

PROVISOIRES

Étude détaillée du fond géochimique des eaux souterraines de Martinique

Rapport final

BRGM/RP-62886-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2012 POL2900

L. Arnaud, M. Senergues, N. Devau

Vérificateur :

Nom : J. Lions

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : J.-C. Audru

Date :

Signature :

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

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

Mots clés : Directive Cadre sur l'Eau, Eaux souterraines, Éléments majeurs, Fond géochimique, Métaux, Valeur seuil, Martinique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Arnaud L., Senergues M., Devau N. (2013). Étude détaillée du fond géochimique des eaux souterraines de Martinique. Rapport BRGM/RP-62886-FR, 109 p., 38 ill., 6 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'évaluation du bon état chimique des masses d'eau souterraine, au titre de la Directive Cadre sur l'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.

C'est pourquoi l'ODE et la DEAL de Martinique ont confié au BRGM l'étude détaillée du fond géochimique des eaux souterraines.

D'un point de vue méthodologique, il était nécessaire de compléter l'étude préliminaire financée par l'ONEMA en 2008. La base de données cartographique a ainsi été enrichie avec des résultats d'analyse de qualité, acquis en suivant les recommandations techniques du guide AQUAREF, en termes d'échantillonnage et d'analyse. Trente points d'eau ont été échantillonnés en août 2012 (condition de hautes eaux) et en février 2013 (basses eaux).

L'étude a permis de contraindre l'estimation des fonds géochimiques des eaux souterraines. Des zones à risque de fond géochimique élevé ont été délimitées pour les éléments chimiques suivants : le sodium et les chlorures dans le sud de l'île, le bore dans le Sud Caraïb, les sulfates dans la presqu'île de Sainte-Anne, localement pour l'arsenic, le baryum et le mercure ainsi que le fer et le manganèse sur tout le territoire.

Dans certains cas, un fond géochimique élevé entraîne des concentrations supérieures aux normes de potabilité. Aussi, afin de prendre en compte ces fortes teneurs d'origine naturelle dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraines, le BRGM a proposé de nouvelles valeurs seuils pour le sodium, les chlorures, l'arsenic, le fer et le manganèse.

Ces nouvelles valeurs seuils doivent permettre de ne pas déclasser une masse d'eau dont les concentrations en éléments chimiques ne s'expliquent pas par des pollutions mais par le fond géochimique naturel des eaux.

Chaque nouvelle valeur seuil est associée à une zone d'emprise : une masse d'eau dans sa totalité ou un sous-secteur lié à une formation géologique particulière.

Enfin, il faut souligner que des interrogations subsistent pour le nickel avec des fortes concentrations mesurées pour la première fois sur le forage de Rivière Salée – Nouvelle Cité en février et avril 2013. Il est délicat à ce stade d'associer ces anomalies en nickel au fond géochimique des eaux souterraines. Une attention particulière sera portée à ce paramètre lors des prochaines campagnes d'analyse.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Cadre de l'étude | 9 |
| 1.1. DÉFINITION DU FOND GÉOCHIMIQUE | 9 |
| 1.2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE | 9 |
| 1.3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE | 10 |
| 2. Contexte hydrogéochimique et stratégie d'échantillonnage | 13 |
| 2.1. CONTEXTES GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE (EXTRAIT DU RAPPORT BRGM/RP-56266-FR) | 13 |
| 2.2. SÉLECTION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT | 14 |
| 2.3. CAMPAGNES DE TERRAIN ET ANALYSES | 15 |
| 2.3.1. Prélèvements | 15 |
| 2.3.2. Analyses | 17 |
| 2.4. FACIÈS HYDROCHIMIQUES DES EAUX ÉCHANTILLONNÉES | 18 |
| 3. Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé | 21 |
| 3.1. MÉTHODOLOGIE SUIVIE | 21 |
| 3.1.1. Constitution de la base de données | 21 |
| 3.1.2. Traitement de données | 22 |
| 3.2. ÉLÉMENTS MAJEURS | 23 |
| 3.3. ÉLÉMENTS TRACES INDÉSIRABLES | 26 |
| 3.3.1. Aluminium | 26 |
| 3.3.2. Antimoine | 28 |
| 3.3.3. Baryum | 30 |
| 3.3.4. Bore | 32 |
| 3.3.5. Fluor | 32 |
| 3.3.6. Cuivre | 36 |
| 3.3.7. Zinc | 38 |
| 3.4. ÉLÉMENTS TRACES TOXIQUES | 40 |
| 3.4.1. Arsenic | 40 |
| 3.4.2. Cadmium | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.3. Chrome | 45 |
| 3.4.4. Mercure | 47 |
| 3.4.5. Nickel | 49 |
| 3.4.6. Plomb | 51 |
| 3.4.7. Sélénium..... | 53 |
| 3.5. FER ET MANGANÈSE | 55 |
| 3.5.1. Mobilité du fer et du manganèse | 55 |
| 3.5.2. Diagrammes pH-pe | 57 |
| 3.5.3. Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé en fer et manganèse..... | 60 |
| 3.6. RÉCAPITULATIF | 60 |
| 4. Détermination de nouvelles valeurs seuils | 65 |
| 4.1. MÉTHODOLOGIE SUIVIE..... | 65 |
| 4.2. DÉPASSEMENTS DES VALEURS SEUILS ACTUELLES | 65 |
| 4.3. ARSENIC | 67 |
| 4.4. CHLORURES | 68 |
| 4.5. SODIUM | 70 |
| 4.6. FER 71 | |
| 4.7. MANGANÈSE..... | 73 |
| 4.8. RÉCAPITULATIF | 75 |
| 5. Conclusion | 77 |
| 6. Références bibliographiques | 79 |

Liste des illustrations

| | |
|---|----|
| Illustration 1 : Liste des 30 points de prélèvements | 15 |
| Illustration 2 : Localisation des 30 points de prélèvement sur fond de carte géologique au 1/50 000 (BRGM©) | 16 |
| Illustration 3 : Planches photographiques des prélèvements : a) forage Robert – Pontaléry, b) filtration in situ à 0.45 µm, c) source Essente à Morne Rouge, d) mesures des paramètres in situ..... | 17 |

| | |
|--|----|
| Illustration 4 : Paramètres analysés et limites de quantification associées..... | 18 |
| Illustration 5 : Diagramme de Piper pour les deux campagnes de prélèvement..... | 19 |
| Illustration 6 : Délimitation des faciès hydrochimiques enrichies en Ca, Mg, Na, C et SO ₄ | 25 |
| Illustration 7 : Carte des résultats d'analyses pour l'Aluminium | 27 |
| Illustration 8 : Carte des résultats d'analyses pour l'Antimoine | 29 |
| Illustration 9 : Carte des résultats d'analyses pour le Baryum | 31 |
| Illustration 10 : Carte des résultats d'analyses pour le Bore | 34 |
| Illustration 11 : Carte des résultats d'analyses pour le Fluor..... | 35 |
| Illustration 12 : Carte des résultats d'analyses pour le Cuivre | 37 |
| Illustration 13 : Carte des résultats d'analyses pour le Zinc | 39 |
| Illustration 14 : Carte des résultats d'analyses pour l'Arsenic..... | 42 |
| Illustration 15 : Carte des résultats d'analyses pour le Cadmium | 44 |
| Illustration 16 : Carte des résultats d'analyses pour le Chrome..... | 46 |
| Illustration 17 : Carte des résultats d'analyses pour le Mercure | 48 |
| Illustration 18 : Carte des résultats d'analyses pour le Nickel..... | 50 |
| Illustration 19 : Carte des résultats d'analyses pour le Plomb..... | 52 |
| Illustration 20 : Carte des résultats d'analyses pour le Sélénium..... | 54 |
| Illustration 21 : Concentrations en fer et manganèse supérieures aux normes de potabilité pour des eaux de forage | 56 |
| Illustration 22 : Contextes hydrogéologiques des forages concernés par des eaux naturellement enrichies en fer et manganèse | 57 |
| Illustration 23 : Diagramme de Pourbaix pH-pe pour le fer calculé pour une eau de composition moyenne à partir des analyses effectuées..... | 59 |
| Illustration 24 : Diagramme de Pourbaix pH-pe pour le manganèse calculé pour une eau de composition moyenne à partir des analyses effectuées | 60 |
| Illustration 25 : Carte des résultats d'analyses pour le Fer | 61 |
| Illustration 26 : Carte des résultats d'analyses pour le Manganèse..... | 62 |
| Illustration 27 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond géochimique élevé | 63 |
| Illustration 28 : Tableau récapitulatif des dépassements de valeurs seuils DCE d'origine naturelle | 66 |
| Illustration 29 : Concentrations en arsenic pour la masse d'eau souterraine Nord Atlantique et nouvelle valeur seuil proposée..... | 67 |
| Illustration 30 : Principales valeurs statistiques et nouvelle valeur seuil pour les chlorures | 68 |
| Illustration 31 : Concentrations en chlorures pour les masses d'eau souterraine Centre, Sud Atlantique et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées | 69 |

| | |
|---|----|
| Illustration 32 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le sodium..... | 70 |
| Illustration 33 : Concentrations en sodium pour les masses d'eau souterraine Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées | 70 |
| Illustration 34 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le fer..... | 71 |
| Illustration 35 : Évolution des concentrations en fer pour les masses d'eau souterraine Nord Atlantique, Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées | 72 |
| Illustration 36 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le manganèse | 73 |
| Illustration 37 : Évolution des concentrations en manganèse pour les masses d'eau souterraine Nord Atlantique, Nord Caraïbes, Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées..... | 74 |
| Illustration 38 : Tableau récapitulatif des nouvelles valeurs seuils proposées | 75 |

Liste des annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 Compte-rendu de la réunion de lancement (30 mai 2012)..... | 83 |
| Annexe 2 Paramètres physico-chimiques <i>in situ</i> et conditions de prélèvement (août 2012 et février 2013)..... | 87 |
| Annexe 3 Résultats d'analyses pour la campagne 2012/2013..... | 91 |
| Annexe 4 Cartes résultats pour les éléments majeurs | 95 |
| Annexe 5 Synthèse des travaux reportant des concentrations en fer et en manganèse dépassant les normes de potabilité | 103 |
| Annexe 6 Compilation des données de forages dont les eaux présentent des concentrations en fer et manganèse élevées | 109 |

PROVISOIRES

1. Cadre de l'étude

1.1. DÉFINITION DU FOND GÉOCHIMIQUE

On désigne par le terme « fond géochimique » des eaux tous les éléments chimiques, majeurs et traces, provenant uniquement d'une origine naturelle.

L'eau de pluie altère les sols et les roches, en particulier en climat tropical. Cette altération produit une lente destruction chimique des minéraux et, à terme, conduit à un entrainement de matières dont certaines se retrouvent sous forme dissoute dans les eaux souterraines puis dans les rivières, jusqu'à la mer.

La Martinique étant une île volcanique, son histoire géologique fait qu'il est possible de retrouver des éléments tels que des métaux de manière naturelle dans les eaux. La présence de ces éléments est directement liée à la nature géologique du sol et du sous-sol. Au cours de son parcours, l'eau acquiert une charge en éléments dissous, jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui caractérise son faciès : son fond géochimique naturel.

La minéralisation finale d'une eau souterraine est fonction de la nature de la roche qui compose l'aquifère, du type de circulation des eaux au sein de la masse rocheuse, du temps de contact avec les minéraux, des phénomènes d'oxydo-réduction et du renouvellement de l'eau dans le réservoir par les apports d'eau météorique (BRGM, 2006).

1.2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 vise à atteindre ou à restaurer le bon état des masses d'eau d'ici 2015. La directive fille 2006/118/CE du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration fixe les règles de définition de ce bon état. Ces règles sont transposées en droit français par l'arrêté du 17 décembre 2008.

S'agissant plus spécifiquement des masses d'eau souterraines, le bon état est la somme de deux états : l'état quantitatif et l'état chimique.

Afin d'orienter l'évaluation de l'état chimique, la directive 2006/118/CE et l'arrêté du 17 décembre prévoient :

- > des normes de qualité, fixées au niveau européen, pour deux paramètres (nitrates et pesticides),
 - Nitrates 50 mg/l
 - Pesticides 0,1 µg/l ou 0,5 µg/l au total
- > des valeurs seuils fixées par les États membres pour les paramètres qui ont été identifiés comme contribuant à caractériser les masses ou groupes de

masses d'eau souterraine comme étant à risque. L'arrêté du 17 décembre 2008 prévoit des valeurs seuils nationales minimales pour certains paramètres (annexe II.A) :

- o Arsenic 10 µg/l
- o Cadmium 5 µg/l
- o Plomb 10 µg/l
- o Mercure 1 µg/l
- o Ammonium 0,5 mg/l

Pour ces dernières, il ne s'agit que de valeurs par défaut. Par exemple, pour les nappes dont le contexte géologique influe sur la concentration d'un de ces paramètres, des valeurs seuils peuvent être localement définies.

On comprend donc que 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.

Une précédente étude financée par l'ONEMA en 2008 (Lions et al., 2008) portait sur l'identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de Martinique.

Il s'agissait d'une estimation préliminaire, réalisée sur la base d'une synthèse bibliographique et de la compilation des données disponibles. La disparité des données disponibles et des niveaux de confiance attribués aux zones à risque de fond géochimique élevé montrait clairement la nécessité de compléter et d'améliorer la connaissance existante, en particulier sur les points suivants :

- dans le secteur du sud de l'île, le nombre de points d'eau analysé et le nombre de paramètres mesurés sont réduits empêchant la définition du fond géochimique pour certains éléments traces dont l'arsenic et le chrome pour les eaux souterraines ;
- les masses d'eau Nord Atlantique et Centre présentent une faible quantité de points d'eau analysés ce qui empêche de délimiter précisément les zones de fond géochimique ;
- les analyses en mercure, antimoine et sélénium sont de qualité insuffisante compte-tenu de seuils de quantification trop élevés pour une estimation du fond géochimique. Le sélénium est associé aux sulfures et l'antimoine au plomb.

1.3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude poursuit ainsi deux objectifs principaux :

- mieux contraindre l'estimation du fond géochimique pour l'ensemble des éléments majeurs et traces, en particulier ceux dont un risque de fond

géochimique élevé était (Fe, Mn, As) et ceux pour lesquels trop peu de données de qualité sont disponibles (Cd, Hg, Sb, Se, Cr). En effet, compte-tenu de la variabilité du contexte climatique, de l'altération, du contexte lithologique, du contexte hydrothermal et du contexte hydrogéologique, il est délicat de délimiter précisément les zones à risque de fond géochimique en l'état actuel ;

- s'il s'avère que des dépassements du seuil sont confirmés sur certaines masses d'eau, discriminer, dans la mesure du possible, la part naturelle et la part anthropique afin de proposer, masse d'eau par masse d'eau, une valeur seuil différente de la valeur seuil nationale si ce paramètre est influencé par le contexte géologique.

Afin d'atteindre ces objectifs, il était nécessaire de mettre en place des campagnes de prélèvements dédiées à l'estimation du fond géochimique, en respectant les recommandations techniques du programme AQUAREF, en termes d'échantillonnage et d'analyse.

PROVISOIRES

2. Contexte hydrogéochimique et stratégie d'échantillonnage

2.1. CONTEXTES GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE (EXTRAIT DU RAPPORT BRGM/RP-56266-FR)

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

De manière générale, les concentrations en éléments chimiques dans les eaux proviennent en grande partie de l'altération des roches encaissantes. Les éléments traces permettent de préciser l'origine de la minéralisation, les variations pouvant être liées à des variations de lithologie ou de faciès, ou à des apports anthropiques bien identifiés.

Le contexte géologique et hydrogéologique particulier au territoire de la Martinique détermine un certain nombre de processus contrôlant potentiellement la composition géochimique en éléments majeurs et traces des eaux naturelles. Parmi les plus importants, on retiendra :

- les interactions eau-roche, accentuées par la nature volcanique des roches. Les verres volcaniques sont notamment beaucoup plus réactifs pendant l'altération que les autres roches silicatées (Gislason et Euster, 1987). Ainsi, la mobilisation des éléments de ces roches vers la phase dissoute des eaux se trouve accentuée. En Martinique, les températures élevées et les précipitations importantes accroissent encore davantage les processus d'altération ;
- les interactions eau-gaz volcaniques. Les gaz émis dans le contexte volcanique de la Martinique peuvent présenter les composés dissous suivants : des sulfites, des sulfates et des thiosulfates ; de l'acide chlorhydrique (HCl) ; des chlorures (NaCl, AlCl₃, FeCl₃) ; des composés du fluor (F, HF, SiF₄) ; des oxydes de carbone (CO, COS) ; du méthane ; de l'azote ; de l'hydrogène. Les eaux naturelles interagissant avec ces gaz sont susceptibles de collecter ces composés dissous ainsi que certains éléments volatils (Tonani, 1971 ; Symonds et al., 2001). Par ailleurs, en présence d'acides (sulfurique et

chlorhydrique) provenant des gaz volcaniques, l'hydrolyse des minéraux, et donc les interactions eau-roche se trouvent également accentuées ;

- les phénomènes hydrothermaux et le cortège des minéraux associés qui viennent enrichir les interactions décrites précédemment. On en relève de nombreux témoins en Martinique avec des minéralisations hydrothermales actuelles ou anciennes et des sources thermales qui se situent à proximité des édifices volcaniques récents (sources carbo-gazeuses, sulfureuses, ferrugineuses, chlorurées sodiques ;
- les phénomènes maritimes liés à la proximité d'eau de mer : embruns marins, biseau salé, eaux saumâtres de bord de mer.

2.2. SÉLECTION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT

Les critères de sélection des points de prélèvement ont été discutés lors de la réunion de lancement du 30 mai 2012 (Cf. compte-rendu en Annexe 1). La liste définitive des 30 points d'eau a été validée par la DEAL et l'ODE après proposition par le BRGM d'une pré-sélection de 35 stations.

Pour l'évaluation du fond géochimique, il est tout d'abord impératif d'étudier des points d'eau non impactés par des activités anthropiques. Dans certains secteurs du sud de l'île, il n'est cependant pas toujours évident d'y parvenir.

Il a été décidé de couvrir le maximum de lithologies représentatives des aquifères martiniquais et, dans la mesure du possible, dans des secteurs non renseignés jusqu'alors. Les forages ont été privilégiés aux sources, étant rappelé que les forages non impactés par des activités anthropiques sont rares.

Les prélèvements ne visaient pas à reconnaître les eaux thermales ou encore la frange littorale sous influence d'intrusions marines. Les résultats d'analyse issus des différentes prospections géothermiques conduites en Martinique ont cependant bien été compilées (§ 3.1.1).

Il faut signaler que des prospections de terrain ont été menées dans le but de repérer des sources non répertoriées dans la Banque du Sous-Sol dans des secteurs d'intérêt. Les zones pour lesquelles aucun point d'accès aux eaux souterraines n'a été trouvé sont localisées sur la carte de l'illustration 2.

Au final, 12 forages et 18 sources ont été échantillonnés. Toutes les masses d'eau souterraine sont bien entendu représentées.

Sur les 31 unités aquifères de la BDLISA (Référentiel hydrogéologique de la Martinique), 19 ont été échantillonnées tandis qu'une unité semi-perméable a été étudiée car suivie par la station de surveillance DCE du Gros Morne – La Borelli (Illustration 1). Les unités aquifères non étudiées correspondent pour la grande majorité à des aquifères de faible extension. En définitive, toutes les unités aquifères suivies par le réseau de surveillance DCE ont été traitées.

| Indice BSS | Type | Désignation | Unité aquifère (BDLISA NIV 3) | Système aquifère (BDLISA NIV 2) | Masse d'eau |
|------------|--------|----------------------|---|--|-----------------|
| 1173Z20108 | Source | La Médaille | Unité aquifère des dômes et coulées d'andésites et dacites des pitons du Carbet | Système aquifère des pitons du Carbets | Centre |
| 1182Z20160 | forage | Nouvelle Cité | Unité aquifère des laves de Rivière Pilote | Système aquifère du Sud | |
| 1179Z20070 | forage | Habitation Ressource | Unité aquifère des laves de Vert Pré et du François | | |
| 1174Z20110 | Source | Deux Choux | Unité aquifère des andésites Zalpha | Système aquifère du Morne Jacob | Nord |
| 1174Z20134 | forage | Cœur Bouilki | Unité aquifère des laves du Morne Jacob | | |
| 1173Z20065 | Source | Piton Gelé | | | |
| 1166Z20020 | Source | Potiche | Unité aquifère des nuées ardentes de type Saint Vincent | Système aquifère de la Montagne Pelée | Nord Atlantique |
| 1168Z20048 | forage | Demare | | | |
| 1168Z20081 | Source | Louison | Unité aquifère des premières nuées ardentes de l'édifice intermédiaire | Système aquifère du Mont Conil | |
| 1165Z20005 | Source | Fond Moulin | Unité aquifère des andésites de l'édifice initial du Mont Conil | | |
| 1175Z20167 | Source | Brin d'Amour | Unité aquifère des laves de Vert Pré et du François | Système aquifère du Sud | |
| 1169Z20155 | Source | L'Épineux | Unité aquifère des hyaloclastites du Morne Jacob | | |
| 1174Z20113 | source | Les 3 sources | Unité aquifère des laves du Morne Jacob | Système aquifère du Morne Jacob | |
| 1174Z20135 | Source | Capitaine | Unité semi-perméable des conglomérats et lahars du Morne Jacob | | |
| 1173Z20077 | source | Bellevue | Unité aquifère des andésites Zalpha | | |
| 1177Z20202 | forage | Mabelo | | | |
| 1167Z20023 | forage | Rivière Blanche | Unité aquifère des nuées ardentes récentes | Système aquifère de la Montagne Pelée | Nord Caraïbe |
| 1168Z20050 | Source | Essente | | | |
| 1167Z20042 | forage | Pecoul | Unité aquifère des premières nuées ardentes de l'édifice intermédiaire | Système aquifère des pitons du Carbet | |
| 1173Z20068 | Source | Attila | Unité aquifère des dômes et coulées d'andésites et dacites des pitons du Carbet | | |
| 1167Z20059 | Source | La Ganate | Unité aquifère des laves et brèches du Mont Conil | Système aquifère du Mont Conil | |
| 1186Z20119 | forage | Cap Macré | Unité aquifère des laves de Sainte Anne | | |
| 1186Z20119 | forage | Cap Macré | Unité aquifère des laves de Sainte Anne | Système aquifère de Sainte Anne et du complexe de base | Sud Atlantique |
| 1179Z20300 | forage | Pontaléry | Unité aquifère des hyaloclastites et tuffites calcaires de Vaudin-Pitault | | |
| 1180Z20130 | source | Dos d'âne | Unité aquifère des hyaloclastites, conglomérats et calcaires du François | | |
| 1185Z20120 | forage | Piezo Sainte Luce | Unité aquifère des brèches et tufs du volcanisme fissural du Sud Martiniquais | Système aquifère du Sud | |
| 1185Z20121 | Source | Source du Riz | Unité aquifère des laves de Rivière Pilote | | |
| 1183Z20074 | Source | Morne Escarpé | Unité aquifère des laves de Rivière Pilote et du Vauclin | Sud Caraïbe | |
| 1181Z20131 | forage | Grande Anse | Unité aquifère des laves du Morne Pavillon | | |
| 1184Z20001 | forage | Dizac | Unité aquifère des brèches du cycle éruptif des Roches Genty | | |
| 1184Z20036 | Source | Morne Larcher | Unité aquifère des laves du Morne Larcher et du cycle éruptif des Roches Genty | Système aquifère du Morne Larcher et des Roches Genty | |

Illustration 1 : Liste des 30 points de prélèvements

2.3. CAMPAGNES DE TERRAIN ET ANALYSES

2.3.1. Prélèvements

Deux campagnes de prélèvements ont été conduites, une première en condition de hautes eaux (du 20 août au 7 septembre 2012) et une seconde en basses eaux (du 29 janvier au 8 février 2013).

Il faut signaler que la dépression tropicale ISAAC a traversé la Martinique deux jours après le lancement de la première campagne.

Lors de la campagne de saison sèche, la source du Morne Larcher était sèche, et aucune autre résurgence n'a pu être retrouvée dans le sud à cette période.

L'estimation des fonds géochimiques est exigeante du point de vue de l'échantillonnage et de l'analyse.

L'échantillonnage a ainsi été conduit en respectant les recommandations techniques du cahier des charges pour l'analyse et le prélèvement élaboré par le BRGM dans le cadre du programme national d'activité d'AQUAREF (Ghestem et al. 2008). Sur le terrain, les échantillons d'eau ont été filtrés à 0.45 µm et ceux destinés à l'analyse des cations ont été acidifiés (acide HNO₃). Dans le but de maîtriser les contaminations lors de l'échantillonnage, deux blancs de terrain ont été réalisés au cours de chaque campagne.

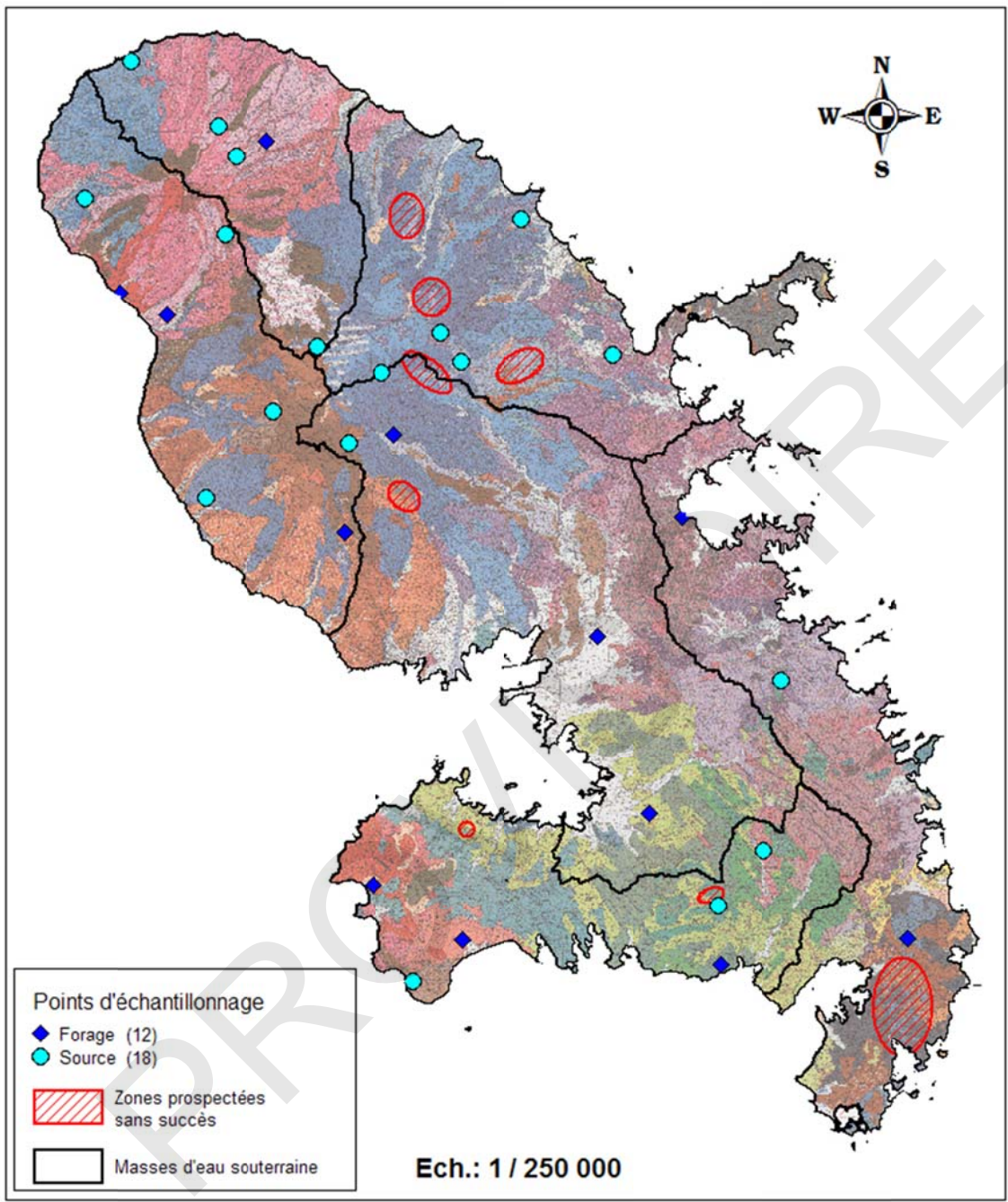


Illustration 2 : Localisation des 30 points de prélèvement sur fond de carte géologique au 1/50 000 (BRGM©)



Illustration 3 : Planches photographiques des prélèvements : a) forage Robert – Pontaléry, b) filtration in situ à 0.45 μm , c) source Essente à Morne Rouge, d) mesures des paramètres in situ

2.3.2. Analyses

Les mesures réalisées in situ concernent les paramètres suivants : température, pH, conductivité électrique à 25°C, oxygène dissous et potentiel redox. Les résultats ainsi que les conditions de prélèvement (état de l'eau, temps, usage, pressions anthropiques) sont reportés en Annexe 2.

Les paramètres analysés à la Direction des Laboratoire du BRGM à Orléans sont récapitulés dans le tableau de l'illustration 4 avec report des limites de quantification (LQ). Afin d'atteindre des LQ les plus basses possibles, les analyses ont été réalisées par ICPMS (Spectrométrie de masse) pour tous les métaux sauf pour le mercure pour lequel une technique plus spécifique et plus sensible a été utilisée (Spectrométrie de Fluorescence Atomique).

Tous les résultats d'analyse sont présentés en Annexe 3.

| Paramètres | Méthodes | Limite de quantification | |
|-------------------------|--|--------------------------|---------------------------|
| Éléments majeurs | HCO ₃ / CO ₃ | NF EN 9963-1 | 3 mg.L ⁻¹ |
| | Ca, Mg, Na, K, SiO ₂ | NF EN ISO 11885 | 0.5 mg.L ⁻¹ |
| | COD | NF EN 1484 | 0.5 mg.L ⁻¹ |
| | NO ₃ , SO ₄ , Cl | NF EN ISO 10304-1 | 0.5 mg.L ⁻¹ |
| | PO ₄ | NF EN ISO 6878 | 0.1 mg.L ⁻¹ |
| | NO ₂ | NF EN 26777 | 0.01 mg.L ⁻¹ |
| Elements traces | F | NF EN ISO 10304-1 | 100 µg.L ⁻¹ |
| | Fe | NF EN ISO 11885 | 20 µg.L ⁻¹ |
| | Br, Cr, Li, Mn, Ni, Sb, Se, Sr | NF EN ISO 17294-2 | 0.1 µg. L ⁻¹ |
| | Al, B, Zn | NF EN ISO 17294-2 | 0.5 µg. L ⁻¹ |
| | As, Ba, Co, Pb, | NF EN ISO 17294-2 | 0.05 µg. L ⁻¹ |
| | Ag, Be, Cd, Cu | NF EN ISO 17294-2 | 0.01 µg. L ⁻¹ |
| | Hg | NF EN ISO 17852 | 0.015 µg. L ⁻¹ |

Illustration 4 : Paramètres analysés et limites de quantification associées

2.4. FACIÈS HYDROCHIMIQUES DES EAUX ÉCHANTILLONNÉES

Les balances ioniques des résultats d'analyses n'excèdent pas | 10 | %, excepté pour la source Capitaine (+12%) et le forage Pontaléry (-55%) lors de la deuxième campagne. Concernant ce dernier point, les résultats aberrants sont dus à une acidification par erreur du flacon des anions. Pour le reste, les eaux sont correctement équilibrées et les analyses sont donc exploitables.

Le diagramme de Piper, construit à partir des concentrations en éléments majeurs, permet de décrire les faciès géochimiques des eaux analysées (Illustration 5).

Conformément aux faciès hydrochimiques des eaux souterraines martiniquaises, deux pôles principaux se dégagent :

- des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes pour les points majoritairement situés dans la moitié nord de l'île et éloignés du littoral

(sans cation réellement dominant). La composition de l'eau est ici principalement contrôlé par les interactions eau/roche et les apports d'eaux de pluie ;

- des eaux chlorurées, sodiques et potassiques pour les points situés majoritairement dans le sud de la Martinique et proches du littoral (Sainte-Luce, Nouvelle Cité, Dizac, Grande Anse, Morne Larcher, etc.). Ces points sont sous l'influence d'intrusion d'eaux marines et/ou d'eau de mer fossile piégée dans certaines formations.

En effet, en contexte volcanique, les interactions eau-roche conduisent à un enrichissement des eaux en calcium et sodium du fait de la déstabilisation des plagioclases présents dans les basaltes et les andésites. Les pyroxènes des coulées pyroclastiques sont eux susceptibles de libérer du magnésium et du fer.

Enfin, les eaux prélevées sur le forage de Cap Macré se distinguent plus particulièrement avec un faciès chloruré et sulfaté, calcique et magnésien. Cette eau est largement la plus minéralisée de celles échantillonnées avec une conductivité supérieure à 7 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour chacune des campagnes.

Pour le reste, les conductivités varient entre 50 et 1 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une valeur moyenne de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les deux campagnes de prélèvement (médiane à 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Lors du prélèvement de février 2013, l'échantillon du forage Robert – Pontaléry a été contaminé par de l'acide nitrique, d'où des résultats aberrants et la position du point sur le diagramme de Piper (Illustration 5).

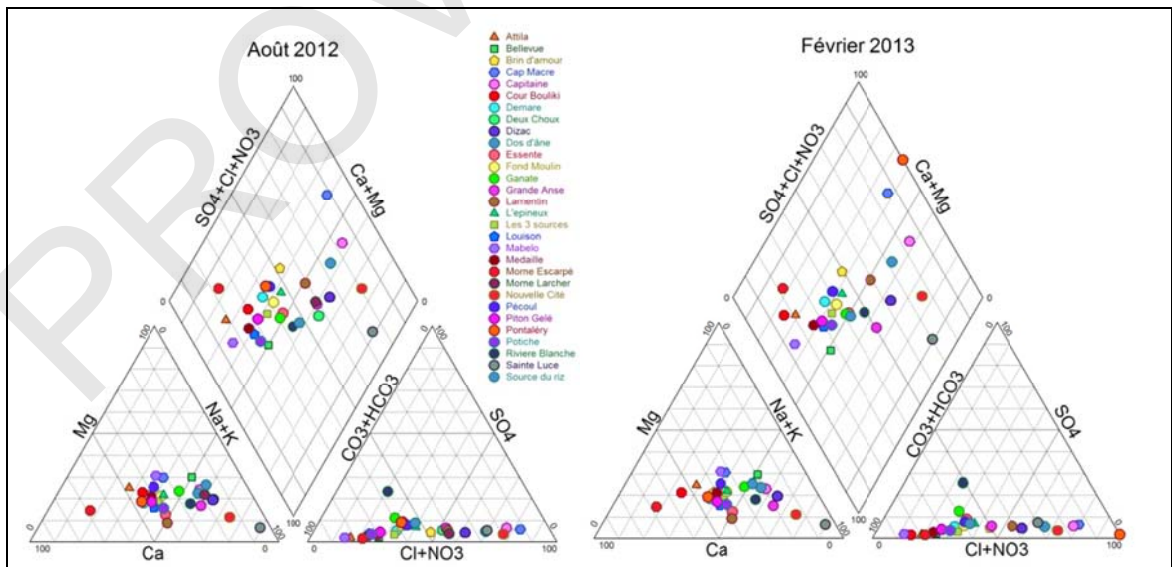


Illustration 5 : Diagramme de Piper pour les deux campagnes de prélèvement

PROVISOIRES

3. Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé

La présente étude s'intéresse :

- ✓ aux éléments minéraux majeurs, à savoir le calcium, le magnésium, le sodium, les ions chlorures, les ions sulfates, les bicarbonates et le potassium ;
- ✓ aux éléments traces 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 : 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, le fer et le manganèse. Le cadmium, le nickel, le mercure et le plomb font partie de la liste des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau.

3.1. MÉTHODOLOGIE SUIVIE

3.1.1. Constitution de la base de données

Dans le but de préciser / valider la délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé proposé par le BRGM en 2008 (Lions et al., 2008), la base de données (Access©) sur la qualité des eaux souterraines a été enrichie par les analyses suivantes :

- deux campagnes de terrain dédiées à la présente étude, soient 2287 résultats d'analyses répartis sur 30 points d'eau (§ 2) ;
- export actualisé de toutes les données disponibles sur ADES à fin 2012 (www.ades.eaufrance.fr), incluant le réseau de surveillance patrimoniale DCE (20 stations) et la surveillance sanitaire de l'ARS. Il faut signaler qu'à titre exceptionnel, les paramètres Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb et Sr ont été analysés dans le cadre de la campagne DCE de saison des pluies 2012 ;
- résultats de la campagne photographique DCE d'avril 2013 incluant l'analyse de tous les éléments traces sur les 20 stations de surveillance du réseau (reçus en septembre 2013 et non encore disponibles sur ADES) ;
- prospections hydrogéologiques menées par le BRGM depuis le début des années 1970 (compilation du fond documentaire BRGM), soient 350 résultats d'analyses, concernant principalement les éléments majeurs ;
- résultats des campagnes géochimiques menées par le BRGM en 2012 dans le cadre d'un programme de prospection géothermique, soient 735 analyses. Les

éléments traces recherchés étaient les suivants : Al, As, Ba, Br, Cd, Cs, Ga, Ge, Li, Mn, Ni, Pb, Rb et U.

Au total, la base de données constituée est composée de 19 212 résultats d'analyse, répartis sur 44 sources et 75 forages.

Toutes les concentrations en éléments majeurs sont exprimées en mg.L^{-1} et toutes les concentrations en éléments traces en $\mu\text{g.L}^{-1}$. En ce qui concerne les chroniques de données issues d'ADES, les valeurs minimales, maximales et moyennes ainsi que les écarts-type ont été calculées.

Les résultats d'analyses sur eaux brutes et sur eaux filtrées ont été différenciés afin de n'évaluer les fonds géochimiques qu'à partir des concentrations en éléments dissous. Les résultats sur eaux brutes permettent tout de même de compléter l'analyse dans des secteurs dépourvus de données.

3.1.2. Traitement de données

L'analyse cartographique a été réalisée sous ArcGis 10 ©. L'architecture du S.I.G permet de distinguer les couches numériques suivantes : campagne de prélèvements 2012/2013, export ADES sur eaux filtrées, export ADES sur eaux brutes, autres sources de données (prospections géothermiques et hydrogéologiques pour l'essentiel).

Un poids plus important a été donné aux résultats d'analyse issus des campagnes de terrain menées dans le cadre de la présente étude ainsi qu'aux données récentes du réseau de surveillance DCE. En effet, les protocoles de prélèvement, de conditionnement et d'analyse sont ici conformes aux recommandations AQUAREF pour l'évaluation du fond géochimique.

Même si les points d'eau soumis à des pollutions agricoles n'ont pas été totalement écartés de l'analyse, ils ont été identifiés à partir des concentrations en nitrates. On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg.L^{-1} traduit un apport anthropique (BRGM, 2006).

Pour le fer et le manganèse, en complément de l'analyse cartographique, une étude plus approfondie des résultats d'analyse et des données de forage est proposée.

La délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé s'appuie sur la BDLISA (Base de Données sur les Limites des Systèmes Aquifères), qui correspond à la deuxième version du référentiel hydrogéologique français finalisée en 2011 pour la Martinique. Elle propose donc un découpage du territoire en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non).

En fonction de la quantité et de la qualité des données disponibles, un indice de confiance a été attribué à chacune des zones à risque délimitées (faible, moyen et élevé).

3.2. ÉLÉMENTS MAJEURS

L'étude de Brenot (2008) avait permis une première caractérisation de la chimie des eaux souterraines de Martinique, complétée ensuite par l'étude de Lions et al. (2008). Grâce aux données complémentaires acquises sur les éléments majeurs dans la présente étude nous avons pu confirmer / préciser la délimitation des faciès chimiques observés en fonction des « secteurs hydrogéologiques ».

Concernant les éléments pour lesquels il existe une valeur seuil relative à la réglementation pour la consommation humaine (Na, Cl et SO₄), il a ainsi été possible de définir des zones à risque de fond géochimique élevé. Pour le calcium, le magnésium et le potassium, on parlera de zones associées à des faciès hydrochimiques marqués en Ca, Mg et/ou K.

Pour chaque élément majeur, une carte de synthèse est reportée en Annexe 3.

Les eaux thermales, particulièrement enrichies en éléments majeurs, ne sont pas directement ciblées. Par exemple, aucune zone à risque de fond géochimique élevé n'a été identifiée sur le flanc ouest de la montagne Pelée, car seules les sources thermales apparaissent enrichies.

De même, seules les eaux thermales présentent de fortes concentrations en **potassium** (supérieures à 10 mg.L⁻¹). Aucun secteur à fond géochimique élevé n'a donc été identifié en Martinique pour cet élément.

On peut constater que les aquifères du sud présentent des eaux plus minéralisées (Ca, Mg et Na, Cl, SO₄), du fait (1) d'une évaporation plus marquée et d'une recharge plus faible qui limite le phénomène de dilution et (2) de formations géologiques plus anciennes et plus altérées, et parfois mises en place en milieu sous-marin.

Les eaux souterraines drainant les formations du complexe de base de la presqu'île de Sainte-Anne sont particulièrement enrichies en **calcium** et **magnésium** (Annexe 3). Cette plus forte minéralisation des eaux s'explique par la nature géologique du complexe de base. Le substratum est ici constitué de laves épanchées en milieu sous-marin, variant des basaltes à clinopyroxène et olivine argilisée aux andésites, voire aux dacites, très enrichies en plagioclase (Westercamp et al., 1989). Ponctuellement, on retrouve au-dessus les laves issues de petits volcans de type strombolien, de nature basaltique puis andésitique (activité aérienne) : volcan de la Savane des Pétrifications, piton Crève-Cœur, volcan du morne Flambeau. Une activité hydrothermale ancienne est par ailleurs reconnue dans ce secteur, contemporain ou postérieur à la mise en place des édifices volcaniques).

Une zone à risque de fond géochimique élevé en **sulfates** a également été associée au système aquifère du complexe de base (Annexe 3), avec un indice de confiance moyen en raison du faible nombre de points d'eau dans ce secteur. Les eaux prélevées sur le forage du Marin – Cap Macré présentent des concentrations proches de la norme de potabilité fixée à 250 mg.L⁻¹ (229 mg.L⁻¹ en août 2012 et 225 mg.L⁻¹ en février 2013).

En ce qui concerne le **sodium** et les **chlorures**, une zone à risque de fond géochimique élevé plus étendue a été délimitée. Elle regroupe le complexe de base, l'unité aquifère de laves de Rivière-Pilote, le système aquifère du morne Larcher et des Roches Genty ainsi que l'axe pitons du Carbet – Lamentin (Annexe 3).

Dans ce dernier secteur, Traineau et al. (2012) envisagent des mélanges entre un pôle météorique, un pôle eau de mer et un pôle géothermal. Deux faciès géochimiques d'eaux thermales se distinguent : les eaux bicarbonatées Ca-Mg-Na de Didier-Absalon (plus superficielles) et des eaux chlorurées sodiques plus profondes que l'on retrouve au niveau des sources et forages du Lamentin (alimentation probable depuis le NO). Ainsi, au-delà des sources thermales reconnues (Absalon, Didier, Moutte, Meynard, Lamentin), les forages du secteur confirment un mélange entre trois pôles même si le pôle géothermal apparaît moins marqué avec un faciès chloruré sodique (forages de Fond Lahaye, Tivoli et Rivière Monsieur).

Pour la presqu'île des Trois Ilets, les fortes concentrations en sodium et chlorures sont liées à des laves épanchées en milieu sous-marin et à une activité hydrothermale ancienne.

En domaine littoral, comme précisé par Lions et al. (2008), des fonds géochimiques élevés en **sodium** et **chlorures** sont à attendre dès lors que les eaux souterraines sont sous l'influence d'intrusion marine.

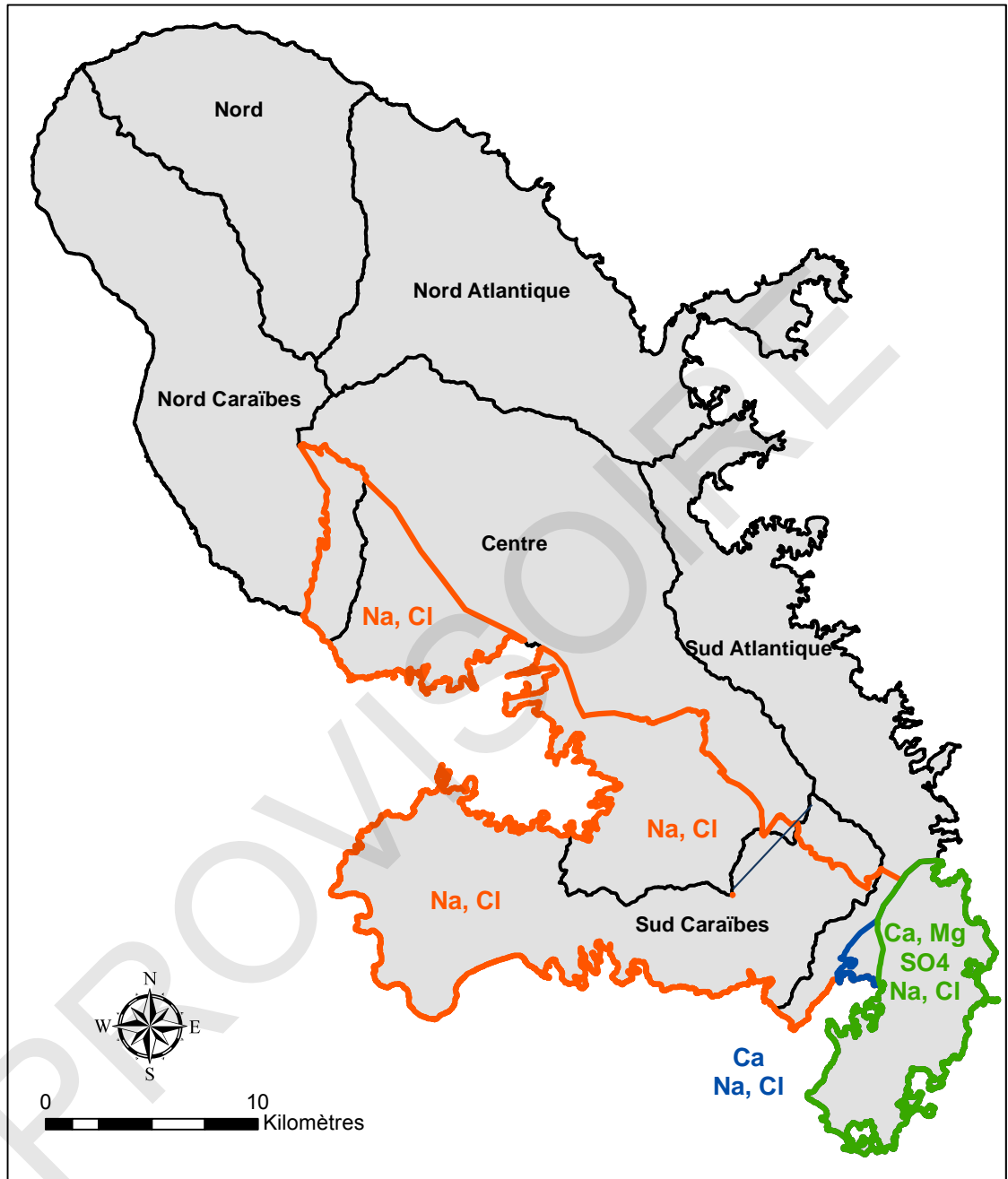


Illustration 6 : Délimitation des faciès hydrochimiques enrichies en Ca, Mg, Na, C et SO₄

3.3. ÉLÉMENTS TRACES INDÉSIRABLES

3.3.1. Aluminium

L'aluminium est présent dans de nombreuses formations volcaniques de la Martinique. Il entre dans la composition des feldspaths, des feldspathoïdes, des biotites et des amphiboles en se substituant au fer et au silicium. Par ailleurs, l'altération des minéraux aluminosilicatés conduit également à la mobilisation de l'aluminium qui précipite sous forme secondaire (argile, hydroxyde d'aluminium) (Hem et al., 1985). En effet, l'aluminium étant peu soluble, il peut être mobilisé en grande quantité sous formes colloïdale et/ou particulaire dans les eaux.

La norme de potabilité est fixée à $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Lors de l'étude de 2008, un fond géochimique élevé avait été attribué aux formations du Morne Jacob (masses d'eau Nord et Nord Atlantique) avec un indice de confiance moyen compte tenu du nombre limité d'analyses.

En ce qui concerne la campagne de prélèvements 2012/2013, la seule concentration anormale concerne la source hydrothermale du Morne Larcher ($2\,194 \mu\text{g.L}^{-1}$ en août 2013). Pour le reste, toutes les concentrations restent inférieures à $25 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Illustration 7).

Au niveau du réseau de surveillance DCE, des dépassements de la norme de potabilité ont été observés sur les forages de Rivière du Prêcheur (Nord Caraïbe) et de Trois Ilets – Vatable (Sud Caraïbe) mais à une seule reprise : respectivement en novembre 2010 et en novembre 2011. Il faut signaler que ces deux ouvrages présentent une eau très chargée en matière en suspension et que les prélèvements sont effectués au tube préleveur (mise en œuvre d'un pompage impossible). Il est donc probable que ces fortes concentrations isolées aient été engendrées par la présence de colloïdes dans l'échantillon (soit la taille des colloïdes est inférieure au seuil de filtration, soit une contamination après filtration lors du conditionnement). En effet, en condition de pH neutre, la filtration à $0.45 \mu\text{m}$ diminue très significativement les concentrations avec l'aluminium car comme évoqué précédemment les colloïdes et particules argileux sont riches en aluminium.

Pour le reste des stations de surveillance, les concentrations sont toujours inférieures à $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ et les plus fortes teneurs concernent des eaux fortement contaminées par des produits phytosanitaires (Basse Pointe – Chez Lélène, Basse Pointe – Chalvet et Lorrain – Fond Brûlé). Une origine anthropique ne peut donc ici être exclue.

En définitive, en dehors des anomalies observées au niveau de certaines sources hydrothermales, les plus fortes concentrations ($> 100 \mu\text{g.L}^{-1}$) sont toutes mesurées sur des eaux brutes. Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en aluminium n'est ainsi identifiée pour les eaux souterraines de Martinique.

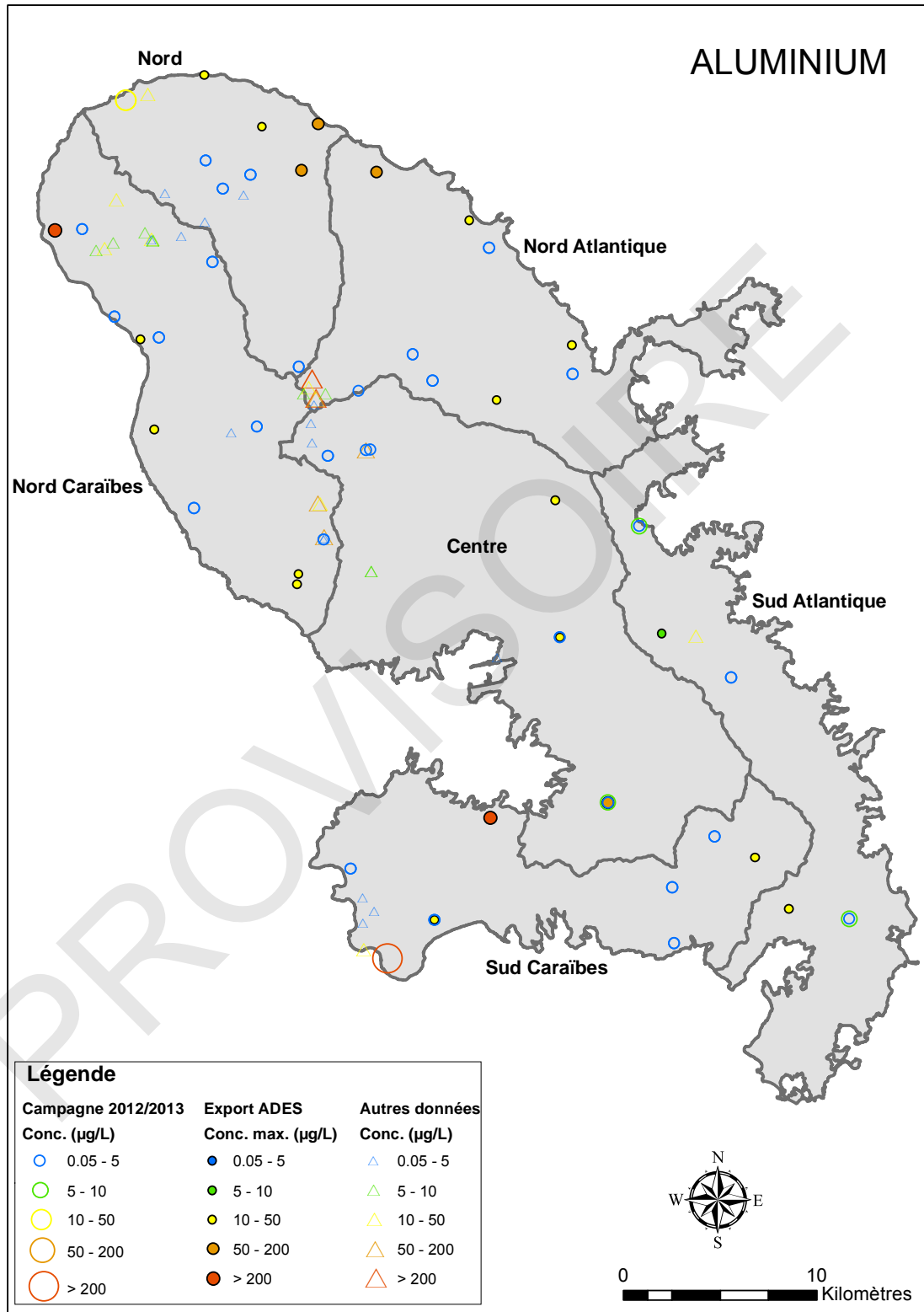


Illustration 7 : Carte des résultats d'analyses pour l'Aluminium

3.3.2. Antimoine

L'antimoine est un élément peu abondant dans les roches comme dans les eaux naturelles. Seules les eaux thermales ou les eaux drainant des filons miniers (zones plombifères par exemple) peuvent contenir de fortes concentrations en antimoine (BRGM, 2006). Dans le contexte martiniquais, l'antimoine peut cependant se substituer au fer et se retrouver dans les olivines magnésiennes et dans l'ilménite ainsi que dans des sulfures volcaniques, notamment la galène en association avec le plomb (Wedepohl et al., 1974).

La norme de potabilité est fixée à $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Lors de l'étude préliminaire de 2008, la quantité et la qualité des données n'avaient pas été suffisantes pour évaluer le fond géochimique des eaux souterraines.

Un seul dépassement de cette norme a été observé en Martinique avec $24 \mu\text{g.L}^{-1}$ à Saint-Pierre – CDST en avril 2007. Cette forte concentration n'a pas été confirmée ni en novembre 2007 ($< 5 \mu\text{g.L}^{-1}$) ni en avril 2013 ($0.06 \mu\text{g.L}^{-1}$) (Illustration 8).

Pour le reste, toutes les concentrations restent inférieures à $1 \mu\text{g.L}^{-1}$, excepté sur le forage de Rivière du Prêcheur avec $1.06 \mu\text{g.L}^{-1}$ en avril 2013 (en 2007, la limite de quantification était à $5 \mu\text{g.L}^{-1}$). Lors de la campagne 2012/2013, la concentration maximale concerne le piézomètre de Sainte-Luce avec $0.14 \mu\text{g.L}^{-1}$ en février 2013.

En conclusion, au regard des nouvelles données acquises, il n'y a pas de risque de fond géochimique élevé en antimoine en Martinique.

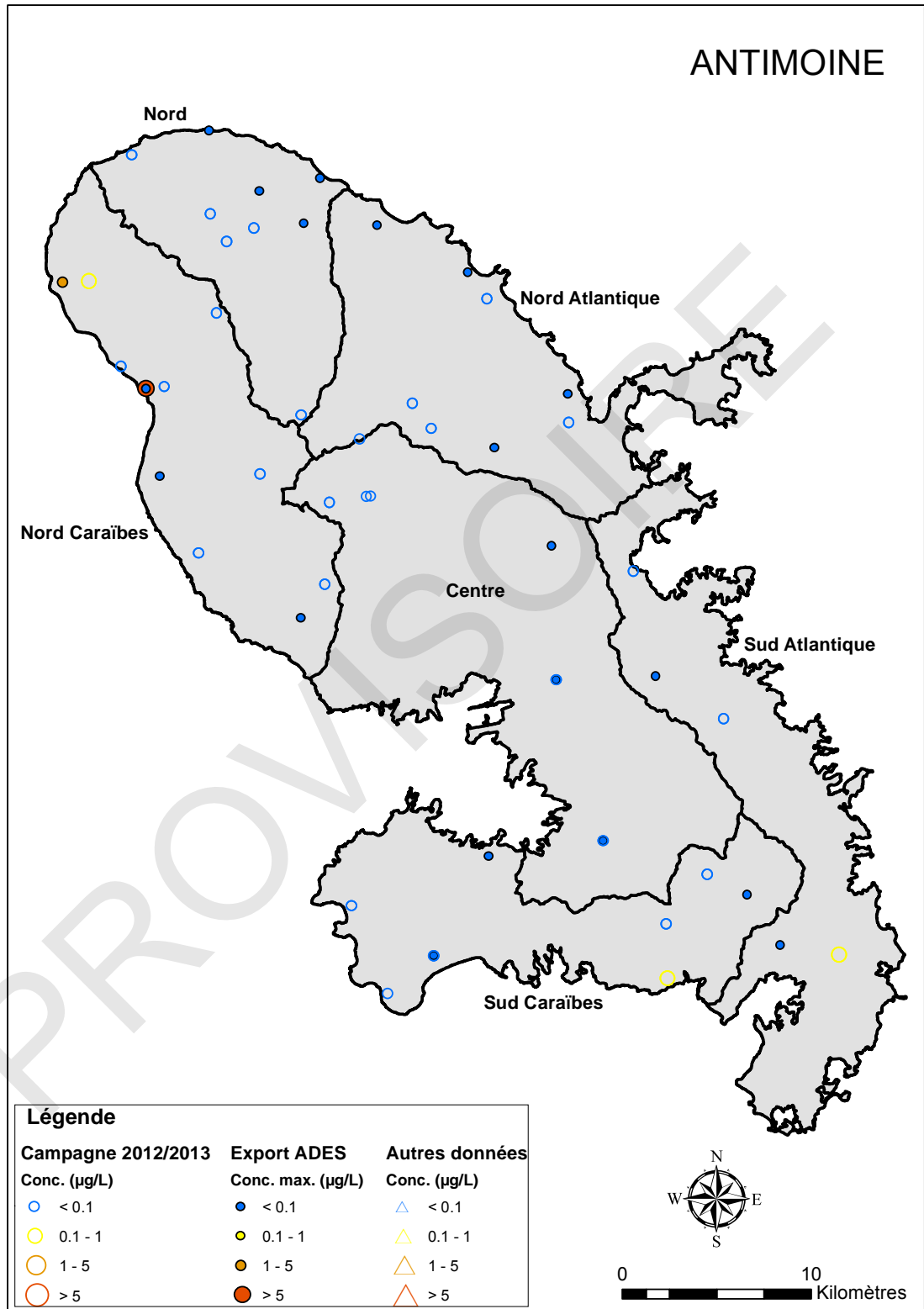


Illustration 8 : Carte des résultats d'analyses pour l'Antimoine

3.3.3. Baryum

Le baryum est relativement abondant dans les roches magmatiques. Le principal minéral contenant du baryum est la barytine (BaSO_4). Il peut également entrer dans la composition des feldspaths (BRGM, 2006).

Différents paramètres influencent la teneur en baryum dans les eaux : (1) sa présence dans les sols, (2) la faible solubilité de la barytine, (3) la concentration en sulfates dans les eaux et (4) l'adsorption sur des hydroxydes ou des oxydes métalliques (de manganèse en particulier).

De façon générale, les concentrations en baryum dépassent couramment $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ dans les eaux souterraines. L'OMS fixe une concentration maximale admissible de $700 \mu\text{g.L}^{-1}$.

En 2008, des zones à risque de fond géochimique élevé avaient été retenues sur la Presqu'île de la Caravelle et localement sur la Presqu'île de Sainte-Anne. L'indice de confiance associé était faible, car le risque était uniquement suspecté du fait de la présence de minéralisations de barytine mentionnées sur la carte géologique (Westercamp et al., 1989). D'un point de vue lithologique, ces deux secteurs sont associés à l'unité aquifère des andésites du complexe de base de la BDLISA (Vittecoq, 2012).

Pour la presqu'île de la Caravelle, en l'absence de points d'accès aux eaux souterraines, la connaissance n'a pu être améliorée.

Pour le sud de la masse d'eau Sud Atlantique, un fond géochimique élevé est confirmé par le piézomètre de Cap Macré où les concentrations sont les plus importantes de toutes les eaux échantillonnées en Martinique : jusqu'à $221 \mu\text{g.L}^{-1}$ en février 2013.

Pour le reste, les rares concentrations supérieures à $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ concernent des sources hydrothermales (Petite Anse, Absalon, Lamentin et sources chaudes de Saint-Pierre).

Il est ainsi proposé de délimiter deux zones à risque de fond géochimique élevé pour le baryum : la presqu'île de la Caravelle avec un indice de confiance faible ainsi que la presqu'île de Sainte-Anne avec un indice de confiance moyen (Illustration 9).

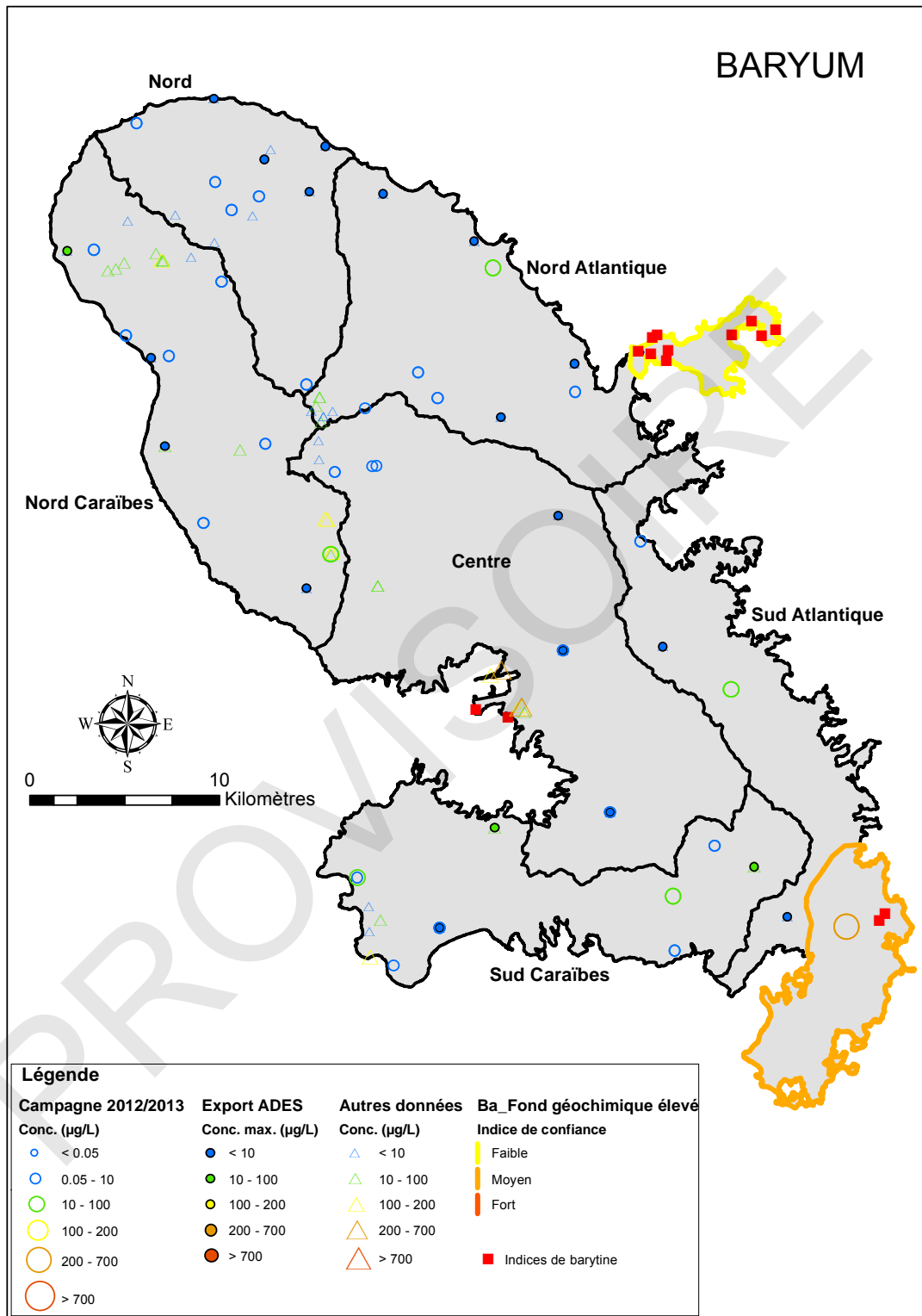


Illustration 9 : Carte des résultats d'analyses pour le Baryum

3.3.4. Bore

Le bore est relativement abondant dans les océans. En milieu volcanique, il sera retrouvé préférentiellement dans les eaux en domaine littoral et au sein de formations épanchées en milieu sous-marin.

La norme de potabilité du bore est fixée à 1 000 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Les seuls dépassements observés concernent des eaux thermales (sources chaudes de Saint-Pierre, source et forages du Lamentin, source de Petite Anse) et sont clairement d'origine naturelle. En effet, le bore est très volatil, c'est pourquoi il est abondant dans les sources thermales (Illustration 10).

Toujours en lien avec une activité géothermale mais ancienne, des concentrations significatives en bore sont mesurées sur le forage des Trois Ilets – Vatable (valeur moyenne de 230 $\mu\text{g.L}^{-1}$). En effet, Lachassagne et Paulin (1991) ont décrit localement l'existence d'un système thermo-minéral avec notamment la présence d'argiles hydrothermales présentant des enrichissements en d'autres éléments traces : Pb, Cu, Zn, Rb, S, P, Cl, As, Ba, Br et Sn (Pons et al., 1989).

Hors activité hydrothermale, les plus fortes concentrations sont observées au niveau d'eaux souterraines marquées par une contribution d'eau de mer : Diamant – Dizac (140 $\mu\text{g.L}^{-1}$) et Anses d'Arlet – Grande Anse (156 $\mu\text{g.L}^{-1}$) pour des eaux sous l'emprise du biseau salé ainsi que Rivière Salée – Nouvelle Cité (584 $\mu\text{g.L}^{-1}$) pour des eaux de mer fossiles.

Une zone à risque de fond géochimique élevé en bore (niveau de confiance élevé) englobe ainsi la presqu'île des Trois Ilets en correspondance avec les unités aquifères des laves de Rivière-Pilote, des laves du Morne Pavillon et du Morne Larcher et des Roches Genty (Illustration 10).

Il est rappelé que d'une manière générale, les eaux souterraines sous l'emprise du biseau salé n'ont pas été étudiées, mais un fond géochimique intermédiaire en bore et fluor est à attendre en domaine littoral dans certains secteurs (Lions et al, 2008).

3.3.5. Fluor

L'origine principale du fluor dans les eaux souterraines est la dissolution de minéraux fluorés, en particulier les orthophosphates et la fluorine. Les aquifères volcaniques ne correspondent pas à un contexte géologique favorable à la mobilisation du fluor dans les eaux souterraines.

La norme de potabilité du fluor est fixée à 1 500 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucun dépassement de la norme n'est constaté dans les eaux souterraines de Martinique. Les plus fortes concentrations sont mesurées au niveau des eaux thermales ou en bordure littorale (*a priori* sous l'emprise du biseau salé), mais elles restent inférieures à 500 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Illustration 11).

En Martinique, les eaux souterraines présentent ainsi un fond géochimique faible pour le fluor.

PROVISOIRE

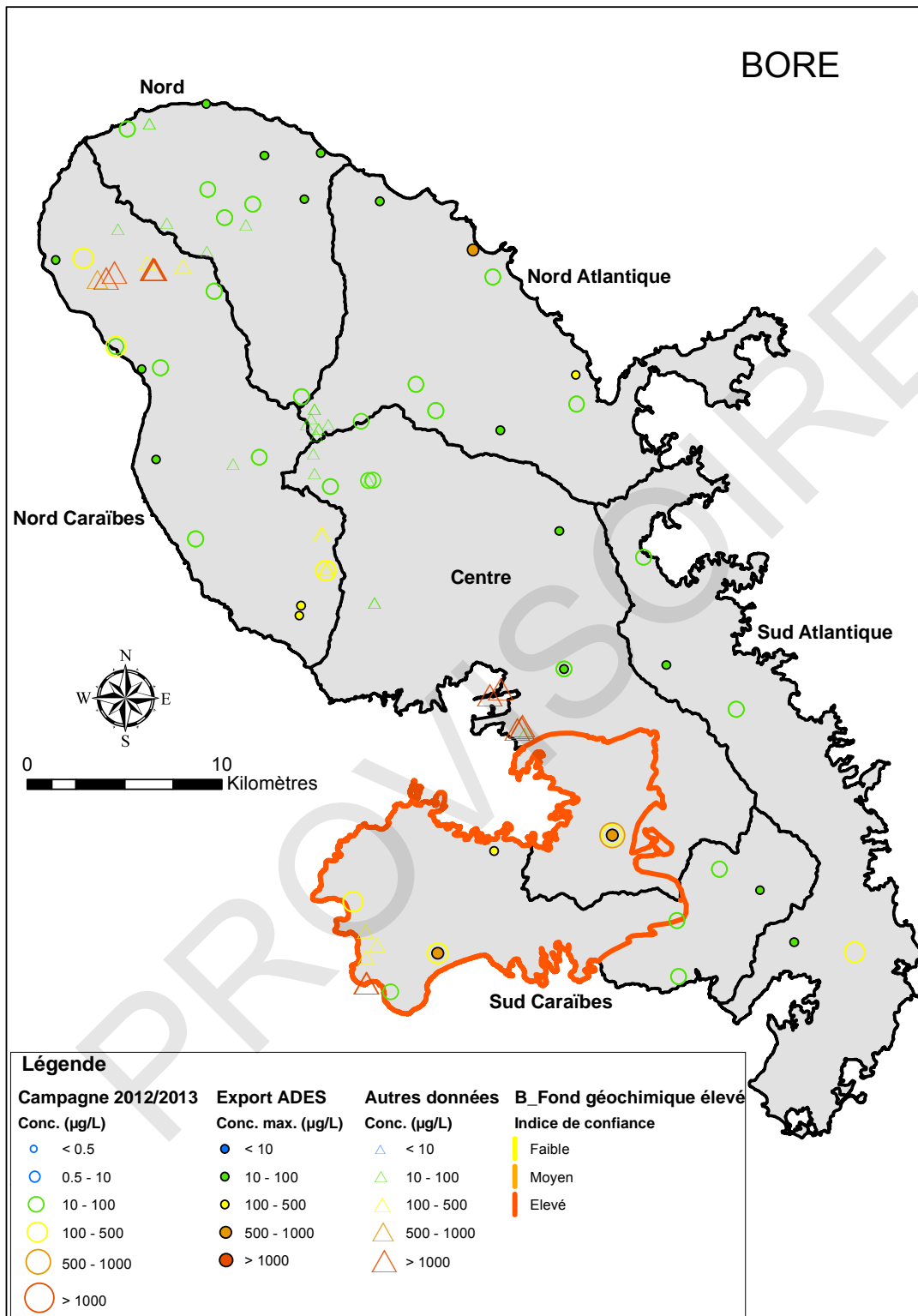


Illustration 10 : Carte des résultats d'analyses pour le Bore

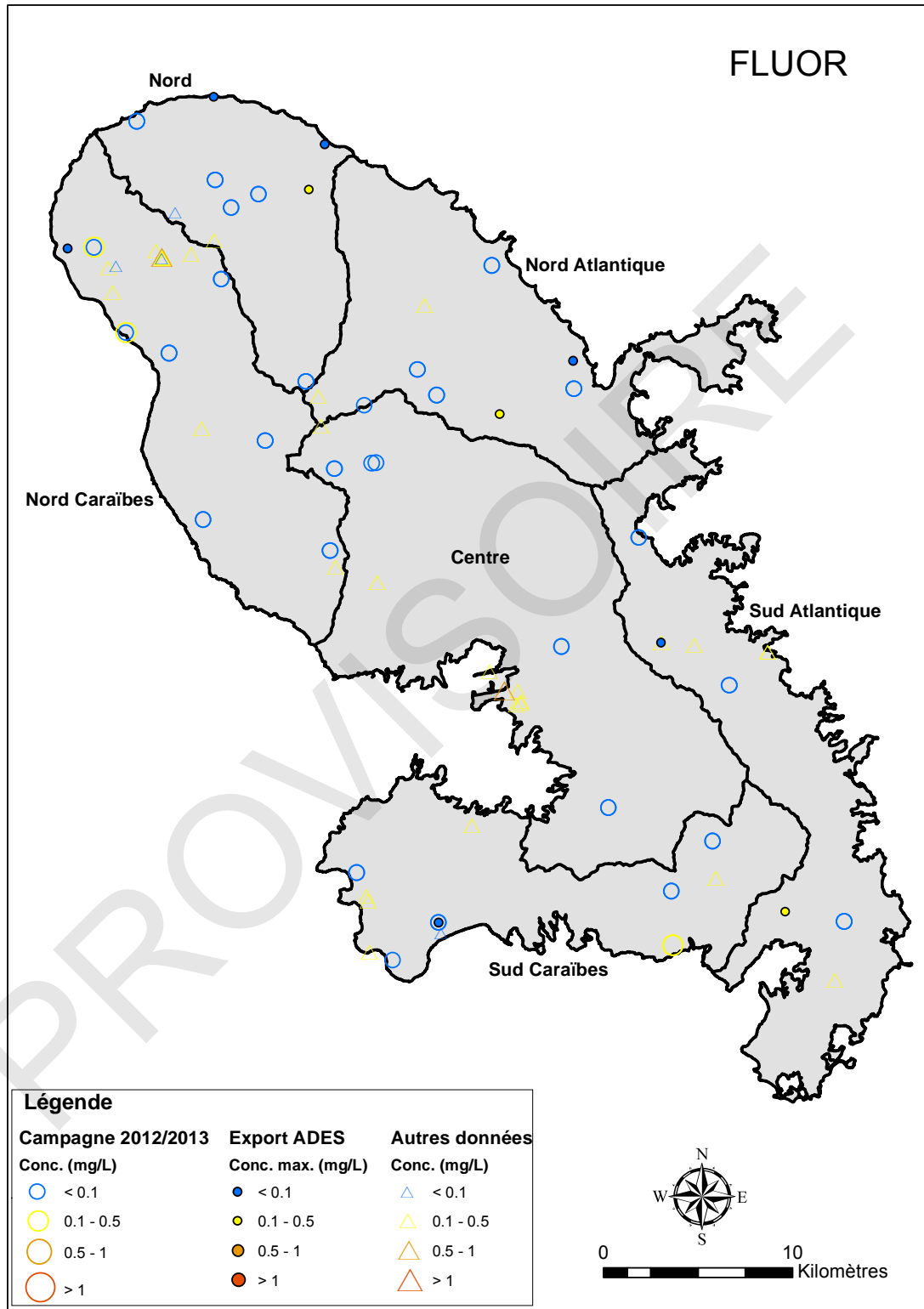


Illustration 11 : Carte des résultats d'analyses pour le Fluor

3.3.6. Cuivre

Le cuivre et le zinc (§ 3.3.4) sont deux éléments associés dans les roches aux minéraux ferromagnésiens (olivine, amphibole, biotite) (Selinus et al., 2005) ainsi qu'aux processus fumeroliens et/ou hydrothermaux (Pons et al., 1989). D'un point de vue anthropique, ces deux éléments peuvent également être associés aux produits phytosanitaires.

Les caractéristiques physico-chimiques (faible solubilité, adsorption) du cuivre n'autorisent généralement pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent habituellement pas $1 \mu\text{g.L}^{-1}$, même si des valeurs plus fortes sont possibles à un pH plus acide et s'il y a oxydation des sulfures de cuivre.

La norme de potabilité pour le cuivre est de $2\ 000 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007). À titre indicatif, la Norme de Qualité Environnementale (NQE) est fixée à $1.4 \mu\text{g.L}^{-1}$.

En ce qui concerne la campagne de prélèvements 2012/2013, seuls trois points présentent des concentrations supérieures à $1 \mu\text{g.L}^{-1}$: $3.3 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour la source hydrothermale du Morne Larcher en août 2012, $5.9 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le forage AEP de Pécol en février 2013 et $22.1 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le forage AEP de Démare en septembre 2012. Dans les deux derniers cas, une origine anthropique (polluants agricoles) ne peut être exclue.

Au niveau du réseau de surveillance DCE, les concentrations en cuivre sont toujours inférieures à $10 \mu\text{g.L}^{-1}$, sauf au droit des forages de Robert – Vert-Pré (concentration maximale de $14 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour une moyenne de $2.3 \mu\text{g.L}^{-1}$) et de Basse Pointe – Chez Lélène (concentration maximale de $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ en novembre 2007 pour une moyenne de $7.7 \mu\text{g.L}^{-1}$). Ces eaux présentent une contamination par plusieurs pesticides, en conséquence, il n'est pas impossible que ces pics de concentration en cuivre soient une nouvelle fois d'origine anthropique.

En Martinique, les eaux souterraines présentent ainsi un fond géochimique faible pour le cuivre.

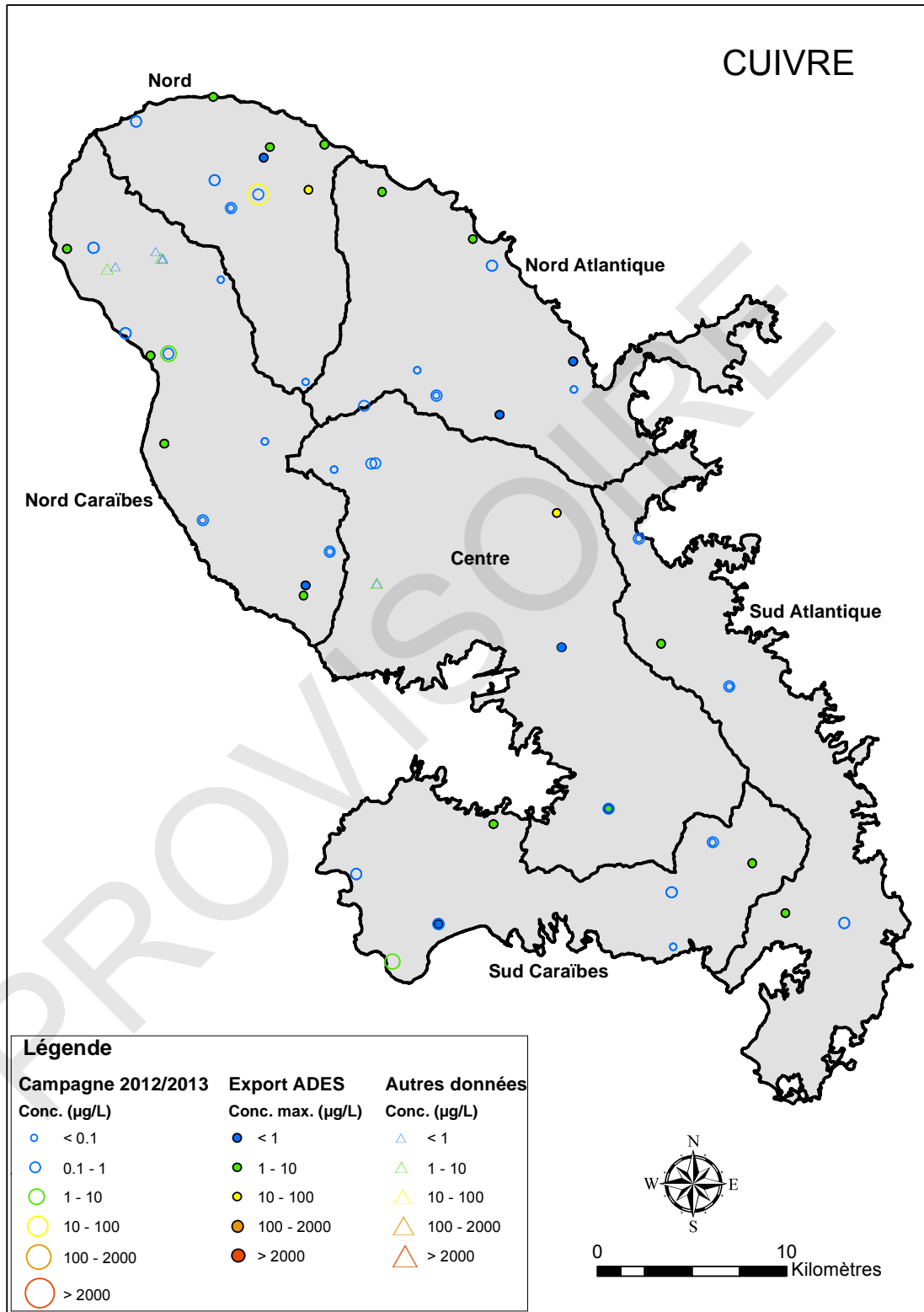


Illustration 12 : Carte des résultats d'analyses pour le Cuivre

3.3.7. Zinc

Le zinc est relativement plus soluble que le cuivre et le nickel. Le zinc s'adsorbe facilement sur certaines surfaces minérales et peut co-précipiter limitant ainsi sa concentration dans les eaux naturelles. Néanmoins, les plus fortes concentrations connues dans la littérature sont de quelques centaines de $\mu\text{g.L}^{-1}$.

La norme de potabilité pour le zinc est de $5\,000\ \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007). La Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour les cours d'eau est fixée à $7.8\ \mu\text{g.L}^{-1}$.

En 2008, un fond géochimique faible avait été attribué à toutes les masses d'eau de Martinique (concentrations inférieures à $200\ \mu\text{g.L}^{-1}$). Ce qui est confirmé par la présente étude, pour laquelle les plus fortes concentrations en zinc sont très majoritairement inférieures à $200\ \mu\text{g.L}^{-1}$ (Illustration 13).

Seuls deux forages du réseau DCE ont présenté des concentrations supérieures : le forage de Diamant – Dizac avec une concentration maximale de $213\ \mu\text{g.L}^{-1}$ pour une moyenne de $139\ \mu\text{g.L}^{-1}$ et le forage du Marin – Grand Fond avec une concentration maximale de $282\ \mu\text{g.L}^{-1}$ pour une moyenne de $40\ \mu\text{g.L}^{-1}$. Pour ce dernier forage qui intercepte une formation calcaire, il s'agit d'une valeur isolée très probablement liée à une contamination lors du prélèvement ou une origine anthropique ($0.73\ \mu\text{g.L}^{-1}$ en avril 2013). Pour le Diamant, le forage capte la formation des brèches ponceuses de Dizac composés de blocs andésitiques à orthopyroxène, hornblende et à olivine pouvant expliquer les plus fortes concentrations en zinc.

Concernant la campagne de terrain 2012/2013, la concentration maximale est de $59.3\ \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les eaux du piézomètre Marin – Cap Macré en août 2012. Ce piézomètre présentant de manière générales des eaux plus minéralisées et plus riches en éléments traces (Ba, Pb, Hg), en lien avec une mise en place en milieu sous-marin et une activité hydrothermale ancienne.

Par conséquent, les nouveaux résultats d'analyse viennent confirmer un fond géochimique faible en zinc pour toutes les masses d'eau souterraine de Martinique.

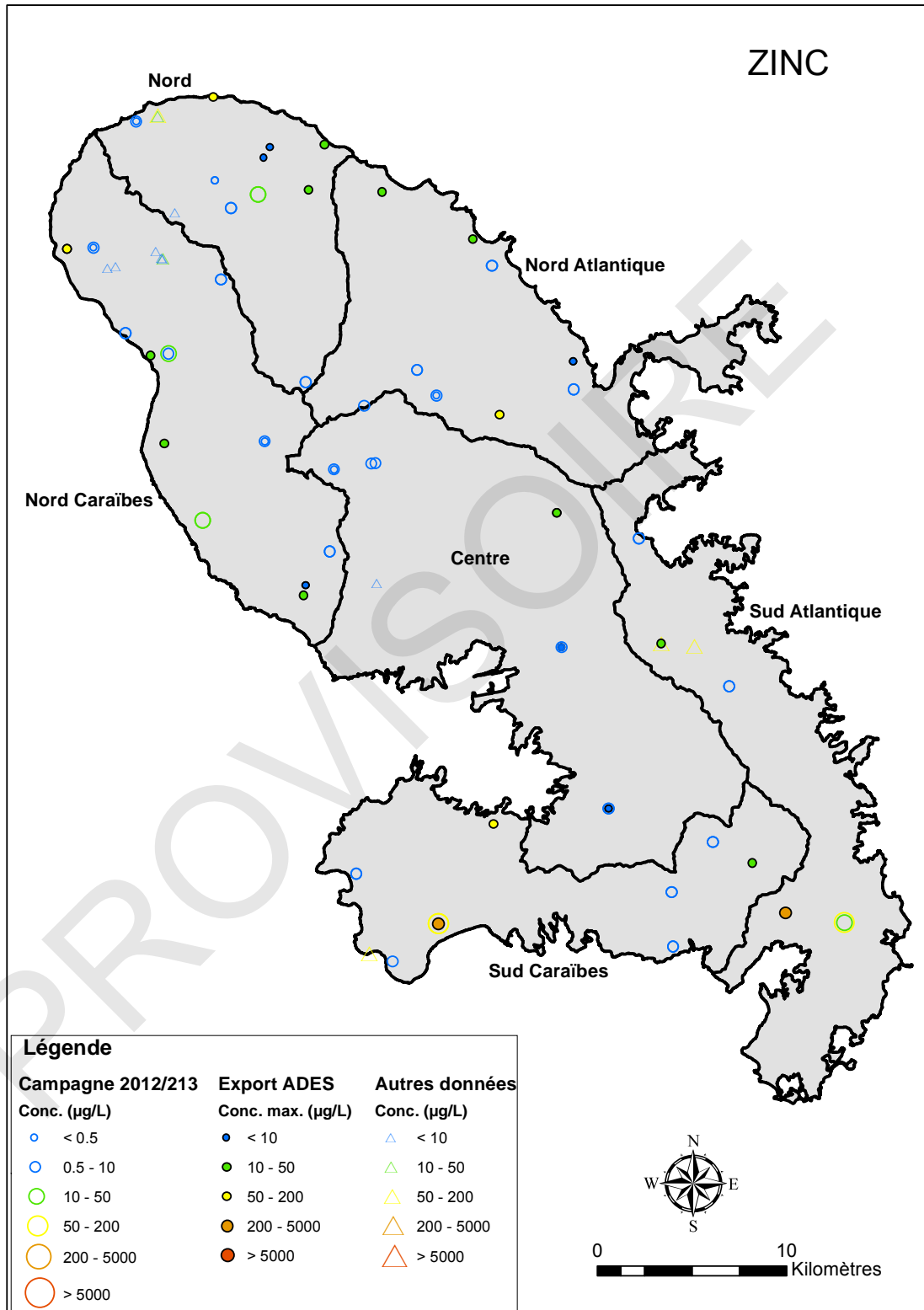


Illustration 13 : Carte des résultats d'analyses pour le Zinc

3.4. ÉLÉMENTS TRACES TOXIQUES

3.4.1. Arsenic

En solution, l'arsenic se présente essentiellement sous forme inorganique. La forme trivalente (AsIII) domine en milieu réducteur et peut co-précipiter avec du soufre pour former des sulfures.

En milieu oxydant, la forme pentavalente (AsV) prédomine et tend à être adsorbée ou à co-précipiter avec des hydroxydes de fer. Les conditions d'oxydo-réduction sont donc essentielles dans le contrôle de la mobilité de l'arsenic.

En Martinique, l'arsenic est attendu dans la composition des minéraux associés à l'hydrothermalisme notamment les sulfures (pyrite, ...) ou les oxy-hydroxydes de fer.

Selon les contextes hydrogéologiques, des concentrations dans les eaux souterraines de quelques $\mu\text{g.L}^{-1}$ à quelques dizaines $\mu\text{g.L}^{-1}$ d'arsenic sont observées dans les environnements favorables. En Martinique, des concentrations pouvant atteindre voire dépasser $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ ont été mesurées.

La norme de potabilité pour l'arsenic est de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Lors de l'étude préliminaire de 2008, plusieurs zones à risque de fond géochimique élevé en arsenic avaient été identifiées :

- au sein de la masse d'eau Nord Atlantique, avec un indice de confiance faible pour les séries volcaniques du Morne Jacob car la délimitation proposée était uniquement basée sur les fortes concentrations régulièrement constatées sur le forage de Marigot – Anse Charpentier (concentration moyenne de $29 \mu\text{g.L}^{-1}$ sur les 5 dernières années de suivi). Au regard des nouvelles données acquises qui ne mettent pas en évidence la présence d'arsenic sur cette masse d'eau (concentrations inférieures à $0.5 \mu\text{g.L}^{-1}$), et du caractère hydrothermal du forage d'Anse Charpentier, le risque de fond géochimique élevé est faible pour la masse d'eau Nord Atlantique ;
- la masse d'eau Nord Caraïbe avait été affectée d'un fond géochimique élevé avec un indice de confiance moyen, en lien avec l'hydrothermalisme de la montagne Pelée et des pitons du Carbet. Sur la base des nouvelles données acquises, une zone à risque de fond géochimique élevé a été délimitée à partir des limites de trois systèmes aquifères de la BDLISA : la Montagne Pelée, l'édifice ancien de la Montagne Pelée et les pitons du Carbet. Cette nouvelle zone, affectée d'un indice de confiance élevé, n'englobe pas l'extrémité nord de la masse d'eau Nord Caraïbe (système aquifère du Mont Conil) et déborde par contre sur la masse d'eau Centre (Illustration 14) ;
- une zone à risque de fond géochimique élevé avait été attribuée au secteur des Trois Ilets avec un niveau de confiance élevé. Les concentrations sont effectivement importantes sur le forage de Vatable (entre 0.8 et $14 \mu\text{g.L}^{-1}$). Ces

fortes concentrations sont liées au système thermo-minéral décrit par Lachassagne et Paulin (1991) et la présence d'argiles hydrothermales présentant des enrichissements en éléments traces : Pb, Cu, Zn, Rb, S, P, Cl, As, Ba, Br et Sn (Pons et al., 1989). Compte tenu des concentrations élevées en arsenic également observées sur le forage de Rivière Salée – Nouvelle Cité (entre 0.8 et 8.0 $\mu\text{g.L}^{-1}$), il a été décidé d'étendre la zone à risque à l'unité aquifère des laves de Rivière Pilote avec un niveau de confiance moyen (Illustration 14). Les eaux échantillonnées à Rivière Salée présentent, en effet, une forte minéralisation (enrichissement en sodium, chlorures, bore, arsenic), probablement due à la remobilisation d'une eau de mer fossile piégée dans les laves de Rivière Pilote (Brenot et al., 2008) ;

- enfin, une zone à risque avait été rattachée à l'anomalie en arsenic et mercure dans les sols du Lamentin mentionnée sur la carte géologique au 1 / 50 000 (Westercamp et al., 1989). Au regard des données géologiques recueillies sur le forage profond de Carrère (présence de sulfures riches en As), ces anomalies seraient liées à un système hydrothermal ancien (Sanjuan et al., 2002). Cette dernière zone est maintenue avec un indice de confiance moyen puisque les seules données disponibles dans le secteur concernent une ressource géothermale (aucune donnée nouvellement acquise).

Une dernière concentration élevée est constatée au niveau de la source hydrothermale de Petite Anse et ne justifie donc pas l'identification d'une zone à risque de fond géochimique élevé.

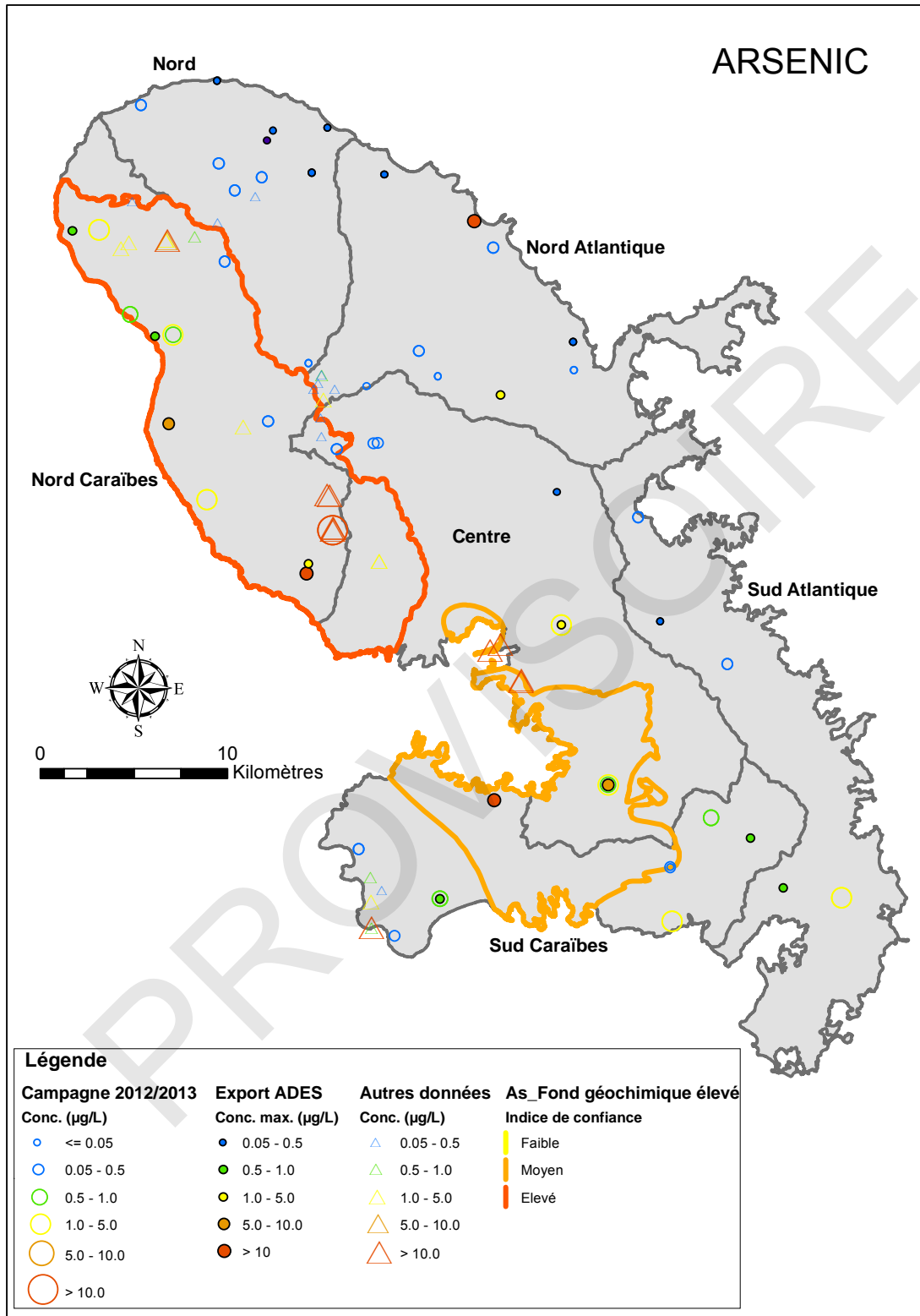


Illustration 14 : Carte des résultats d'analyses pour l'Arsenic

3.4.2. Cadmium

Les propriétés chimiques du cadmium sont proches de celles du zinc mais il est nettement moins abondant. Il est généralement présent dans des minerais de zinc souvent associés aux filons hydrothermaux. Il est aussi couramment associé à la pyrite. Le cadmium peut co-précipiter avec des oxydes de manganèse. Ces propriétés limitent sa concentration dans les eaux naturelles.

Dans la littérature, il existe ainsi très peu de concentration significative en cadmium d'origine naturelle (BRGM, 2006).

La norme de potabilité pour le cadmium est de $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Le cadmium a été quantifié sur seulement 8 des 30 points échantillonnés en 2012 et 2013 avec des concentrations maximales mesurées sur le forage de Dizac : de $0.05 \mu\text{g.L}^{-1}$ en février 2013 et $0.03 \mu\text{g.L}^{-1}$ en août 2012 (Illustration 15).

En ce qui concerne la dernière campagne photographique DCE (avril 2013), on constate 6 quantifications de cadmium avec une concentration maximale de $0.04 \mu\text{g.L}^{-1}$ sur la station du Prêcheur.

Pour le reste, les deux seules anomalies notables sont constatées sur les sources chaudes de Saint-Pierre avec $60 \mu\text{g.L}^{-1}$ et sur les mofettes de Deux Choux avec $0.85 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Il n'existe pas de risque de fond géochimique en cadmium pour les eaux souterraines de la Martinique.

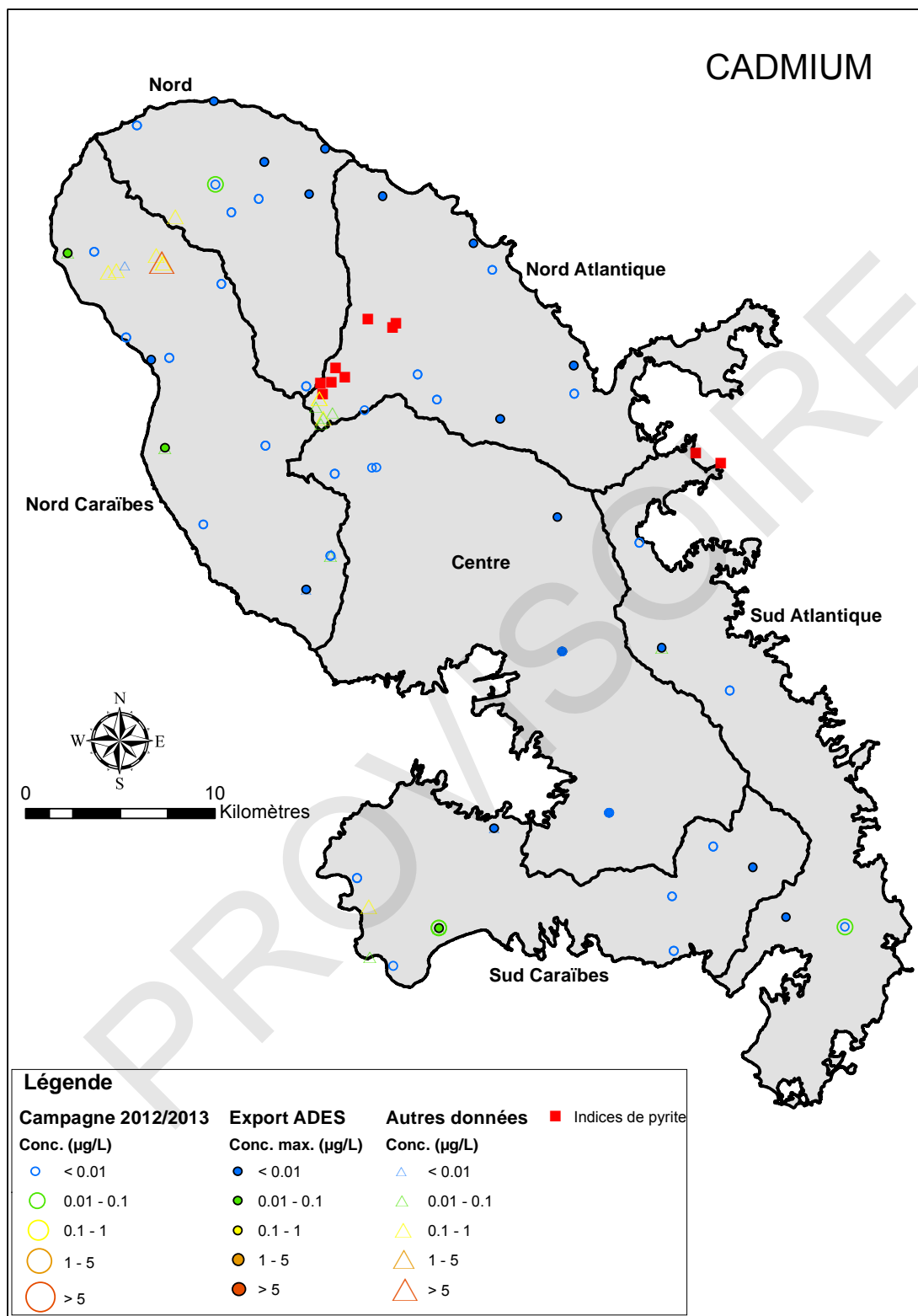


Illustration 15 : Carte des résultats d'analyses pour le Cadmium

3.4.3. Chrome

Le principal minéral contenant du chrome est la chromite (FeCr_2O_4). Le chrome se substitue aisément au fer ferrique, ce qui lui vaut d'être présent dans de nombreux minéraux silicatés fréquemment rencontrés en Martinique (pyroxènes, amphiboles, micas) (BRGM, 2006). Il est néanmoins peu mobile dans les eaux souterraines du fait de sa forte affinité avec les oxy-hydroxydes de fer ou de manganèse.

La norme de potabilité pour le chrome est de $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Un pH alcalin (>7) et un milieu oxygéné favorisent la mise en solution du chrome. En théorie, les eaux souterraines drainant des roches mafiques et ultra-mafiques ayant une signature plus basique pourraient être enrichies en chrome.

Cela n'est cependant pas vérifié avec des concentrations en chrome quasiment toujours inférieures à $1 \mu\text{g.L}^{-1}$ en Martinique (Illustration 16). À titre indicatif, les seules valeurs supérieures à $1 \mu\text{g.L}^{-1}$ (sur eaux filtrées) sont les suivantes :

- $1.08 \mu\text{g.L}^{-1}$ à Saint-Pierre – CDST lors de la saison sèche 2013 ;
- $2.42 \mu\text{g.L}^{-1}$ au forage de Rivière du Prêcheur en avril 2012 ;
- $4.41 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour le piézomètre de Sainte-Luce (campagne de terrain 2013) ;
- $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ sur le forage de Fond Lahaye (1177ZZ0161/FLF1) en décembre 2007.

Lors de l'étude de 2008, de fortes valeurs avaient été mises en avant sur les forages du François (1179ZZ0299) et de Robert – Pontaléry (supérieures à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$) au sein de la masse d'eau Sud Atlantique. Il est, cependant, très probable que les mesures aient été réalisées sur eaux brutes ; ces résultats ne peuvent donc pas être considérés pour l'évaluation du fond géochimique des eaux souterraines. D'autant plus, que cette forte concentration n'a pas été vérifiée pour le forage 1179ZZ0300 intégré à la campagne de prélèvements menée dans le cadre de l'étude ($< 0.1 \mu\text{g.L}^{-1}$ lors des deux campagnes).

En définitive, le fond géochimique en chrome est défini comme faible pour toute la Martinique.

CHROME

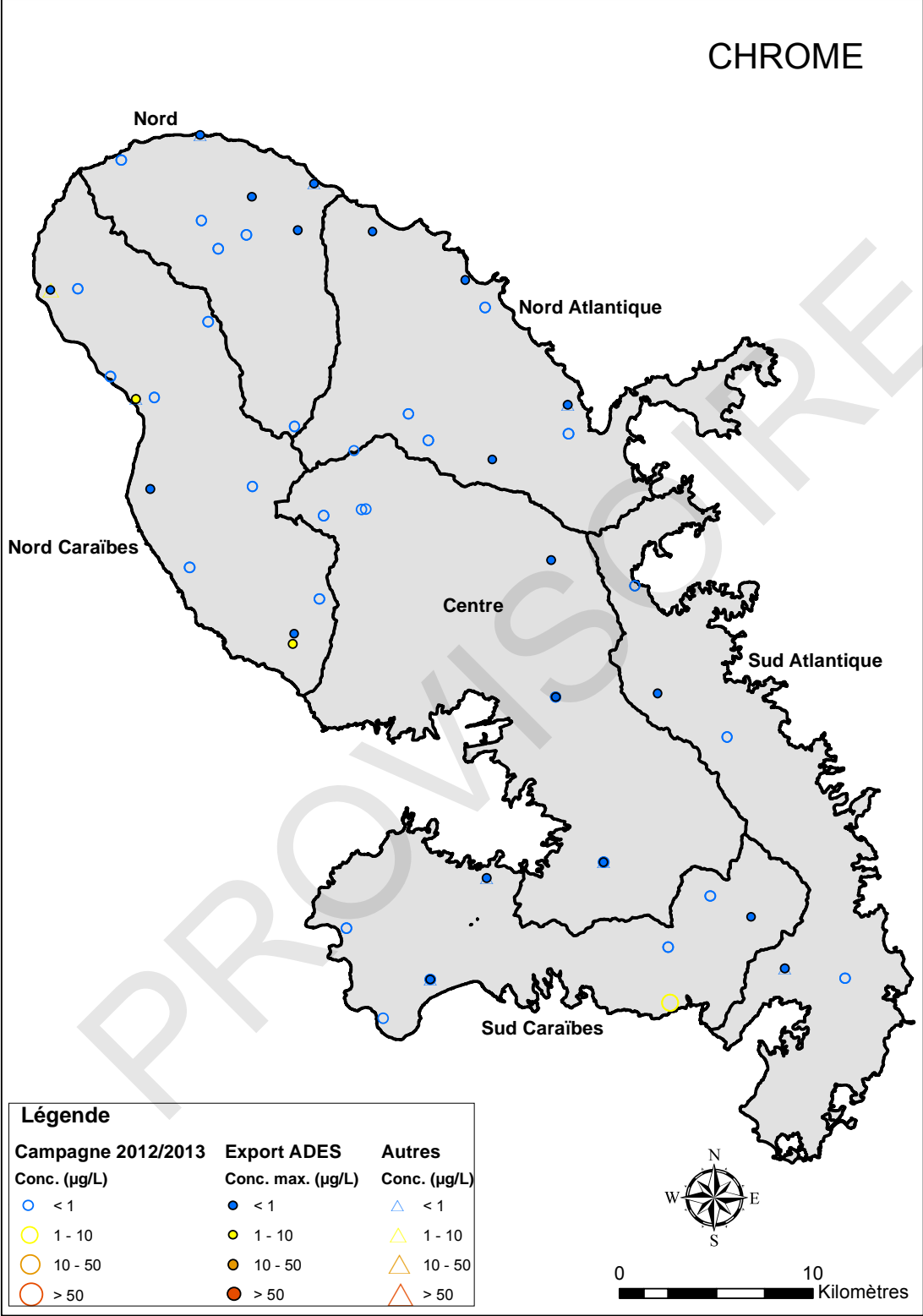


Illustration 16 : Carte des résultats d'analyses pour le Chrome

3.4.4. Mercure

La concentration en mercure dans les eaux souterraines ne dépasse généralement pas 1 µg/L. Les valeurs se situent le plus souvent autour de 0.01 µg/L. En raison du manque de teneurs significatives, aucun contexte géologique favorable à la présence du mercure dans les eaux souterraines n'est reconnu. Des concentrations en mercure d'origine naturelle supérieures au seuil analytique sont rares en raison d'une faible solubilité des complexes qu'il forme, de l'adsorption.

En revanche, la présence de mercure est souvent l'indicateur d'une activité géothermale (a ou présente).

La norme de potabilité pour le mercure est de 1 µg.L⁻¹ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Parmi toutes les données disponibles, seules les eaux du forage du Marin-Cap Macré présentent un enrichissement en mercure, avec respectivement 0.03 et 0.236 µg.L⁻¹ en novembre 2012 et février 2013. Pour le reste des points échantillonnés en 2012 et 2013 (incluant la campagne photographique DCE d'avril 2013), le mercure n'a jamais été quantifié (< 0.015 1 µg.L⁻¹) (Illustration 17).

Les eaux de Cap Macré sont très minéralisées avec, outre le mercure, des enrichissements en chlorures, sodium, brome et baryum et la présence d'éléments traces (zinc, plomb, arsenic, fer, manganèse). Comme le montre leur signature isotopique en strontium, proche de celle de l'eau de mer actuelle, ce forage est implanté dans des formations géologiques qui se sont mises en place en contexte sous-marin ou qui ont vu *a posteriori* des invasions marines (eaux de mer fossiles). Il est probable que la présence de mercure souligne une activité géothermale, d'ores et déjà reconnue dans certains secteurs du Complexe de base à Sainte-Anne : savane des pétrifications, piton Crève-Cœur, volcan du morne Flambeau.

Il est, par conséquent, proposé d'associer aux andésites du complexe de base, présentes dans la presqu'île de Sainte-Anne, un risque de fond géochimique élevé en mercure. Avec un seul point d'accès aux eaux souterraines de cette unité aquifère, un indice de confiance moyen est attribué.

Comme en 2008, compte tenu de l'anomalie en mercure dans les sols décrite par Westercamp et al. (1989), une zone à risque de fond géochimique élevé est localement maintenue dans la plaine du Lamentin (masse d'eau Centre ; Illustration 17), avec un indice de confiance moyen faute de données récentes dans ce secteur.

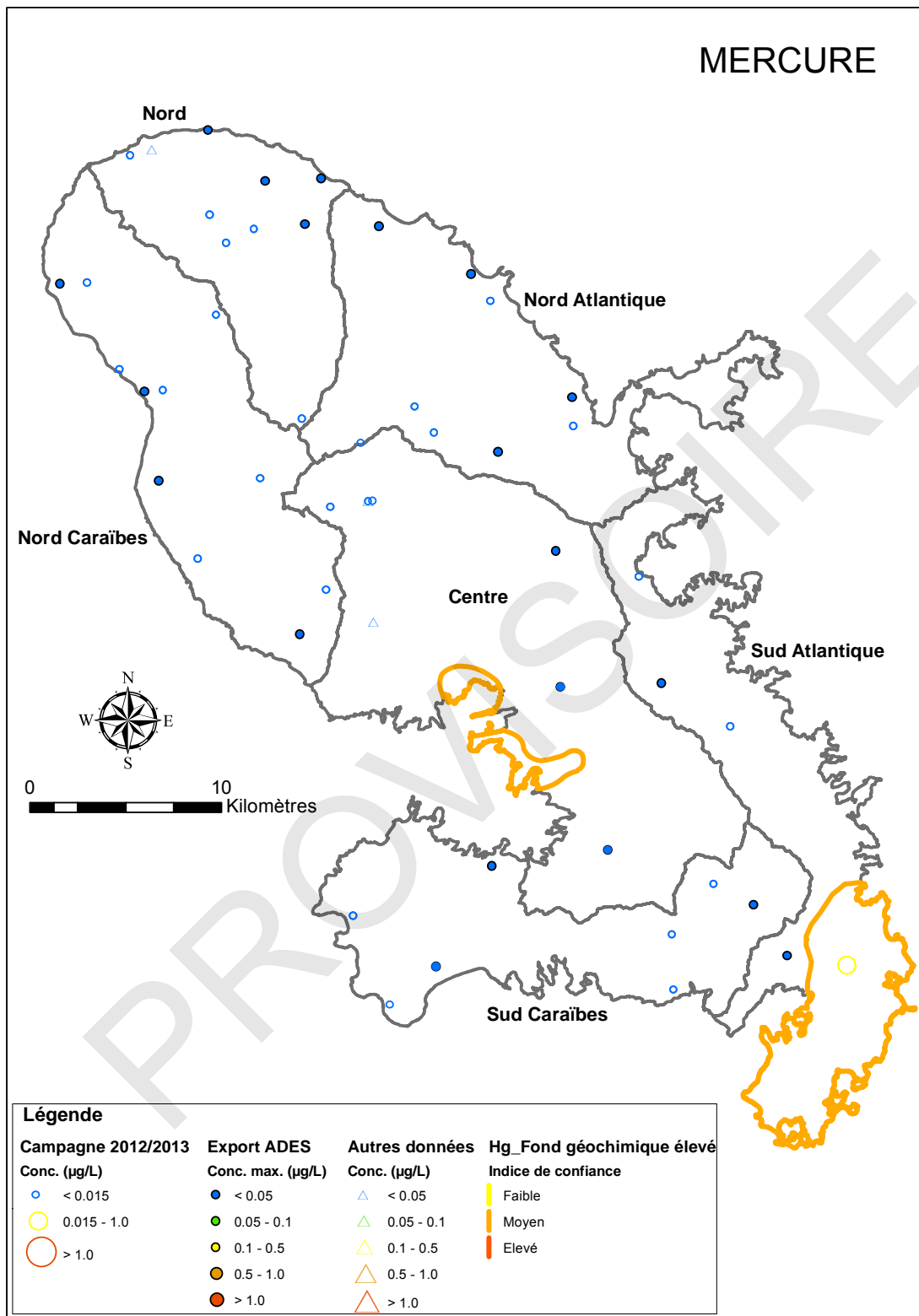


Illustration 17 : Carte des résultats d'analyses pour le Mercure

3.4.5. Nickel

Le nickel se substitue facilement au fer et au magnésium dans les roches ferromagnésiennes. Il est ainsi principalement présent dans les minéraux sulfurés comme la pyrite ou la pentlandite.

Des dépôts de pyrite sont signalés sur la carte géologique de la Martinique dans le secteur du Morne Jacob (Westercamp et al., 1989).

La norme de potabilité pour le nickel est de $20 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

En Martinique, le fond hydrochimique en nickel est faible avec des concentrations qui restent inférieures à $5 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Illustration 18). Deux stations DCE présentent cependant des enrichissements en nickel, à chaque fois associés à des fortes concentrations en arsenic :

- à Schœlcher – Fond Lahaye avec $15 \mu\text{g.L}^{-1}$ en décembre 2007 sur le forage 1177ZZ0161. Cette forte concentration n'a pas été confirmée sur un forage à proximité (1177ZZ0177), ni en avril 2012 ni en avril 2013 (avec respectivement 0.17 et $0.12 \mu\text{g.L}^{-1}$) ;
- à Rivière Salée – Nouvelle Cité, avec une évolution atypique des concentrations en nickel. En effet, il n'était pas quantifié en avril et novembre 2007 ($< 5 \mu\text{g.L}^{-1}$), puis détecté à des concentrations respectives de 5.86 et $6.09 \mu\text{g.L}^{-1}$ en avril et novembre 2012 pour enfin augmenter brutalement à des teneurs de 147 et $173 \mu\text{g.L}^{-1}$ en février et avril 2013.

Du fait du peu de données disponibles, il apparaît difficile d'expliquer ces anomalies, en particulier sur le forage de Rivière Salée – Nouvelle Cité. Pour ce dernier, un intérêt tout particulier sera porté aux analyses à venir dans le cadre des campagnes photographiques de la DCE (novembre 2013).

Enfin, dans l'étude préliminaire de 2008, des concentrations comprises entre 5 et $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ avaient été mises en avant sur le piézomètre de Sainte-Luce pour l'année 2006. Ces concentrations n'ont pas été confirmées par la campagne 2012/2013 : $0.13 \mu\text{g.L}^{-1}$ en août 2012 et $1.05 \mu\text{g.L}^{-1}$ en février 2013. Il est probable que les analyses aient été effectuées sur eaux brutes en 2006 et ne peuvent être intégrées à l'estimation du fond géochimique en nickel.

À ce stade, aucune zone à risque de fond géochimique élevé ne peut être proposée pour le nickel.

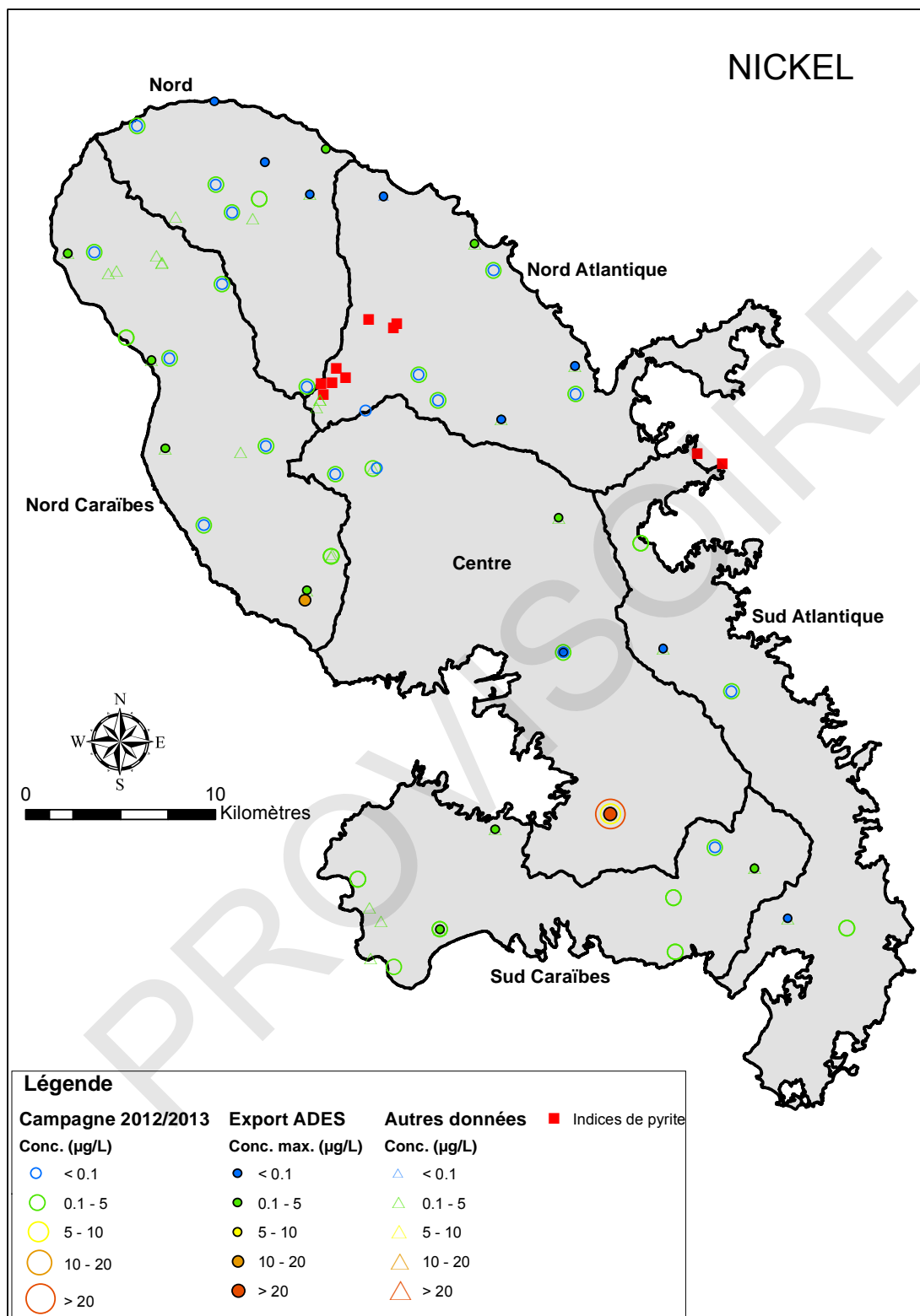


Illustration 18 : Carte des résultats d'analyses pour le Nickel

3.4.6. Plomb

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, les hornblendes, les amphiboles ou les plagioclases (Wedepohl et al., 1974).

Des concentrations en plomb d'origine naturelle supérieures au seuil analytique restent cependant rares en raison d'une faible solubilité des complexes qu'il forme, de l'adsorption sur diverses surfaces et d'une co-précipitation possible avec les oxydes de manganèse (BRGM, 2006).

La norme de potabilité du plomb est de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucun dépassement de la norme a été constaté en Martinique.

Lors de la campagne photographique DCE d'avril 2013, seules trois quantifications sont à noter : $0.19 \mu\text{g.L}^{-1}$ à Trois Ilets – Vatable, $0.28 \mu\text{g.L}^{-1}$ à François – Habitation Victoire et $0.73 \mu\text{g.L}^{-1}$ à Rivière du Prêcheur.

Des résultats probablement obtenus sur eaux brutes ont été écartées de l'analyse (Gros Morne – La Borelli et Sainte-Luce), d'autant plus les concentrations ne sont pas confirmées par les analyses de 2012 et 2013.

En ce qui concerne la campagne de prélèvements menée dans le cadre de la présente étude, toutes les concentrations en plomb restent inférieures à $0.5 \mu\text{g.L}^{-1}$, exceptés pour les points suivants : le forage du Marin – Cap Macré avec $0.89 \mu\text{g.L}^{-1}$ (février 2013), le forage de Démare à basse Pointe avec $0.9 \mu\text{g.L}^{-1}$ (août 2012) le forage de Pécol à Saint-Pierre avec $1.46 \mu\text{g.L}^{-1}$ (février 2013).

Au regard des faibles concentrations mesurées, le fond géochimique en plomb est défini comme faible pour les eaux souterraines de la Martinique.

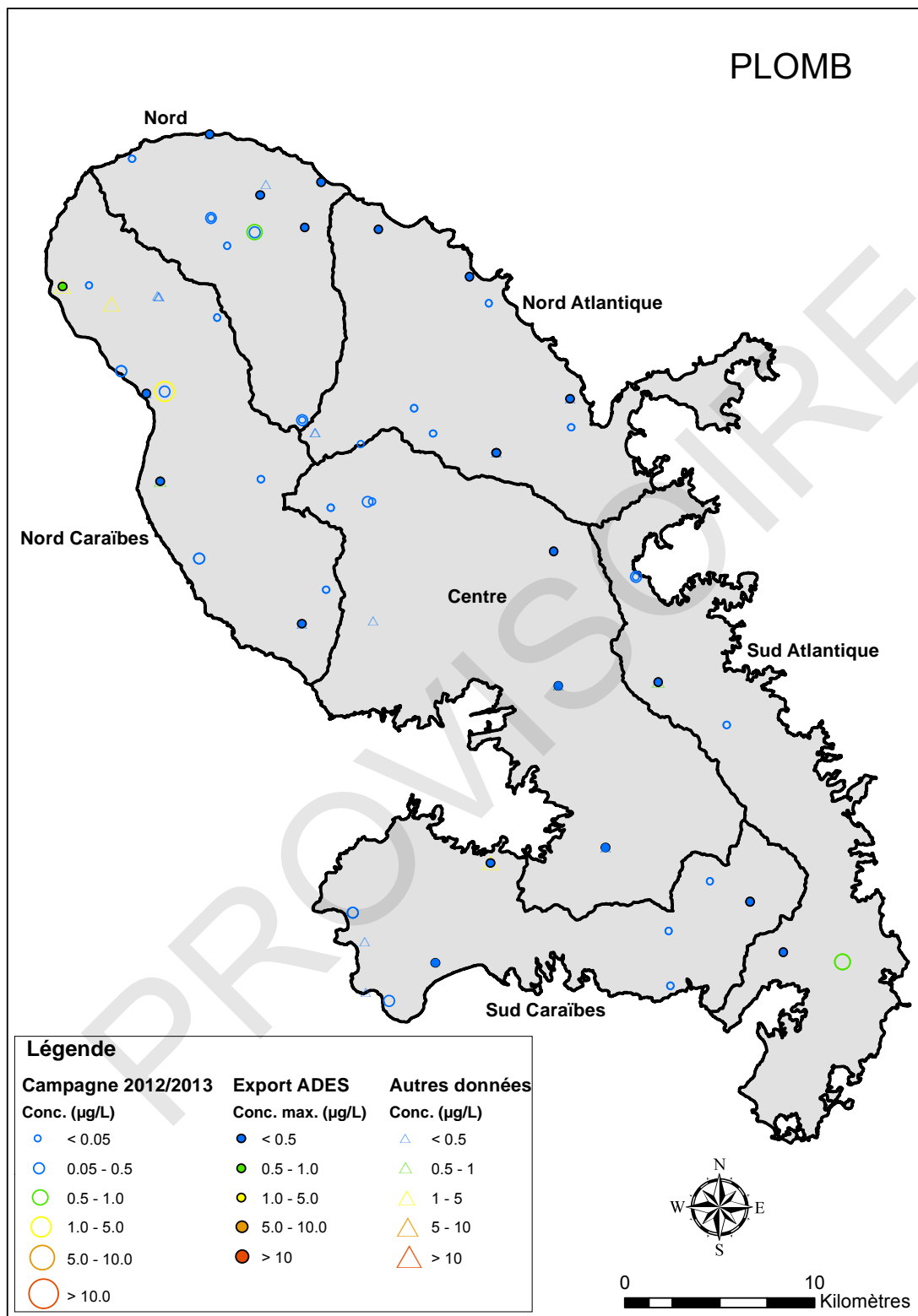


Illustration 19 : Carte des résultats d'analyses pour le Plomb

3.4.7. Sélénium

Le sélénium est présent dans les roches sous forme de sulfures ou associé à des hydroxydes de fer. La mise en solution du sélénium s'explique le plus souvent par l'oxydation de sulfures. Enfin, le front d'oxydation est la zone de l'aquifère la plus riche en sélénium (BRGM, 2006).

La norme de potabilité du sélénium est de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

En 2008, la quantité et la qualité des données disponibles n'avaient pas permis d'évaluer le fond géochimique en sélénium des eaux souterraines.

Lors de la campagne photographique DCE de 2007, trois dépassements de la norme avaient été constatés : forages de Rivière Salée – Nouvelle Cité avec $16 \mu\text{g.L}^{-1}$, Trois Ilets – Vatable et Diamant – Dizac avec $13 \mu\text{g.L}^{-1}$. Les nouvelles données acquises en 2012 et 2013 ne vont cependant pas dans ce sens avec à chaque fois des concentrations en sélénium soient inférieures à la limite de quantification ($0.1 \mu\text{g.L}^{-1}$) pour Rivière Salée soit inférieures à $0.5 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les deux autres points.

Au regard des résultats récents, l'absence de filtration *in situ* pourraient biaiser les résultats obtenus en 2007.

Pour le reste, il est intéressant de noter que les plus fortes concentrations mesurées sont localisées au niveau de la presqu'île des Trois Ilets avec le piézomètre de Grande Anse (concentration maximale de $1.01 \mu\text{g.L}^{-1}$), le forage de Diamant – Dizac ($0.49 \mu\text{g.L}^{-1}$) et le piézomètre de Sainte-Luce ($0.55 \mu\text{g.L}^{-1}$) (Illustration 20). Il est rappelé que ces eaux sont influencés par des intrusions marines (emprise du biseau salé).

En définitive, le fond géochimique en sélénium est défini comme faible pour les eaux souterraines de la Martinique.

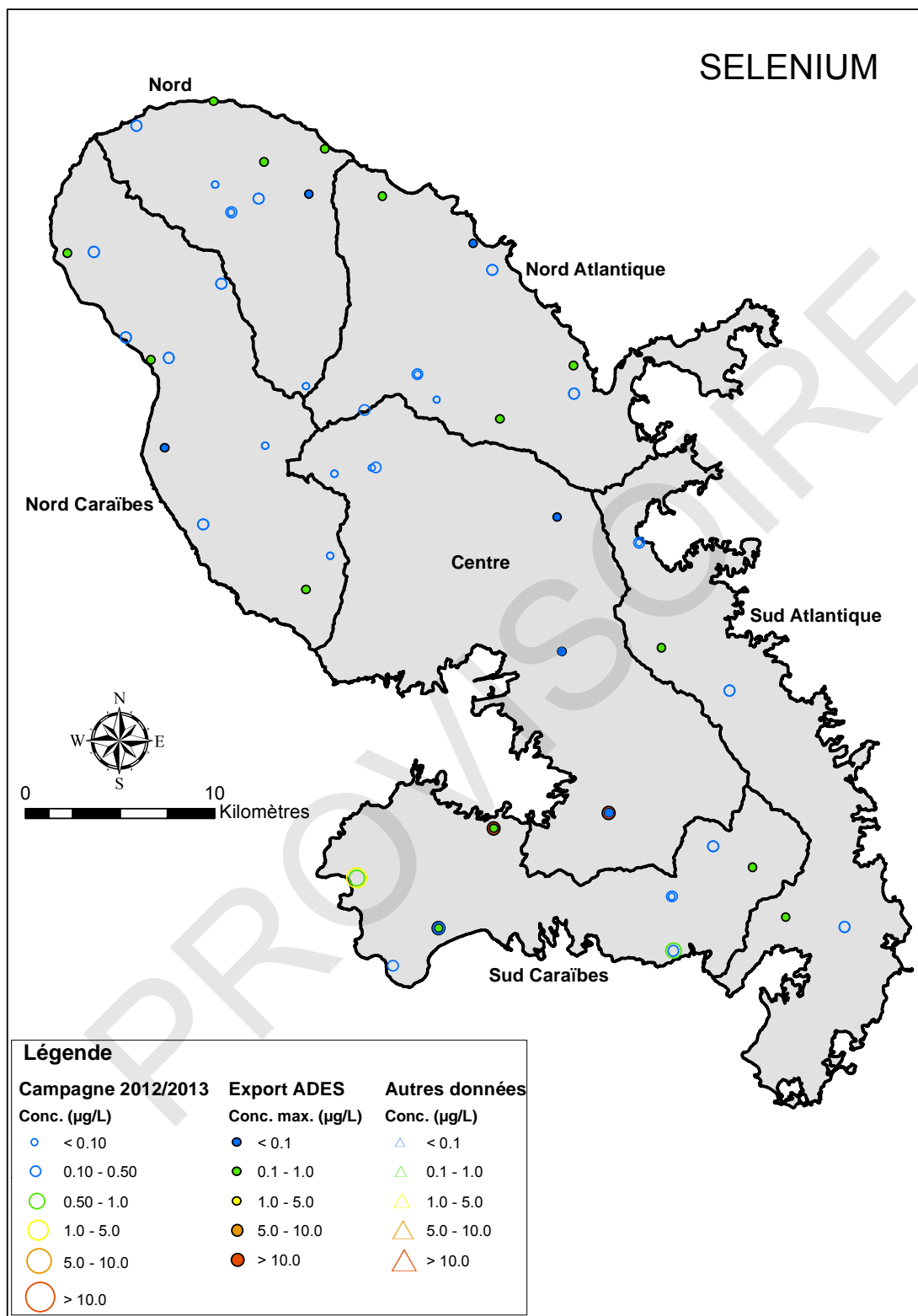


Illustration 20 : Carte des résultats d'analyses pour le Sélénium

3.5. FER ET MANGANÈSE

3.5.1. Mobilité du fer et du manganèse

Synthèse bibliographique

Comme pour les métaux étudiés précédemment, la mobilité du fer et du manganèse, dans les eaux souterraines dépend, d'une part, de la nature des matériaux constituant l'aquifère avec lesquels interagissent les eaux, et d'autre part, des conditions physico-chimiques d'interactions eau-roche. Il semble que peu de travaux se sont intéressés en détails à la présence de fer et/ou de manganèse dans les eaux souterraines ainsi qu'au processus régulant la concentration de ces deux éléments.

Une revue bibliographique internationale a été conduite dans le cadre de l'étude relativement à la présence de concentrations élevées en fer et manganèse dans les eaux souterraines. Il est toutefois important de souligner que la recherche de ces données a été rendu complexe par le manque de référencement précis de cette thématique dans la littérature.

Afin de pouvoir comparer les informations collectées entre elles ainsi qu'avec les données obtenues en Martinique, les caractéristiques de l'aquifère, le pH, le potentiel d'oxydoréduction et les concentrations en fer et/ou en manganèse ont été compilés dans un tableau de synthèse, reporté en Annexe 5.

Il ressort tout d'abord de cette synthèse que des concentrations élevées en fer et manganèse peuvent être rencontrées dans tout type d'aquifère (alluvial, sédimentaire, socle, volcanique,...). De nombreux matériaux géologiques contiennent, en effet, du fer et du manganèse, les principales espèces minérales contenant du fer et/ou du manganèse sont les oxy-hydroxydes de fer et de manganèse, respectivement. La présence de ces minéraux régulent également la concentration d'autres métaux traces dans les eaux souterraines. En effet, les oxy-hydroxydes de Fe et de Mn possèdent des groupements hydroxyles à leur surface sur lesquels des métaux traces s'adsorbent. La quantité d'ions métalliques adsorbés à la surface des oxy-hydroxydes de fer et de manganèse dépend du pH car les propriétés d'adsorption de ces minéraux sont associées à l'état de protonation des groupements hydroxyles (Appelo et Postma, 2005).

Les données issues de la synthèse bibliographique confirment également que les concentrations élevées en fer et en manganèse sont principalement liées à des conditions réductrices. Ce sont bien ces dernières et non la lithologie qui contrôlent la libération de fer et de manganèse vers les eaux souterraines. En conditions réductrices, le fer et le manganèse présents dans les oxy-hydroxydes sous forme oxydés (Fe^{3+} et Mn^{3+} ou Mn^{5+}) se transforment en forme réduite (Fe^{2+} et Mn^{2+}). Or, les formes réduites du fer et du manganèse sont plus solubles que les formes oxydées, ce qui implique une dissolution des oxy-hydroxydes et donc la mobilisation de fer et de manganèse vers les eaux souterraines (Appelo et Postma, 2005).

Lorsque le fer et le manganèse sont associés à de la matière organique dissoute, leur solubilité croît. La dégradation de la matière organique consomme en effet de l'oxygène et rend le milieu plus réducteur : il y a ainsi libération de fer et de manganèse en solution. C'est très probablement pour cette raison que des concentrations très élevées sont enregistrées dans les eaux du forage du Carbet – Fond Canal où une pollution de la nappe aux hydrocarbures est avérée (Cf. § 4.2).

Compilation des données de forage en Martinique

Le fer et le manganèse sont présents dans de nombreux minéraux classiquement rencontrés dans les laves et dépôts pyroclastiques constitutifs du sous-sol martiniquais : pyroxène, amphibole, biotite, magnétite et olivine pour les principaux.

Toujours dans le but de mieux appréhender les concentrations élevées en fer et manganèse dans les eaux souterraines, il a été procédé à une étude détaillée des forages présentant des eaux naturellement enrichies en fer et manganèse. Ont été compilés les informations suivantes : indice BSS, désignation, coordonnées géographiques, profondeur, nature tubage, formations géologiques captées, typologie aquifère, formations de recouvrement, mode de gisement (nappe libre / captive), référence bibliographique, concentrations maximales en fer et manganèse (Annexe 6).

47 forages ont ainsi été étudiés : 32 présentent une concentration maximale en fer supérieure à la norme de potabilité ($200 \mu\text{g.L}^{-1}$) et 38 présentent une concentration maximale en manganèse supérieure à la norme de potabilité ($50 \mu\text{g.L}^{-1}$) (Illustration 21).

| Statistiques | Concentration maximale en Fer ($\mu\text{g.L}^{-1}$) | Concentration maximale en Manganèse ($\mu\text{g.L}^{-1}$) |
|---------------------|--|--|
| Nombre de valeurs | 32 | 38 |
| Minimum | 200 | 62 |
| Maximum | 14 100 | 3 634 |
| Moyenne | 2 850 | 572 |
| Médiane | 942 | 314 |

Illustration 21 : Concentrations en fer et manganèse supérieures aux normes de potabilité pour des eaux de forage

Comme évoqué précédemment, on constate que toutes les lithologies de la Martinique sont concernées par des dépassements en fer et manganèse (Illustration 22). La sur-représentativité des aquifères laviques et ponceux n'est pas liée à un contexte géologique favorable à la libération du fer et manganèse dans les eaux souterraines. Il s'agit simplement des roches majoritairement présentes à l'affleurement en Martinique, aux potentiels aquifères intéressants, et elles ont donc été les cibles prioritaires des prospections hydrogéologiques passées.

En revanche, l'analyse des forages confirme que les conditions réductrices contrôlent les concentrations dans les eaux souterraines avec de l'ordre de 80 % des dépassements observés pour des nappes captives à semi-captives (Illustration 22).

| Nature des aquifères captés | Nombre de forages ([Fe] > 200 µg.L ⁻¹) | Nombre de forages ([Mn] > 200 µg.L ⁻¹) |
|-----------------------------|--|--|
| Laves | 14 | 19 |
| Ponces | 6 | 5 |
| Ponce + Lave | 3 | 2 |
| Nuées ardentes | 1 | 2 |
| Hyaloclastite / Brèche | 5 | 5 |
| Lave + Hyaloclastite | 1 | 1 |
| Lahar / Conglomérat | 0 | 2 |
| Alluvions | 1 | 1 |
| Calcaires | 1 | 1 |

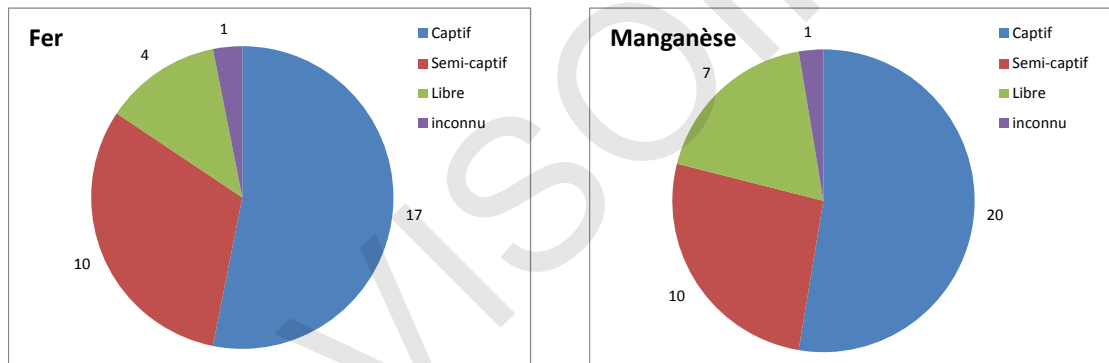
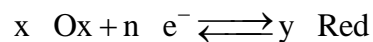


Illustration 22 : Contextes hydrogéologiques des forages concernés par des eaux naturellement enrichies en fer et manganèse

3.5.2. Diagrammes pH-pe

Au vu de ce qui a été dit précédemment, la caractérisation de la spéciation du fer et du manganèse peut donc permettre d'identifier les processus régulant la concentration de ces deux éléments dans les eaux souterraines. Dans ce but, un diagramme Pourbaix pH-pe a été réalisé. Le diagramme Pourbaix pH-pe permet de calculer la spéciation d'un élément en fonction du pH et du potentiel d'oxydoréduction (Eh) d'un échantillon. La construction du diagramme repose sur l'utilisation de la loi de Nernst :



$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{\text{Ox}}^x}{a_{\text{Red}}^y}$$

Le potentiel d'oxydoréduction, Eh, peut également être exprimé sous forme de potentiel de l'électron (pe), qui correspond au logarithme décimal de la concentration en électron. Toutefois, il est important de préciser que l'électron n'existe pas en tant qu'espèce isolée dans les solutions aqueuses, contrairement au proton. Il n'existe que des échanges d'électrons entre espèces chimiques et donc le potentiel de l'électron traduit uniquement le niveau énergétique de l'électron lors de ces échanges. Les potentiels d'oxydoréduction mesurés lors des prélèvements effectués durant la campagne 2012-2013 ont été convertis en potentiel d'électron à l'aide de la relation suivante :

$$pe = \frac{Eh \times F}{\ln 10 \times R \times T}$$

où F correspond à la constante de Faraday ($C.mol^{-1}$), R est la constante des gaz parfaits ($J.mol^{-1}.K^{-1}$) et T est la température (K).

Fer

Le diagramme Pourbaix pH-pe (Illustration 23) réalisé pour le fer montre clairement que la quasi-totalité des échantillons présentant une concentration en fer supérieure à la norme de potabilité ($200 \mu g.L^{-1}$), se concentrent dans le domaine Fe^{2+} . Ces résultats indiquent donc que les concentrations élevées en fer dans les eaux souterraines sont liées à la présence de conditions réductrices qui favorisent la dissolution réductrice des oxy-hydroxydes.

Néanmoins, le diagramme Pourbaix pH-pe montre également qu'un site (source Capitaine, code BSS 174ZZ0135), présentant une concentration en fer supérieure à la norme de potabilité, est à la jonction des domaines Fe^{2+} et Fe^{3+} . Typiquement, ces eaux sont en déséquilibre vis-à-vis du potentiel d'oxydoréduction. Ainsi, il est possible que les conditions permettant la mobilisation de fer ne soient présentes que transitoirement mais que la durée ou l'intensité de ces événements soient suffisantes pour permettre la libération de fer vers les eaux souterraines. Dans le cas de ce site, la concentration élevée en fer pourrait également être expliquée par la concentration élevée en colloïde. En effet, les colloïdes possèdent des groupements hydroxyles à leur surface sur lesquels s'adsorbent le fer en solution, limitant sa précipitation sous forme d'oxy-hydroxydes même lorsque le fer en solution est principalement présent sous forme de Fe^{3+} .

Plusieurs points d'eau ne présentant pas de concentrations en fer supérieures aux normes de potabilité sont également à la jonction des domaines Fe^{2+} et Fe^{3+} . Ces eaux doivent également être en déséquilibre vis-à-vis du potentiel d'oxydoréduction mais la durée ou l'intensité des conditions permettant la libération de fer semble insuffisante.

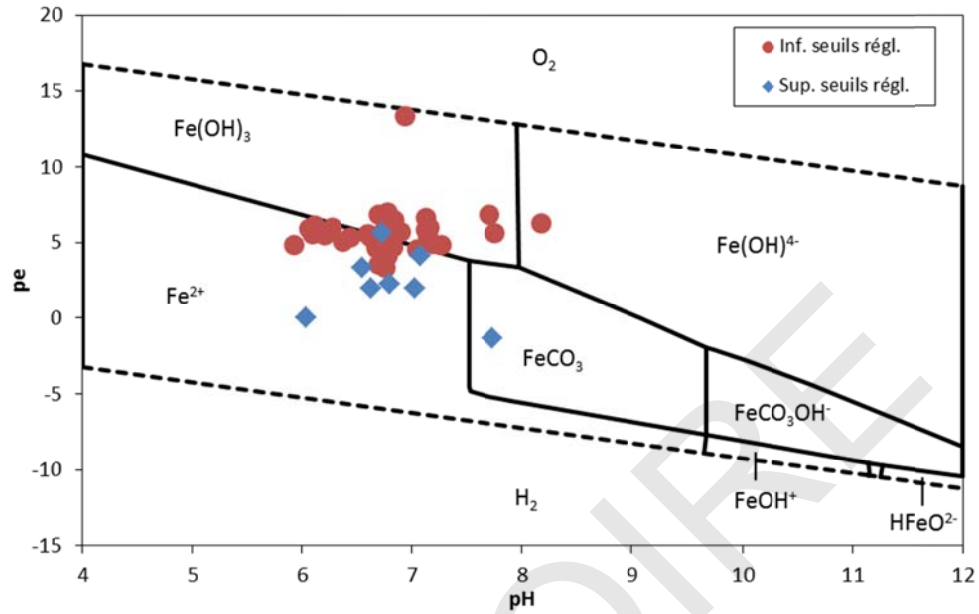


Illustration 23 : Diagramme de Pourbaix pH-pe pour le fer calculé pour une eau de composition moyenne à partir des analyses effectuées

Manganèse

Pour le manganèse, les échantillons analysés se concentrent principalement dans le domaine Mn^{2+} (Illustration 24). Ce résultat montre que les processus contrôlant la libération du manganèse vers les eaux souterraines ne peuvent pas être discriminés uniquement à l'aide d'un diagramme de Pourbaix pH-pe. Il est important de souligner que la spéciation est plus complexe que celle du fer, et qu'elle reste encore mal comprise.

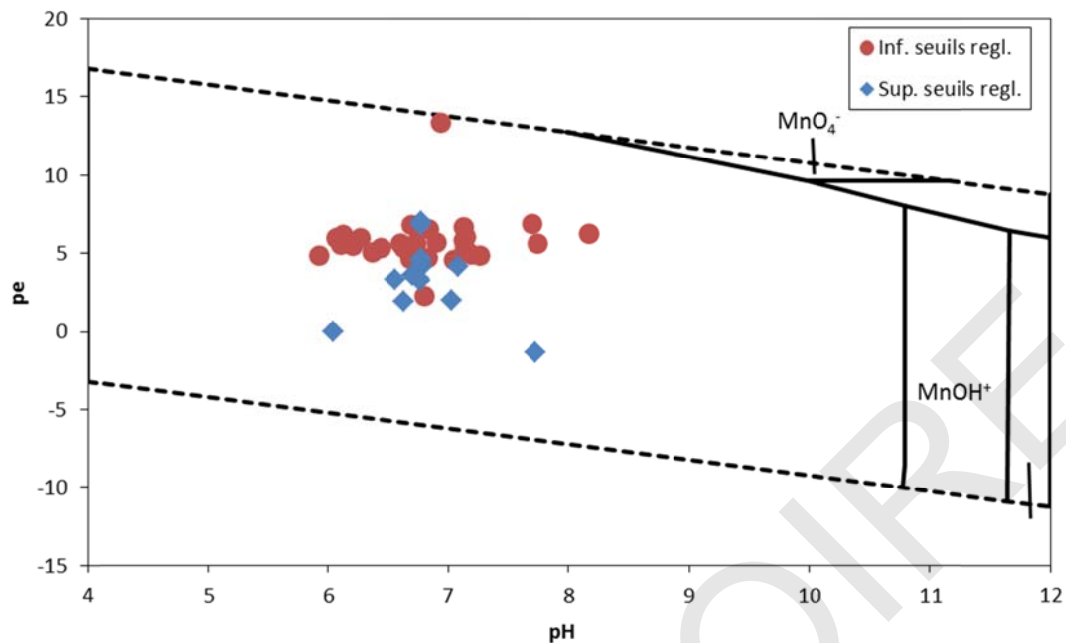


Illustration 24 : Diagramme de Pourbaix pH-pe pour le manganèse calculé pour une eau de composition moyenne à partir des analyses effectuées

3.5.3. Délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé en fer et manganèse

Les nouvelles données acquises et l'étude détaillée des forages d'eau en Martinique amènent à maintenir des zones à risque de fond géochimique élevé en fer et manganèse sur l'ensemble du territoire. L'indice de confiance de l'estimation est élevé.

Des fortes concentrations sont effectivement observées sur la quasi-totalité du territoire (Illustration 25 et Illustration 26). Cela semble moins évident pour le fer au vu des données disponibles, notamment dans le Nord, mais le risque ne peut cependant être exclu. En effet, des eaux souterraines, localement en charge (situation commune en Martinique) et captées par forage, présenteraient très probablement des concentrations en fer élevées dans ce secteur.

3.6. RÉCAPITULATIF

L'illustration 27 propose un tableau récapitulatif des éléments chimiques à risque de fond géochimique élevé en Martinique avec rappel des formations géologiques et des masses d'eau souterraine concernées.

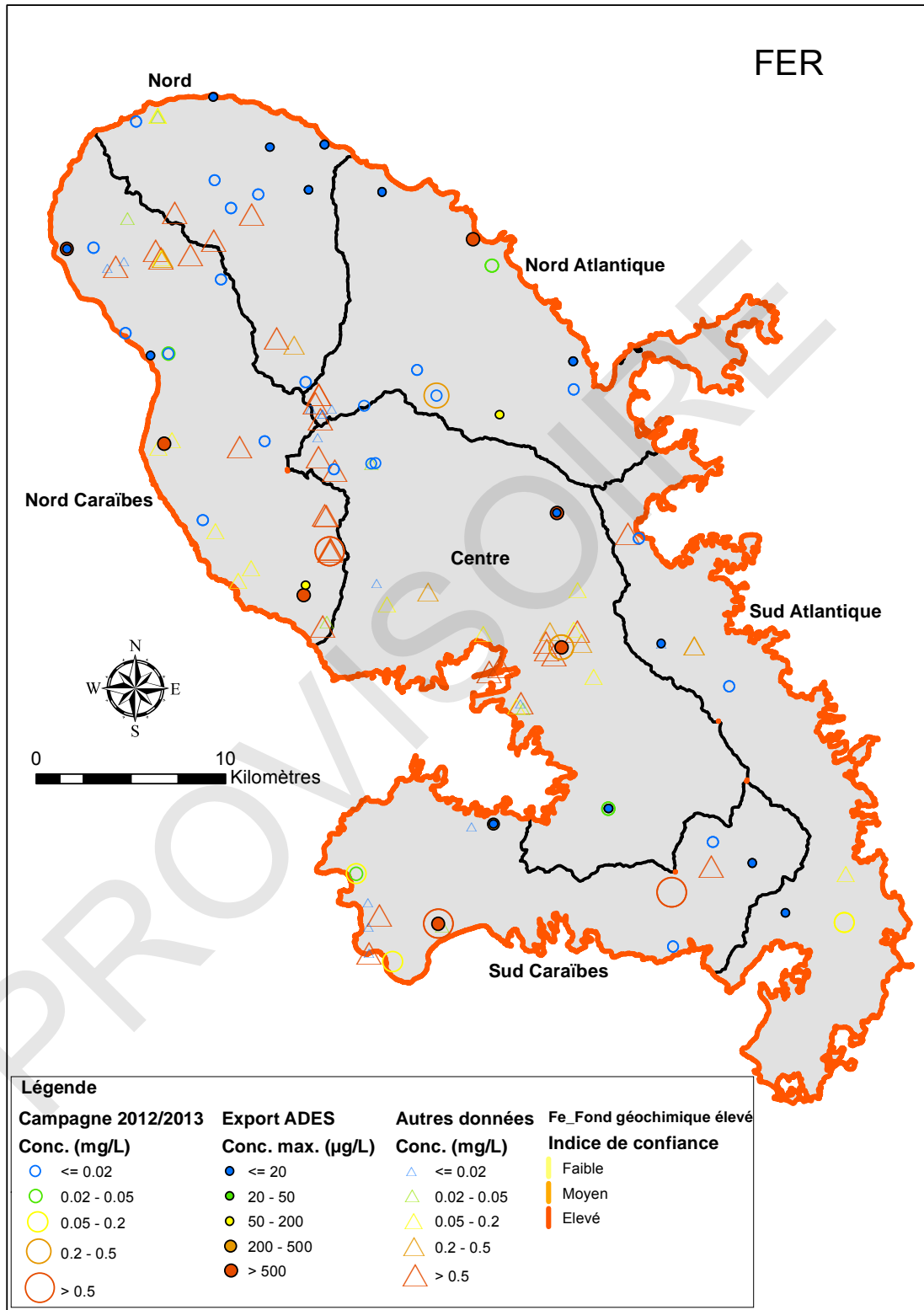


Illustration 25 : Carte des résultats d'analyses pour le Fer

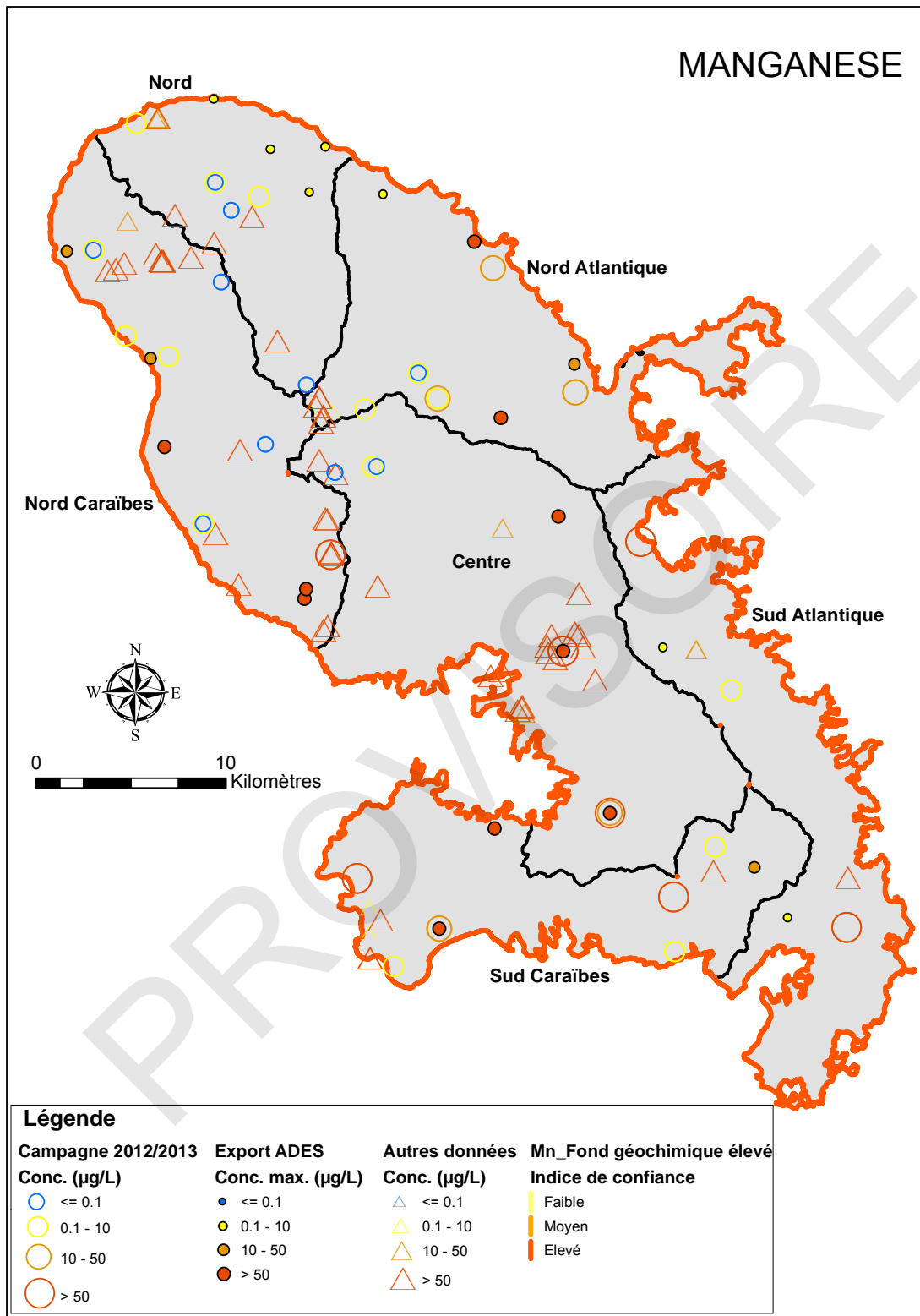


Illustration 26 : Carte des résultats d'analyses pour le Manganèse

| | Éléments | Indice de confiance | Délimitation | Masses d'eau souterraine |
|--|------------------|--|---|--------------------------|
| ÉLÉMENTS MAJEURS | Calcium | Élevé | Calcaires du Marin | Sud Atlantique |
| | | | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | |
| | Magnésium | Élevé | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | Sud Atlantique |
| | Chlorures Sodium | Élevé | Unité aquifère des andésites 2alpha | Nord Caraïbe |
| | | | Système aquifère du Sud | Centre |
| | | | Système aquifère du Morne Larcher et des Roches Genty | Sud Caraïbe |
| | | | Système aquifère du Sud | Sud Atlantique |
| Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | | | | |
| Sulfates | Élevé | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | Sud Atlantique | |
| ÉLÉMENTS TRACES | Arsenic | Élevé | Système aquifère de la Montagne Pelée | Nord Caraïbe |
| | | | Système aquifère de l'édifice ancien de la Montagne Pelée | |
| | | | Système aquifère des pitons du Carbet | |
| | | Moyen | Anomalies sols (Le Lamentin) | Centre |
| | | | Unité aquifère des laves de Rivière Pilote | Sud Caraïbe |
| | Baryum | Faible | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de la Caravelle) | Nord Atlantique |
| | | Moyen | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | Sud Atlantique |
| | Bore | Élevé | Unité aquifère des laves de Rivière Pilote | Centre |
| | | | Unité aquifère des laves du Morne Pavillon | Sud Caraïbe |
| | | | Système aquifère du Morne Larcher et des Roches Genty | |
| | Fer Manganèse | Élevé | Martinique | |
| Mercure | Moyen | Anomalies sols (Le Lamentin) | Centre | |
| | | Système aquifère du complexe de base (Presqu'île de Sainte-Anne) | Sud Atlantique | |

Illustration 27 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond géochimique élevé

PROVISOIRES

4. Détermination de nouvelles valeurs seuils

En préambule, il est important de préciser que les nouvelles valeurs seuils proposées dans le présent chapitre n'ont aucune valeur réglementaire.

4.1. MÉTHODOLOGIE SUIVIE

En concertation avec l'ODE et la DEAL Martinique, il a été décidé de définir de nouvelles valeurs seuils uniquement si des dépassements d'origine naturelle étaient observés sur les stations de surveillance du réseau DCE.

À partir des chroniques de données disponibles, différentes valeurs statistiques ont été calculées dans le but d'orienter la définition des nouvelles valeurs seuils : "moyenne + écart-type", "moyenne + 2 x écart-type", "quantile 90¹" et "maximum".

Après analyse des résultats, et en accord avec l'ODE et la DEAL, il a été décidé de retenir le quantile 90 arrondi à la cinquantaine supérieure. Par exemple, dans le cas du sodium et de la masse d'eau Sud Caraïbe, avec un quantile 90 de 316 mg.L⁻¹, une nouvelle valeur seuil de 350 mg.L⁻¹ est proposée. La démarche suivie est ainsi homogène d'une masse d'eau à l'autre et d'un élément chimique à l'autre.

Une valeur seuil n'est pas obligatoirement affectée à l'ensemble de la masse d'eau souterraine, il est possible de proposer des valeurs seuils locales. Deux cas de figure peuvent alors être envisagés : la valeur seuil est associée à une station de surveillance ou à un sous-secteur de la masse d'eau, sous-secteur délimité à partir des zones à risque de fond géochimique élevé.

Pour chaque situation, les nouvelles valeurs seuils proposées sont confrontées à l'ensemble des résultats d'analyse compilés dans le cadre de la présente étude (Cf. § 4.3 à 4.7).

Enfin, il est rappelé que zone à risque de fond géochimique élevé ne signifie pas systématiquement dépassement des normes de potabilité et donc définition d'une nouvelle valeur seuil.

4.2. DÉPASSEMENTS DES VALEURS SEUILS ACTUELLES

Au niveau du réseau de surveillance DCE, les dépassements en éléments majeurs et en métaux sont très majoritairement d'origine naturelle. Les deux seuls ouvrages où sont constatés régulièrement des dépassements d'origine anthropique sont :

¹ 90% des valeurs de l'échantillon étudié sont inférieurs au quantile 90

- Robert – Vert Pré (1175ZZ0106) pour la masse d'eau Centre avec des pollutions en ammonium, fer et manganèse ;
- Carbet – Fond Canal (1172ZZ0063) au sein de la masse d'eau Nord Caraïbe pour les mêmes éléments (NH₄, Fe, Mn). Cet ancien forage AEP a, en effet, été abandonné en raison d'une pollution aux hydrocarbures.

Les forages et/ou sources présentant des anomalies marquées et d'origine naturelle sont finalement peu nombreux (Illustration 28). Exceptés pour le fer et le manganèse, ils sont associés à des contextes géologiques particuliers et évoqués précédemment pour la délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé. On retiendra principalement le forage de Marigot – Anse Charpentier et une signature géothermale, les forages de Schoelcher – Fond Lahaye influencés par le système hydrothermal de Didier-Absalon, les forages de Rivière Salée, Trois Ilets, Diamant et Cap Macré dont les aquifères captés sont influencés par une activité géothermale ancienne et/ou par des eaux marines (intrusion saline, eaux de mer fossiles).

| Masses d'eau | Éléments | Réseau DCE | Campagne 2012/2013 |
|-----------------|--|---|--|
| Nord | / | / | / |
| Nord Atlantique | Arsenic Fer Manganèse | Anse Charpentier (1169ZZ0006) Anse Charpentier Anse Charpentier, La Borelli | / Source Capitaine / |
| Nord Caraïbe | Antimoine Arsenic Fer Manganèse | Saint-Pierre – CDST (1167ZZ0045) Fond Lahaye (1177Z0161) / Fond Lahaye (1177Z0161 et 177) | / Forage Mabelo Forage Mabelo Forage Mabelo |
| Centre | Chlorures Fer Manganèse Nickel Sélénium Sodium | Nouvelle Cité (1182ZZ0160) Lamentin (1179ZZ0070) Lamentin, Nouvelle Cité Nouvelle Cité Nouvelle Cité Nouvelle Cité | Nouvelle Cité Lamentin (1179ZZ0070) Lamentin, Nouvelle Cité Nouvelle Cité / Nouvelle Cité |
| Sud Atlantique | Chlorures Mercure Sodium | Grand Fond (1186ZZ0118) / / | Cap Macré Cap Macré Cap Macré |
| Sud Caraïbe | Arsenic Chlorures Fer Manganèse Sélénium Sodium | Vatable (1181ZZ0132) Vatable Vatable, Dizac (1184ZZ0001) Vatable, Dizac Vatable, Dizac Vatable | / Grande Anse Source du Riz, Dizac Source du Riz, Grande Anse / / |

Illustration 28 : Tableau récapitulatif des dépassements de valeurs seuils DCE d'origine naturelle

Afin de prendre en compte le fond géochimique dans l'évaluation chimique des masses d'eau souterraine, la définition de nouvelles valeurs seuils s'avère nécessaire en Martinique pour l'arsenic, les chlorures, le sodium, le fer et le manganèse.

Pour l'**antimoine** et le **sélénium**, il n'y a pas lieu de définir de nouvelles valeurs seuils car les dépassements ponctuellement constatés en 2007 (pour une seule des deux campagnes) n'ont pas été confirmés en 2013.

Enfin, les anomalies en **nickel** récemment observées en février et avril 2013 sur Rivière Salée – Nouvelle Cité (§ 3.4.5) ne permettent pas, en l'état actuel des connaissances, de justifier une nouvelle valeur seuil. Une attention toute particulière devra être portée à l'évolution des concentrations en nickel en ce point d'eau.

4.3. ARSENIC

Malgré la définition de zones à risque de fond géochimique élevé pour les masses d'eau Nord Caraïbe, Centre et Sud Caraïbe, il n'apparaît pas nécessaire de proposer de nouvelles valeurs seuils. En effet, les dépassements de la valeur seuil actuelle restent très ponctuels : une occurrence pour Schœlcher – Fond Lahaye ($11 \mu\text{g.L}^{-1}$ en avril 2007) et Trois Ilets – Vatable ($14 \mu\text{g.L}^{-1}$ en novembre 2007), non confirmée par les données plus récentes.

En revanche, dans le cas de la masse d'eau Nord Atlantique, les dépassements sont réguliers sur le forage de Marigot – Anse Charpentier (eau hydrothermale). La nouvelle valeur seuil en arsenic est calculée uniquement sur la base des concentrations enregistrées sur cette station, seule à présenter des anomalies en arsenic pour cette masse d'eau et ce quel que soit la source de données. Les valeurs statistiques caractéristiques sont les suivantes : moyenne = 26 / écart-type = 15 / quantile 90 = 38 / maximum = 59).

En l'absence de fond géochimique élevé en arsenic sur la masse d'eau Nord Atlantique, il est suggéré de retenir une valeur seuil locale de $50 \mu\text{g.L}^{-1}$, à rattacher au seul forage d'Anse Charpentier (eau hydrothermale).

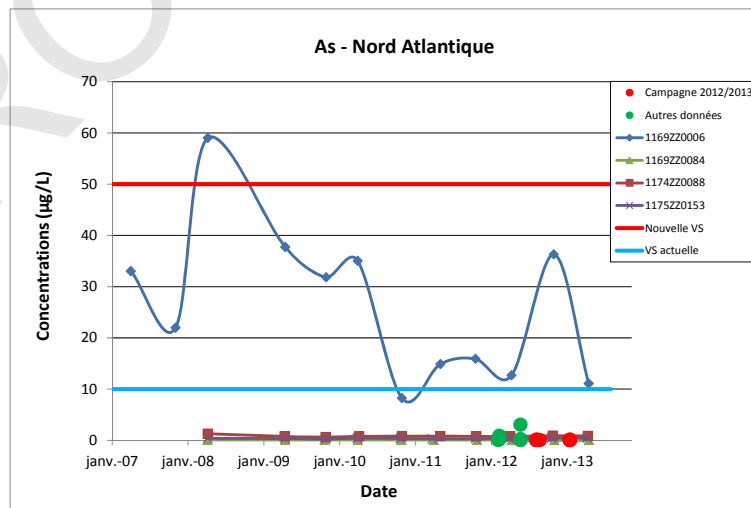


Illustration 29 : Concentrations en arsenic pour la masse d'eau souterraine Nord Atlantique et nouvelle valeur seuil proposée

4.4. CHLORURES

En cohérence avec les zones à risque de fond géochimique élevé identifiées précédemment, il est nécessaire de définir de nouvelles valeurs seuils pour les chlorures au sein des masses d'eau souterraine Centre, Sud Atlantique et Sud Caraïbes.

Pour ces trois masses d'eau, la nouvelle valeur seuil a été calculée à partir des chroniques de données présentant des concentrations régulièrement supérieures à la valeur seuil actuelle de 200 mg.L⁻¹: les forages de Rivière Salée – Nouvelle Cité (1182ZZ0160) pour le Centre, du Marin – Grand Fond (1186ZZ0118) pour le Sud Atlantique et des Trois ilets – Vatable (1181ZZ0132) pour le Sud Caraïbes (Illustration 30 et Illustration 31).

Pour la masse d'eau Centre, il est proposé une nouvelle valeur seuil locale de 500 mg.L⁻¹, uniquement affectée à la zone à risque de fond géochimique élevé (unité aquifère des laves de Rivière Pilote + axe pitons du Carbet – Lamentin ;

Illustration 6).

Pour les masses d'eau Sud Atlantique et Sud Caraïbes, les nouvelles valeurs seuils sont respectivement de 300 et 500 mg.L⁻¹ et concernent à chaque fois la totalité de la masse d'eau.

Avec ces nouvelles valeurs seuils, les seuls dépassements à attendre correspondent à des eaux hydrothermales (source chaude de Petite Anse) et aux eaux de mer fossiles piégées dans les lithologiques du complexe de base (forage du Marin – Cap Macré) (Illustration 31).

| Masse d'eau | Station de surveillance | Moyenne (mg.L ⁻¹) | Écart-type | Quant. 90 (mg.L ⁻¹) | Max. (mg.L ⁻¹) | Valeur seuil (mg.L ⁻¹) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Centre | 1182ZZ0160 | 440 | 45 | 484 | 511 | 500 |
| Sud Atlantique | 1186ZZ0118 | 236 | 21 | 262 | 283 | 300 |
| Sud Caraïbes | 1181ZZ0132 | 358 | 68 | 466 | 484 | 500 |

Illustration 30 : Principales valeurs statistiques et nouvelle valeur seuil pour les chlorures

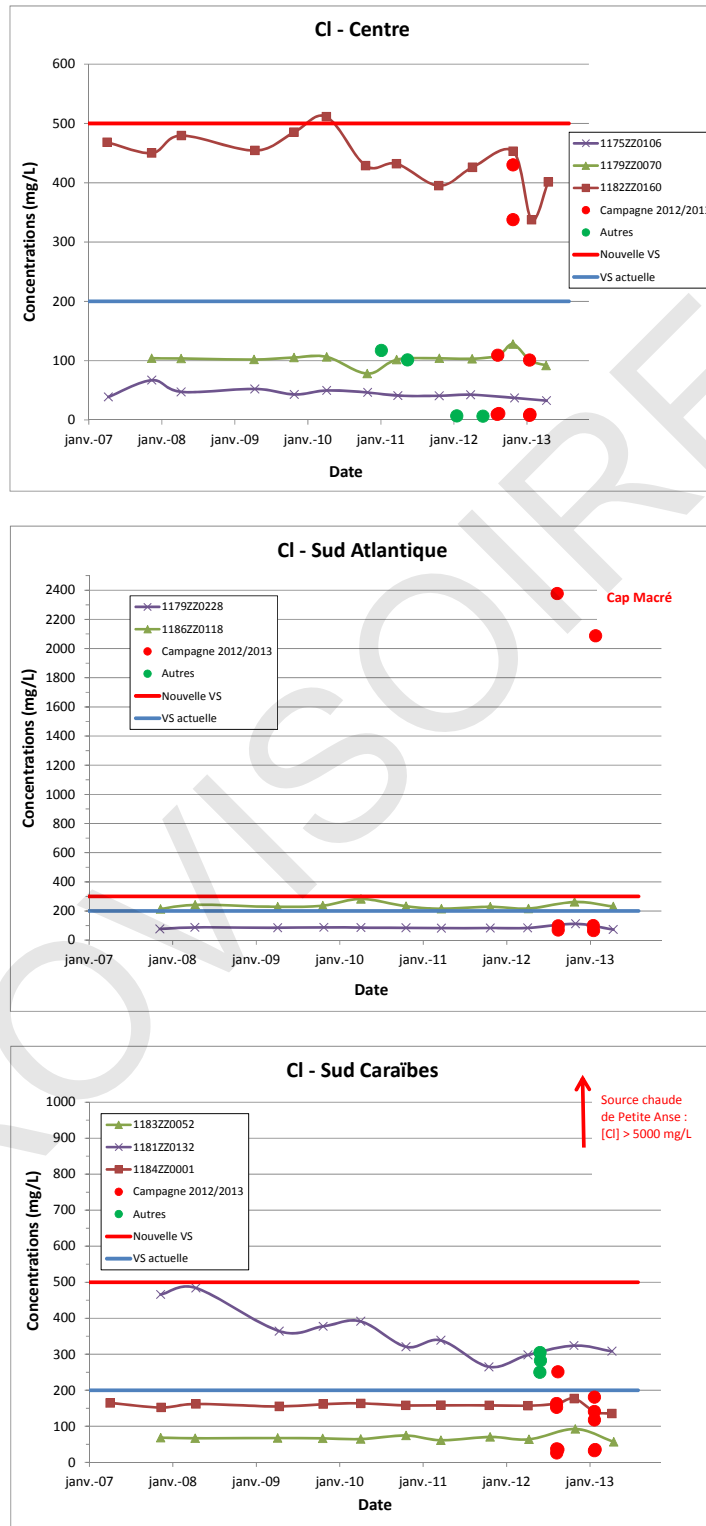


Illustration 31 : Concentrations en chlorures pour les masses d'eau souterraine Centre, Sud Atlantique et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées

4.5. SODIUM

En ce qui concerne le sodium, les seuls dépassements de la valeur seuil actuelle (200 mg.L⁻¹) sont constatés sur les forages de Rivière Salée – Nouvelle Cité (1182ZZ0160) pour la masse d'eau Centre des Trois Ilets – Vatable (1181ZZ0132) pour le Sud Caraïbes.

L'analyse statistique des chroniques de données amènent à proposer de nouvelles valeurs seuils de 300 mg.L⁻¹ pour le Centre et de 350 mg.L⁻¹ pour le Sud Caraïbes. Pour la masse d'eau Centre, à l'instar des chlorures, il est suggéré une valeur seuil locale.

| Masse d'eau | Station de surveillance | Moyenne (mg.L ⁻¹) | Écart-type | Quant. 90 (mg.L ⁻¹) | Max. (mg.L ⁻¹) | Valeur seuil (mg.L ⁻¹) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Centre | 1182ZZ0160 | 261 | 10 | 272 | 274 | 300 |
| Sud Caraïbes | 1181ZZ0132 | 272 | 25 | 316 | 318 | 350 |

Illustration 32 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le sodium

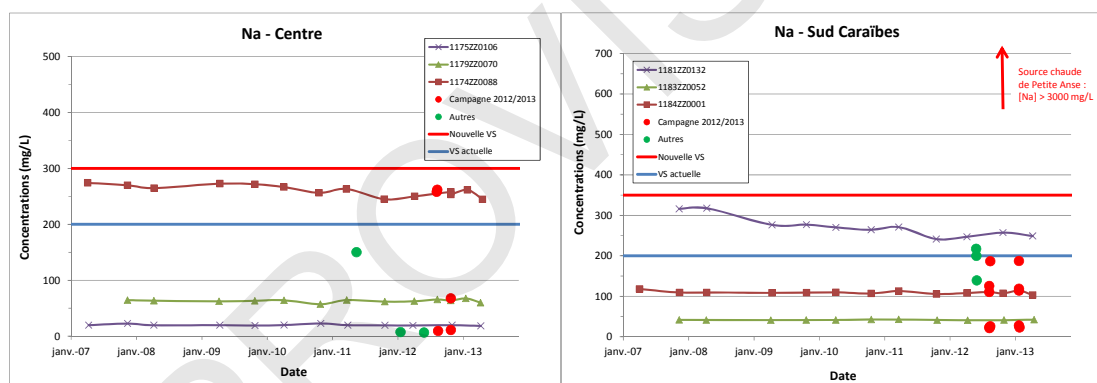


Illustration 33 : Concentrations en sodium pour les masses d'eau souterraine Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées

4.6. FER

Au regard du réseau de surveillance DCE, il s'avère nécessaire de définir de nouvelles valeurs seuils pour les masses d'eau Nord Atlantique, Centre et Sud Caraïbes. Pour chacune, la nouvelle valeur seuil a été calculée sur la base d'une seule station de surveillance (Illustration 34).

Pour la masse d'eau Nord Atlantique, une nouvelle valeur seuil locale de 1 800 $\mu\text{g.L}^{-1}$ est associée à l'unique ouvrage du Marigot – Anse Charpentier (1169ZZ0006).

Pour le Centre et le Sud Caraïbes, les nouvelles valeurs seuils définis sont respectivement de 400 et 800 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

Il faut noter que pour le Centre, il n'est pas tenu compte des résultats d'analyse du Robert – Vert Pré car les fortes concentrations en fer sont d'origine anthropique (Illustration 35).

Pour le reste, les dépassements d'origine naturelle des nouvelles valeurs seuils sont observées sur des sources thermales (sources du Lamentin, source de Petite Anse, source du Riz ; Illustration 35).

| Masse d'eau | Station de surveillance | Moyenne ($\mu\text{g.L}^{-1}$) | Écart-type | Quant. 90 ($\mu\text{g.L}^{-1}$) | Max. ($\mu\text{g.L}^{-1}$) | Valeur seuil ($\mu\text{g.L}^{-1}$) |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Nord Atlantique | 1169ZZ0006 | 940 | 630 | 1 790 | 2 160 | 1 800 |
| Centre | 1179ZZ0070 | 290 | 140 | 396 | 670 | 400 |
| Sud Caraïbes | 1184ZZ0001 | 510 | 220 | 760 | 840 | 800 |

Illustration 34 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le fer

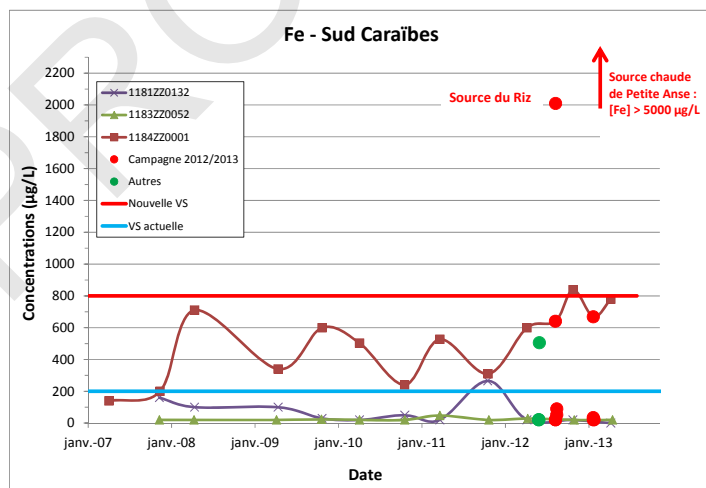
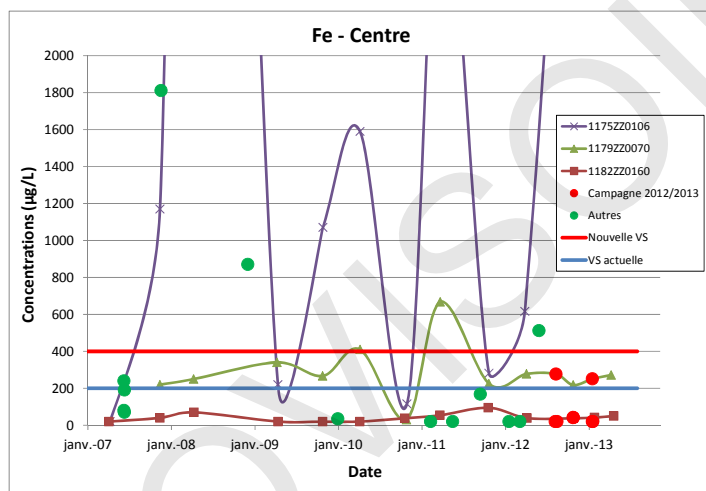
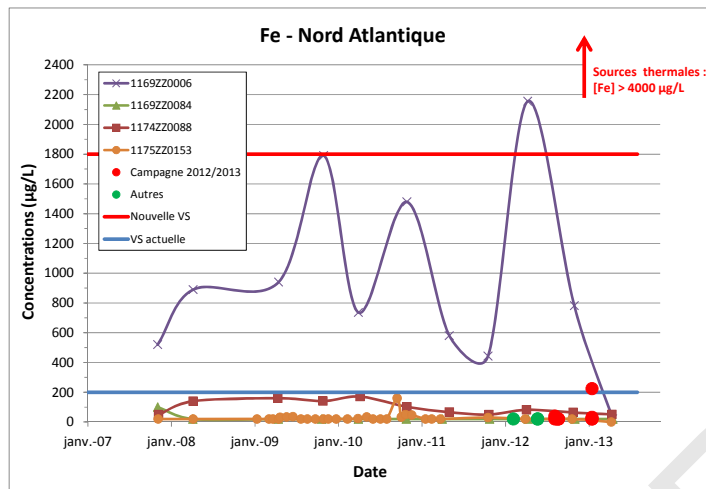


Illustration 35 : Évolution des concentrations en fer pour les masses d'eau souterraine Nord Atlantique, Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées

4.7. MANGANÈSE

Quatre masses d'eau (Nord Atlantique, Nord Caraïbes, Centre et Sud Caraïbes) nécessitent de définir de nouvelles valeurs seuils avec plusieurs stations de surveillance en dépassement par masse d'eau (Illustration 36 et Illustration 37).

Pour la masse d'eau Nord Caraïbes, le forage du Carbet – Fond Canal (1172ZZ0063) n'a pas été considéré car les fortes concentrations en manganèse sont liées à des conditions réductrices d'origine anthropique (pollution aux hydrocarbures).

Comme précédemment pour le fer, les résultats d'analyses du forage Robert – Vert-Pré ont également été écartés de l'analyse pour la masse d'eau Centre.

Les principales valeurs statistiques et les nouvelles valeurs seuils suggérées sont reportées dans le tableau de l'illustration 36.

Pour la masse d'eau Centre, la règle retenue jusqu'alors (quantile 90 arrondi à la cinquantaine supérieure, Cf. § 4.1) ne peut être appliquée. En effet, l'évolution des concentrations étant stables, le quantile 90 n'apparaît pas suffisamment sécuritaire. Au regard des autres données disponibles sur la masse d'eau Centre, il a finalement été décidé d'arrêter une nouvelle valeur seuil à 300 µg.L⁻¹ pour le manganèse.

Outre des eaux thermales, des dépassements des nouvelles valeurs seuils seront encore possibles sur des ouvrages n'appartenant pas au réseau de surveillance DCE : forages de Mabelo et de Case Navire, piézomètre de Grande Anse (Illustration 37).

| Masse d'eau | Station de surveillance | Moyenne (µg.L ⁻¹) | Écart-type | Quant. 90 (µg.L ⁻¹) | Max. (µg.L ⁻¹) | Valeur seuil (µg.L ⁻¹) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Nord Atlantique | 1169ZZ0006 | 196 | 132 | 301 | 576 | 350 |
| | 1174ZZ0088 | | | | | |
| Nord Caraïbes | 1177ZZ0161 | 154 | 75 | 214 | 265 | 250 |
| | 1177ZZ0177 | | | | | |
| Centre | 1179ZZ0070 | 76 | 40 | 90 | 254 | 300 |
| | 1182ZZ0160 | | | | | |
| Sud Caraïbes | 1184ZZ0001 | 88 | 50 | 166 | 203 | 200 |

Illustration 36 : Principales valeurs statistiques et nouvelles valeurs seuils pour le manganèse

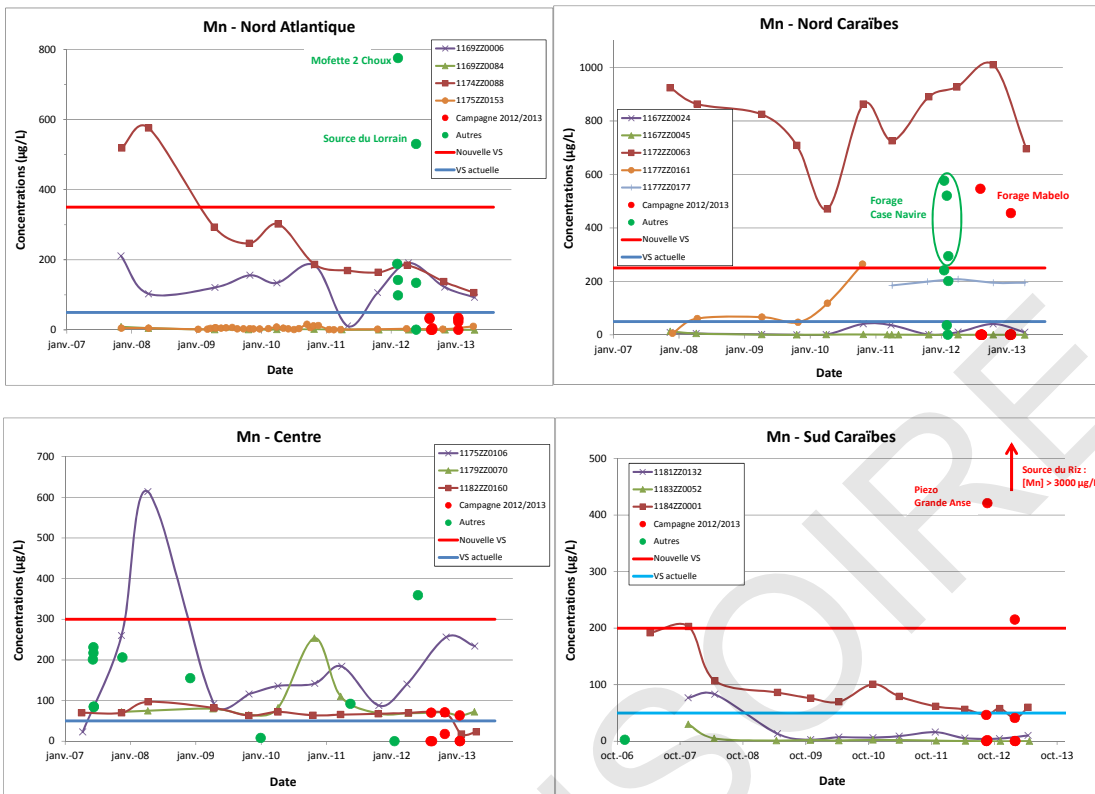


Illustration 37 : Évolution des concentrations en manganèse pour les masses d'eau souterraine Nord Atlantique, Nord Caraïbes, Centre et Sud Caraïbes et nouvelles valeurs seuils proposées

4.8. RÉCAPITULATIF

Le tableau de l'illustration 38 récapitule les nouvelles valeurs seuils proposées par paramètres et par masse d'eau souterraine.

| Paramètres | Valeur seuil actuelle | Masse d'eau souterraine | Nouvelles valeurs seuils | |
|------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| | | | Concentration | Emprise |
| Arsenic | 10 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | Nord Atlantique | 50 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | locale (forage Anse Charpentier) |
| Chlorures | 200 mg.L^{-1} | Centre | 500 mg.L^{-1} | locale (fond géochimique élevé) |
| | | Sud Atlantique | 300 mg.L^{-1} | masse d'eau |
| | | Sud Caraïbes | 500 mg.L^{-1} | masse d'eau |
| Sodium | 200 mg.L^{-1} | Centre | 300 mg.L^{-1} | locale (fond géochimique élevé) |
| | | Sud Caraïbes | 350 mg.L^{-1} | masse d'eau |
| Fer | 200 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | Nord Atlantique | 1 800 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | locale (forage Anse Charpentier) |
| | | Centre | 400 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |
| | | Sud Atlantique | 800 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |
| Manganèse | 50 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | Nord Atlantique | 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |
| | | Nord Caraïbes | 250 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |
| | | Centre | 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |
| | | Sud Caraïbes | 200 $\mu\text{g.L}^{-1}$ | masse d'eau |

Illustration 38 : Tableau récapitulatif des nouvelles valeurs seuils proposées

PROVISOIRES

5. Conclusion

À l'issue de l'étude préliminaire de Lions et al. (2008), il était apparu nécessaire d'acquérir de nouvelles données pour contraindre l'estimation des fonds géochimiques des eaux souterraines de Martinique.

Deux campagnes de prélèvements ont ainsi été menées sur trente points d'eau, une première en août 2012 en condition de hautes eaux et une seconde en février 2013 en basses eaux. Les recommandations techniques du guide AQUAREF ont été suivies, en termes d'échantillonnage et d'analyse.

Au final, une base de données cartographique, composée de plus de 19 000 résultats d'analyse, a pu être exploitée.

Il a été possible de préciser la délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé :

- pour les principaux éléments chimiques constitutifs de la croûte terrestre (dits éléments majeurs), des zones à risque de fond géochimique élevé ont été identifiées pour le sodium et les chlorures dans le sud de l'île, le bore dans le Sud Caraïbe et les sulfates dans la presqu'île de Sainte-Anne. Au sein de cette dernière, les eaux souterraines présentent également un faciès hydrochimique enrichi en calcium, magnésium et sulfates ;
- En ce qui concerne les métaux (dits éléments traces, par opposition aux éléments majeurs), des zones à risque de fond géochimique élevé ont été définis localement pour l'arsenic, le baryum et le mercure ainsi que sur tout le territoire pour le fer et le manganèse.

Dans certains cas, un fond géochimique élevé entraîne des concentrations supérieures aux normes de potabilité. Aussi, afin de prendre en compte ces fortes teneurs d'origine naturelle dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraines (Directive Cadre sur l'Eau), le BRGM a proposé de nouvelles valeurs seuils DCE. Ces dernières doivent permettre de ne pas déclasser une masse d'eau dont les concentrations en éléments chimiques ne s'expliquent pas par des pollutions mais par le fond géochimique naturel des eaux.

En définitive, de nouvelles valeurs seuils sont suggérées pour le sodium, les chlorures, l'arsenic, le fer et le manganèse. À chaque nouvelle valeur seuil est associée une zone d'emprise : une masse d'eau dans sa totalité ou un sous-secteur liée à une formation géologique particulière.

Enfin, des interrogations subsistent pour le nickel. En effet, de fortes concentrations ont pour la première fois été mesurées sur le forage de Rivière Salée – Nouvelle Cité en février et avril 2013. Il est délicat à ce stade d'associer ces anomalies en nickel au fond géochimique des eaux souterraines de l'unité aquifère des laves de Rivière Pilote.

PROVISOIRES

6. Références bibliographiques

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.

Cary L., Petit V., Lucas C., Lions J. (2012). Détermination des valeurs seuils de quatre polluants spécifiques pour la définition de l'état des eaux souterraines de La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-61486-FR, 59 p., 20 ill., 1 ann.

Chery L. (2006) – Guide technique. Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français.

Chovelon P. (1984a) - Contexte géothermique des prospectifs du Lamentin et du Morne Rouge. Rapport BRGM/84 SGN 003 GTH, 46 p.

Chovelon P. (1984b) – Cadre structural des minéralisations structurales des prospectifs du Lamentin et du Morne Rouge (Martinique). Rapport BRGM/84 SGN 326 GTH, 58 p.

Ghestem J.P. et Crouzet C., (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. Rapport BRGM/RP-xxxxx-FR.

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

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

Lachassagne P., Paulin C. (1991) – mairie des Trois Ilets – cartographie de la potentialité des terrains de la commune des Trois Ilets (Martinique) à renfermer de l'eau souterraine. Rapport Brgm R-32574-ANT-4S-91, 22p.

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.

Pons J.-C., Parra M., Ferragne A. et Latouche C., (1989) – Caractéristiques des argiles hydrothermales de la Martinique – Petites Antilles Françaises. *Applied Clay Science*, 4, pp. 307-325.

Sanjuan B., Genter A., Correia H., Girard J.P., Roig J.-Y., Brach M. (2002) – Travaux scientifiques associés à la réalisation des trois puits d'exploration géothermique dans la plaine du Lamentin (Martinique). Rapport final BRGM/RP-51671-FR juin 2002. 253 p, 46 fig., 17 tabl., 10 ann.

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

Sanjuan B., Genter A., Baltassat J.-M., Serra H., Roig J.-Y., Brach M. (2003b) – Synthèse des connaissances concernant le potentiel géothermique des régions de Morne Rouge – Montagne Pelée et de Diamant (Martinique) : premiers travaux du BRGM en 2001-2003. Rapport BRGM/RP-52283-FR, 140 p.

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

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.

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

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

Vittecoq B., Mardhel V. (2012) Référentiel Hydrogéologique Français – BDLISA – Martinique (Année 4). BRGM/RP-57740-FR.

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

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

Étude fer et manganèse

Appelo, C.A.J and Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition. A.A. Balkema, Leiden.

Banwart, S.A., 1999 Reduction of iron(III) minerals by natural organic matter in groundwater. Geochim. Cosmochim. Acta 63: 2919-2928.

Baran, N., Negrel, P., 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 première campagne de basses eaux (2004) et premières campagnes de saison des pluies (2004). BRGM/RP-54717-FR. 101p.

Brinkma, W.L.F., 1975 Hydrogeochemistry of groundwater resources in central Amazonia, Brazil. 17p.

Hodgkinson, J., Cox, M., Mcloughlin, S., 2008 Coupling mineral analysis with conceptual groundwater flow modelling: The source and fate of iron, aluminium and manganese in a back-barrier island. 251: 77-98.

Jain, C.K., Bansyopadhyay, A., Bhadra, A., 2010 Assessment of ground water quality for drinking purpose, District Nainital, Uttarakhand, India. Environ. Monit. Assess. 166: 663-676.

Liptzin, D., Silver, W. 2009 Effects of carbon additions on iron reduction and phosphorus ability in a humid tropical forest soil. Soil Biol. Biochem. 41: 1696-1702.

Matsunaga, T., Karametaxas, G., Von Gunten, H.R., Lichtner, P.C., 1993. Redox chemistry of iron and manganese minerals in river-recharged aquifers: a model interpretation of a column experiment. 57: 1691-1704.

Obiri, S. 2007 Determination of heavy metals in water from boreholes in Dumasi in the Wassa West District of Western Region of Republic of Ghana. Environ. Monit. Assess. 130: 455-463.

Parizot, M., 2008 Contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Guyane conformément à la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : saison des pluies 2008/ BRGM/RP-56890-FR, 101p.

Promma, K., Zheng, C., Asnachinda, P., 2007 Groundwater and surface-water interactions in a confined alluvial aquifer between two rivers: effects of groundwater flow dynamics on high iron anomaly. Hydrogeology J. 15: 495-513.

Quicksall, A., Bostick, B. C., Sampson, M.L., 2008 Linking organic matter deposition and iron mineral transformations to groundwater arsenic levels in the Mekong delta, Cambodia. 23: 3088-3098.

Tijani, M., 1994 Hydrogeochemical assessment of groundwater in Moro area, Kwara state, Nigeria. Environ. Geology. 24: 194-202.

Wilkniss, P.E., Warner, T.B., Carr, R.A. 1972 Some aspects of the geochemistry of F, Fe and Mn in coastal waters and in fresh-water springs o, the southeast coast of Hawaii. Marine Geology. 11: 39-46.

PROVISOIRES

Annexe 1

Compte-rendu de la réunion de lancement (30 mai 2012)

PROVISOIRE

PROVISOIRES



Réf. : COPIL 1

Fort-de-France, le 30/05/2012

| COMPTE RENDU DE RÉUNION | |
|--|-------------------------------|
| Rédacteur : L. Amaud | Entité : SGR Martinique |
| Diffusion externe : Visa et nom du responsable : | |
| Projet : Étude détaillée du fond géochimique des eaux souterraines de Martinique | Numéro : PSP12MAR06 |
| Objet : Réunion de lancement | |
| Date : 30/05/2012 | Lieu : DEAL Martinique |
| Participants : C. Figueras (DEAL), J. Gresser (ODE), J. Lions, N. Devau, M. de Béchillon et L. Arnaud (BRGM) | |
| Absents : | |
| Diffusion : participants | |

| RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS |
|--|
| <p>1 – Le BRGM rappelle brièvement la méthodologie générale du projet : (1) campagnes d'analyses photographiques en hautes eaux et basses eaux (de l'ordre de 30 points de prélèvements par campagne), (2) étude dédiée au Fer et au Manganèse, (3) détermination de nouvelles valeurs seuils et délimitation des zones à risque de fond géochimique élevé.</p> <p>Pour les zones à risque, comme lors de l'étude ONEMA 2008, il est précisé qu'un niveau de confiance (faible, moyen, élevé) sera attribué à chacune des délimitations. En revanche, l'objectif sera bien, dans la mesure du possible, d'affiner les délimitations selon des considérations hydrogéologiques (entités hydrogéologiques, cf. BDLISA).</p> |
| <p>2 – Analyses de type photographique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les analyses suivantes seront réalisées : les paramètres in situ (T, pH, Cond., O₂, potentiel redox), les éléments majeurs (anions, cations) et les éléments traces (Al, As, Ba, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr et Zn) ; • Les recommandations AQUAREF seront suivies (conditionnement des échantillons, blancs de terrain) ; • Les méthodes d'analyse permettront d'abaisser au maximum les limites de quantification des éléments traces (cf. présentation jointe au CR) ; • Au regard de l'étude ONEMA 2008, le BRGM propose pour la première campagne de prélèvement de couvrir le plus grand nombre possible de faciès lithologiques. En effet, toutes les masses d'eau sont concernées par des lacunes de données ou des pré-délimitations avec un niveau de confiance faible à moyen (Lions et al., 2008). C. Figueras rappelle que l'objectif opérationnel est de pouvoir statuer sur les parts « naturelles » et « anthropiques » des anomalies observées au niveau des stations de surveillance du réseau qualité DCE ; |

IM 192 (22/07/09)

1/2

En ce qui concerne la méthodologie de sélection des points de prélèvements, plusieurs points ont été discutés :

- les prélèvements devront se faire au maximum dans des secteurs non soumis à des pressions anthropiques ;
- dans la mesure du possible, les forages seront privilégiés aux sources ;
- les forages dans l'emprise théorique du biseau salé ne seront a priori pas concernés par l'étude ;
- les eaux thermales ne seront pas étudiées. En revanche, les nombreuses données disponibles seront intégrées à la géodatabase. Le BRGM mentionne notamment la campagne géothermique 2012 en cours (février et juin) menée en partenariat avec la Région et l'ADEME ;
- les aquifères « atypiques » ne seront considérés que lorsqu'ils sont suivis par une station de surveillance DCE, on peut citer le forage du Marin – Grand Fond qui capte les calcaires du Marin (aquifère de très faible extension et non représentatif de la géologie martiniquaise) ;
- enfin, le BRGM propose de donner la priorité à l'acquisition de données nouvelles en privilégiant les points pour lesquels aucune donnée n'est disponible. Ainsi, il a été convenu de ne retenir les stations DCE que si elles sont hors pression anthropique et avec beaucoup de lacunes de données. À ce titre, la question des limites de quantification s'est posée pour la dernière campagne photographique DCE de 2007. J. Lions précise par exemple que les LQ de l'Arsenic rendent inexploitable les résultats de 2004 à 2006. Le BRGM se chargera de vérifier ce point avant sélection des points de prélèvements ;
- à titre indicatif, le BRGM présente une première compilation des forages existants en Martinique. Une trentaine d'ouvrages existants serait peu ou pas impactés par des pressions anthropiques (dont 8 du réseau DCE). Comme discuté précédemment, il a été convenu de donner la priorité à des ouvrages récents (forage Mabelo à Didier, forage Champflor, Cœur Bouliki, ...) ou sans donnée (Pécoul, Fond Canonville, ...) ;
- de cette première compilation, les principales anomalies mises en évidence par les analyses disponibles sont Fe, Mn, As, Sb, Pb, Cr, Zn et Ni.
- en tout état de cause, une sélection argumentée des points de prélèvement sera soumise à la validation de l'ODE et de la DEAL.

3 – Calendrier

- les campagnes de prélèvement sont programmées pour les mois d'août 2012 (hautes eaux) et février 2013 (basses eaux). La sélection des points de prélèvement sera soumise à la validation de l'ODE et de la DEAL début juillet ;
- un second COPIL sera tenu en décembre 2012 pour une présentation des premiers résultats et pour le dimensionnement de la seconde campagne (à ajuster en fonction des résultats de la première) ;
- l'ODE et la DEAL précise que, dans le cadre de la révision de l'état des lieux, les nouvelles valeurs seuils devront être fournies pour fin juin 2013. Avec une dernière campagne en février 2013, le BRGM fait savoir que ce délai pourra être tenu. La campagne de basses eaux ne pourra pas intervenir plus tôt (J. Lions rappelle l'importance de cette dernière : absence de dilution des eso par la recharge) ;
- les livrables (rapport, géodatabase, cartes raster) seront eux remis au plus tard en octobre 2013.

Annexe 2

Paramètres physico-chimiques *in situ* et conditions de prélèvement (août 2012 et février 2013)

PROVISOIRE

PROVISOIRES

Campagne d'août 2012 :

| N° BSS | Point de prélèvement | Date Prélèvement | Heure | Nature | Conc. à 729 (µS/cm) | T (°C) | pH | Et (mV) | Etat de l'eau | Pression Anthropique | Usages | Temps |
|------------|------------------------|------------------|-------|--------|---------------------|--------|------|---------|---|--|---|----------------------------------|
| 11792Z0167 | Trinité Bin d'amour | 20/08/2012 | 16h30 | Source | 474 | 27.1 | 6.44 | 315 | Eau claire | Habitat de forte densité, bois | Aucun | Beau temps |
| 11692Z0155 | L'Épineux | 20/08/2012 | 15h00 | Source | 271 | 28.5 | 6.70 | 417 | Eau claire (petites particules dans filtre) | Deux ou trois habitations en amont/ordures plastiques... proches de l'exutoire. | Aucun | Beau temps |
| 11772Z0202 | Mabelo | 21/08/2012 | 15h00 | Forage | 730 | 32.5 | 6.55 | 203 | Eau claire | Aucune | Source exploitée pour mise en bouteille | Beau temps |
| 11732Z0108 | La Médaille | 21/08/2012 | 13h15 | Source | 186 | 22.9 | 7.13 | 407 | Eau claire | Aucune | consommée par la population | Pluie + soleil |
| 11732Z0107 | Bellevue | 21/08/2012 | 12h00 | Source | 407 | 25.4 | 7.25 | 343 | Eau claire | Champs avec vaches, et qq habitations en amont | Agricole | Pluie + soleil |
| 11812Z0131 | Grande Anse | 23/08/2012 | 9h55 | Forage | 1359 | 28.9 | 6.76 | 200 | Eau chargée en début de pompage (dépot de sable gris-clair au fond du seau) puis eau claire | Inconnu | Aucun | Temps nuageux, lendemain d'ISAAC |
| 11842Z0035 | Même Jardier | 23/08/2012 | 12h30 | Source | 215 | 25.9 | 7.34 | 417 | Eau un peu blanchâtre et jaune, chargée en particules | Inconnu | Aucun | Temps nuageux, lendemain d'ISAAC |
| 11842Z0001 | Dzac | 23/08/2012 | 14h00 | Forage | 835 | 30.7 | 6.80 | 138 | Eau chargée en début de pompage puis claire | Aucune | Aucun | Temps nuageux, lendemain d'ISAAC |
| 11852Z0120 | Sainte Luce | 23/08/2012 | 15h40 | Forage | 700 | 29.0 | 7.14 | 327 | Eau trouble en début de pompage puis claire assez rapidement | Aucune (Habitat de forte densité) | Aucun | Temps nuageux, lendemain d'ISAAC |
| 11792Z0207 | Habitatation Ressource | 24/08/2012 | 11h00 | Forage | 640 | 27.6 | 7.23 | -81 | Eau claire | Culture de Bananes | Aucun | Temps nuageux |
| 11862Z0119 | Caj Macré | 07/09/2012 | 14h30 | Forage | 7510 | 28.3 | 6.78 | 273 | Eau trouble (bops de particules, 3 filtres utilisés), odeur de marée | Inconnu (influence de la mer) | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11832Z0204 | Même Escampé | 24/08/2012 | 15h30 | Source | 603 | 26.5 | 7.05 | 277 | Eau claire | Inconnu | consommée par la population | Temps nuageux |
| 11852Z0121 | Source du Riz | 24/08/2012 | 17h00 | Source | 250 | 25.7 | 6.04 | | Eau claire | Eparages en amont + construction d'un hôtel sur le terrain de l'exore de la source | Aucun | Temps nuageux |
| 11682Z0081 | Pérou F88 | 27/08/2012 | 8h20 | Forage | 305 | 26.3 | 6.63 | 325 | Eau claire | Aucune (périètre de protection) | Alimentation en eau potable/ Utilisée en période de extrême | Soleil + nuage |
| 11672Z0233 | Rivière Blanche | 27/08/2012 | 9h10 | Forage | 195 | 28.1 | 6.60 | 341 | Eau blanchâtre en début de pompage puis claire | Aucune (à proximité de carrière) | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11682Z0048 | Demare | 07/09/2012 | 11h20 | Source | 160 | 25.9 | 6.94 | 816 | Eau claire | Aucune | Alimentation en eau potable | Temps enssoleillé |
| 11682Z0081 | Louison | 27/08/2012 | 13h30 | Source | 106 | 22.9 | 6.88 | 283 | Eau claire | Aucune | Alimentation en eau potable | Temps nuageux |
| 11652Z0005 | Fond Moulin | 27/08/2012 | 17h30 | Source | 227 | 26.4 | 7.27 | 295 | Eau claire | cultures et animaux (vaches, chèvres, cochons) | Aucune (utilisé dans le temps pour boire et l'agriculture) | Temps nuageux |
| 11742Z0113 | Les Trois sources | 28/08/2012 | 16h30 | Source | 108 | 23.7 | 6.20 | 334 | Eau claire | Aucune | consommée par la population | Temps nuageux |
| 11792Z0380 | Pontalery | 29/08/2012 | 16h20 | Forage | 619 | 28.4 | 6.78 | 415 | Eau très chargée au début (blanchâtre puis trouble puis claire) | Aucune | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11802Z0130 | Source Dos d'âne | 29/08/2012 | 12h20 | Source | 485 | 26.6 | 5.92 | 288 | Eau claire | Inconnu | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11742Z0111 | Cœur bouilli | 29/08/2012 | 17h30 | Source | 134 | 23.9 | 7.36 | 313 | Eau claire | Aucune | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11682Z0050 | Essente | 30/08/2012 | 9h40 | Source | 92 | 22.5 | 6.83 | 287 | Eau claire | Aucune | Alimentation en eau potable | Temps enssoleillé |
| 11732Z0065 | Gélé | 30/08/2012 | 11h43 | Source | 106 | 22.8 | 7.19 | 299 | Eau claire | Aucune | Alimentation en eau potable | Temps enssoleillé |
| 11672Z0059 | Ganate | 30/08/2012 | 14h00 | Source | 470 | 27.4 | 8.17 | 383 | Eau claire | Inconnu | Agricole | Temps enssoleillé |
| 11732Z0068 | Antia | 30/08/2012 | 15h40 | Source | 126 | 21.1 | 7.20 | 418 | Eau claire | Inconnu | Aucun | Temps nuageux |
| 11662Z0230 | Poiche | 04/09/2012 | 11h20 | Source | 99 | 23.3 | 7.15 | 367 | Eau claire, qq particules dans le filtre | Aucune | Alimentation en eau potable | Temps enssoleillé |
| 11742Z0135 | Capitaine | 04/09/2012 | 15h20 | Source | 72 | 24.5 | 6.73 | 342 | Eau claire, qq particules dans le filtre | Inconnu | Aucun | Temps enssoleillé |
| 11742Z0110 | Source deux doux | 04/09/2012 | 17h30 | Source | 47 | 22.0 | 6.80 | 312 | Eau claire | Aucune | consommée par la population | Temps enssoleillé |
| 11822Z0160 | Nouvelle Cité | 08/11/2012 | 11h30 | Forage | 1639 | 30.4 | 7.24 | | Eau claire (gout sale) | cultures maraichères | Aucun | Temps enssoleillé |

Campagne de février 2013 :

| N° BSS | Point de prélèvement | Date Prélèvement | Heure | Nature | Cond. à T25 (µS/cm) | T (°C) | pH | Emmes (mV) | O2 (‰) | Etat de l'eau | Pression Antihopique | Temps |
|------------|----------------------|------------------|-------|--------|---------------------|--------|------|------------|--------|--|--|------------------|
| 1175Z20167 | Trinité Brin d'amour | 29/01/2013 | 10h00 | Source | 248 | 26.9 | 6.71 | 118 | 69.1 | Eau claire | Habitat de forte densité, bois | Beau temps |
| 1169Z20155 | L'Épineux | 29/01/2013 | 9h15 | Source | 213 | 27.7 | 7.13 | 156 | 77.7 | Eau claire (petites particules dans filtre) | Deux ou trois habitations en amont / ordures plastiques... proches de l'émergence. | Beau temps |
| 1177Z20202 | Mabello | 06/02/2013 | 9h10 | Forage | 781 | 31.1 | 6.73 | | 38.5 | Eau claire | Aucune | Beau temps |
| 1173Z20108 | La Medaille | 01/02/2013 | 16h00 | Source | 131 | 22.3 | 7.04 | | 91.6 | Eau claire | Aucune | Pluie + soleil |
| 1173Z20077 | Bellevue | 06/02/2013 | 10h30 | Source | 403 | 27.2 | 8.41 | | 131.4 | Eau claire, qq particules dans le filtre | Champs avec vaches, et qq habitations en amont | soleil |
| 1181Z20131 | Grande-Anse | 05/02/2013 | 10h30 | Forage | 1283 | 29.3 | 6.87 | | 16 | Eau claire | route | Temps ensoleillé |
| 1184Z20036 | Montre Lardier | séjour | | Source | | | | | | | | |
| 1184Z20001 | D'zac | 05/02/2013 | 13h30 | Forage | 883 | 31.3 | 6.89 | | 54.1 | Eau trouble / légère odeur | Aucune | Temps ensoleillé |
| 1185Z20120 | Sainte Luce | 05/02/2013 | 15h30 | Forage | 638 | 29.1 | 7.29 | | 67.3 | Eau claire | (Habitat de forte densité) | Temps ensoleillé |
| 1179Z20070 | Habitation Ressource | 30/01/2013 | 15h00 | Forage | 610 | 27.5 | 7.83 | -168 | 1.6 | odeurs d'œuf pourri (soufre?), eau plutôt claire | Culture de Bananes | Temps ensoleillé |
| 1186Z20119 | Cap Maré | 08/02/2013 | 11h00 | Forage | 8460 | 28.0 | 6.82 | | 30.3 | Eau saumâtre et trouble (ucps de particules) | habitations | Temps ensoleillé |
| 1183Z20074 | Morne Escarpé | 08/02/2013 | 14h30 | Source | 572 | 26.5 | 7.32 | | 57.7 | Eau claire | habitat diffus | Temps nuageux |
| 1185Z20121 | Source du Riz | 05/06/2013 | 17h | Source | 236 | 25.9 | 6.63 | | 50.9 | Eau claire | Epanchés en amont + construction d'un hôtel sur le | Temps pluvieux |
| 1168Z20081 | Pécoul FR8 | 07/02/2013 | 9h30 | Forage | 271 | 27.3 | 6.73 | | 64.8 | Eau claire, qq particules dans le | Aucune | Soleil |
| 1167Z20023 | Rivière Blanche | 07/02/2013 | 12h45 | Forage | 189 | 27.3 | 6.81 | | 57.7 | Eau claire, peu de particules | Aucune (à proximité de | Temps ensoleillé |
| 1168Z20048 | Demare forage | 04/02/2013 | 10h00 | Source | 155 | 24.3 | 6.91 | | 83.4 | Eau claire | Aucune | Temps pluvieux |
| 1168Z20081 | Louison | 04/02/2013 | 11h00 | Source | 111 | 22.3 | 7.09 | | 93.6 | Eau claire | Aucune | Temps pluvieux |
| 1165Z20005 | Fond Moulin | 01/02/2013 | 13h00 | Source | 188 | 25.2 | 7.48 | | 87.7 | Eau claire, pas d'odeur, particules en suspension | un peu de cultures et qq animaux (vaches, chèvres, | Temps nuageux |
| 1174Z20113 | Les Trois sources | 29/01/2013 | 12h00 | Source | 129 | 23.5 | 6.53 | 171 | 92.2 | Eau claire | Aucune | Soleil + nuage |
| 1179Z20300 | Pontaleiry | 30/01/2013 | 13h00 | Forage | 622 | 28.0 | 6.95 | 67 | 1.4 | Eau claire | champs avec des vaches | Temps ensoleillé |
| 1180Z20130 | Source Dos d'Ane | 29/01/2013 | 15h00 | Source | 544 | 26.7 | 6.21 | 194 | 39.7 | Eau claire, particules dans le | habitat dispersé | Temps nuageux |
| 1174Z20134 | Œuf Boulik | 30/01/2013 | 9h30 | Forage | 167 | 24.1 | 6.51 | 191 | 47.7 | Eau claire, pas d'odeur | Aucune | Temps nuageux |
| 1168Z20050 | Essenne | 01/02/2013 | 10h30 | Source | 92 | 22.3 | 7.03 | 297 | 100.1 | Eau claire | Aucune | Temps pluvieux |
| 1173Z20065 | Gele | 07/02/2013 | 11h00 | Source | 133 | 22.1 | 7.47 | | 97.3 | Eau claire | Aucune | Temps pluvieux |
| 1167Z20059 | Ganate | 06/02/2013 | 11h37 | Source | 472 | 27.4 | 8.35 | | 114.9 | Eau claire, qq particules dans le | Aucune | Temps ensoleillé |
| 1173Z20068 | Athla | 04/02/2013 | 15h00 | Source | 162 | 21.0 | 7.99 | | 99.2 | Eau claire | Aucune | Soleil + nuage |
| 1166Z20020 | Poiche | 04/02/2013 | 12h00 | Source | 114 | 22.0 | 7.22 | | 98.3 | Eau claire | Aucune | Temps pluvieux |
| 1174Z20135 | Capitaine | 29/01/2013 | 13h15 | Source | 73 | 24.4 | 6.10 | 98 | 92.2 | Eau claire | habitat dispersé | Temps ensoleillé |
| 1182Z20160 | Nouvelle Cité | 08/02/2013 | 16h00 | Forage | 1679 | 27.9 | 8.12 | | 27.5 | Eau jaunâtre en début de pompage, est restée chargée | cultures maraichères | Orage |

Annexe 3

Résultats d'analyses pour la campagne 2012/2013

PROVISOIRE

PROVISOIRES

Campagne d'août 2012 :

| | *Ag (Argent) | *Al (Aluminium) | *As (Arsenic) | *B (Bore) | *Ba (Baryum) | *Be (Béryllium) | *COD (C.O.R.G. dissous) | *Ca (Calcium) | *Cd (Cadmium) | *Cl (Chlorures) | *Co (Cobalt) | *Cr (Chrome) |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|------------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| LQ | 0.01 | 0.5 | 0.05 | 0.5 | 0.05 | 0.01 | 0.5 | 0.5 | 0.01 | 0.5 | 0.05 | 0.1 |
| Unité | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | mg/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | µg/l |
| 1 Potiche 27/08/12 | <LQ | 3.73 | 0.1 | 20.7 | 0.87 | <LQ | 0.8 | 7 | <LQ | 7.8 | <LQ | <LQ |
| 2 Choux 04/09/12 | 0.02 | 4.07 | <LQ | 14.2 | 4.33 | <LQ | 0.6 | 1.1 | <LQ | 7.7 | <LQ | <LQ |
| 3 Source du ruisseau 24/08/12 | <LQ | 1.64 | 0.05 | 41.1 | 46.7 | 0.02 | 0.8 | 6 | <LQ | 25.4 | 6.09 | <LQ |
| 4 Ganate 30/08/12 | <LQ | 2.7 | 3.45 | 489 | 0.34 | <LQ | 0.8 | 25.9 | <LQ | 47.3 | <LQ | 0.26 |
| 5 Attilla 30/08/12 | <LQ | 3.11 | 0.24 | 17.1 | 0.15 | <LQ | 0.5 | 11.7 | <LQ | 7.1 | <LQ | 0.15 |
| 6 Lamentin 24/08/12 | <LQ | 1.56 | 1.46 | 78.6 | 3.17 | <LQ | <LQ | 46 | <LQ | 109 | <LQ | <LQ |
| 7 Riviere Blanche 27/08/12 | <LQ | 1.99 | 0.81 | 104 | 1.05 | <LQ | 0.7 | 9.8 | <LQ | 12.9 | <LQ | 0.15 |
| 8 Louison 27/08/12 | <LQ | 1.58 | 0.09 | 18.3 | 0.39 | <LQ | 0.5 | 7.4 | <LQ | 7 | <LQ | <LQ |
| 9 Fond Moulin 27/08/12 | <LQ | 23.9 | 0.13 | 22.1 | 1.59 | <LQ | 0.9 | 12.1 | <LQ | 16.6 | <LQ | <LQ |
| 10 Gelle 30/08/12 | <LQ | 1.67 | 0.05 | 19.8 | 0.43 | <LQ | 0.7 | 8.2 | <LQ | 7.9 | <LQ | <LQ |
| 11 Bellevue 21/08/12 | <LQ | 1.49 | 2.83 | 88.9 | 0.94 | <LQ | 0.8 | 16.7 | <LQ | 34.6 | <LQ | <LQ |
| 12 Essente 30/08/12 | <LQ | 1.9 | 0.24 | 22.7 | 0.7 | <LQ | 0.7 | 6.6 | <LQ | 7.4 | <LQ | <LQ |
| 13 Medaille 21/08/12 | <LQ | 1.4 | 0.15 | 21.3 | 0.54 | <LQ | <LQ | 10.2 | <LQ | 9.1 | <LQ | 0.62 |
| 14 Brin d'amour 20/08/12 | <LQ | 0.86 | <LQ | 32.3 | 5.22 | <LQ | <LQ | 29.3 | <LQ | 54.6 | 0.09 | 0.33 |
| 15 Demare 07/09/12 | 0.01 | 1.91 | 0.17 | 20.7 | 1.97 | <LQ | 0.8 | 13.5 | <LQ | 9.9 | <LQ | 0.1 |
| 16 Péroul 27/08/12 | <LQ | 1.47 | 1.04 | 47.9 | 0.93 | <LQ | 0.6 | 18.8 | <LQ | 17.4 | <LQ | <LQ |
| 17 Capitaine 04/09/12 | <LQ | 4.74 | <LQ | 19.9 | 3.97 | <LQ | 0.7 | 2.3 | <LQ | 9.2 | <LQ | <LQ |
| 18 1179220300 29/08/12 | <LQ | 1.75 | 0.38 | 59.7 | 6.79 | <LQ | 0.9 | 56.7 | 0.01 | 49 | 0.06 | 0.45 |
| 19 Morne escarpé 24/08/12 | <LQ | 2.16 | 0.86 | 32.8 | 2.28 | <LQ | <LQ | 77.4 | <LQ | 36.9 | <LQ | 0.46 |
| 20 Les 3 sources 28/08/12 | <LQ | 1.08 | 0.09 | 20.1 | 0.9 | <LQ | 0.5 | 7.7 | <LQ | 10 | <LQ | <LQ |
| 21 Cap Macre 24/08/12 | 0.01 | 3.65 | 1.9 | 134 | 215 | <LQ | 2.6 | 488.6 | <LQ | 2376 | 0.87 | 0.13 |
| 22 L'épineux 20/08/12 | <LQ | 2.8 | 0.1 | 28.1 | 14.4 | <LQ | 0.8 | 18.2 | <LQ | 32.3 | <LQ | <LQ |
| 23 Mabelo 21/08/12 | <LQ | 1.53 | 26.6 | 134 | 47.5 | <LQ | 0.6 | 52.5 | 0.01 | 36.8 | 1.1 | <LQ |
| 24 118120131 29/08/12 | <LQ | 2.45 | 0.33 | 156 | 15.1 | <LQ | 1.1 | 62.1 | <LQ | 251 | 0.52 | 0.1 |
| 25 Morne Larcher 23/08/12 | 0.01 | 2194 | 0.08 | 81.6 | 8.48 | 0.01 | 13.4 | 7.7 | <LQ | 16.1 | 0.08 | 0.2 |
| 26 Dizac 23/08/12 | <LQ | 1.14 | 0.51 | 140 | 4.75 | <LQ | 0.8 | 26.1 | 0.03 | 163 | 1.48 | 0.11 |
| 27 St Luce 23/08/12 | <LQ | 1.93 | 3.46 | 86.3 | 0.13 | <LQ | 1.1 | 5.4 | <LQ | 152 | <LQ | 3.12 |
| 28 Source Dos d'âne 29/08/12 | <LQ | 1.6 | 0.13 | 59.9 | 10.4 | <LQ | 0.7 | 18.1 | <LQ | 97.5 | <LQ | <LQ |
| 29 1174220134 29/08/12 | <LQ | 1.99 | 0.2 | 20.4 | 1.2 | <LQ | 0.7 | 11 | <LQ | 10.7 | <LQ | <LQ |
| 30 Blanc Terrain 24/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.03 | 0.1 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |

| | *Cu (Cuivre) | *F (Fluorures) | *Fe (Fer) | *Hg (Mercure) | *K (Potassium) | *Li (Lithium) | *Mg (Magnésium) | *Mn (Manganèse) | *NH4 (Ammonium exprimé en NH4) | *NO2 (Nitrites exprimés en NO2) | *NO3 (Nitrates exprimés en NO3) | *Na (Sodium) |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| LQ | 0.1 | 0.1 | 0.02 | 15 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.05 | 0.01 | 0.5 | 0.5 |
| Unité | µg/l | mg/l | mg/l | ng/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| 1 Potiche 27/08/12 | 0.25 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.4 | 0.53 | 1.7 | 0.13 | <LQ | <LQ | <LQ | 8.7 |
| 2 Choux 04/09/12 | 0.13 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.0 | 0.81 | 0.8 | 0.11 | <LQ | <LQ | <LQ | 4.7 |
| 3 Source du ruisseau 24/08/12 | 0.34 | <LQ | 0.009 | <LQ | 4.7 | 1.0 | 5.9 | 132 | 0.15 | <LQ | 1.5 | 23.6 |
| 4 Ganate 30/08/12 | 0.13 | 0.2 | <LQ | <LQ | 2.9 | 28.9 | 13 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.5 | 49.3 |
| 5 Attilla 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.5 | 3.7 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.5 | 7.6 |
| 6 Lamentin 24/08/12 | <LQ | <LQ | 0.277 | <LQ | 1.8 | 7.81 | 6.1 | 70.1 | <LQ | <LQ | <LQ | 65.6 |
| 7 Riviere Blanche 27/08/12 | 0.78 | 0.2 | <LQ | <LQ | 2.7 | 16.8 | 3.9 | 0.23 | <LQ | 0.02 | <LQ | 21.9 |
| 8 Louison 27/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.9 | 0.27 | 1.7 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 7.9 |
| 9 Fond Moulin 27/08/12 | 0.21 | <LQ | <LQ | <LQ | 0.9 | 0.43 | 4.2 | 214 | <LQ | 0.02 | 3 | 15.4 |
| 10 Gelle 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.5 | 0.59 | 2.2 | 9.1 | <LQ | <LQ | 0.6 | 8.2 |
| 11 Bellevue 21/08/12 | <LQ | 0.1 | <LQ | <LQ | 1.4 | 10.4 | 35 | <LQ | <LQ | <LQ | 6.4 | 46.6 |
| 12 Essente 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.5 | 0.97 | 1.3 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.5 | 8.5 |
| 13 Medaille 21/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.2 | 0.74 | 3.2 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 10.3 |
| 14 Brin d'amour 20/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.1 | 1.29 | 9 | 31.1 | <LQ | 0.02 | 2.2 | 28.7 |
| 15 Demare 07/09/12 | 22.1 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.2 | 0.73 | 3.2 | 0.13 | <LQ | <LQ | 10.7 | 11.1 |
| 16 Péroul 27/08/12 | 0.51 | <LQ | <LQ | <LQ | 3.3 | 18.2 | 7.7 | 0.12 | <LQ | 0.01 | 21.4 | 19.3 |
| 17 Capitaine 04/09/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.5 | 1.34 | 1.7 | 441 | <LQ | <LQ | 7.2 | 7.7 |
| 18 1179220300 29/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.8 | 1.8 | 139 | 139 | <LQ | 0.07 | 1.8 | 49.4 |
| 19 Morne escarpé 24/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.2 | 2.91 | 9.9 | 0.18 | <LQ | <LQ | 7.7 | 21.1 |
| 20 Les 3 sources 28/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.1 | 0.39 | 2.2 | <LQ | <LQ | 0.01 | <LQ | 8.9 |
| 21 Cap Macre 24/08/12 | 0.71 | <LQ | 0.177 | 30 | 7.9 | 39.7 | 278.6 | 390 | 0.07 | 0.02 | 0.7 | 686.7 |
| 22 L'épineux 20/08/12 | 0.11 | <LQ | 0.039 | <LQ | 0.9 | 0.7 | 6.8 | 34 | <LQ | 0.04 | 3.3 | 24.7 |
| 23 Mabelo 21/08/12 | <LQ | <LQ | 1.122 | <LQ | 6.5 | 37.5 | 28.5 | 546 | <LQ | <LQ | <LQ | 58.2 |
| 24 118120131 29/08/12 | 0.18 | <LQ | 0.052 | <LQ | 2.4 | 3.28 | 27.3 | 421 | <LQ | 0.01 | 0.7 | 186.6 |
| 25 Morne Larcher 23/08/12 | 3.28 | <LQ | 0.089 | <LQ | 4.7 | 10.4 | 7.4 | 7.7 | <LQ | <LQ | 1.1 | 4.7 |
| 26 Dizac 23/08/12 | 0.14 | <LQ | 0.64 | <LQ | 5.5 | 4.02 | 18.3 | 46.3 | <LQ | 0.05 | 8.2 | 110.4 |
| 27 St Luce 23/08/12 | 0.1 | 0.3 | <LQ | <LQ | 6.1 | 7.4 | 5 | 0.24 | <LQ | 0.02 | 4.4 | 125.5 |
| 28 Source Dos d'âne 29/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 2.4 | 1.35 | 11.6 | 5.01 | <LQ | <LQ | 7.6 | 53.6 |
| 29 1174220134 29/08/12 | 0.16 | <LQ | <LQ | <LQ | 1 | 0.48 | 3.5 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 9.1 |
| 30 Blanc Terrain 24/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |

| | *Ni (Nickel) | *PO4 (OrthoPhosphates en PO4) | *Pb (Plomb) | *SO4 (Sulfates) | *Sb (Antimoine) | *Se (Sélénium) | *SiO2 (Silice) | *Sr (Strontium) | *Zn (Zinc) | Br (Brome) | CO3 (Carbonates) | HCO3 (Bicarbonates) |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------|------------------------|
| LQ | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0.5 | 0.05 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.05 | 5 | 5 |
| Unité | µg/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | µg/l | mg/l | µg/l | µg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| 1 Potiche 27/08/12 | <LQ | <LQ | 0.12 | 1.6 | <LQ | <LQ | 54.1 | 28.5 | <LQ | <LQ | <LQ | 41 |
| 2 Choux 04/09/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.1 | <LQ | 0.15 | 14.9 | 9.19 | 1.08 | <LQ | <LQ | 11 |
| 3 Source du ruisseau 24/08/12 | 0.14 | <LQ | <LQ | 8 | <LQ | 0.10 | 46.3 | 36.6 | 2.84 | 0.2 | <LQ | 61 |
| 4 Ganate 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 24.7 | 0.11 | 0.17 | 72.9 | 84.1 | <LQ | 0.14 | <LQ | 167 |
| 5 Attilla 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.2 | <LQ | <LQ | 31.2 | 49.1 | <LQ | <LQ | <LQ | 61 |
| 6 Lamentin 24/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 14.2 | <LQ | <LQ | 64.3 | 69.1 | 1.54 | 0.39 | <LQ | 141 |
| 7 Riviere Blanche 27/08/12 | 0.18 | 0.3 | 0.08 | 19.5 | 0.06 | 0.2 | 87.3 | 29.9 | 0.92 | <LQ | <LQ | 60 |
| 8 Louison 27/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.6 | <LQ | 0.11 | 47.3 | 29.6 | 1.36 | <LQ | <LQ | 39 |
| 9 Fond Moulin 27/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 5.6 | <LQ | 0.13 | 81.6 | 56.9 | 1.67 | 0.06 | <LQ | 54 |
| 10 Gelle 30/08/12 | <LQ | <LQ | 0.06 | 1.9 | <LQ | <LQ | 29.2 | 35 | 1.1 | <LQ | <LQ | 36 |
| 11 Bellevue 21/08/12 | <LQ | <LQ | 0.39 | 4.2 | 0.06 | 0.17 | 108.2 | 81.6 | 14 | 0.12 | <LQ | 169 |
| 12 Essente 30/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 3.3 | <LQ | 0.18 | 61.7 | 24 | 2.8 | <LQ | <LQ | 26 |
| 13 Medaille 21/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.6 | <LQ | <LQ | 50.6 | 62.9 | 0.61 | <LQ | <LQ | 51 |
| 14 Brin d'amour 20/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 7.4 | <LQ | 0.31 | 52.5 | 84.1 | 0.76 | 0.18 | <LQ | 98 |
| 15 Demare 07/09/12 | 0.17 | 0.1 | 0.9 | 3.4 | <LQ | 0.13 | 76.8 | 51.8 | 21.7 | <LQ | <LQ | 51 |
| 16 Péroul 27/08/12 | <LQ | 0.2 | 0.42 | 8.7 | <LQ | 0.22 | 93.6 | 56.1 | 3.54 | <LQ | <LQ | 80 |
| 17 Capitaine 04/09/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.5 | <LQ | 0.1 | 19 | 21.2 | <LQ | <LQ | <LQ | 5 |
| 18 1179220300 29/08/12 | 0.24 | <LQ | <LQ | 26.1 | <LQ | 0.11 | 46.4 | 126 | 0.74 | 0.22 | <LQ | 212 |
| 19 Morne escarpé 24/08/12 | <LQ | 0.2 | <LQ | 4.3 | <LQ | 0.17 | 56 | 149 | 0.66 | 0.11 | <LQ | 257 |
| 20 Les 3 sources 28/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.4 | <LQ | 0.14 | 43.5 | 33.9 | 1.47 | <LQ | <LQ | 33 |
| 21 Cap Macre 24/08/12 | 1.47 | 0.1 | 0.63 | 229 | 0.12 | 0.12 | 63.9 | 4089 | 59.3 | 5.27 | <LQ | 571 |
| 22 L'épineux 20/08/12 | <LQ | <LQ | <LQ | 8 | <LQ | 0.26 | 52.5 | 75.7 | 2.28 | 0.1 | <LQ | 78 |
| 23 Mabelo 21/08/12 | 1.27 | 1.3 | <LQ | 7.2 | <LQ | <LQ | 118.7 | 238 | 1.02 | 1.1 | <LQ | 383 |
| 24 118120131 29/08/12 | 0.28 | <LQ | 0.34 | 40.1 | <LQ | 1.01 | 73.2 | 359 | 0.84 | 0.63 | <LQ | 336 |
| 25 Morne Larcher 23/08/12 | 0.51 | <LQ | 0.11 | 3.2 | <LQ | 0.18 | 53.4 | 5 | | | | |

Campagne de février 2013 :

| | *Ag (Argent) | *Al (Aluminium) | *As (Arsenic) | *B (Bore) | *Ba (Baryum) | *Be (Béryllium) | *Br- (Bromures) | *COD (C.org.) | *Ca (Calcium) | *Cd (Cadmium) | *Cl (Chlorures) | *Co (Cobalt) |
|--|-----------------|--------------------|------------------|-----------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| Unité | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | mg/l | mg/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l |
| 1 Fond Moulin | <LQ | 18.2 | 0.12 | 20.2 | 1.48 | <LQ | <LQ | 0.9 | 13.2 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 2 Potiche | <LQ | 4.13 | 0.1 | 21.3 | 1.12 | <LQ | <LQ | 0.6 | 7.6 | 0.02 | 8.1 | <LQ |
| 3 Riviere blanche | 0.01 | 2.58 | 0.78 | 94.2 | 1.01 | <LQ | 0.2 | 0.8 | 9.6 | <LQ | 13.4 | <LQ |
| 4 Pécou | <LQ | 2.04 | 0.97 | 47.3 | 0.95 | <LQ | <LQ | 0.6 | 18.6 | 0.01 | 17 | <LQ |
| 5 Ganate | <LQ | 2.75 | 3.36 | 446 | 0.23 | <LQ | 0.1 | 1.7 | 26.6 | <LQ | 40.9 | <LQ |
| 6 Demare forage | <LQ | 2.31 | 0.25 | 21.7 | 2.09 | <LQ | <LQ | 1.3 | 13.5 | <LQ | 8.9 | <LQ |
| 7 Essente | <LQ | 2.69 | 0.21 | 22.3 | 0.68 | <LQ | <LQ | 1.4 | 6.7 | <LQ | 7.4 | <LQ |
| 8 Louison | <LQ | 2.34 | 0.09 | 17.7 | 1.36 | <LQ | <LQ | 0.9 | 7.6 | <LQ | 6.9 | <LQ |
| 9 Epineux | <LQ | 4.74 | 0.09 | 28.2 | 14.2 | <LQ | 0.1 | 1.4 | 18.8 | <LQ | 29.5 | <LQ |
| 10 Mont gelé | <LQ | 3.01 | <LQ | 18.7 | 0.48 | <LQ | <LQ | 0.5 | 8.5 | <LQ | 7.9 | <LQ |
| 11 attila | <LQ | 3.94 | 0.23 | 17.7 | 0.16 | <LQ | <LQ | 0.6 | 11.9 | <LQ | 7.2 | <LQ |
| 12 Bellevue | <LQ | 2.36 | 2.84 | 81 | 1 | <LQ | 0.1 | 1.1 | 16.8 | <LQ | 30.3 | <LQ |
| 13 Médaille | <LQ | 1.63 | 0.14 | 20.9 | 0.56 | <LQ | <LQ | 0.7 | 10.7 | <LQ | 9.2 | <LQ |
| 14 1174z0134 | <LQ | 1.98 | 0.12 | 17.4 | 0.88 | <LQ | <LQ | 1.1 | 18.6 | 0.01 | 7.8 | <LQ |
| 15 3 sources | <LQ | 1.66 | 0.09 | 21.1 | 0.9 | <LQ | <LQ | 1.1 | 8.1 | <LQ | 10 | <LQ |
| 16 Capitaine | <LQ | 4.35 | <LQ | 19.9 | 4.99 | 0.01 | <LQ | 1.1 | 2.5 | <LQ | 9.5 | 0.14 |
| 17 Brin d'amour | 0.01 | 1.37 | <LQ | 33.6 | 5.12 | <LQ | 0.1 | 1.2 | 30.3 | <LQ | 48.5 | 0.14 |
| 18 Mabelo | <LQ | 1.97 | 22.6 | 125 | 43.6 | <LQ | 0.1 | 1.1 | 23.5 | 0.01 | 30.3 | 1.09 |
| 19 1179z0070 | 0.03 | 1.94 | 1.45 | 72 | 3.09 | <LQ | 0.4 | 1.3 | 46.7 | <LQ | 100.9 | <LQ |
| 20 1179z0300 | 0.01 | 5.43 | 0.37 | 53.1 | 6.35 | <LQ | <LQ | 0.9 | 56.5 | 0.01 | 65.2 | 0.05 |
| 21 dos d'âne | 0.01 | 1.99 | 0.12 | 53.3 | 10.7 | 0.01 | 0.3 | 1 | 20.1 | <LQ | 98.9 | 0.08 |
| 22 Grande Anse | 0.02 | 2.46 | 0.27 | 140 | 7.92 | <LQ | 0.5 | 1.6 | 51.9 | <LQ | 180.4 | 0.31 |
| 23 Morne Escarpé | 0.01 | 1.85 | 0.86 | 31.5 | 2.28 | <LQ | 0.1 | <LQ | 78.9 | <LQ | 34.9 | <LQ |
| 24 Dizac | 0.03 | 1.65 | 0.7 | 127 | 4.69 | <LQ | 0.4 | 2 | 26.3 | 0.05 | 140.6 | 1.56 |
| 25 St Lucie | <LQ | 2.28 | 3.73 | 74.7 | 0.09 | <LQ | 0.3 | 2 | 4.8 | <LQ | 117.3 | <LQ |
| 26 Source du Riz | 0.02 | 2.54 | 0.2 | 38.1 | 99.1 | 0.02 | 0.2 | 1.9 | 11.5 | <LQ | 34.7 | 21.7 |
| 27 Cap Macré | 0.06 | 8.69 | 3.29 | 151 | 221 | <LQ | 5 | 2.9 | 522.6 | 0.02 | 2086.5 | 0.89 |
| 28 Nouvelle Cité | 0.03 | 7.76 | 0.94 | 437 | 6.81 | <LQ | 1 | 1.2 | 41.5 | <LQ | 337.5 | 0.59 |
| 29 HNO3 filtré Nouvelle Cité (Blanc 1) | 0.01 | 3.87 | <LQ | <LQ | 0.11 | <LQ | | | | <LQ | | <LQ |
| 30 HNO3 filtré Morne Escarpé (Blanc 2) | <LQ | 1.54 | <LQ | <LQ | 0.06 | <LQ | | | | <LQ | | <LQ |

| | *Cr (Chrome) | *Cu (Cuivre) | *F (Fluores) | *Fe (Fer) | *Hg (Mercure) | *K (Potassium) | *Li (Lithium) | *Mg (Magnésium) | *Mn (Manganésium) | *NH4 (Ammonium en NH4) | *NO2 (Nitrites exprimés en NO2) | *NO3 (Nitrates exprimés en NO3) |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Unité | µg/l | µg/l | µg/l | mg/l | ng/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| 1 Fond Moulin | <LQ | 0.14 | <LQ | <LQ | <LQ | 0.9 | 0.11 | 4.8 | 1.38 | <LQ | <LQ | 1.2 |
| 2 Potiche | <LQ | 0.2 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.6 | 0.14 | 1.9 | <LQ | <LQ | 0.04 | 0.5 |
| 3 Riviere blanche | 0.16 | 0.9 | 0.1 | <LQ | <LQ | 2.8 | 13.7 | 4 | 0.17 | <LQ | 0.01 | <LQ |
| 4 Pécou | <LQ | 5.92 | 0.1 | 0.035 | <LQ | 3.5 | 15.7 | 7.9 | 1.79 | <LQ | 0.01 | 18 |
| 5 Ganate | 0.36 | 0.16 | 0.1 | <LQ | <LQ | 3.1 | 20.8 | 13.9 | 0.13 | <LQ | <LQ | 1.3 |
| 6 Demare forage | <LQ | 0.61 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.5 | 1.4 | 3.4 | 0.14 | <LQ | 0.01 | 9.1 |
| 7 Essente | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.7 | 0.48 | 1.3 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.4 |
| 8 Louison | <LQ | 0.74 | <LQ | <LQ | <LQ | 3.1 | <LQ | 1.7 | 0.1 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 9 Epineux | <LQ | 0.19 | <LQ | 0.031 | <LQ | 1 | 0.5 | 7.1 | 22.5 | <LQ | 0.03 | 2.5 |
| 10 Mont gelé | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.7 | 0.62 | 2.1 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |
| 11 attila | 0.18 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 0.6 | 0.2 | 3.8 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |
| 12 Bellevue | <LQ | 0.12 | 0.1 | <LQ | <LQ | 1.7 | 9.67 | 15.2 | 0.21 | <LQ | 0.01 | 5.1 |
| 13 Médaille | 0.63 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.3 | 0.35 | 3.4 | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ |
| 14 1174z0134 | 0.1 | 0.13 | <LQ | <LQ | <LQ | 0.7 | <LQ | 4.4 | 0.14 | <LQ | 0.02 | <LQ |
| 15 3 sources | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | <LQ | 1.3 | 0.15 | 2.3 | 0.11 | <LQ | 0.01 | <LQ |
| 16 Capitaine | <LQ | 0.27 | <LQ | 0.223 | <LQ | 1 | 0.87 | 1.8 | 33.9 | <LQ | <LQ | 7.6 |
| 17 Brin d'amour | 0.41 | <LQ | <LQ | <LQ | 15 | 1.4 | 0.92 | 9.5 | 29.2 | <LQ | 0.09 | 2.7 |
| 18 Mabelo | <LQ | 0.19 | 0.1 | 1.136 | <LQ | 6.4 | 28.8 | 29.3 | 455 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 19 1179z0070 | <LQ | <LQ | <LQ | 0.251 | <LQ | 1.9 | 6.74 | 6.4 | 63.3 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 20 1179z0300 | <LQ | 0.19 | <LQ | <LQ | <LQ | 1.4 | 1.12 | 14.6 | 137 | <LQ | <LQ | 1205.9 |
| 21 dos d'âne | <LQ | 0.15 | <LQ | <LQ | <LQ | 2.3 | 1.11 | 13.6 | 6.73 | <LQ | 0.03 | 5.2 |
| 22 Grande Anse | 0.12 | 0.32 | 0.1 | 0.034 | <LQ | 1.7 | 3.16 | 23.2 | 215 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 23 Morne Escarpé | 0.57 | 0.15 | 0.1 | <LQ | <LQ | 1.4 | 3.03 | 10.4 | 0.11 | <LQ | <LQ | 7.4 |
| 24 Dizac | 0.17 | 0.24 | 0.1 | 0.668 | <LQ | 5.5 | 5.82 | 19 | 41 | <LQ | 0.06 | 6.6 |
| 25 St Lucie | 4.41 | 0.1 | 0.3 | <LQ | <LQ | 4.1 | 5.53 | 4.5 | 0.13 | <LQ | 0.05 | 1.2 |
| 26 Source du Riz | 0.27 | 0.14 | <LQ | 15.898 | <LQ | 1.3 | 1.88 | 7.4 | 3018 | 0.66 | 0.03 | 0.8 |
| 27 Cap Macré | <LQ | 0.63 | 0.1 | 0.141 | 236 | 7.3 | 40 | 324.4 | 165 | 0.1 | 0.1 | 1.7 |
| 28 Nouvelle Cité | 0.96 | 0.76 | <LQ | 0.042 | <LQ | 8.8 | 43.6 | 20.9 | 17.7 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 29 HNO3 filtré Nouvelle Cité (Blanc 1) | <LQ | 0.16 | | | | | 0.17 | | | <LQ | | |
| 30 HNO3 filtré Morne Escarpé (Blanc 2) | <LQ | 0.2 | | | | | 0.11 | | | <LQ | | |

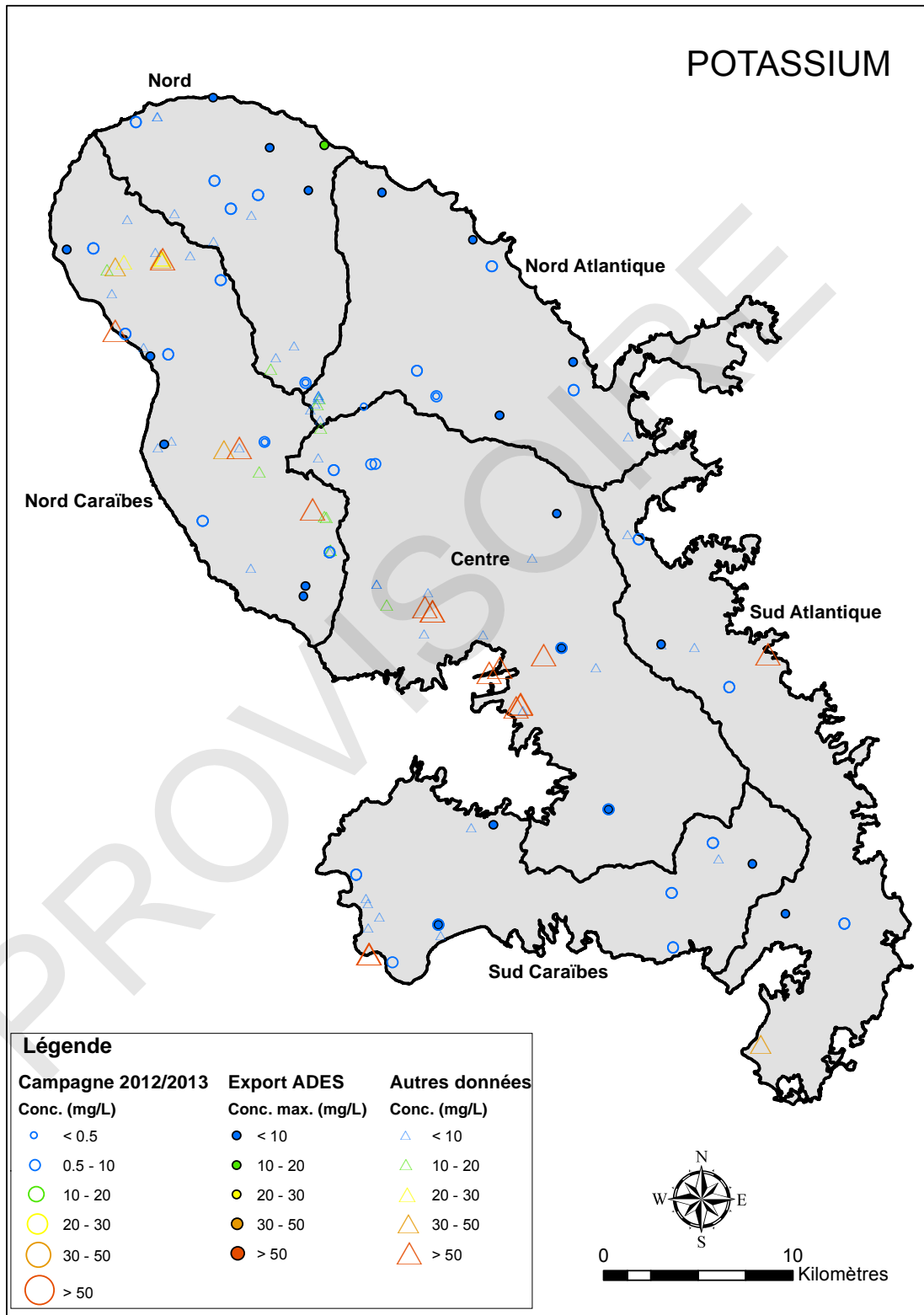
| | *Na (Sodium) | *Ni (Nickel) | *PO4 (OrthoPhos phates en PO4) | *Pb (Plomb) | *SO4 (Sulfates) | *Sb (Antimoine) | *Se (Sélénium) | *SiO2 (Silice) | *Sr (Strontium) | *Zn (Zinc) | CO3 (Carbonates) | HC03 (Bicarbonates) |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------------|------------------------|
| Unité | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | µg/l | mg/l | µg/l | µg/l | mg/l | mg/l |
| 1 Fond Moulin | 17.6 | 0.98 | <LQ | <LQ | 4.6 | <LQ | 0.14 | 84.7 | 53.5 | 0.5 | <LQ | 59 |
| 2 Potiche | 9.4 | 1.02 | <LQ | <LQ | 1.4 | <LQ | <LQ | 59.3 | 25.4 | <LQ | <LQ | 33 |
| 3 Riviere blanche | 22.1 | 1.47 | 0.4 | 0.07 | 19.7 | 0.06 | 0.12 | 87 | 27.9 | 1.11 | <LQ | 50 |
| 4 Pécou | 20.4 | 1.25 | 0.1 | 1.46 | 8.5 | 0.05 | 0.23 | 96.8 | 52.8 | 27.4 | <LQ | 83 |
| 5 Ganate | 52.1 | 1 | <LQ | <LQ | 24.8 | 0.11 | 0.15 | 78.6 | 77.8 | 0.67 | <LQ | 148 |
| 6 Demare forage | 11.7 | 0.81 | <LQ | 0.27 | 3.5 | <LQ | 0.13 | 83.7 | 51 | 14.2 | <LQ | 52 |
| 7 Essente | 9 | 1.22 | <LQ | <LQ | 3.2 | <LQ | 0.14 | 85.5 | 22.3 | 0.54 | <LQ | 26 |
| 8 Louison | 8.3 | 1.08 | <LQ | <LQ | 1.4 | <LQ | <LQ | 51.4 | 27.3 | 0.52 | <LQ | 33 |
| 9 Epineux | 25.5 | 1.29 | <LQ | <LQ | 7.8 | <LQ | 0.27 | 56.6 | 71 | 1.69 | <LQ | 79 |
| 10 Mont gelé | 9.1 | 1.28 | <LQ | <LQ | 1.7 | <LQ | <LQ | 32.1 | 31 | 0.57 | <LQ | 37 |
| 11 attila | 8.1 | 1 | <LQ | <LQ | 1 | <LQ | <LQ | 34 | 42.3 | 0.51 | <LQ | 52 |
| 12 Bellevue | 49.1 | 1.19 | <LQ | 0.48 | 3.9 | 0.06 | 0.12 | 113.1 | 72.3 | 12 | <LQ | 171 |
| 13 Médaille | 11 | 0.79 | <LQ | <LQ | 1.5 | <LQ | <LQ | 55.5 | 59.4 | <LQ | <LQ | 51 |
| 14 1174z0134 | 9.2 | 1.17 | <LQ | 0.12 | 1.1 | <LQ | <LQ | 46.2 | 47.6 | 0.68 | <LQ | 76 |
| 15 3 sources | 9.6 | 1.39 | <LQ | <LQ | 1.3 | <LQ | 0.1 | 47.6 | 31.2 | 0.66 | <LQ | 34 |
| 16 Capitaine | 7.9 | 1.16 | <LQ | <LQ | 1.4 | <LQ | <LQ | 21.7 | 30.2 | 2.33 | <LQ | 5 |
| 17 Brin d'amour | 30.5 | 1.45 | <LQ | <LQ | 7.4 | <LQ | 0.31 | 56.7 | 80.4 | 0.61 | <LQ | 98 |
| 18 Mabelo | 59.8 | 1.65 | 1.4 | <LQ | 6.9 | <LQ | <LQ | 121.9 | 198 | 1.03 | <LQ | 381 |
| 19 1179z0070 | 67.5 | 0.8 | <LQ | <LQ | 14.5 | <LQ | <LQ | 67.9 | 61.6 | <LQ | <LQ | 133 |
| 20 1179z0300 | 51.4 | 0.23 | <LQ | 0.12 | 17.9 | <LQ | <LQ | 50.3 | 111 | 1.66 | <LQ | <LQ |
| 21 dos d'âne | 59.2 | 1.16 | <LQ | <LQ | 11.4 | <LQ | 0.17 | 75.3 | 78.9 | 1.22 | <LQ | 74 |
| 22 Grande Anse | 187.1 | 1.38 | <LQ | 0.24 | 30.3 | <LQ | 0.89 | 77.6 | 205 | 1.05 | <LQ | 341 |
| 23 Morne Escarpé | 22.8 | 1.51 | 0.2 | <LQ | 4 | <LQ | 0.12 | 61.4 | 136 | 0.62 | <LQ | 258 |
| 24 Dizac | 114 | 1.55 | 0.2 | <LQ | 15.9 | <LQ | 0.35 | 116.9 | 135 | 135 | <LQ | 161 |
| 25 St Lucie | 118.4 | 1.05 | 0.5 | <LQ | 18.2 | 0.14 | 0.55 | 114.9 | 31.7 | | | |

Annexe 4

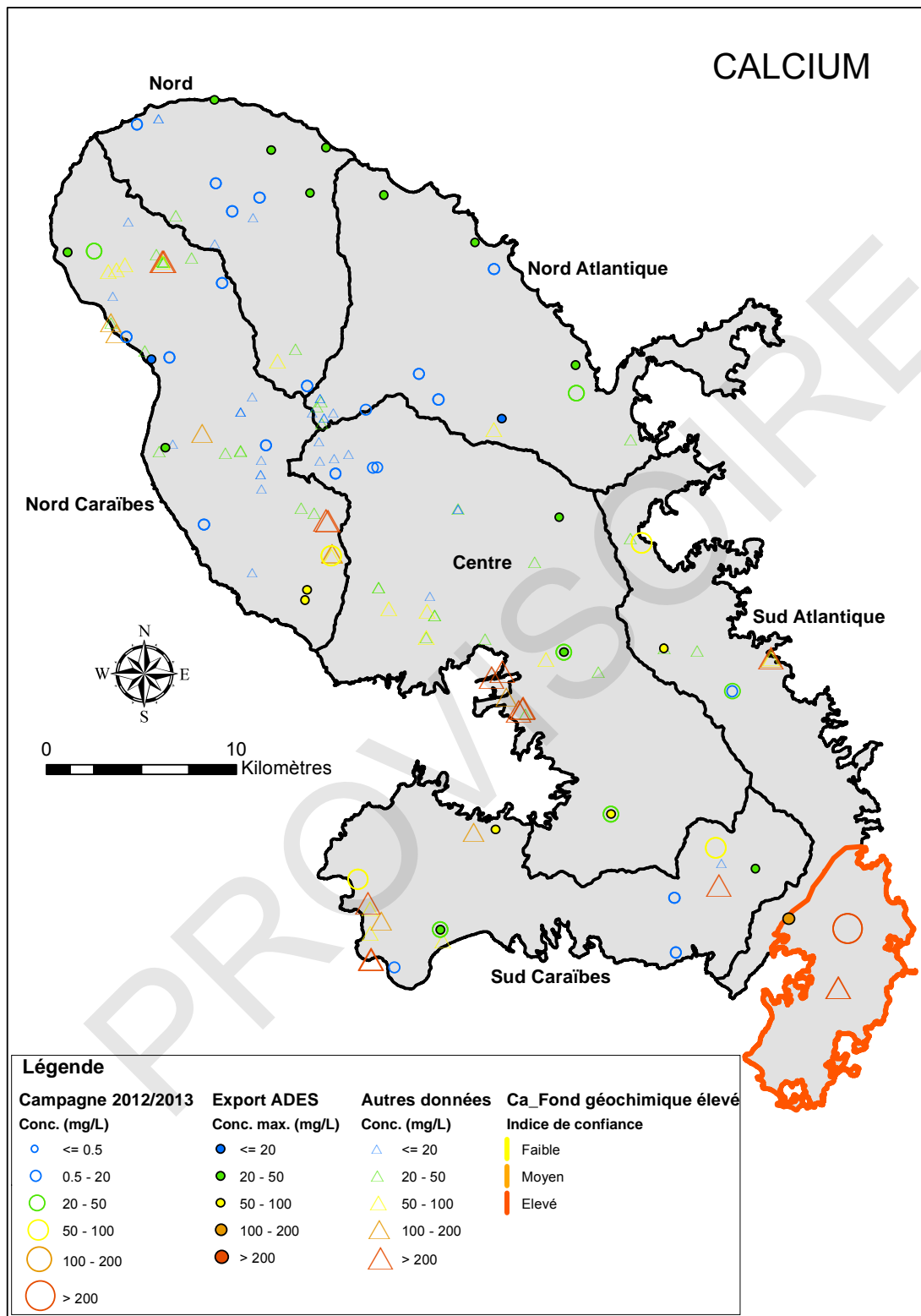
Cartes résultats pour les éléments majeurs

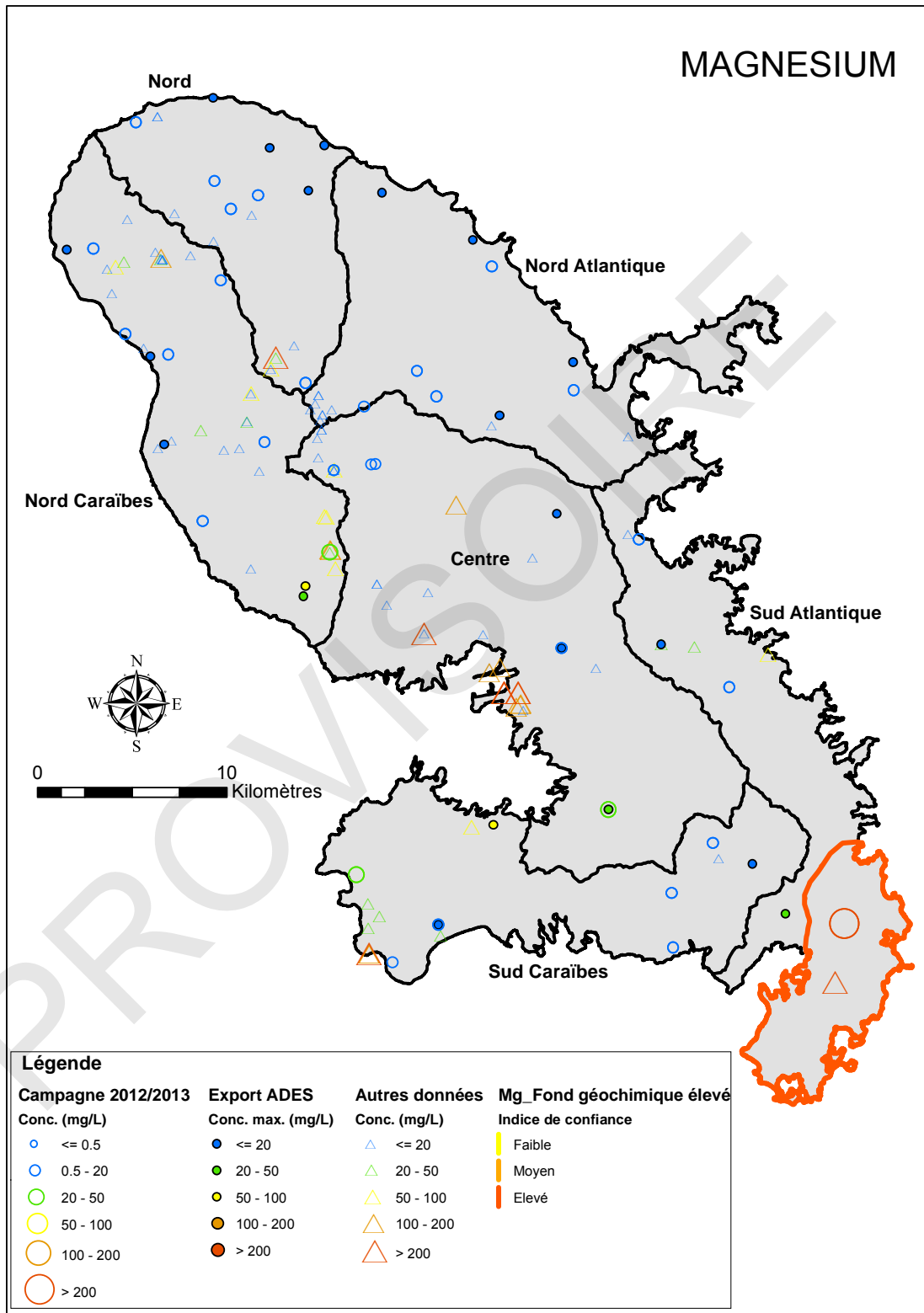
PROVISOIRE

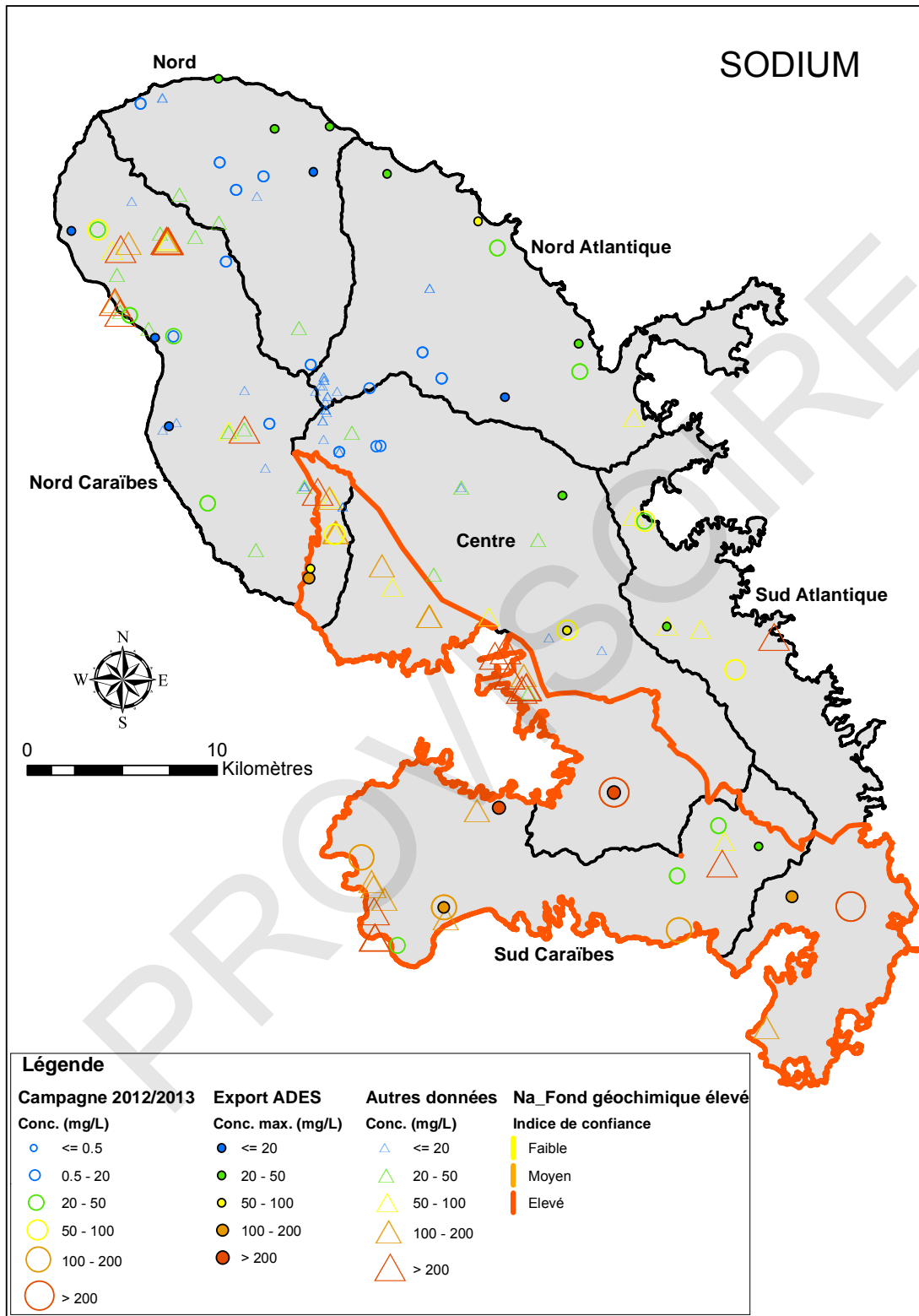
PROVISOIRES

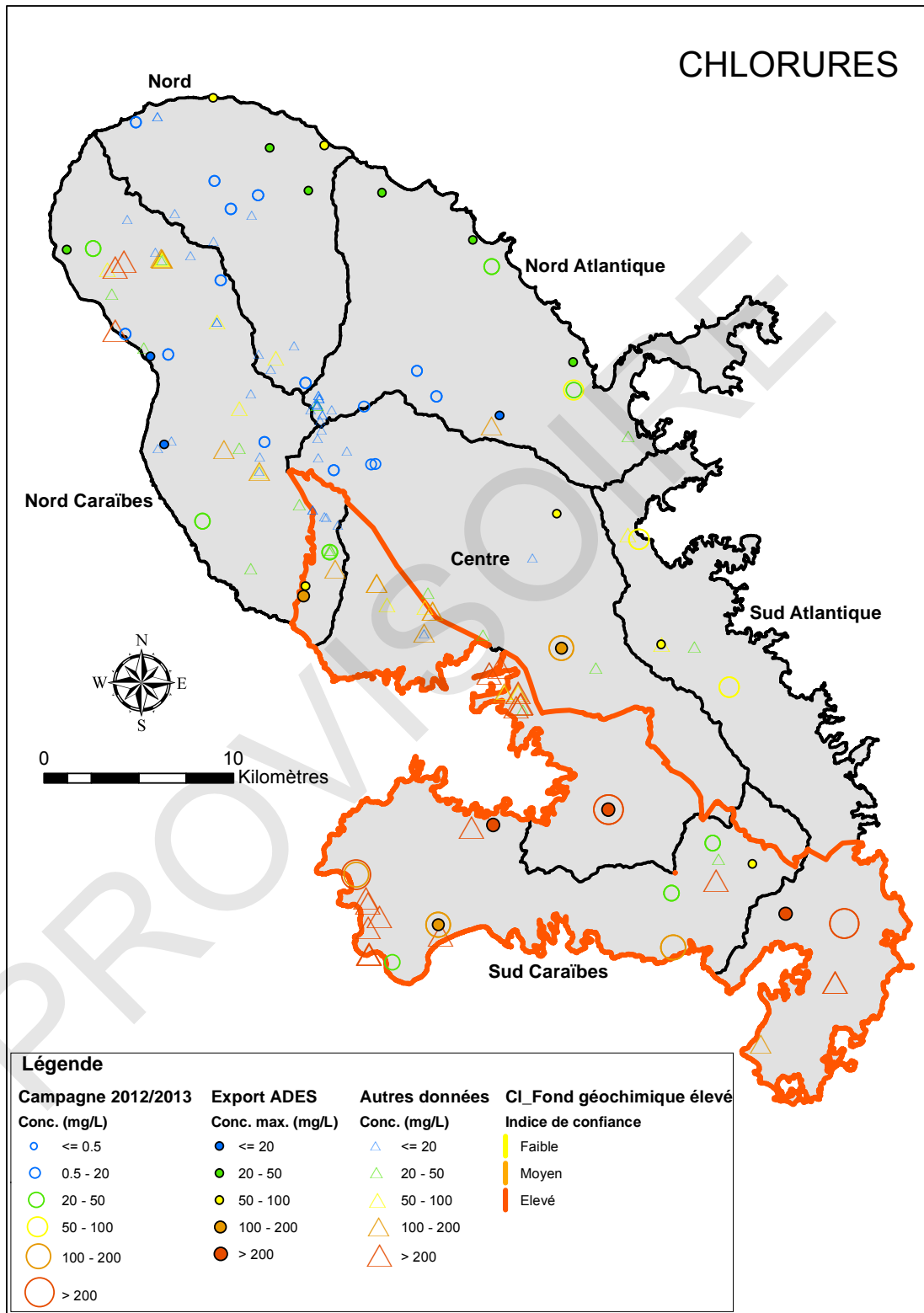


CALCIUM

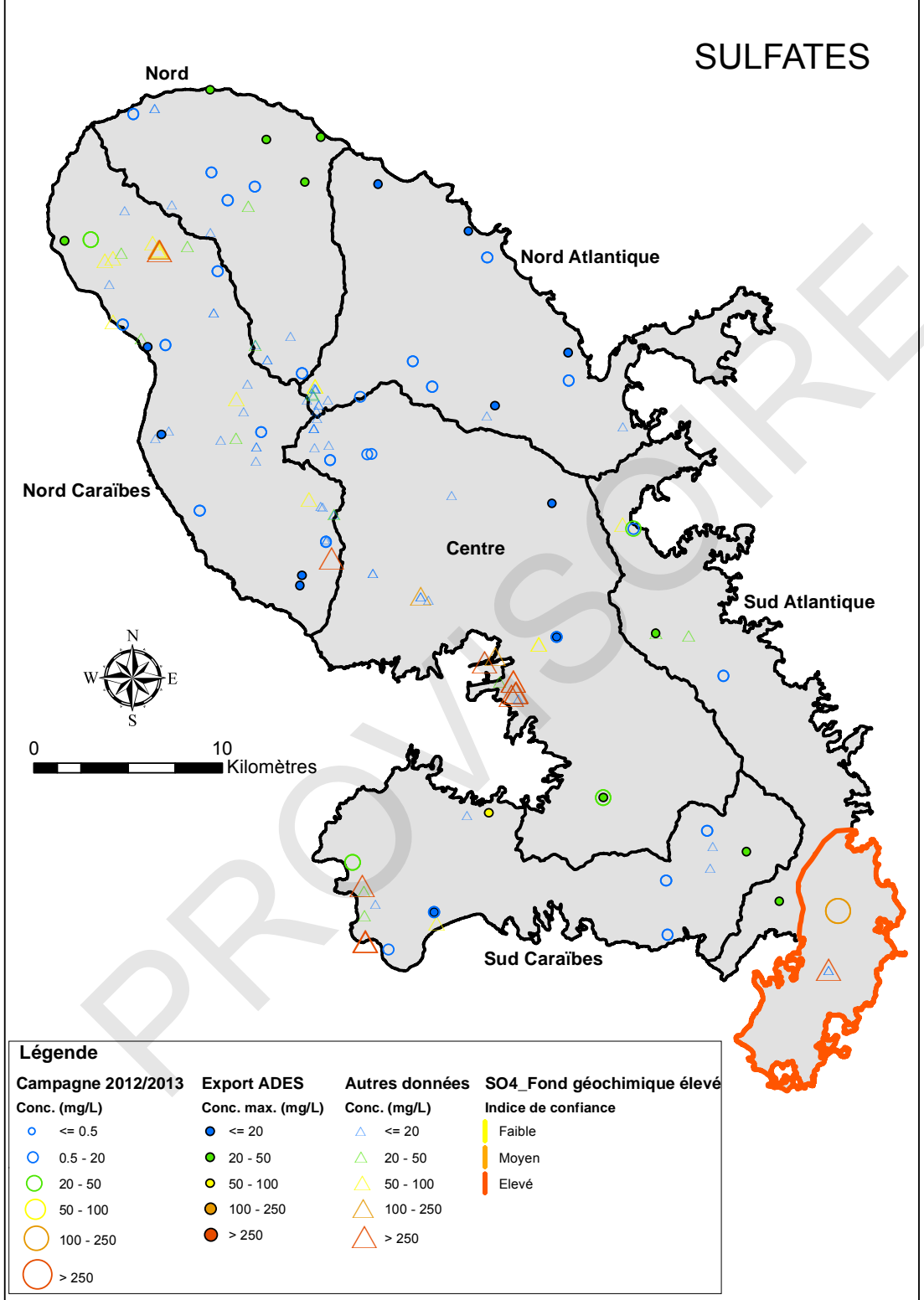








SULFATES



Annexe 5

Synthèse des travaux reportant des concentrations en fer et en manganèse dépassant les normes de potabilité

PROVISOIRE

PROVISOIRES

| | Localisation | Aquifère | pH | Potentiel redox | Fe ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | Mn ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | Ref. |
|-----------------------|---|--|-----------|---|--|--|-------------------|
| Expérience de terrain | Ile d'Äspö (Suède) | Aquifère côtier non confiné (formation granitique surmontée d'une couche argileuse) Temps de résidence (milieu non perturbé : 17 ans ; milieu perturbé : 8 mois) Volume d'eau (milieu non perturbé : 630 m ³ ; milieu perturbé : 2700 m ³) Biseau salé (teneur en Cl ⁻ : 4890 mg/L) | ≈7.5 | Eh = -115 mV à -145 mV | 950 | - | Banwart, 1999 |
| | Plaine inondable de l'Amazonie (Brésil) | Aquifère alluvial (dépôt sédimentaire du pléistocène) | 5.4-3.5 | O ₂ dissout : 5.4 à 2.4 mg/L | 35 - 230 | 0 - 170 | Brinkman n, 1975 |
| | Etat d'Uttarakhand (Inde) | Aquifère alluviaux non confinés (dépôts sédimentaires) Aquifères confinés sous-jacents (milieux métamorphiques) | 5.9 à 8.1 | - | 40 - 1400 | 1 - 71 | Jain et al., 2010 |
| | Wassa West District (Ghana) | Aquifère sédimentaire du miocène Capacité de stockage : 10.6 à 15.80 L/m/j Filons aurifères à proximité | 4.5-7.6 | - | 7500 à 8500 | 111 à 586 | Obiri, 2007 |

| | | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|--|--|--|------------------------|
| Phitsanulok (Thaïlande) | Aquifère alluvial confiné aérobie (dépôts sédimentaires) Infiltration de berges Lentilles anaérobies Conductivité hydraulique : 124.3 m/j et transmissivité : 1998 m ² /j | 6.2 – 6.7 | -130.1 (lentille anaérobie) 17.9 (zone aérobie) | 23100 (lentille anaérobie) 1320 (zone aérobie) | 690 (lentille anaérobie) 90 (zone aérobie) | Promma et al., 2007 |
| Province de Kandal (Vietnam) | Dépôt sédimentaire dans le paléo-delta du Mékong : toit de l'aquifère et centre de l'aquifère | - | - | 1.5 mol/kg (toit de l'aquifère) 0 mol/kg (centre de l'aquifère) | 60 mmol/kg (toit de l'aquifère) 30 mmol/kg (centre de l'aquifère) | Quicksall et al., 2008 |
| Martinique | 34 points de prélèvements (piézomètres, source et forages exploités) | 6.5-8 | Eh : 100-450 mV | 20 – 6600 | 6 – 2170 | Baran et al., 2006 |
| Guyane | Aquifère de socle (Forages AEP, piézomètres, source AEP) | 4.5 - 7 | -25 - 320 | 50 – 520 | 10 000 – 32 000 | Parizot et al., 2008 |
| Etat Kwara (Nigeria) | Aquifère de surface non confiné (dépôt sableux issus de l'érosion du socle gneissique) Présence de lentilles anaérobies Conductivité hydraulique : 4.72 l/s | 6.5 – 7.0 | - | 100 – 4000 | 10 – 800 | Tijani et al. 1994 |
| Kilauea (Hawaï) | | | | 30 - 50 | 0.01 - 15 | Wilkniss et al. 1972 |

| | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------------------|--|---------|--|--|--|-------------------------|
| Expérience de laboratoire | Luquillo Experimental Forest (Bresil) | Aquifère sédimentaire non confiné Ajout d'acétate pour stimuler l'activité de réduction | 5.92 | - | 0.6 mg/g (pas d'acétate) 1250 mg/g (100 µg/g d'acétate) | | Liptzin et Silver, 2009 |
| | Ile de Toorbul (Australie) | Aquifère côtier non confiné (intrusion saline) Aquifère confiné sous-jacent | 5.5-6.9 | Eh = -251 mV (aquifère non confiné) 325 mV (aquifère confiné) | 930 (aquifère non-confiné) 214000 (aquifère confiné) | 6 (aquifère non-confiné) 2030 (aquifère confiné) | Hodgkinson et al., 2008 |
| Simulation | Glatfelden (Suisse) | Aquifères alluviaux non confinés (dépôts fluvio-glaciaires) Infiltration de berges Conductivité hydraulique : 7.6×10^{-4} cm/s Aquifère bi-phasique (aérobie puis anaérobie) | 8.0 | 340 mV (zone aérobie) -290 mV (zone anaérobie) | 0.2×10^{-4} M (zone aérobie) 1.1×10^{-4} M (zone anaérobie) | 0×10^{-4} M (aérobie) 0.6×10^{-4} M (anaérobie) | Matsunaga et al., 1993 |

PROVISOIRES

Annexe 6

Compilation des données de forages dont les eaux présentent des concentrations en fer et manganèse élevées

PROVISOIRE

PROVISOIRES

PROVISOIRES

PROVISOIRES



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction Régionale de Martinique
4 Lot. Miramar
Route de la Pointe des Nègres
97 200 – Fort-de-France - Martinique
Tél. : 05 96 71 17 70