et de leur qualité il est difficile de statuer sur le niveau de risque de fond géochimique. En effet outre le nombre de points de surveillance, le nombre d'analyses pour une station est limité, aussi les occurrences en éléments traces sont rarement répétées pour une station donnée. Par ailleurs, les seuils de quantification sont pour certains producteurs et certains éléments trop élevés pour statuer sur le fond géochimique, ainsi pour le sélénium le seuil de quantification est de  $10 \mu\text{g.L}^{-1}$  ce qui est équivalent à la limite de qualité pour cet élément. Par ailleurs pour la majeure partie des analyses des éléments traces les seuils de quantification ne sont pas renseignés.

Compte-tenu du nombre limité de données et d'occurrences, une étude dédiée pourrait être envisagée afin d'identifier le fond géochimique pour les éléments traces, **cuivre**, **zinc**, **chrome**, **arsenic** et **plomb** pour lesquels des occurrences ont été soulignées dans les eaux souterraines et les eaux de surface en essayant de rattacher ces occurrences à des minéralisations caractéristiques.



## 7 Bibliographie

**Andre C., Cruchet M.**, (1995) – Les gisements de matériaux à La Réunion. Notice de la carte à l'échelle 1/100 000. Description et caractéristiques des matériaux volcaniques (95-REU-38), Rapport BRGM/RR-38551-FR.

**Arrêté du 11 Janvier 2007** relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique.

**Aunay B., Gourcy L.** (2007) - Approche hydrogéochimique pour la détermination de l'origine de la contamination des eaux souterraines à Antenne 4 - Phase 2, Rapport BRGM RP-55535-FR, 91 p.

**Bachèlery P., Mairine P.** (1990) - Évolution morpho-structurale du Piton de la Fournaise depuis 0,53 Ma. Dans : J. F. LÉNAT Ed., Le volcanisme de l'île de la Réunion. Monographie. Publication du Centre de Recherches Volcanologiques de Clermont-Ferrand, pp. 213-242.

**Bachèlery P., Lénat J.F.** (1993) - Le Piton de la Fournaise. Mém. Soc. géol. France, n° 163, pp. 221-229.

**Bagnato E., Aiuppa F., D'Allessandro W., Allard P., Calabrese S.** (2008) – Mercury concentration, speciation and budget in volcanic aquifers: Italy and Guadeloupe (Lesser Antilles). Journal of Volcanology and Geothermal Research, *Accepted Manuscript*, doi : 10.1016/j.jvolgeores.2008.10.005.

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

**Billard G.** (1974) - Cartes géologiques de la France - la Réunion. In: BRGM (Editor), 4 feuilles 1/50 000ème.

**Birch G.F., Taylor S.E., Matthai C.** (2001) - Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metal in aquatic sediments: a review and some new concepts. Environmental Pollution, 113, pp. 357-372.

**Blum A., Chery L., Barbier J. et al.** (2002) –Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport BRGM RP-51549-FR, 5 vol.

**Blum A., Brenot A., Chéry L. et al.** (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 2. Caractérisation des secteurs à risque. Rapport BRGM RP-54530-FR, 137p, 3 ann.

**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 ann.

**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, 109 p.

**BRGM** (1994) - Hydrochimie des eaux souterraines de l'île de la Réunion, eaux de sources et eaux de nappes. Bilan et synthèse, Rapport BRGM 94REU49, 74p.

**BRGM** (2006) – Guide technique – Qualité naturelle des eaux souterraines – Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français. BRGM Editions, 248 p.

**Circulaire DCE 2007/23 (07/05/07)** : Définition des « normes de qualité environnementale provisoires (NQE<sub>p</sub>) » des 41 substances impliquées dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances dangereuses dans l'eau.

**Collin B. et Doelsch E.** (2008) – Evaluation de la mobilité et de la phytodisponibilité des éléments traces métalliques des sols. Etude Office de l'Eau-CIRAD, Mai 2008.

**Coquery M., Morin A., Becue A.,** et al. (2005). – Priority substances of the European Water Framework Directive: analytical challenges in monitoring water quality, Trends in Analytical Chemistry, 24 (2), pp. 117-127.

**Creed J., Martin T., Sivaganesan M.** (1995). – Preservation of trace metals in water samples. Journal of American Water Works Association, 3, pp. 104-114.

**Demange J., Chovelon P. et Puvilland P.** (1989) – Geothermal model of the salazie cirque (Reunion island) : volcanic and structural implication. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 36, pp. 153-176.

**Directive 2000/60/CE** Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

**Directive 2006/118/CE** du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

**Directive 2008/105/CE** (16/12/08) : Directive du Parlement européen et du Conseil établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE.

**DIREN** (2005) - Etat des lieux du district hydrographique de La Réunion. Rapport A2003-42, 211 p.

**Doelsch E.** (2004) – Eléments traces métalliques – Inventaire pour l'île de La Réunion. Etude CIRAD - Avril 2004.

**Doelsch E., Van De Kerchove V., Saint Macary H.**, (2006a) - Heavy metal content in soils of Réunion (Indian Ocean). GEODERMA, 134, pp.119-134.

**Doelsch E., Saint Macary H., Van de Kerchove V.** (2006b) - Sources of very high heavy metal content in soils of volcanic island (La Reunion), Journal of geochemical exploration, 88, pp. 194-197.

**Doelsch E., Doelsch I.B., Rose J., Masion A., et al.** (2006c). New combination of EXAFS Spectroscopy and Density Fractionation for the Speciation of Chromium within an Andosol. Environmental Science & Technology, 40, pp. 7602-7608.

**FD T90523-3** (à paraître) : Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 3 – Prélèvement d'eau souterraine.

**FD T90523-1** (février 2008) : Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 3 – Prélèvement d'eau superficielle.

**Fauconnier R.**, (1991) - La canne à sucre. Technicien d'Agriculture Tropicale, 65 p.

**Forstner U, Wittmann G.** (1981) – Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer Verlag, Berlin, p. 119-131.

**Frissant N., Lacquement F., Raçon J.Ph.** (2003). Etude du potentiel hydrothermal de la zone amont de la rivière du Bras Rouge (Cirque de Cilaos), Rapport BRGM/RP-52673-FR, 80 p.

**Frissant N., Gourcy L., Brach M.** (2005a) - Recherche d'une relation entre le plateau de Dos-d'Ane et les sources Blanche et Denise. Rapport BRGM/RP-54167-FR

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

**Frissant N., Barthelemy L., Petit V.**, (2006) - Synthèse des ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables à La Réunion. Rapport final. Rapport BRGM/RP-55035-FR

**Garcia B., Bertin C., Ricard J., Bourg A., et al.** (1994). – Effet de berge, effet de vase, deux facteurs différents de mobilisation du manganèse : un exemple dans le champ captant de la vallée du Lot (France), *Annls Limnol.* 30 (1), pp. 67-85.

**GHESTEM JP, CROUZET C, GIRARDOT N.** (2008), Estimation des fonds géochimiques en éléments traces des eaux de surface continentales et des eaux souterraines : cahier des charges pour l'analyse et le prélèvement. Version 0, BRGM/RP-56835-FR, 38 p.

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

**Grunberger O.,** (1989) - Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté - massif du Piton des Neiges - île de la Réunion, thèse à l'université Paris XI, Paris. 197p.

**Hem J.D.** (1985) – Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, U.S. Geological Survey Water Supply, paper 2254, 264 p.

**Hoareau J.L., Nicolini E., Fritz B., Delcher E.** (2005) - Signatures géochimiques des eaux souterraines en milieu basaltique tropical (île de la Réunion). Approche expérimentale. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 167(3), pp. 257-267.

**Hoenig M.** (2001). – Preparation steps in environmental trace element analysis –facts and traps. *Talanta* 54, pp.1021-1038.

**Join J.L.,** (1991) - Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire. Le Piton des Neiges - Ile de la Réunion, thèse, Université de la Réunion, Saint-Denis. 187 p.

**Lacquement F., Frissant N., Chevalier P., Nehlig P.** (2005) – Etude du potentiel hydrothermal de la zone amont de la rivière du Bras-Rouge (Cirque de Cilaos)-Phase 2. BRGM/RP-54251-FR, 68 p., 24 ill., 2 ann.

**Laperche V., Dictor M.C., Clozel-Leloup B., Baranger P.,** (2004) - Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52881-FR, 136 p.

**Laperche V., Lucas E. et Jaques E.** (2008) - Cartographie des teneurs des Eléments Traces Métalliques (ETM) sur l'ensemble des sols de l'île de la Réunion. Rapport final, BRGM/RP-56576-FR.

**Lions J., Allier D., Pinson S., Vittecoq B.** (2008) - Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Martinique. Rapport BRGM RP-56748-FR, 122 p.

**Lopoukhine M., Stieltjes L.** (1978) - Evaluation du potentiel géothermique de la Réunion, Rapport BRGM 78SGN467GTH, 57 p.



**Mauroux B., Chavinier L.** (1994) - Hydrochimie des eaux souterraines de l'île de la Réunion, eaux de sources et eaux de nappes. Bilan et synthèse, Rapport BRGM R37963 REU SGN94, 94 REU 10, 73 p.

**Meybeck M.** (1984) – Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse d'Etat. Paris 6. 493 p.

**Moulin M. et Lebon D.** (2002) – Synthèse hydrogéologique du cirque de Salazie (Ile de la Réunion). Rapport BRGM/RP-51450-Fr, 160 p.

**Mouvet C.** (1986) - Métaux lourds et mousses aquatiques - Synthèse méthodologique. Agence de l'eau Rhin-Meuse, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Laboratoire d'Ecologie, Université de Metz. 110 p.

**MVTERRE** (2008) – Mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines de La Réunion. Projet de recherche pluriannuel : BRGM, Région Réunion, Conseil Général de la Réunion, Etat (DIREN), Europe (Feder)

**Nimis P.L., Fumagalli F., Bizzotto A., et al.** (2002). – Bryophytes as indicators of trace metals pollution in the River Brenta (NE Italy). *The Science of the Total Environment* 286, pp. 233-242.

**Nordstrom, D.K., Plummer, L.N., Wigley, T.M.L.** (1979) - Comparison of computerized chemical models for equilibrium calculations in aqueous systems. In: *Chemical Modelling in Aqueous Systems* (Ed. E.A. Jenne). American Chemical Society Symposium Series 93, pp. 815-835.

**Quevauviller P.** (2002). – *Quality Assurance for Water Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 262 p.

**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.

**Rançon J.Ph.** (1985) – Hydrothermal history of Piton des Neiges volcano (Reunion Island, Indian ocean). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 26, pp. 297-315.

**Raunet M.** (1991) - Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquence pour la mise en valeur agricole. CIRAD IRAT, Montpellier. 438 p.

**Rocher Ph.** (1988) – Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du piton des neiges, Ile de la Réunion. Thèse, Université de Paris XI - Orsay. 443 p.

**Saint Macary H.**, (2003) - Risques de pollution par les excès d'azote en élevage bovin à la Réunion : connaissances récentes et questions de recherche, Les ruminants : élevage et valorisation. Résumés des présentations et posters du symposium régional interdisciplinaire, 10-13 juin 2003, St-Denis de la Réunion. Grimaud P. (eds). 18 p.

**Selinus O.** (2005) - Essentials of Medical Geology. Academic Press, London, 812 p.

**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.

**Stieltjes L.**, (1994) – Notice explicative de la carte géologique de La Réunion 1/100 000. rapport BRGM/RR-38001-FR .

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

**Thomas P.** (2003) – Metal Analysis in Chemical Analysis of Contaminated Land. Edited by K.C.Thompson and C.P. Nathanail. Blackwell CRC Press.

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

**Wedepohl, K. H.** (1970) - Handbook of Geochemistry, Vol. II/3: Berlin, Germany, Springer-Verlag.

**Wedepohl, K. H.** (1974) - Handbook of Geochemistry, Vol. II/4: Berlin, Germany, Springer-Verlag.

**Yeghicheyan D., Carignan J., Valladon M.**, et al. (2001) – A compilation of silicon and thirty one trace elements measured in the natural river water reference material SLRS-4 (NRC-CNRC). Geostandards Newsletter 25, pp. 465-474.

## **Annexe 1**

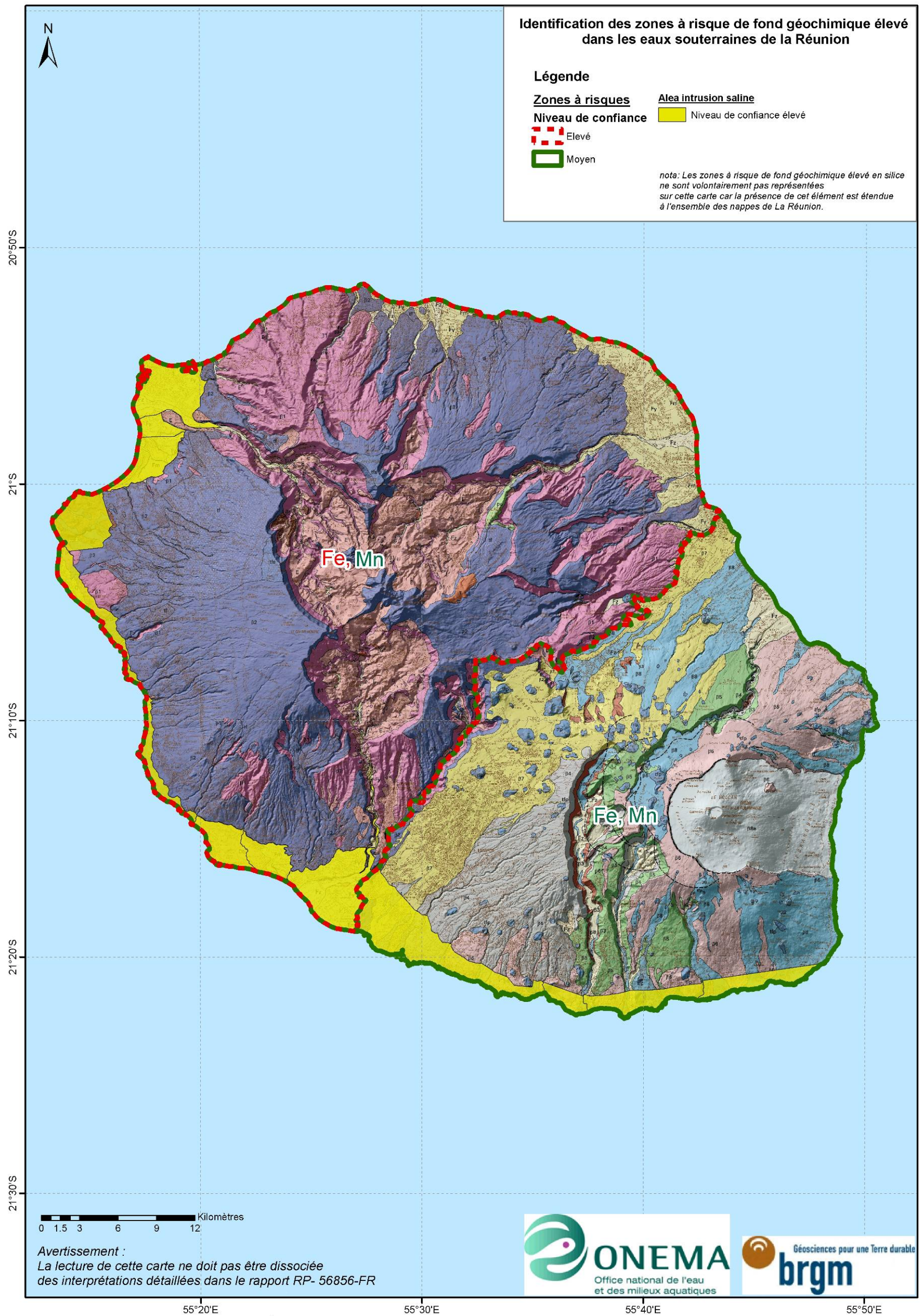
### **Atlas de cartes « milieu/eaux souterraines et eaux de surface » (cf DVD associé au rapport)**



## **Annexe 2**

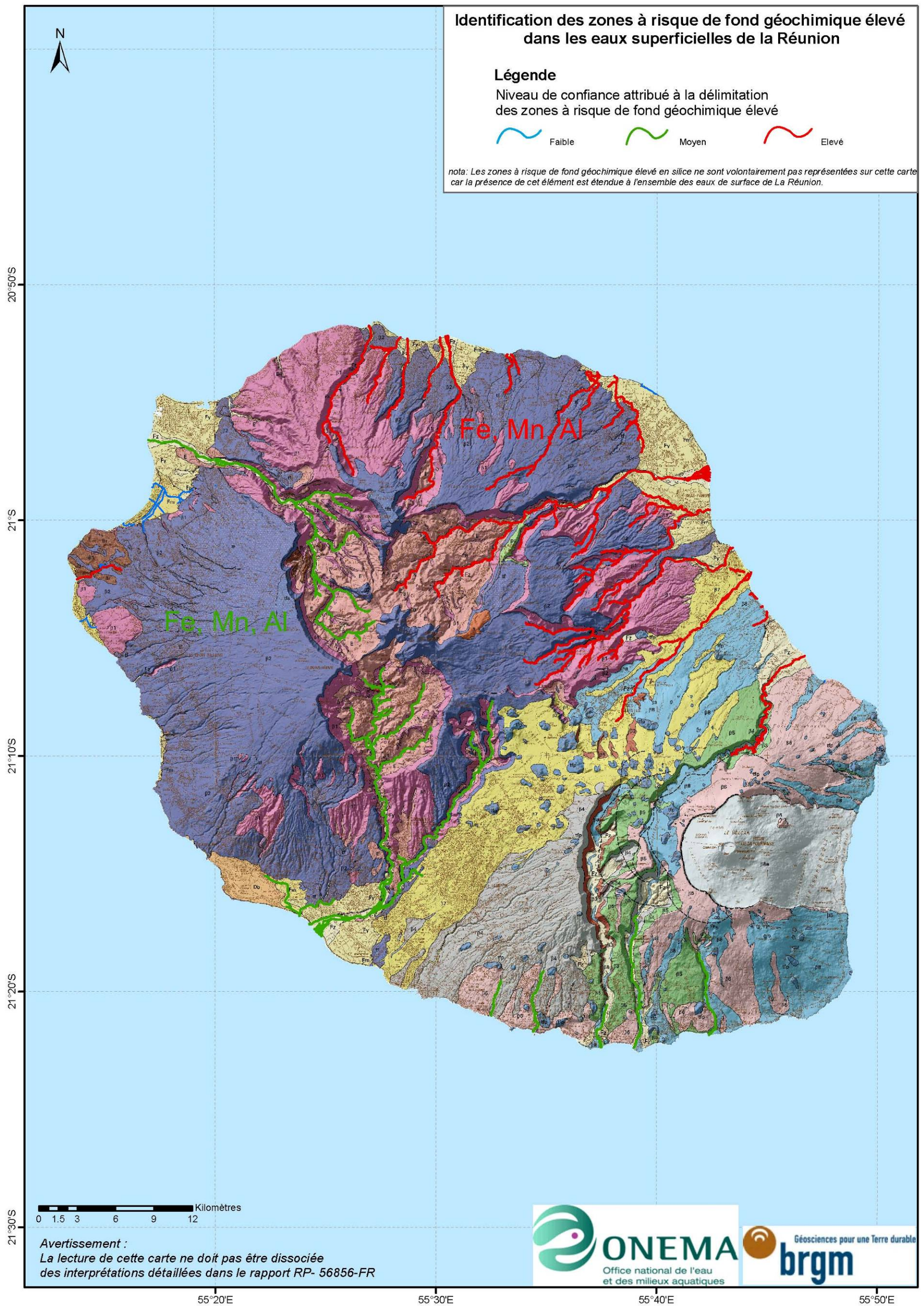
# **Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé**













## **Annexe 3**

### **Coefficients de variation (CV) de reproductibilité de la profession "laboratoires accrédités analystes de l'eau", extraits des essais AGLAE**



ELEMENTS	NIVEAUX DE CONCENTRATIONS (µg/L)	CV <sub>R</sub> *de la profession (%)
Al	20	40
	100	15
	400	14
Cd	2.5	20
	5	12
	10	10
Cr	20	10
	10	15
	20	13
Fe	50	10
	100	12
	200	10
Mn	400	7
	40	12
	100	9
Ni	400	8
	10	20
	20	15
Pb	50	10
	10	10
	20	12
Zn	50	13
	100	7
	200	6.5
As	400	6.4
	5	20
	10	15
Hg	20	14
	1	17
	2	13
Se	10	12
	10	20
	20	20
Ba	40	20
	70	13
	100	11
B	150	10
	100	20
	200	10
Cu	400	5
	50	7
	100	9
Ag	150	10
	5	30
	10	25
Sb	20	20
	15	17
	20	15
F	40	12
	100	20
	200	15
	500	12

Calculs à partir de la norme NF ISO 5725

\*CV<sub>R</sub> : Coefficient de Variation de reproductibilité

$CV_R = 100 * 100 * sR / M$

- la moyenne globale M pour l'ensemble des laboratoires ayant participé à l'analyse
- l'écart-type de reproductibilité sR



**Centre scientifique et technique  
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34