



Document public

Etude du fond géochimique du cuivre en Martinique

Rapport final

BRGM/RP-68069-FR
Juin 2018



Document public

Etude du fond géochimique du cuivre en Martinique

Rapport final

BRGM/RP-68069-FR
Juin 2018

V. Laperche, A.-L. Taïlamé et L. Nacimento

Vérificateur :

Nom : C. Auterives

Fonction : Responsable de
programme

Le 18 juin 2018

Signature :



Approbateur :

Nom : B. Vittecoq

Fonction : Directeur Martinique

Le 20 juin 2018

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : cuivre, sédiment, roche, sol, altérite, valeur seuil, fond géochimique, naturel, anthropique, rivière, Martinique

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

Laperche V., Taïlamé A.-L., Nacimento L. (2018) – Etude du fond géochimique du cuivre en Martinique. Rapport final. BRGM/RP-68069-FR, p. 39, ill. 17, Ann. 4.

Synthèse

La DEAL a pour mission la gestion du domaine public fluvial intégrant l'entretien des rivières de la Martinique et doit, pour cela, assurer le dragage des sédiments des rivières pour permettre l'écoulement des eaux et limiter les risques d'inondation. Actuellement, les sédiments des rivières situées dans le centre et dans le sud de la Martinique montrent fréquemment des concentrations en cuivre supérieures à la Norme Qualité Environnementale (NQE) de 100 mg/kg, limite de l'arrêté du 9 août 2006. L'absence de filière de traitement des résidus de curage dits « pollués » au sens de la NQE, conduit l'île dans une impasse réglementaire. C'est pourquoi l'ODE, la DEAL et le BRGM ont programmé cette étude afin de définir les valeurs du fond géochimique naturel du cuivre en Martinique, et de dissocier ainsi l'origine naturelle et/ou anthropique des concentrations mesurées dans les sédiments des rivières.

L'étude bibliographique à l'échelle de la Martinique de l'ensemble des données géologiques et géochimiques du cuivre a permis de mener une analyse statistique descriptive sur roches, altérites, sols et sédiments.

Les premières données sont issues des recherches d'indices en cuivre réalisées dans les années 70 (Penarroya, 1970 ; Vincent, 1971) avec des analyses dans les communes du Lamentin, Morne Rouge et Trinité connues pour leurs altérations hydrothermales. Dans les années 90, l'exploration minière (Labbé, Jourde, Leduc, 1990 et 1991) pour la recherche de minéralisations aurifères débute par 22 permis miniers répartis en 5 groupes sur l'île. Leduc (1990) a établi un seuil d'anomalie du cuivre à 160 mg/kg à partir d'analyses statistiques des données disponibles. La poursuite de l'exploration de Jourde (1991) révèle ainsi des concentrations en cuivre élevées dans les sédiments de rivière du secteur Four à Chaux au Robert (associé aux formations du Vauclin-Pitault).

Les thèses de Pons (1987) et Escalant (1988) ainsi que les réseaux de surveillance de l'ODE (2008 à 2016) et les données du bureau d'étude SAFEGE (2015 à 2017), acquises pour le compte de la DEAL, ont permis de constituer une base de données des résultats d'analyses en cuivre sur les différents supports solides réparties dans toute la Martinique. Les différents résultats ont été rassemblés selon six contextes géographiques et géologiques, identifiés par les principaux édifices volcaniques de la Martinique : Pelée / Conil, Carbet / Jacob, Miocène Sud, Trois Ilets, Vauclin-Pitault et Complexe de Base.

L'étude statistique descriptive réalisée sur sédiments révèle que :

- Le groupe Trois Ilets ne possède pas suffisamment de données en cuivre pour conclure ;
- Les groupes Pelée / Conil, Carbet / Jacob, Miocène Sud et Complexe de base ne présentent pas de risque de fond géochimique élevé en cuivre. En revanche, une valeur de référence est proposée à 80 mg/kg, au-delà de laquelle il faut s'interroger sur l'origine du dépassement de la concentration ;
- Le groupe Vauclin-Pitault présente un fond géochimique naturellement élevé en cuivre.

D'un point de vue réglementaire, la Directive Cadre sur l'Eau autorise la prise en compte des fonds géochimiques en métaux dans le cas où les concentrations mesurées ne sont pas en conformité avec les NQE (EC 2008; MEEDDM 2010b). Dans le cas des sédiments issus des

formations du Vauclin-Pitault, une adaptation au contexte local est à envisager afin de se rapprocher au mieux des réalités géologiques, en réhaussant la norme qualité environnementale en cuivre à 160 mg/kg.

Toute concentration présentant un dépassement de ces valeurs de référence devra faire l'objet d'une analyse critique et d'une recherche de son origine. Plusieurs causes peuvent impacter des résultats, une contamination ponctuelle de l'échantillon lors du prélèvement, un enrichissement en cuivre dû à de l'hydrothermalisme local, une pollution anthropique,

D'après l'analyse bibliographique, le cuivre d'origine anthropique pourrait avoir deux principales provenances. Il semblerait que pour les sédiments échantillonnés dans les baies, un impact anthropique dû aux peintures « antifouling » soit pressenti (Thomas et al., 2004). Le rôle des distilleries a quant à lui été supposé par Pujos et al en 2000, il serait néanmoins nécessaire d'avoir plus de données sur toute la Martinique ; en effet les distilleries ont été historiquement réparties sur l'ensemble de l'île et il ne semble pas y avoir d'impact autre que dans les rivières du sud.

Sommaire

1. Contexte et objectif	9
1.1. DÉFINITION DU FOND GÉOCHIMIQUE NATUREL.....	9
1.2. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	9
2. Teneurs mondiales du cuivre	11
2.1. COMPOSITION DE LA CROUTE TERRESTRE EN CUIVRE	11
2.2. CONCENTRATION EN CUIVRE DANS LES MINÉRAUX ET LES ROCHES ..	11
3. Géologie de la Martinique	13
3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉ	13
3.2. DÉFINITION DE GROUPES HOMOGÈNES.....	15
4. Teneurs en cuivre en Martinique.....	17
4.1. RECHERCHE D'INDICES EN CUIVRE (1970-1971)	17
4.2. EXPLORATION MINIÈRE EN 1990	19
4.2.1. Résultats d'analyses de roches (1990)	20
4.2.2. Résultats d'analyses de sédiments de rivière (1990)	21
4.3. EXPLORATION MINIÈRE EN 1991	21
4.4. THÈSE DE JEAN-CLAUDE PONS (1987)	23
4.5. THÈSE DE MICHEL ESCALANT (1988).....	26
4.6. BASE DE DONNÉES DES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'ODE.....	27
4.7. BASE DE DONNÉES DU BUREAU D'ÉTUDE SAFEGE	29
4.8. ÉTUDES DU FOND HYDROGÉOCHIMIQUE (2013 ET 2017)	30
4.9. APPORTS ANTHROPIQUES	31
5. Étude statistique	33
5.1. MÉTHODOLOGIE.....	33
5.2. RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE SUR LES ROCHES, ALTÉRITES ET SOLS	34
5.3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE SUR SÉDIMENTS.....	34

5.4. CONCLUSION.....	35
6. Conclusion	37
7. Bibliographie	39

Liste des figures

Illustration 1 : Evolution géologique et construction simplifiée de la Martinique (extrait de Germa et al., 2011)	14
Illustration 2 : Carte géologique simplifiée de la Martinique modifiée de Westercamp (1989), extrait de Germa et al. (2011).....	14
Illustration 3 : Cartographie de l'emprise des groupes homogènes	16
Illustration 4 : Localisation des secteurs de recherche d'indices de cuivre en 1971.....	18
Illustration 5 : Localisation des 22 permis miniers (1990).	19
Illustration 6 : Concentrations en Cu prélevés sur les sols de la Presqu'île de la Caravelle (Jourde, 1991a, 1991b).....	22
Illustration 7 : Concentrations en Cu dans les sols de la plaine du Lamentin (Jourde, 1991a, 1991b).	22
Illustration 8 : Concentrations en Cu des sédiments de rivières prélevés dans le secteur du Four à Chaux au Robert (Jourde, 1991a, 1991b).	23
Illustration 9 : Concentrations en Cu dans les altérites (données de la thèse de JC Pons, 1987).25	
Illustration 10 : Concentrations en Cu dans les laves (par groupe) (Escalant, 1988).	27
Illustration 11 : Médiane des concentrations en Cu des sédiments de rivière (réseau RCS – ODE).	28
Illustration 12 : Concentrations en Cu des sédiments de rivière (SAFEGE).	29
Illustration 13 : Concentrations en cuivre ($\mu\text{g/l}$) des stations de l'étude du fond hydrogéochimique entre 2012 et 2015 par groupes homogènes (trait rouge : NQE)	30
Illustration 14 : Analyse statistique descriptive du cuivre sur les roches, altérites et sols (en rouge : valeurs $>$ à 100 mg/kg, nombre d'analyses $<$ à 37).....	34
Illustration 15 : Analyse statistique descriptive du cuivre sur les sédiments (en rouge : valeurs $>$ à 100 mg/kg, nombre d'analyses $<$ à 37).	35
Illustration 16 : Comment lire une boîte à moustaches	35
Illustration 17 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des sédiments (trait plein : valeur seuil de l'arrêté du 9 août 2006, pointillé : valeurs seuils proposées).	36

Liste des annexes

Annexe 1 Localisation des prélèvements et des formations hydrothermales du Lamentin (extrait de Labbé et Jourde, 1990).....	43
Annexe 2 Résultats d'analyses du cuivre (en rouge) des sédiments de riv��re (extrait de Labbé et Jourde, 1990).....	47
Annexe 3 Résultats d'analyses en cuivre issus de la thèse de Pons (1987).....	51
Annexe 4 Résultats d'analyses en cuivre issus de la thèse de Escalant (1988)	55

1. Contexte et objectif

1.1. DÉFINITION DU FOND GÉOCHIMIQUE NATUREL

Les teneurs en éléments chimiques, majeurs et traces, d'un matériau naturellement présent dans un milieu exempt de toutes perturbations anthropiques et résultant uniquement de son histoire géologique sont appelées le fond géochimique naturel.

La caractérisation des fonds géochimiques naturels s'attache à évaluer les teneurs en éléments (majeurs et traces) en dehors de toute perturbation anthropique, dans le but de distinguer la contribution d'origine naturelle et la contribution anthropique aux concentrations mesurées.

La Martinique est une île volcanique, son histoire géologique fait qu'il est possible de retrouver certains éléments (fer, manganèse, cuivre...) à des concentrations relativement élevées de manière naturelle dans les sols, les sédiments et les eaux.

1.2. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) a pour mission l'entretien des rivières de la Martinique et doit assurer le dragage des sédiments des rivières pour permettre l'écoulement des eaux et limiter les risques d'inondation.

Actuellement, les sédiments des rivières, situées dans le centre et dans le sud de la Martinique, montrent fréquemment des concentrations en cuivre supérieures à la valeur seuil de 100 mg/kg, limite de l'arrêté du 9 aout 2006, faisant ainsi passer, au titre de la loi sur l'eau, du régime de déclaration au régime d'autorisation les dossiers relatifs aux travaux d'entretien. De plus l'absence de filière de traitement des résidus de curage dits « pollués » au sens de la NQE, conduit l'île dans une impasse réglementaire.

C'est pourquoi l'ODE (Office De l'Eau), la DEAL et le BRGM ont décidé de mener une étude visant à définir le fond géochimique du cuivre du centre et du sud de la Martinique et de conclure sur l'origine de ces teneurs.

Dans le cadre de cette étude a été réalisée une synthèse bibliographique, c'est à dire un inventaire le plus exhaustif possible de l'ensemble des références et données géologiques et géochimiques en cuivre relatives aux roches, altérites, sols et sédiments. Cette approche a pour objectif d'identifier l'origine des dépassements en cuivre et de proposer une valeur de référence spécifique adaptée aux secteurs concernés en Martinique.

2. Teneurs mondiales du cuivre

2.1. COMPOSITION DE LA CROUTE TERRESTRE EN CUIVRE

Dans un article de synthèse sur la composition de la croûte terrestre totale, Rudnick et Gao (2003) ont rassemblé des données en cuivre (Cu) de la croûte continentale supérieure et profonde (moyenne et inférieure).

Les concentrations moyennes en Cu dans la croûte terrestre (partie supérieure) :

- 14 mg/kg (Shaw et al, 1967, 1976)
- 14 mg/kg (Wedepohl, 1995)
- 25 mg/kg (Taylor et McLennan, 1985, 1995)
- 26 mg/kg (Eade and Farhig, 1973)
- 28 mg/kg (Rudnick and Gao, 2003)
- 32 mg/kg (Gao et al, 1998)
- 55 mg/kg (Taylor, 1964)

Les concentrations moyennes en Cu dans la croûte terrestre (partie moyenne) :

- 8 mg/kg (Shaw et al, 1994)
- 20 mg/kg (Rudnick and Fountain, 1995)
- 26 mg/kg (Rudnick and Gao, 2003)
- 32 mg/kg (Gao et al, 1998)

Les concentrations moyennes en Cu dans la croûte terrestre (partie inférieure) :

- 26 mg/kg (Rudnick and Fountain, 1995)
- 28 mg/kg (Shaw et al, 1994)
- 29 mg/kg (Rudnick and Taylor, 1987)
- 32 mg/kg (Rudnick and Presper, 1990)
- 37 mg/kg (Wedepohl, 1995)
- 40 mg/kg (Villaseca et al, 1999)
- 50 mg/kg (Gao et al, 1998)
- 90 mg/kg (Taylor et McLennan, 1985, 1995)

En appliquant des facteurs de poids basé sur l'épaisseur de chacune des croûtes, Rudnick et Gao (2003) sont arrivés à une concentration moyenne en cuivre de la croûte terrestre de 27 mg/kg.

2.2. CONCENTRATION EN CUIVRE DANS LES MINÉRAUX ET LES ROCHES

La détermination des concentrations en cuivre dans les minéraux et les roches ont fait l'étude de nombreux travaux, la plupart des données sont rassemblées dans le « Hand book of geochemistry » (Wedepohl, 1969, 1978).

Suivant les minéraux, les concentrations moyennes en cuivre sont très différentes (Ure et Berrow, 1982) :

- Pyroxène : 120 mg/kg
- Olivine : 115 mg/kg
- Biotite : 86 mg/kg
- Amphibole : 78 mg/kg
- Plagioclase : 62 mg/kg

De même, les concentrations moyennes en cuivre dans les roches peuvent varier d'un ordre de grandeur en fonction de la présence de ces minéraux (Taylor, 1964) :

- Basaltes : 100 mg/kg
- Granites : 10 mg/kg

En 2004, Soubran-Colin étudie le comportement des éléments traces métalliques lors de l'altération des basaltes. Il en ressort :

« La distribution du cuivre est diffuse sur l'ensemble des minéraux primaires. Les concentrations en Cu des phases antigéniques sont 2 à 5 fois supérieures à celle des minéraux primaires. Le cuivre libéré durant l'hydrolyse des forstérites et des augites est alors redistribué sur l'ensemble des phases néoformées. La matrice organo-minérale, qui représente plus de 40 % de la surface des échantillons très altérés, est la phase la plus riche en Cu ».

Les données présentées précédemment sont des moyennes qui permettent de voir des tendances à l'échelle de la croûte terrestre et par famille de minéraux et de roches. Les concentrations en cuivre sont ainsi très variables en fonction du contexte géologique et minéralogique. De plus, l'altération des roches et la reminéralisations des minéraux primaires jouent un rôle important, impliquant potentiellement une augmentation de la concentration du cuivre. Il est donc indispensable d'étudier le fond géochimique à une échelle locale, et ce particulièrement en contexte volcanique hétérogène associé à un climat tropical humide.

3. Géologie de la Martinique

3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉ

La Martinique s'est édifiée en alternant des phases d'activité volcanique et des périodes de repos pendant lesquelles la sédimentation calcaire a pu se développer. Les matériaux émis au cours des éruptions constituent le bâti et tous les reliefs de l'île. Les formations calcaires liées aux phases d'accalmies se présentent sous la forme d'affleurements discontinus, d'épaisseur et d'extension limitées, intercalés au sein des dépôts volcaniques ou les coiffant.

Les principales unités géologiques de l'île résultent donc de plusieurs phases majeures d'activité volcanique. Ces unités se sont mises en place selon une progression de l'est vers l'ouest et du sud vers le nord avec, localement et temporairement, quelques récurrences.

Les travaux de thèse de Germa (2009) combinant des études de géochronologie, géochimie et géomorphologie sur l'île de la Martinique permettent de mieux représenter l'évolution de l'activité volcanique de l'île (Illustration 1).

Résumé extrait de la thèse de Germa (2009), [nom des principales unités géologiques relativement aux différents arcs] :

« *L'arc insulaire des Petites Antilles, double dans sa moitié nord, résulte de la subduction vers l'ouest de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe à 2 cm/an.*

Grâce à sa position centrale où les deux branches nord se rejoignent, la Martinique est la seule île des Petites Antilles où l'histoire la plus complète de l'arc affleure. Nos âges K-Ar montrent que l'Arc Ancien a été actif de 25 à 21 Ma. [Complexe de base : Sainte-Anne et Caravelle]

L'Arc Intermédiaire s'est ensuite mis en place en milieu sous-marin puis subaérien entre 16 et 7 Ma. [Chaîne volcanique du Vauclin-Pitault, Miocène du sud-ouest]

Au cours du Miocène, l'activité volcanique s'est déplacée vers l'ouest avec la mise en place de petits volcans monogéniques, alignés le long de failles, entre 3 Ma et 340 ka. Au même moment, le compartiment septentrional s'est édifié au niveau du volcan bouclier du Morne Jacob (5,5 – 1,5 Ma), du Complexe du Carbet (1 Ma – 322 ka), du Mont Conil (550 – 190 ka) et enfin de la Montagne Pelée. [Morne Jacob, Pitons du Carbet, volcanisme des Trois-Îlets, mont Conil, Montagne Pelée]

Nous avons mis en évidence l'étroite relation de l'évolution chimique des laves et des taux d'éruption avec les modifications de surface, ainsi que l'influence de la subduction de ridges asismiques sur la migration et la répartition de l'activité volcanique à travers et le long de l'arc.

En conclusion, notre compilation de 56 nouveaux âges K-Ar entre 26 Ma et 190 ka, nous permet de mieux contraindre les différentes phases volcaniques de l'île de la Martinique, et d'identifier des épisodes de forte production magmatique liés aux changements géodynamiques régionaux et/ou les événements d'effondrement de flanc. »

Les Illustration 1 et Illustration 2 montrent la construction de l'île et la mise en place des 8 principaux ensembles volcaniques. Les séries du sud et ouest correspondent à l'arc ancien et à l'arc intermédiaire alors que les séries du nord correspondent à l'arc récent.

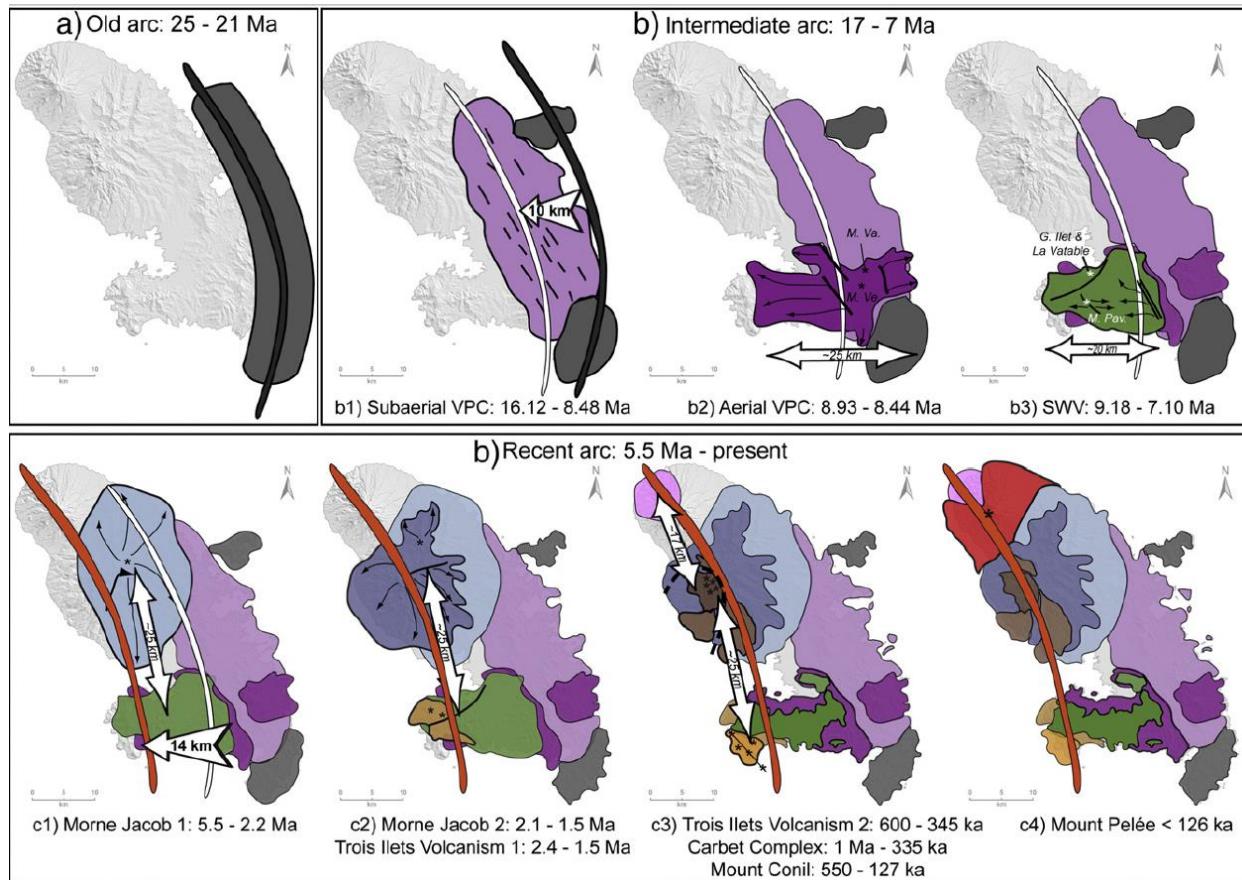


Illustration 1 : Evolution géologique et construction simplifiée de la Martinique (extrait de Germa et al., 2011).

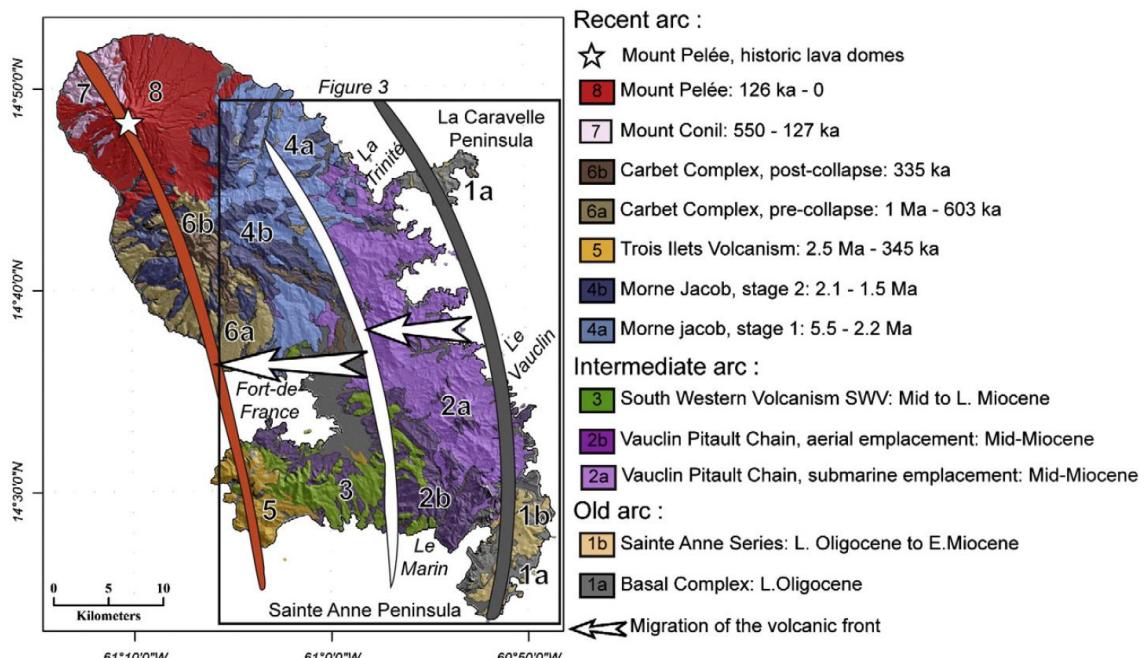


Illustration 2 : Carte géologique simplifiée de la Martinique modifiée de Westercamp (1989), extrait de Germa et al. (2011).

3.2. DÉFINITION DE GROUPES HOMOGÈNES

Dans le cadre de l'étude du fond hydrogéochimique des eaux de surface en Martinique (Taïlamé et Lions, 2017), des groupes homogènes ont été définis selon les zones géographiques et les lithologies drainées au droit de chacune des stations de prélèvement.

L'étude actuelle est repartie de la même méthodologie, en identifiant des groupes homogènes correspondant aux principales phases d'édification de la Martinique, en vue de faciliter l'exploitation de l'ensemble des résultats d'analyses en cuivre des échantillons de roches, sols et sédiments pour l'étude statistique. Six groupes ont été identifiés et sont présentés en Illustration 3 :

- « Pelée / Conil » rassemble les formations récentes de la Montagne Pelée et du Mont Conil au nord de l'île ;
- « Carbet / Jacob » rassemble les faciès issus du Morne Jacob et des Pitons du Carbet ;
- « Miocène Sud » inclut plusieurs faciès de la fin des formations du volcanisme du Miocène. On y retrouve la phase effusive de Rivière Pilote, l'épisode final de la montagne du Vauclin et le volcanisme du sud et du sud-ouest Martiniquais (axe Rivière Salée – Saint Luce, Morne Pavillon et axe Ducos – Rivière Pilote) ;
- « Trois-Îlets » pour le volcanisme plio-pléistocène des Trois-Îlets, sachant que l'étude du fond hydrogéochimique de 2017 montrait un enrichissement global en éléments majeurs sur cet ensemble ;
- « Vauclin-Pitault » regroupe la première partie des formations volcaniques du Miocène composées essentiellement de hyaloclastites ;
- Les « complexes de base de la Caravelle (C) et de Sainte-Anne (SA) » rassemblent les formations les plus anciennes de la Martinique.

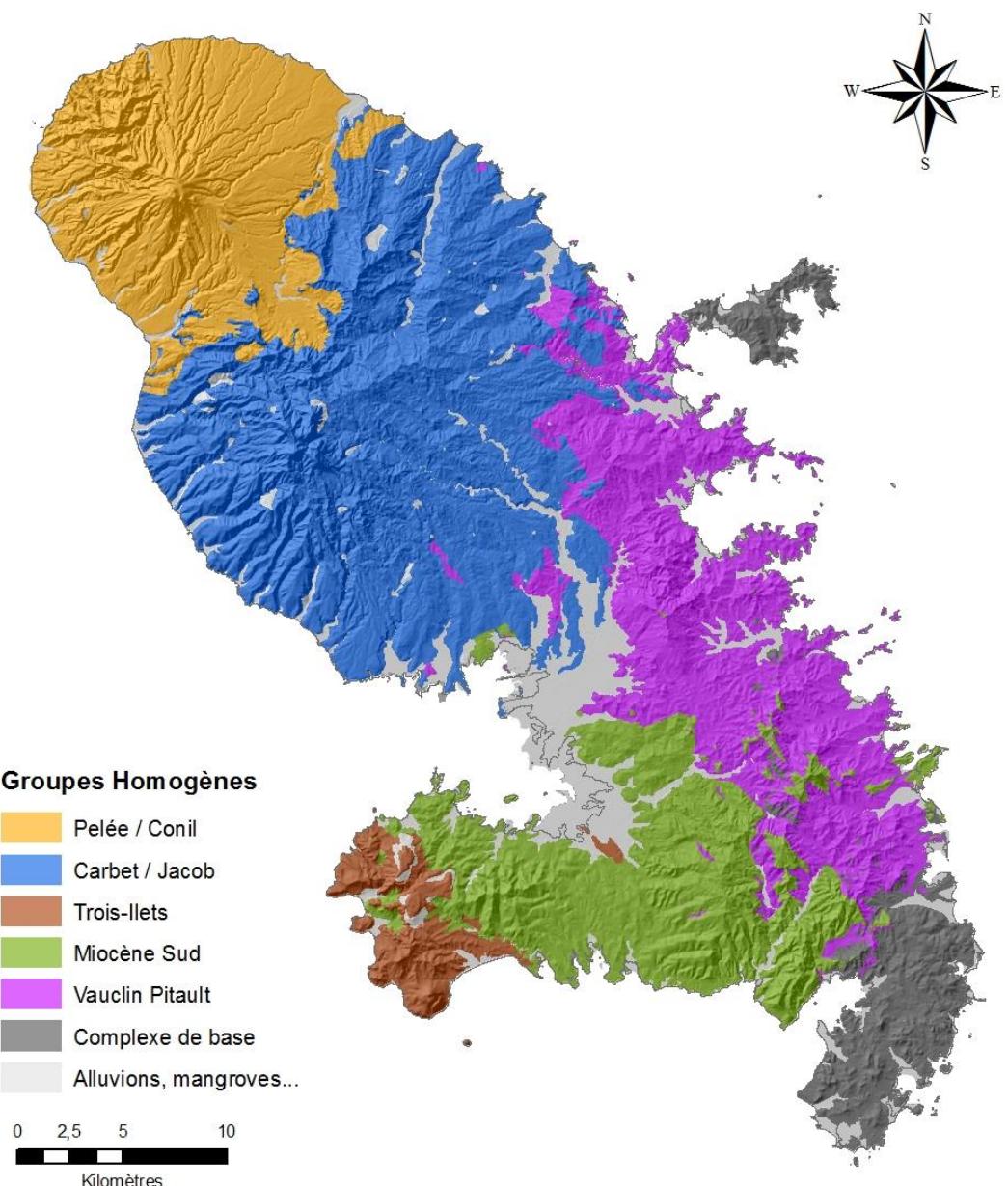


Illustration 3 : Cartographie de l'emprise des groupes homogènes

4. Teneurs en cuivre en Martinique

Un travail de recherche bibliographique a permis de consulter différents types d'ouvrages concernant soit exclusivement le territoire de la Martinique soit d'autres zones géographiques de contexte géologiques identiques ou similaires à celui de la Martinique.

Dans un premier temps, des ouvrages généraux sur la géochimie et la géologie ont été consultés pour appréhender la présence du cuivre dans la croûte terrestre, les roches et les sédiments. Dans un second temps, manuscrits de thèses, articles scientifiques et bases de données spécifiques à la Martinique ont été utilisés comme support. L'ensemble des documents couvre les roches, les altérites, les sols et les sédiments.

Contrairement à d'autres zones géographiques françaises, la Martinique n'a pas été concernée par l'inventaire minier national que l'Etat avait lancé en 1975 (inventaire national des ressources minérales en France (Guyane comprise) qui s'arrêtera en 1992, restant incomplet). Mais en 1990, dans le cadre d'un accord entre le BRGM et Corona Corporation (Canada), une première phase d'exploration minière a été réalisée sur les petites Antilles Françaises. Cette prospection visait principalement l'or mais au total 10 éléments ont été analysés (Au, Ag, As, Sb, Hg, Mn, Cu, Pb, Zn et Ba). Cette campagne d'exploration était orientée sur la recherche de minéralisations aurifères épithermales et concernait 22 permis de 5 km². En 1991, une seconde phase d'exploration complémentaire a eu lieu sur un nombre plus restreint de permis.

4.1. RECHERCHE D'INDICES EN CUIVRE (1970-1971)

Les Antilles françaises (Saint Martin, Saint Barthélémy, les Saintes et la Martinique) ont fait l'objet de missions d'exploration minière réalisées par PENARROYA¹ en 1970, avec pour principal objectif la recherche de présence de cuivre. Les explorations sommaires de 1970 ciblaient 3 zones d'altération (Illustration 4) présentant un potentiel minier en raison d'altération hydrothermales connues, sans que des intrusions aient été cartographiées.

En 1971, une étude est lancée à la demande de la DRME/AM (Direction des Recherches Minières et des travaux à l'Etranger – département AMérique), afin de vérifier la validité des conclusions avancées par PENARROYA (Vincent, 1971). Il ressort de cette étude les informations suivantes par secteurs :

- **Duchaxel (aéroport du Lamentin)**

Il aurait été trouvé dans une carotte de l'un des sondages effectués par le BRGM jusqu'à 200 mg de Cu/kg. Ce résultat n'a pas pu être confirmé car lors de la campagne de 1971, ce site n'a pas été échantillonné. En effet, ce site était en cours d'aménagement pour une piste d'aviation capable de recevoir les longs courriers.

- **Quartier Propreté (sud du Morne Rouge)**

Les analyses de 4 échantillons prélevés sur ~1/2 km² montrent des concentrations en cuivre de faibles à très faibles (sans indications de valeurs dans le rapport de Vincent en 1971).

¹ La société minière et métallurgique de Peñarroya est une compagnie minière française fondée en 1881

- **Presqu'île de la Caravelle (Trinité)**

Sur cette zone, 27 prélèvements de roches ont été effectués. Seuls 2 échantillons présentent des valeurs anomalies voisines de 100 mg/kg. Il semble que les échantillons ont été prélevés dans les falaises qui bordent la mer et il a été émis l'hypothèse que l'anomalie géochimique est faible due à un lessivage.

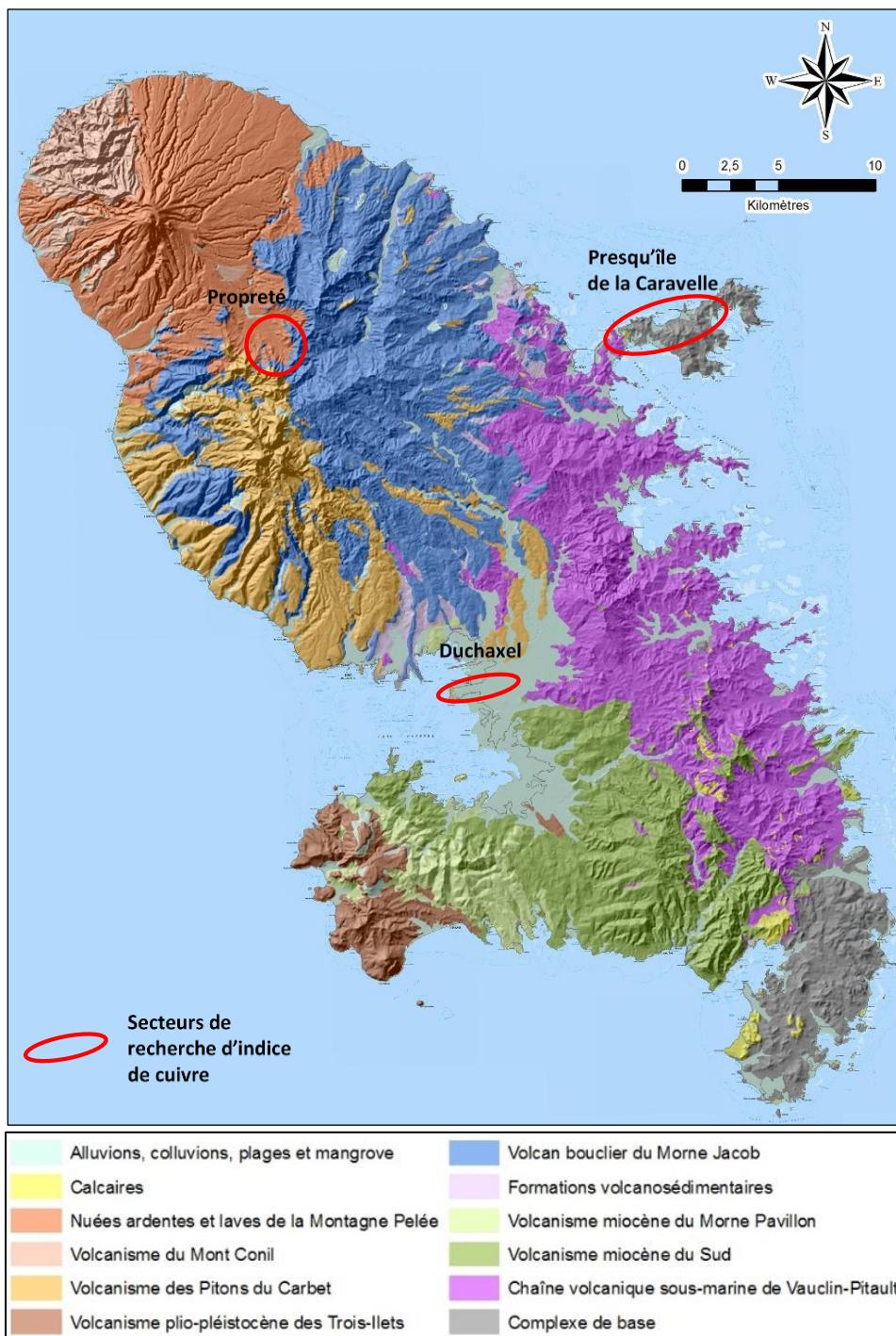


Illustration 4 : Localisation des secteurs de recherche d'indices de cuivre en 1971.

4.2. EXPLORATION MINIÈRE EN 1990

La première campagne d'exploration minière pour la recherche de minéralisations aurifères a débuté dans les années 1990 sur les Petites Antilles (Labbé et Jourde, 1990).

La campagne de 1990 avait pour finalité la mise en évidence et la sélection de cibles potentiellement aurifères au sein de 22 permis miniers (Illustration 5). Ces titres se répartissent en 5 groupes :

- MR : Morne Rouge ;
- CR : Caravelle ;
- LA : Lamentin-Diamant ;
- FR : François ;
- et SA : Sainte-Anne

Ils couvrent la plupart des manifestations hydrothermales fossiles et actives connues dans l'île.

Les prospections ont été réalisées au marteau (220 roches) et en prélevant des sédiments de rivières (823 sédiments < 125 µm ont été analysés).

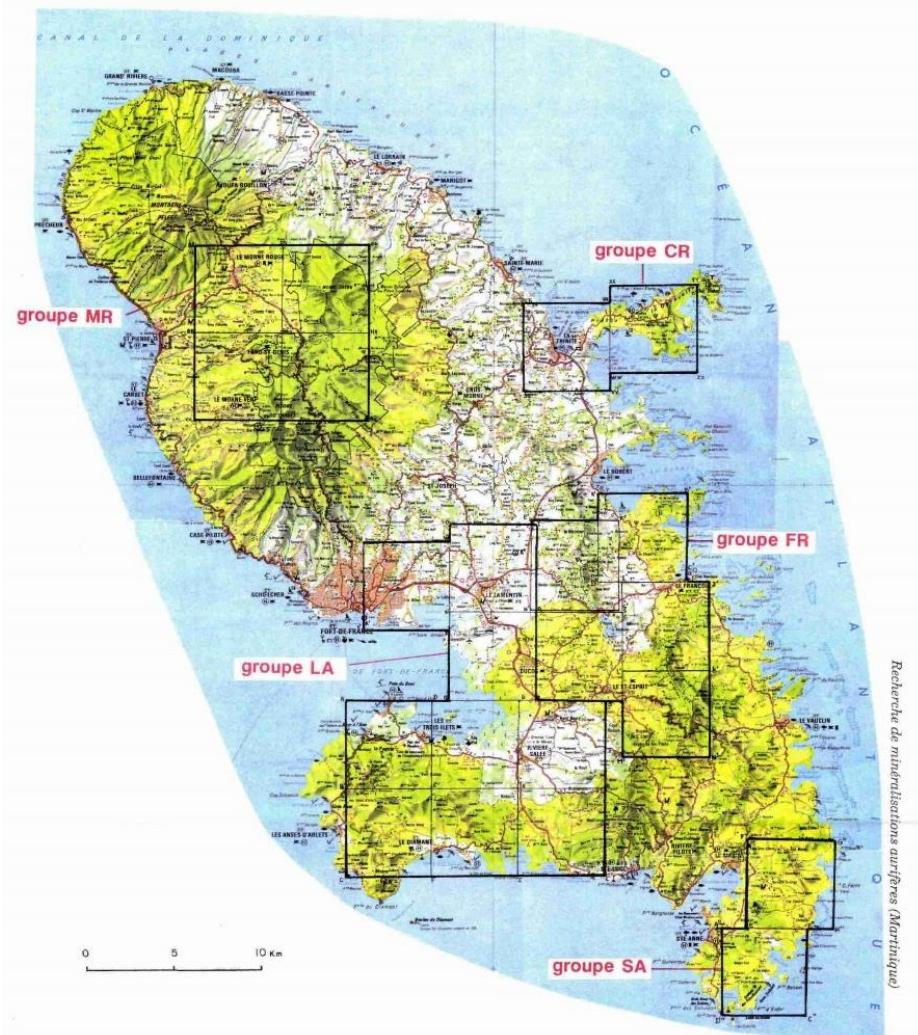


Illustration 5 : Localisation des 22 permis miniers (1990).

4.2.1. Résultats d'analyses de roches (1990)

- **Permis de Morne Rouge**

L'analyse des roches dans la zone de la rivière du Lorrain – Deux Choux montre que sur les 56 échantillons analysés 20 % présentent des concentrations en cuivre anomalies comprises entre 100 et 530 mg/kg.

L'analyse des roches dans la zone de la rivière des Pirogues et de la rivière du Petit Lorrain montre que les concentrations en Cu sont < 70 mg/kg sauf pour une roche sur 22 (110 mg/kg). De même, dans la zone ouest et sud du Piton Gelé, seule une roche sur 7 présente une concentration de 110 mg/kg.

- **Permis de la Caravelle**

Entre l'Anse l'Etang et le Pointe du Diable, des sulfures de cuivre ont été identifiés dans des brèches avec des concentrations en cuivre pouvant atteindre 3700 mg/kg dans certains échantillons.

En général, sur les 45 échantillons analysés, seul 20 % ont des concentrations > 110 mg/kg.

- **Permis Lamentin - Diamant**

Dans la zone de Château Lézards, deux échantillons présentent des concentrations de 170 et 280 mg/kg, tous les autres sont inférieurs à 70 mg/kg.

Dans la zone de Morne Doré, toutes les concentrations sont ≤ 32 mg/kg (10 échantillons).

Dans le secteur de Morne Rouge, seuls deux échantillons présentent des concentrations égales à 110 mg/kg, tous les autres ≤ 70 mg/kg (16 échantillons).

L'Erreur ! Source du renvoi introuvable., présente la localisation des prélèvements effectués dans la plaine du Lamentin.

Dans la Petite Anse du Diamant, les 9 échantillons présentent des concentrations ≤ 43 mg/kg.

A l'Anse à l'Ane, les 3 échantillons de roches présentent de fortes concentrations : 140, 260 et 1300 mg/kg. Les observations indiquent « *des laves et des pyroclastites argilisées, blanchies ou plus ou moins colorées en jaune ou en rouge, avec redéposition des oxydes de fer dans les interstices. La silification et le pyritisation sont en général discrètes, bien qu'assez nettes sur certains affleurements* ».

A la Pagerie, les 2 échantillons présentent des concentrations de 110 et 160 mg/kg. D'après les auteurs (Labbé et Jourde, 1990), cette zone appartient au même système que le secteur de l'Anse de l'Ane.

Les derniers échantillons prélevés, un à Mareuil présente une concentration de 110 mg/kg et les 5 autres dans le secteur de la Rivière Salée présentent des concentrations ≤ 36 mg/kg sauf un à 160 mg/kg.

- **Permis François**

Dans ce secteur, 11 échantillons ont été prélevés, 3 présentent des concentrations anomalies : 130, 200 et 210 mg/kg ; les autres ont des concentrations \leq 56 mg/kg.

- **Permis Sainte Anne**

Toutes les concentrations sont inférieures ou égales à 16 mg/kg (7 échantillons).

4.2.2. Résultats d'analyses de sédiments de rivière (1990)

L'échantillonnage des sédiments de rivière (Leduc, 1990 annexe 2 dans Labbé et Jourde, 1990) a été fait selon une densité d'échantillonnage de 2 échantillons par km^2 sur les 5 permis. Au total 796 échantillons de sédiments ont été prélevés ainsi que quelques sols.

Leduc (1990) a établi un seuil d'anomalie du cuivre à 160 mg/kg à partir des paramètres statistiques élémentaires ainsi que des histogrammes. Un traitement multivarié par ACP (Analyse en Composantes Principales) a permis de mettre en évidence une association géochimique Cu/Zn qui correspond soit à une association minéralisée sulfurée soit à une lithologie particulière basique.

Trois secteurs présentent des concentrations plus élevées que les autres (Annexe 2) :

- A l'est du permis du François les concentrations en Cu sont supérieures à 250 mg/kg.
- Au sud du permis du François, les concentrations en cuivre sont homogènes et de l'ordre de 250 mg/kg.
- Au nord-est du Lamentin, les concentrations en cuivre sont comprises entre 160 et 220 mg/kg.

4.3. EXPLORATION MINIÈRE EN 1991

En 1991, suite à la phase préliminaire d'exploitation, G. Jourde (1991b) poursuit l'exploration minière sur 3 zones d'intérêt identifiées, à savoir :

- le prospect Caravelle-ouest ;
- le prospect Lamentin ;
- et le prospect du Four à Chaux.

Au total, 27 échantillons de roches, 729 sols (Caravelle-ouest et secteur Morne Doré – Château Lézard au Lamentin) et 48 sédiments de rivières (Four à Chaux au Robert) ont été prélevés et analysés.

Ces campagnes ayant pour but la recherche d'indices aurifères, il y a peu d'explication sur les concentrations anomalies parfois rencontrées dans les roches ou sédiments. Les résultats sont présentés en Illustration 6, Illustration 7 et Illustration 8.

Le prospect Caravelle-ouest présente 9 dépassemens de la valeur seuil de 100 mg/kg.

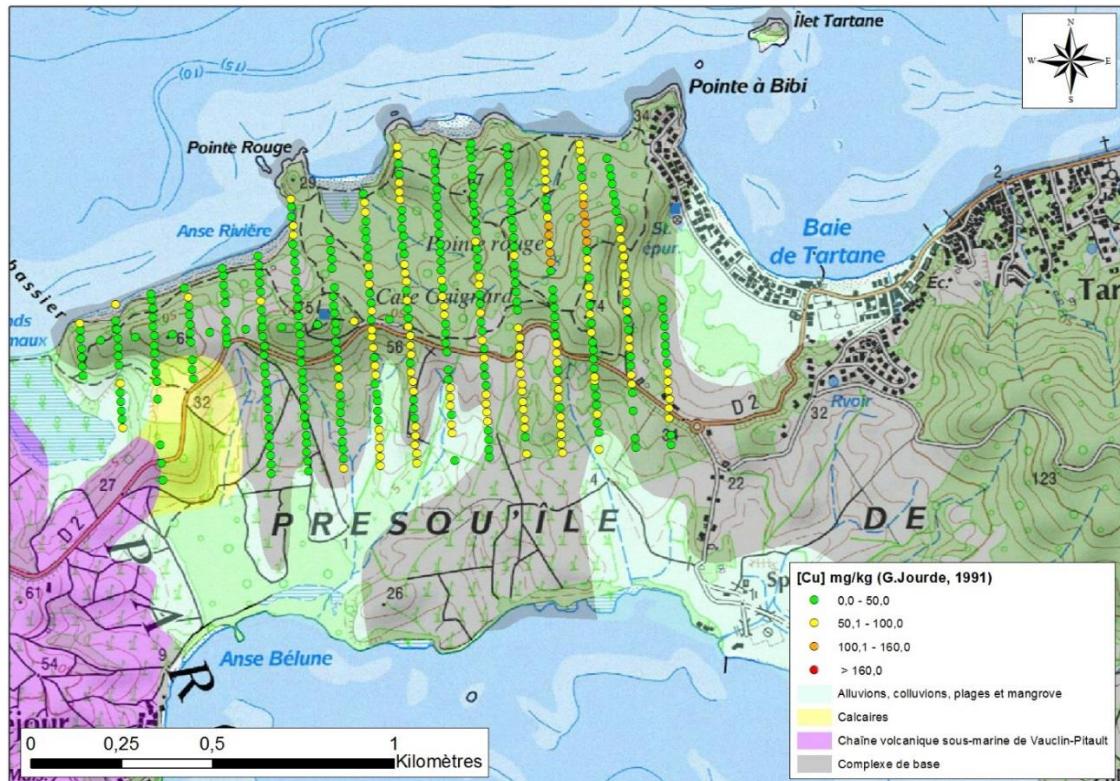


Illustration 6 : Concentrations en Cu prélevés sur les sols de la Presqu'île de la Caravelle (Jourde, 1991a, 1991b).

Le prospect du Lamentin ne présente aucun dépassement de la limite seuil de 100 mg/kg.

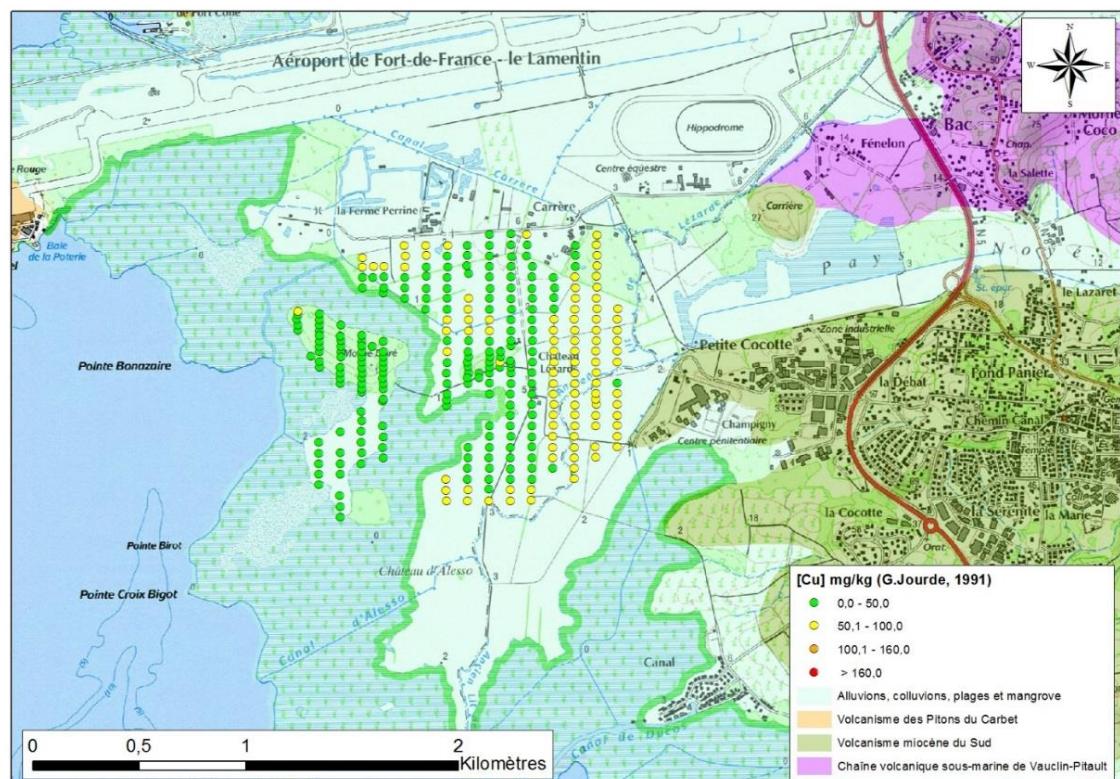


Illustration 7 : Concentrations en Cu dans les sols de la plaine du Lamentin (Jourde, 1991a, 1991b).

L'intégralité du prospect du Four à Chaux présent des dépassements de la valeur seuil. Six prélèvements de sédiments présentent une concentration supérieure à 160 mg/kg.

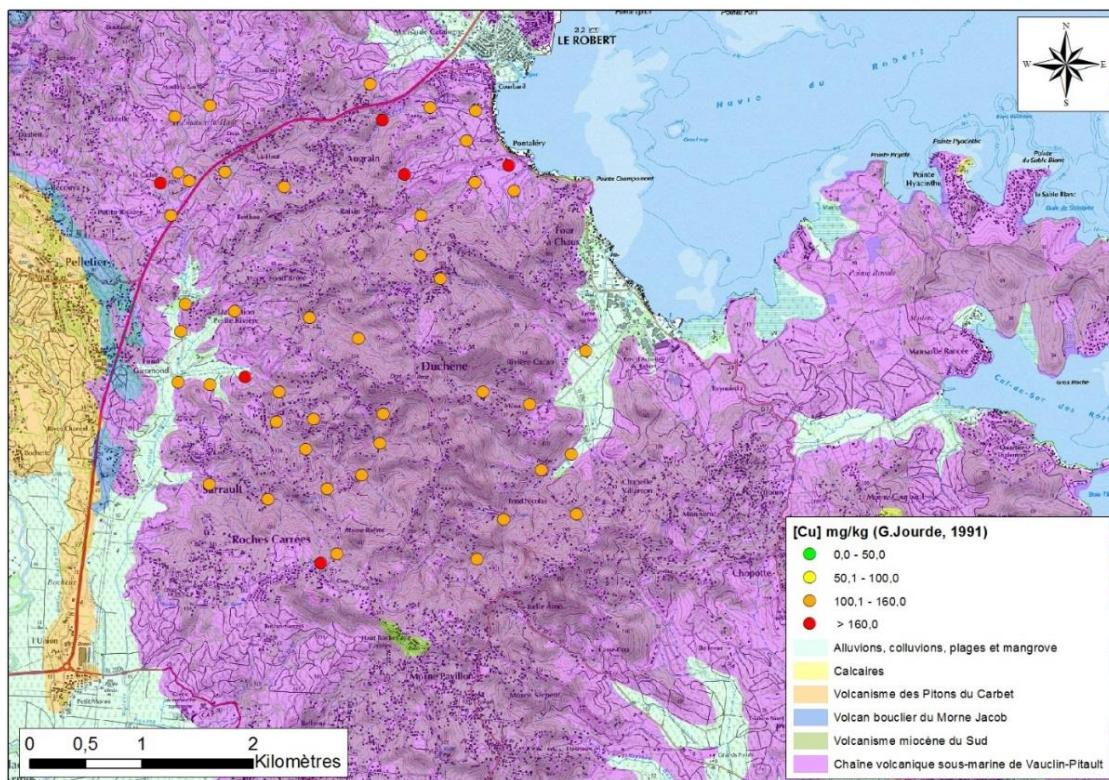


Illustration 8 : Concentrations en Cu des sédiments de rivières prélevés dans le secteur du Four à Chaux au Robert (Jourde, 1991a, 1991b).

4.4. THÈSE DE JEAN-CLAUDE PONS (1987)

En 1987, Pons étudie dans sa thèse la composition chimique des altérites en Martinique et la compare à celle de la roche mère.

Les échantillons analysés sont de différents types :

- Des roches : dacite, andésite et basalte plus ou moins altérées ;
- Des sables et leurs fractions < 2 mm ;
- Des carottes prélevées dans la baie entre Fort de France et les Trois-Îlets.

D'après Pons (1987), les concentrations en cuivre les plus élevées semblent toutes appartenir aux édifices basiques anciens c'est-à-dire aux basaltes appartenant à l'arc ancien dont certains ont été recouverts de produits pyroclastiques comme c'est le cas pour le Mont Larcher. Les concentrations en surface des produits pyroclastiques du Morne Larcher sont de 53 mg/kg alors que le substratum présente des concentrations en Cu de 377 mg/kg.

Les concentrations des basaltes (ou plutôt des altérites dérivées des basaltes anciens) de l'arc ancien sont supérieures à 100 mg/kg :

- Basalte du Marin : 152 mg/kg ;
- Basalte de la Pointe du Faula : 220 mg/kg ;
- Basalte de la Pointe des Salines : 111 mg/kg ;
- Basalte du substratum du Morne Larcher – presqu'île des Trois Ilets : 377 mg/kg.

Les formations du nord et du centre de l'île présentent des concentrations en Cu faibles (< 50 mg/kg) :

- Dacite des Pitons Carbet : 27 mg/kg ;
- Andésite de la montagne Pelée : 17 mg/kg ;
- Andésite du Morne Jacob : 47 mg/kg ;
- Altérites de la presqu'île de la Caravelle (proche des altérites d'Andésite) : < à la limite de détection.

A noter que la moyenne des concentrations en Cu des échantillons de la presqu'île est de 5 mg/kg (roches altérées, argiles sur calcaires et argiles fumerollisées) :

- Altérites des tufs indifférenciés du Pliocène au nord de Fort de France : 30 mg/kg.
- Altérites des tufs du Lahar du Morne Jacob : 37 mg/kg.
- Altérites des falaises de Bellefontaine : 39 mg/kg.

Certains échantillons du centre de l'île peuvent présenter des concentrations plus élevées comme certaines altérites de Lahars (69 mg/kg). L'hypothèse avancée pour cette concentration plus élevée peut-être due à des processus fumeroliens qui auraient enrichi l'andésite primaire ou alors les argiles de la poterie des Trois-Ilets (90 mg/kg). L'hypothèse est que la formation a subi l'action de fluides hydrothermaux enrichis en divers éléments. Dans cette formation, la concentration la plus forte en cuivre mesurée est de 153 mg/kg.

A l'inverse les argiles de la Caravelle sont pauvres en Cu (< LD à 18 mg/kg) et sont caractéristiques des altérites climatiques issues de roches magmatiques.

Certaines formations qui ne sont pas des basaltes et qui se situent au sud ou dans le centre de l'île présentent des concentrations plus faibles que celles rencontrées dans les basaltes mais plus fortes que celles rencontrées dans les formations du nord :

- La dacite du Diamant présente une concentration en Cu plus élevée (53 mg/kg) mais se trouve sur un substratum de basalte très riche en Cu : 377 mg/kg.
- La labradorite du Vauclin (à l'entrée de la presqu'île de la Caravelle) présente une concentration en Cu intermédiaire comme la dacite du Diamant : 53 mg/kg.
- Les altérites des tufs du Vauclin présentent une concentration un peu plus faible : 42 mg/kg.

Les résultats d'analyses sont présentés en Illustration 9 et reportés en Annexe 3.

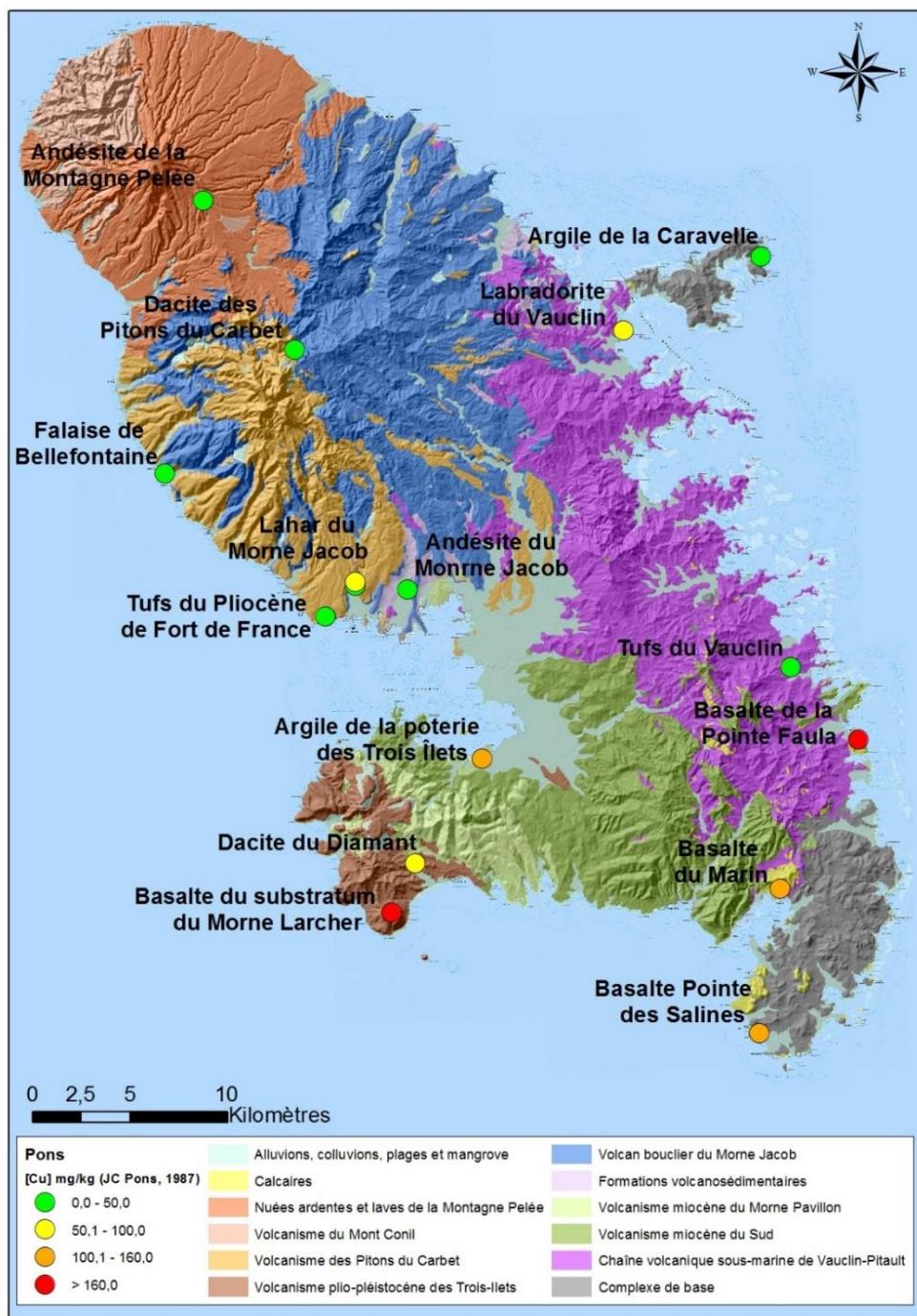


Illustration 9 : Concentrations en Cu dans les altérites (données de la thèse de JC Pons, 1987).

En conclusion d'après Pons (1987), les concentrations en cuivre sont en moyenne d'environ 40 mg/kg sauf pour les altérites de basaltes anciens caractérisées par de très fortes valeurs (~215 mg/kg).

Les résultats obtenus sur les carottes prélevées dans la baie entre Fort de France et les Trois-Îlets montrent la même tendance, les analyses faites sur des échantillons anciens sont plus riches en Cu (92 à 137 mg/kg) par rapport aux plus récents (50 à 68 mg/kg).

4.5. THÈSE DE MICHEL ESCALANT (1988)

La thèse d'Escalant (1988) porte sur une étude pétrographique et minéralogique des différents épisodes volcaniques de Martinique. La pétrographie, la minéralogie ainsi que la géochimie permet de classer les différents épisodes volcaniques en trois grands groupes magmatiques dont les principales particularités sont présentées ci-dessous.

Le groupe 1 assemble principalement la majorité des laves des périodes volcaniques de l'île (> 9,5 Ma) à associer à l'arc ancien et l'arc intermédiaire de Germa. On y retrouve les échantillons issus de la presqu'île de la Caravelle, de la série supérieure de Sainte Anne, du François-Robert, de Trinité, de Rivière Pilote et du Morne Jacob inférieur. Ces laves épanchées en milieu sous-marin, présentent de nombreuses caractéristiques typiques des laves tholéïtiques² d'arcs notamment un enrichissement en fer des clinopyroxènes dans les termes acides.

Le groupe 2 possède les caractéristiques géochimiques des laves calco-alcalines avec des teneurs élevées en K₂O et autre éléments incompatible (Rb, Li, Ba) et en terres rares. Les échantillons analysés appartiennent au complexe de base de Sainte Anne, François-Robert, Vauclin-Pitault, Trinité, Rivière Pilote et Morne Jacob inférieur. Cependant, les caractères pétrographiques et minéralogiques de ces laves sont analogues à ceux des laves tholéïtiques du groupe 1. Toutefois, à la différence des laves du groupe 1 qui sont fréquemment porphyriques (20 à 45 % de phénocristaux), les laves du groupe 2 sont peu porphyriques à aphyriques (< 20 % de phénocristaux). Ce groupe présente des teneurs élevées en éléments (Ti, Fe, Mn, P) et en éléments incompatibles à hautes charges (Zr, Nb, Y), en terres rares intermédiaires et lourdes (Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) ainsi qu'un net enrichissement en éléments de transition : Sc, Ti, V, Mn, Fe, Cu, Zn.

Le groupe 3 réunit la majorité des laves des phases récentes de l'île (< 9,5 Ma) dont le dynamisme éruptif est exclusivement aérien et fréquemment explosif. On y retrouve les échantillons issus de Ducos, Morne Pavillon et de la 2^{ème} phase des Pitons du Carbet. Il se caractérise par la prédominance des andésites et des dacites sur les termes basiques. De plus, le caractère porphyrique de ces laves (30 à 50 % de phénocristaux), l'apparition précoce des minéraux opaques (dès les basaltes), la coexistence de l'orthopyroxène et du clinopyroxène en phénocristaux et dans la mésostase des andésites, la décroissance des teneurs en fer dans les termes intermédiaires et les teneurs élevées en K₂O et autres éléments incompatibles (Rb, Li, Ba, Sr) ainsi qu'en terres rares légères, sont autant de critères symptomatiques d'une nature calco-alcaline de ces laves.

L'Illustration 10 présente les concentrations en cuivre en mg/kg rencontrées sur l'ensemble de la Martinique par groupe (Groupe 1 : étoiles, groupe 2 : triangles, groupe 3 : ronds), les résultats d'analyses sont présentés en Annexe 4.

Globalement, il y a une réelle différence entre les formations géologiques du sud et de l'ouest et celles du nord. En effet, les formations appartenant à la chaîne volcanique sous-marine de Vauclin-Pitault présentent un net enrichissement en cuivre, le secteur de Fort de France présente aussi des concentrations supérieures à 160 mg/kg pour le groupe 2.

² Relatif à un basalte constitué principalement de silice, très courant dans les fonds sous-marins

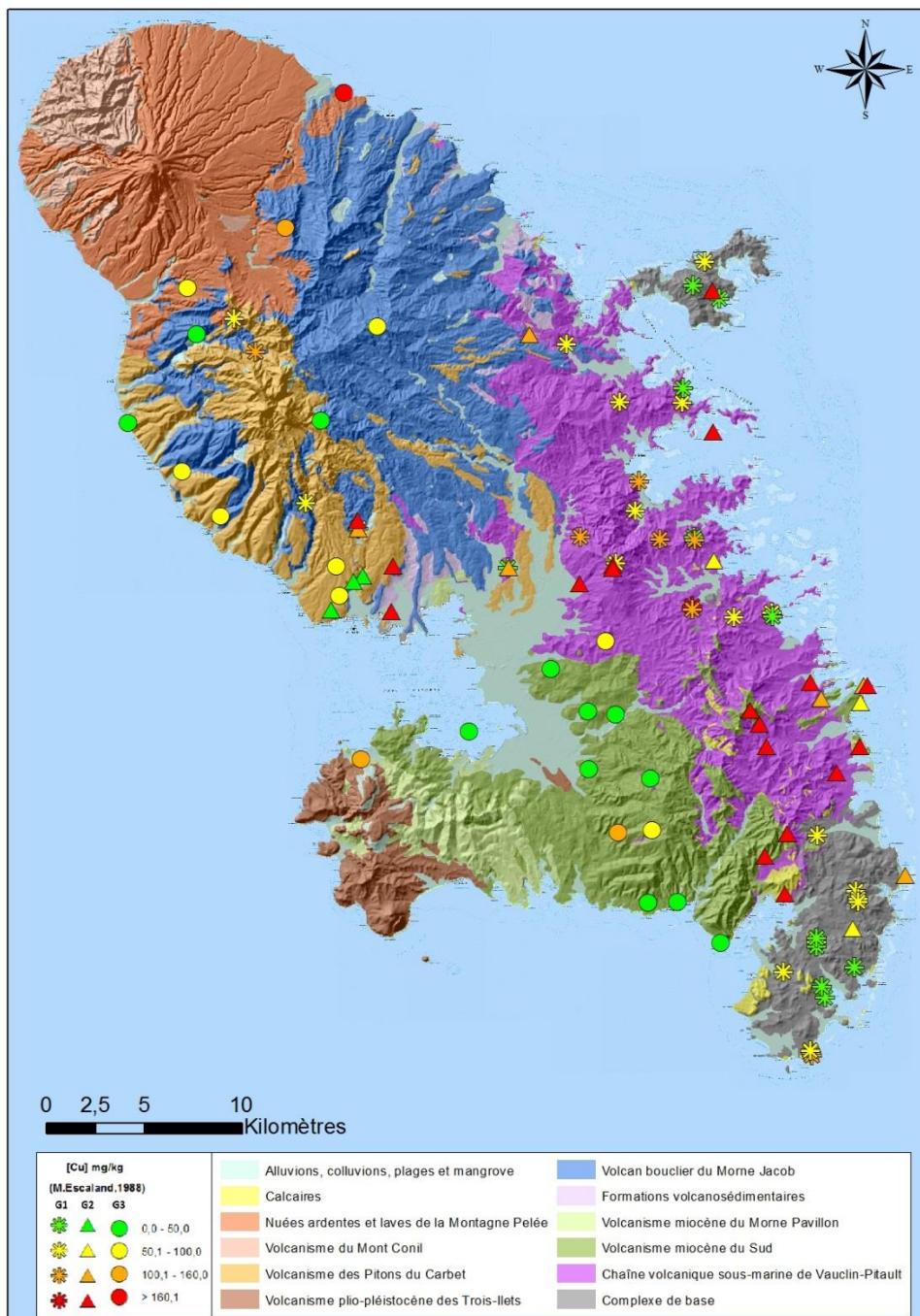


Illustration 10 : Concentrations en Cu dans les laves (par groupe) (Escalant, 1988).

4.6. BASE DE DONNÉES DES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DE L'ODE

Dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), a été mis en place un programme de surveillance au sein de chaque district hydrographique de l'état écologique et de l'état chimique des eaux superficielles.

Des analyses sur sédiment sont réalisées depuis 2008 par l'ODE sur le réseau de contrôle de surveillance (RCS) de la qualité de l'eau. Les valeurs médianes des concentrations en cuivre des sédiments de rivière sont présentées en Illustration 11. Il faut noter les difficultés de prélèvements en raison de la granulométrie et de la forte variabilité interannuelle.

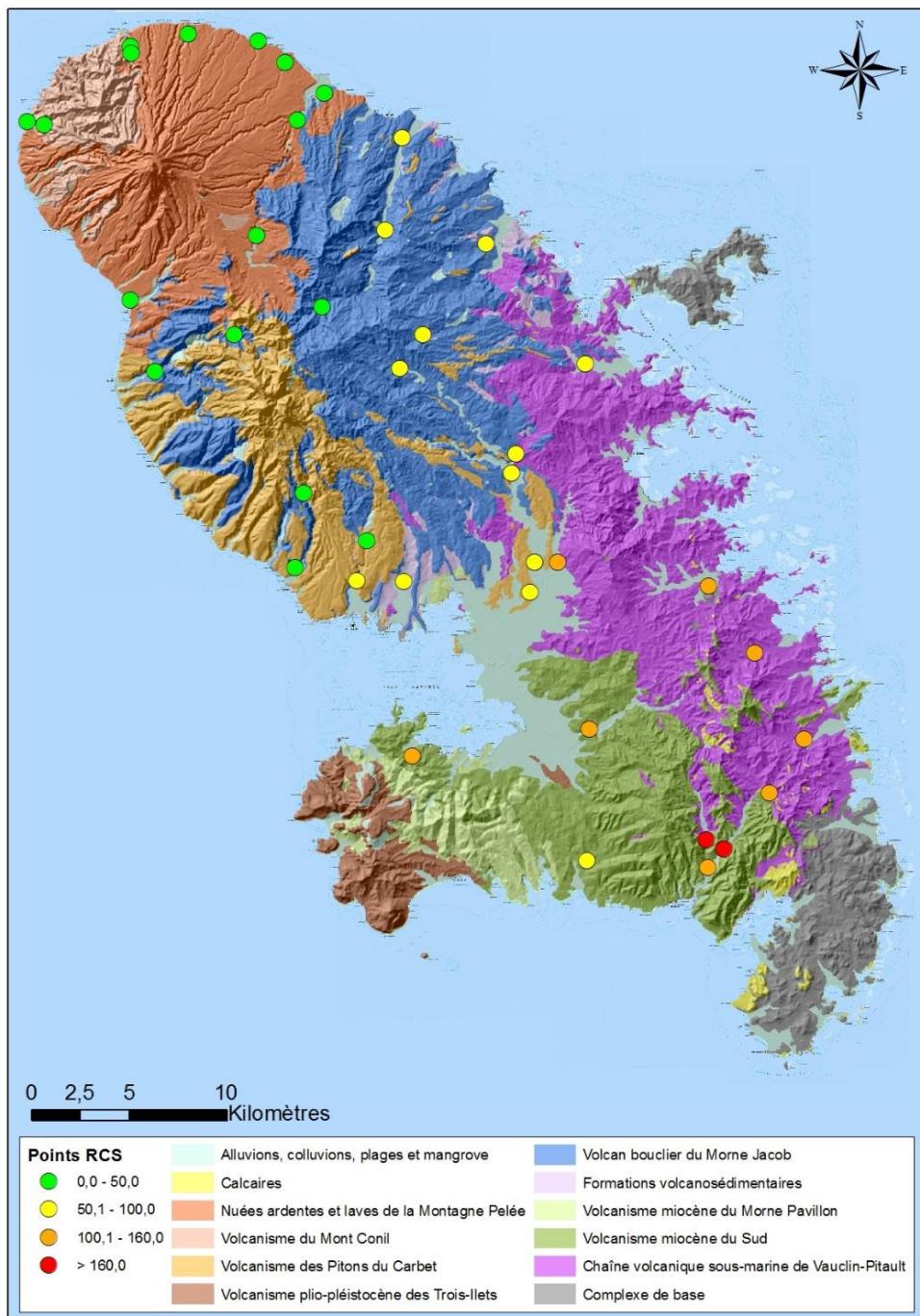


Illustration 11 : Médiane des concentrations en Cu des sédiments de rivière (réseau RCS – ODE).

La répartition des concentrations en cuivre est homogène avec des teneurs inférieures à 100 mg/kg dans toute la partie nord de l'île et un net dépassement des valeurs seuils dans le Sud.

4.7. BASE DE DONNÉES DU BUREAU D'ÉTUDE SAFEGE

Depuis 2015, pour le compte de la DEAL Martinique, le bureau d'étude SAFEGE a réalisé sur 25 rivières plusieurs prélèvements de sédiments. Ces analyses ont pour but de caractériser la qualité des sédiments afin de leur appliquer le mode de gestion le plus approprié.

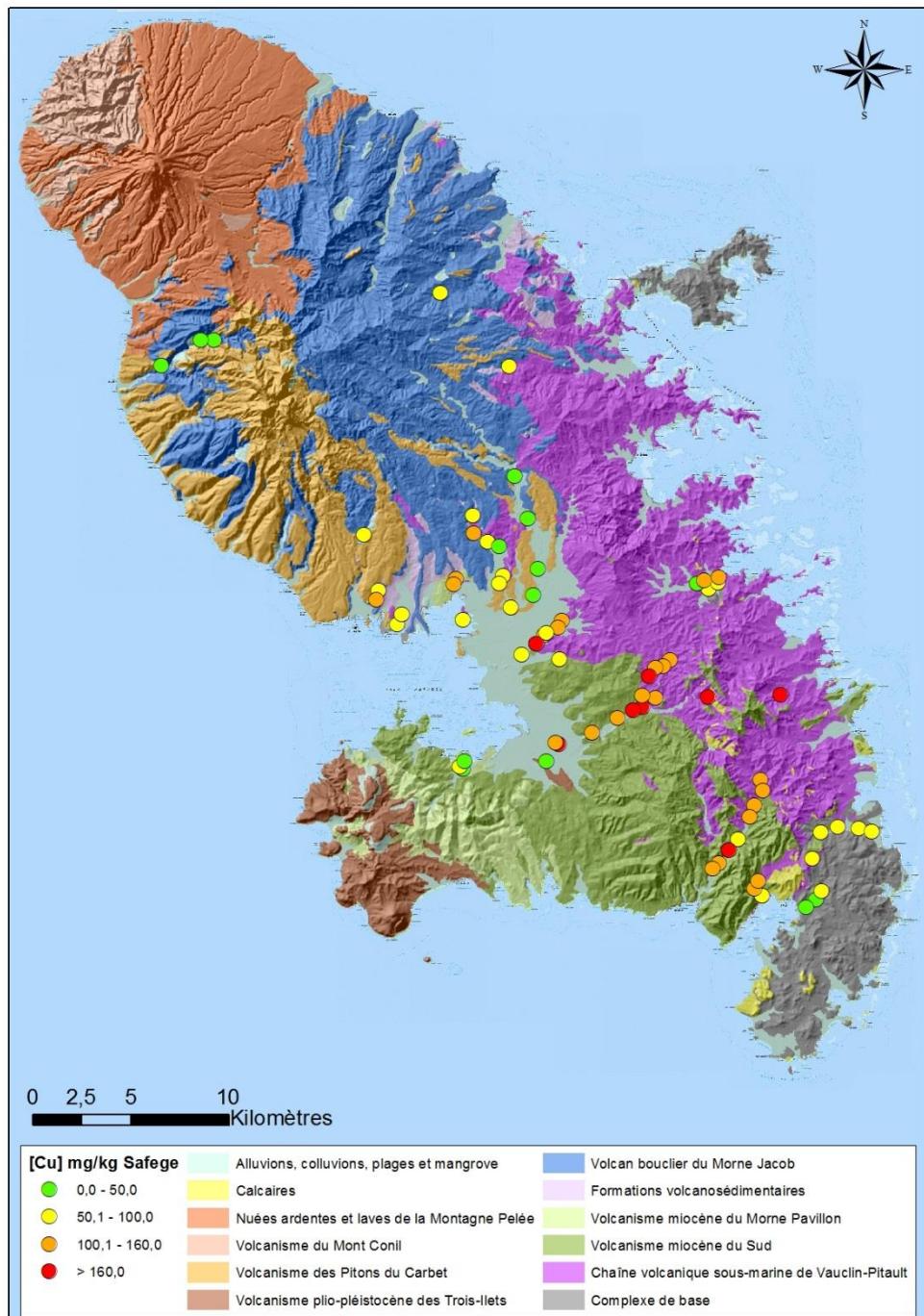


Illustration 12 : Concentrations en Cu des sédiments de rivière (SAFEGE).

Les prélèvements ont été réalisés, depuis la berge (ou un ouvrage hydraulique), à l'aide d'une benne à sédiments ou d'une pelle à main lorsque les sédiments étaient trop grossiers. Un échantillon composite représentatif de chaque station a été constitué, suite au mélange de trois sondages.

Quasiment tout le long du linéaire de la rivière Salée et rivière Pilote, les concentrations en cuivre dépassent la valeur seuil de 100 mg/kg avec un maximum de 219 mg/kg mesuré à la rivière des Coulisses (Rivière Salée).

4.8. ÉTUDES DU FOND HYDROGÉOCHIMIQUE (2013 ET 2017)

L'ODE, la DEAL de Martinique et le BRGM ont mené une étude détaillée du fond hydro géochimique des eaux souterraines (Arnaud et al., 2013) et des eaux de surface (Taïlamé, 2013 ; Taïlamé et Lions, 2017).

Les eaux souterraines n'ont pas montré de risque de fond géochimique élevé en cuivre, néanmoins, au sud de l'île, des valeurs supérieures à 1 µg/L ont été mesurées lors de la campagne de prélèvement au Diamant à la source hydrothermale du Morne Larcher, au forage de Dizac, à Cap Macré au Marin, à Fougainville à Rivière Pilote et à Vatable aux Trois Ilets.

Dans les eaux de surface, les concentrations en cuivre sont présentées dans l'illustration 13 et sont relativement faibles pour les zones Pelée / Conil (en jaune) et Carbet / Jacob (en orange) où aucun dépassement de la norme de qualité environnementale (NQE moyenne annuelle eau douce de surface = 1 µg/L ; NQE provisoire des départements d'outre-mer = 1,4 µg/L – arrêté du 27 juillet 2015) n'est identifié, à l'exception d'anomalies probablement dues à une contamination ponctuelle.

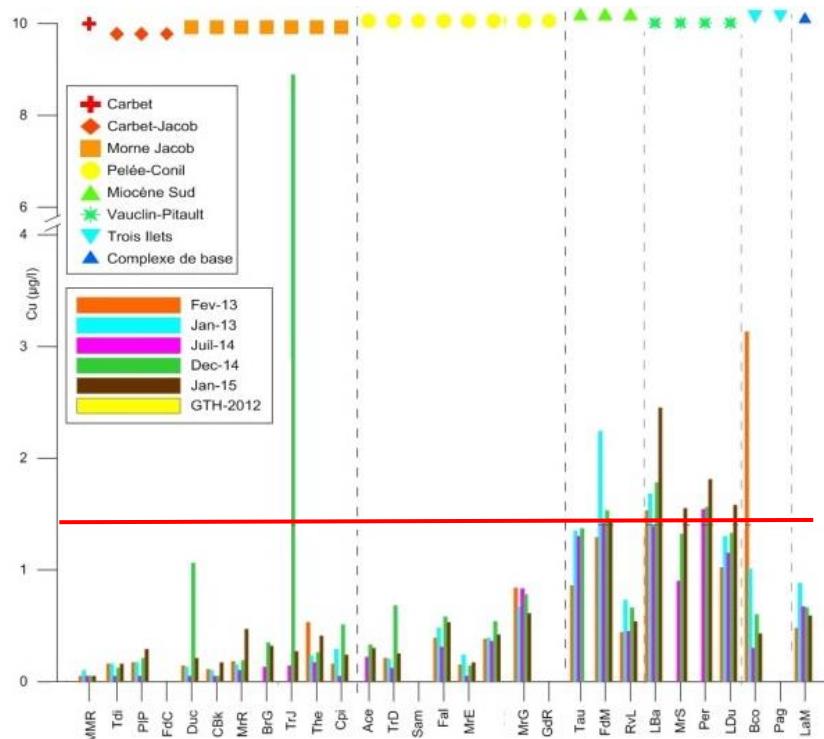


Illustration 13 : Concentrations en cuivre (µg/l) des stations de l'étude du fond hydrogéochimique entre 2012 et 2015 par groupes homogènes (trait rouge : NQE)

En revanche, des concentrations plus fortes sont observées au sud de l'île : Miocène Sud et Vauclin-Pitault (en vert) et Trois Ilets (bleu ciel). Ces valeurs sont homogènes sur le secteur et d'une campagne à l'autre. L'absence de concentrations importantes en cadmium et en zinc écarte l'hypothèse d'un apport anthropique lié aux activités agricoles et laisse supposer une origine naturelle du cuivre.

4.9. APPORTS ANTHROPIQUES

Les recherches bibliographiques n'ont pas permis de trouver suffisamment d'informations sur l'origine anthropique potentielle du cuivre dans les sédiments des rivières de Martinique. Une étude (Pujos et al., 2000) sur l'évolution en métaux lourds des sédiments de la baie de Fort-de-France conclut à un enrichissement due à l'industrialisation de la Martinique par l'essor du rhum et la création de nombreuses plantations de canne à sucre et de distilleries utilisant des matériaux à base de métaux tels que le cuivre. Cette étude se base sur le taux de sédimentation de la baie (calculés à partir des mesures de ^{210}Pb) et montre que les concentrations les plus élevées dans les carottes de sédiments sont à 40 cm et entre 17 et 20 cm et correspondent aux années 1880 et 1940, respectivement.

En 1988, une autre étude par les mêmes auteurs (Pons et al., 1988) sur des sédiments de surface et des carottages jusqu'à 50 cm, indiquait que les concentrations en cuivre étaient homogènes à l'échelle de la baie et étaient proches de celles des altérites.

Thomas et al. (2004) présentent les résultats d'une étude sur le colmatage et les concentrations en métaux lourds en baie du Marin et suggèrent que les fortes concentrations en cuivre dans la partie la plus confinée de la baie et en particulier à l'emplacement de la marina seraient dues aux peintures antifouling des bateaux. En effet, ces dernières sont souvent composées de produits à base de cuivre (d'oxyde cuivreux, d'oxyde cuivrique, de thiocyanate de cuivre, d'acrylate de cuivre, de poudre de cuivre en flocon, d'hydroxyde de cuivre, etc.).

5. Étude statistique

5.1. MÉTHODOLOGIE

Taïlamé et Lions, 2017, ont proposé la méthodologie suivante pour l'étude du fond hydrogéochimique des eaux de surface ;

« *Compte tenu de l'hétérogénéité des milieux géologiques, des gammes de valeurs sont définies plutôt qu'une simple valeur moyenne, afin de servir de valeurs guides. Ces gammes de valeurs peuvent être définies de différentes manières, par exemple en déterminant une moyenne et une déviation standard, la gamme de l'ensemble des valeurs ou en décrivant les valeurs basses et hautes des concentrations après avoir éliminées les concentrations extrêmes.*

La valeur médiane est également utilisée pour comparer les valeurs de fond géochimique de différents aquifères ou différentes régions. Elle est préférée pour comparer différents jeux de données car c'est une valeur plus robuste que la moyenne, étant moins affectée par les valeurs extrêmes. [...]

*Pour définir les valeurs hautes du fond hydrogéochimique, les études relatives au bruit de fond hydro-géochimique aux USA et en Angleterre ont choisi le centile 95. Au niveau européen, les centiles 90 ont été utilisés. Une autre méthode consiste à définir la moyenne + 2 * écart-type (2 σ). Toutes les approches permettent d'éliminer les valeurs extrêmes. Edmunds et Shand (2008) ont travaillé spécifiquement sur les lignes de base sur la qualité des eaux souterraines. Ces auteurs recommandent les percentiles (ou centiles) 95 ou 97,7 (équivalent à la moyenne $\pm 2\sigma$). Ces auteurs recommandent un minimum de 37 échantillons pour appliquer ces calculs en toute rigueur. »*

Dans le cadre de la présente étude, les résultats d'analyse ont fait l'objet d'une analyse statistique descriptive suivant les préconisations présentées ci-dessus. Ainsi, il a été calculé pour chaque groupe homogène :

- Le nombre d'observations : le nombre de données dans le groupe sélectionné ;
- Le minimum : le minimum de la série analysée ;
- Le maximum : le maximum de la série analysée ;
- Le 1^{er} quartile : le premier quartile Q1 est défini comme la valeur telle que 25 % des données lui sont inférieurs ;
- La médiane : la médiane Q2 est telle que 50 % des données lui sont inférieurs ;
- Le 3^{ème} quartile : le troisième quartile Q3 est défini comme la valeur telle que 75 % des données lui sont inférieurs ;
- La moyenne : la moyenne de l'échantillon ;
- L'écart-type : mesure la dispersion des données ;
- La borne inférieure de la moyenne (95 % ou niveau de signification) : cette statistique correspond à la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 % autour de la moyenne ;
- La borne supérieure de la moyenne (95 % ou niveau de signification) : cette statistique correspond à la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % autour de la moyenne.

5.2. RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE SUR LES ROCHEs, ALTÉRITES ET SOLS

L'Illustration 14 présente les résultats de l'analyse statistique des concentrations en cuivre sur roches, altérites ou sols issus de la thèse de Pons (1987) et Escalant (1988) et de l'exploration minière de Jourde (1990).

Les formations géologiques du Vauclin-Pitault présentent une médiane à 124 mg/kg, soit un dépassement de la valeur seuil réglementaire pour 64 % de échantillons. Les résultats les plus élevés dans le groupe Carbet – Jacob (> 160 mg/kg) appartiennent au groupe 2 d'Escalant essentiellement localisés dans le secteur de Fort de France. Le Miocène Sud, malgré un maximum mesuré à 225 mg/kg, l'intervalle de confiance (95 %) est en dessous de 83,2 mg/kg. Les groupes les plus anciens de l'île ont été différenciés, néanmoins la majorité des valeurs sont en dessous de la valeur seuil réglementaire.

Groupe homogène	Nbre analyses	Min	Max	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Ecart-type	Borne inf. (95%)	Borne sup. (95%)
Carbet / Jacob	27	19	172	36	56	92,5	74	46	28	165
Miocène Sud	317	6	225	28	35	62	46	26	23	83
Vauclin-Pitault	39	25	360	78	124	219	139	87	27	279
Complexe de base C	433	10	185	34	45	54	46	21	19	79
Complexe de base SA	17	5	148	45	70	86	69	36	19	118

Illustration 14 : Analyse statistique descriptive du cuivre sur les roches, altérites et sols (en rouge : valeurs > à 100 mg/kg, nombre d'analyses < à 37).

Notons que pour le groupe Pelée / Conil, une unique analyse a été réalisée sur des altérites andésitiques de la Montagne Pelée (Pons et al., 1988) avec une valeur de 17 mg/kg, et pour le groupe Trois Ilets, les dacites du Diamant ont été mesurées à 53 mg/kg alors que les basaltes sous-jacents aux andésites enregistraient une valeur de 377 mg/kg.

Une distinction est réalisée entre les résultats de l'analyses statistique des sédiments de rivière et des supports en place : roches, altérites (altération de la roche) et sols (altération des couches superficielles de la roche mélangée à de la matière organique). En effet, les sédiments sont des matériaux transportés par l'eau de rivière qui proviennent de l'érosion des roches. La concentration en cuivre d'un sédiment peut être différente de celle de la roche appartenant au même secteur géographique car celui-ci peut être représentatif de plusieurs contextes volcaniques.

5.3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE SUR SÉDIMENTS

L'Illustration 15 présente les résultats de l'analyse statistique des concentrations en cuivre sur sédiments issus des bases de données du Réseau de Contrôle de Surveillance de l'ODE (RCS) et de la DEAL (études SAFEGER) ainsi que des données issues de l'exploration minière de Jourde (1990).

Dans le cas des échantillons réalisés sur sédiments de rivières, un mélange issu de plusieurs formations géologiques est possible, le groupe associé a donc été définie en prenant en compte la géologie du lieu de prélèvement mais aussi celle en amont du bassin versant.

Les formations géologiques du Vauclin-Pitault présentent une médiane de 139 mg/kg dépassant ainsi la valeur seuil réglementaire de 100 mg/kg et ce, pour 93 % des résultats. Le groupe Carbet / Jacob présente 4 valeurs (sur 44) dépassant la valeur seuil réglementaire (soit 9 %), parmi

lesquelles 3 prélèvements ont été réalisés en zone particulièrement urbanisée du Lamentin et 1 autre à Fort de France (prélèvement de SAFEGE : Bouille) où des valeurs importantes ont aussi été mesurées dans les roches. Dans ce contexte, ils ne peuvent être considérés comme représentatif d'un fond géochimique.

Groupe homogène	Nbre analyses	Min	Max	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Ecart-type	Borne inf. (95%)	Borne sup. (95%)
Pelée / Conil	10	23	34	28	29	32	29	4	24	34
Carbet / Jacob	44	19	119	46	57	70	59	24	23	113
Miocène Sud	6	25	70	37	52	65	50	19	27	69
Vauclin-Pitault	94	62	219	121	139	153	139	29	94	187
Complexe de base SA	8	37	78	51	59	73	60	15	41	77

Illustration 15 : Analyse statistique descriptive du cuivre sur les sédiments (en rouge : valeurs > à 100 mg/kg, nombre d'analyses < à 37).

L'analyse statistique pour le groupe Trois-Ilets n'a pas été possible car une seule analyse sur sédiments a été réalisé avec une valeur de 107 mg/kg. Il est impossible de conclure sur le risque de fond géochimique du cuivre pour ce groupe.

5.4. CONCLUSION

La boite à moustaches est une représentation graphique des données statistiques permettant de visualiser rapidement l'essentiel d'une série de données (Illustration 16). Les segments horizontaux sont les "pattes" de la boîte, les segments verticaux aux extrémités sont les "moustaches".

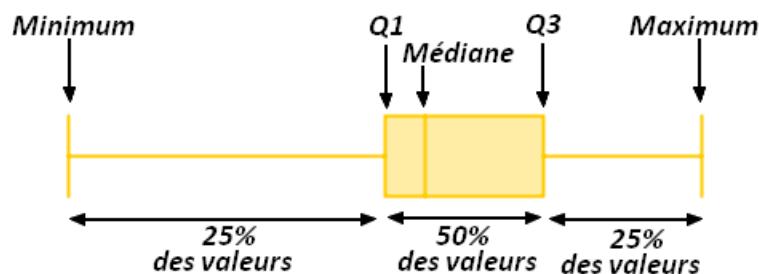


Illustration 16 : Comment lire une boite à moustaches

L'Illustration 17 en une représentation en « boite à moustaches » du tableau présenté en Illustration 15.

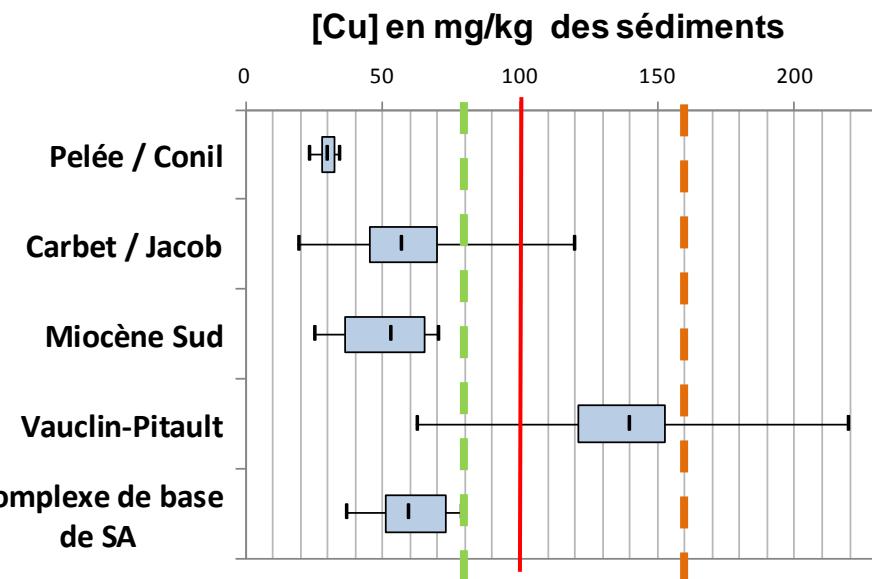


Illustration 17 : Résultats de l'analyse statistique descriptive des sédiments (trait plein : valeur seuil de l'arrêté du 9 août 2006, pointillé : valeurs seuils proposées).

Au regard des résultats de l'analyse statistique sur les roches, altérites, sols et sédiments :

- Il est impossible de conclure pour le groupe Trois-Ilets en raison du peu d'analyses existantes ;
- Il n'existe pas de risque de fond géochimique élevé en cuivre pour les sédiments des groupes Pelée / Conil, Carbet / Jacob, Miocène Sud et Complexe de base de Sainte-Anne et Caravelle. Une valeur de référence est proposée à 80 mg/kg, au-delà de laquelle il faut s'interroger sur l'origine du dépassement de la concentration ;
- Le groupe Vauclin-Pitault présente un risque de fond géochimique naturellement élevé en cuivre avec une valeur médiane de 139 mg/kg et un 3^{ème} quartile à 153 mg/kg. La valeur de référence proposée pour ce contexte géologique est 160 mg/kg.

Toute concentration présentant un dépassement de ces valeurs de référence devra faire l'objet d'une analyse critique et d'une recherche de son origine. Plusieurs causes peuvent impacter des résultats, une contamination ponctuelle de l'échantillon lors du prélèvement, un enrichissement en cuivre dû à de l'hydrothermalisme local, une pollution anthropique....

D'un point de vue réglementaire, la Directive Cadre sur l'Eau autorise la prise en compte des fonds géochimiques en métaux dans le cas où les concentrations mesurées ne sont pas en conformité avec les NQE (EC 2008; MEEDDM 2010b). Dans le cas des sédiments issus des formations du Vauclin-Pitault, une adaptation au contexte local est à envisager afin de se rapprocher au mieux des réalités géologiques, en réhaussant la norme qualité environnementale en cuivre à 160 mg/kg.

6. Conclusion

L'étude bibliographique à l'échelle de la Martinique de l'ensemble des données géologiques et géochimiques des concentrations en cuivre a permis de réaliser une analyse statistique descriptive sur roches, altérites, sols et sédiments ayant pour but de définir les valeurs seuils de fond géochimique élevé permettant ainsi de savoir, par comparaison, si les concentrations en cuivre d'un site sont d'origine naturelle ou anthropique.

Après avoir évoqué les tendances des concentrations en cuivre à l'échelle mondiale, l'ensemble des données de concentrations en cuivre a été analysé à l'échelle de l'île. Les premières données sont issues des recherches d'indices en cuivre réalisées dans les années 70 (Penarroya, 1970 ; Vincent, 1971) avec des analyses dans les communes du Lamentin, Morne Rouge et Trinité connues pour leurs altérations hydrothermales. Dans les années 90, l'exploration minière (Labbé et Jourde, 1990 ; Leduc, 1990) pour la recherche de minéralisations aurifères débute par 22 permis miniers répartis en 5 groupes sur l'île. Leduc a établi un seuil d'anomalie du cuivre à 160 mg/kg à partir des paramètres statistiques élémentaires ainsi que des histogrammes. La poursuite de l'exploration de Jourde révèle des concentrations en cuivre élevées dans les sédiments de rivière du secteur Four à Chaux au Robert (associé aux formations Vauclin-Pitault).

L'origine anthropique des concentrations en cuivre des sédiments de rivière semble difficile à mettre en évidence avec le peu de données recueillies. Il semble que pour les sédiments échantillonnés dans les baies, un impact anthropique dû aux peinture antifouling soit pressenti (Thomas et al., 2004). En ce qui concerne, le rôle des distilleries, il serait nécessaire d'avoir plus de données sur toute la Martinique ; en effet les distilleries ont été historiquement réparties sur l'ensemble de l'île et il ne semble pas y avoir d'impact autre que dans les rivières du sud.

La thèse de Pons (1987) montre un enrichissement global en cuivre dans le sud de l'île marqué au niveau du Vauclin à la Pointe Faula et dans les basaltes du Morne Larcher au Diamant. Escalant (1988) révèle des dépassements dans les formations issues du groupe 2 de la chaîne du Vauclin-Pitault et au niveau de Fort de France.

L'ensemble de ces études, complétées par les données issues des réseaux de surveillance de l'ODE et des données de la DEAL (études SAFEGE) ont permis de constituer une base de données des analyses en cuivre sur les différents supports solides réparties dans toute la Martinique. Les différents résultats ont été rassemblés par contexte géographique et géologique au sein de six groupes, identifiés par les principaux édifices volcaniques de la Martinique : Pelée / Conil, Carbet / Jacob, Miocène Sud, Trois-Ilets, Vauclin-Pitault et Complexe de Base. L'étude statistique descriptive réalisée sur les différents supports (roches/altérites/sols et sédiments) révèle que :

- Le groupe Trois Ilets ne possède pas suffisamment de données en cuivre pour conclure ;
- Les groupes Pelée / Conil, Carbet / Jacob, Miocène Sud et Complexe de base ne présentent pas de risque de fond géochimique élevé en cuivre. En revanche, une valeur de référence est proposée à 80 mg/kg, au-delà de laquelle il faut s'interroger sur l'origine du dépassement de la concentration ;
- Le groupe Vauclin-Pitault présente un fond géochimique naturellement élevé en cuivre. La valeur de référence proposée pour ce contexte géologique est de 160 mg/kg.

Toute concentration présentant un dépassement de ces valeurs de référence devra faire l'objet d'une analyse critique et d'une recherche de son origine. Plusieurs causes peuvent impacter des résultats, une contamination ponctuelle de l'échantillon lors du prélèvement, un enrichissement en cuivre dû à de l'hydrothermalisme local, etc. ou une pollution anthropique.

D'un point de vue réglementaire, la Directive Cadre sur l'Eau autorise la prise en compte des fonds géochimiques en métaux dans le cas où les concentrations mesurées ne sont pas en conformité avec les NQE (EC 2008; MEEDDM 2010b). Dans le cas des sédiments issus des formations du Vauclin-Pitault, une adaptation au contexte local est à envisager afin de se rapprocher au mieux des réalités géologiques, en réhaussant la norme qualité environnementale en cuivre à 160 mg/kg.

7. Bibliographie

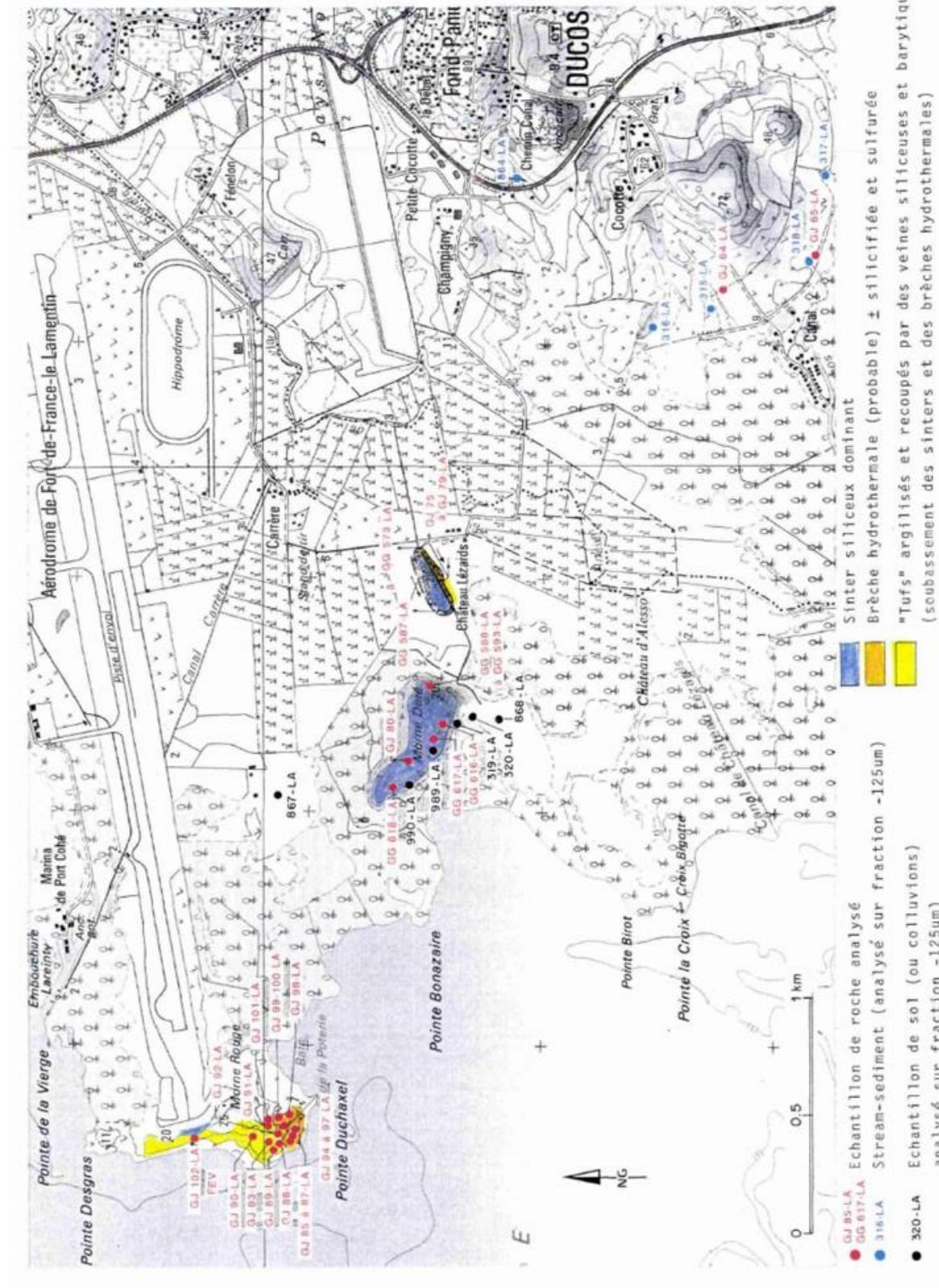
- Arnaud L., Senerques M., Devau N. (2013) - Étude détaillée du fond géochimique des eaux souterraines de Martinique. Rapport BRGM/RP-62886-FR
- Eade, K.E. and Fahrig, W.F. (1973). Regional, lithological and temporal variation in the abundances of some trace elements in the Canadian Shield. *Bulletin of the Geological Survey of Canada* 72-46: 46.
- Escalant M. (1988) Evolution spatiale et chronologique du volcanisme de l'île de la Martinique (Petites Antilles) : implications pétrogénétiques. Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille III, 188p et annexes.
- Edmunds, W. M. and Shand, P. (eds) (2008) *Front Matter*, in *Natural Groundwater Quality*, Blackwell Publishing, Ltd, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444300345.fmatter
- Germa A. (2009) Evolution volcano-tectonique de l'île de la Martinique (arc insulaire des Petites Antilles) : Nouvelles contraintes geochronologiques et geomorphologiques. Thèse de l'Université de Paris XI Orsay, 265 p et annexes.
- Germa A., Quidelleur X., Labanieh S., Chauvel C., Lahitte P. (2011) The volcanic evolution of Martinique Island: Insights from K-Ar dating into the Lesser Antilles arc migration since the Oligocene. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 208, 122–135.
- Gao S., Luo T.-C., Zhang B.-R., Zhang H.-F., Han Y.-W., Hu Y.-K., and Zhao Z.-D. (1998) Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 1959–1975.
- Jourde G. (1991a) Recherche de minéralisations aurifères dans les Petites Antilles Françaises – Compte rendu sommaire d'activité pour les campagnes de terrain 1990 et 1991. Rapport BRGM R 33023, 38 p.
- Jourde G. (1991b) Recherche de minéralisations aurifères dans les Petites Antilles Françaises – Résultats de la seconde phase d'exploration sur la Martinique (février à avril 1991). Etude tactique des prospects de la Caravelle et du Lamentin. Rapport BRGM R 33466, 75 p et annexes.
- Labbé J.F., Jourde G. (1990) Recherche de minéralisations aurifères dans les Petites Antilles Françaises – Résultats de la première phase d'exploration (février à juin 1990). Rapport BRGM R-31092, Volume 1 : Guadeloupe, 79 p ; volume 2 : Martinique, 95 p.
- Leduc C. (1990) Résultats et interprétation de la prospection géochimique en sédiments de ruisseau – BRGM R 31092 DEX-DAM-90.
- Pons J.C. (1987) Genèse et répartition des produits détritiques dans un contexte volcanosédimentaire tropical : exemple de la Martinique et de ses bassins adjacents, Thèse Doct. État, Univ. Bordeaux 1, 332 p.
- Pons J.C., Parra M., Julius C. (1988) Teneurs en métaux lourds des sédiments fins de la baie de Fort-de-France, Martinique, Petites Antilles françaises. *Oceanologica Acta*, vol. 11, n°1, 47-54.

- Pujos M., Pons J.C. et Parra M. (2000). Evolution des métaux lourds dans la sédimentation récente de la baie de fort de France (Martinique). *Oceanologica Acta*, vol 23, 6, 701-715.
- Rudnick R. L. and Fountain D. M. (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Rev. Geophys.* 33(3), 267–309.
- Rudnick R. L. and Presper T. (1990) Geochemistry of intermediate to high-pressure granulites. In *Granulites and Crustal Evolution* (eds. D. Vielzeuf and P. Vidal). Kluwer, Amsterdam, pp. 523–550.
- Rudnick R. L. and Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry*, v. 3 p. 1–64.
- Rudnick, R.L. and Taylor, S.R. (1987) 'The composition and pedogenesis of the lower crust: a xenolith study' *J. Geophys. Res.* 92 13981–14005.
- Shaw, D.M., Reilly, G.A., Muysson, J.R., Pattenden, G.E. and Campbell, F.E. (1967). An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian Shield. *Canadian Journal of Earth Sciences* 4(5): 829-853.
- Shaw D. M., Dostal J., and Keays R. R. (1976) Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 73–83.
- Shaw D.M., Dickin A. P., Li H., McNutt R. H., Schwarcz H. P., and Truscott M. G. (1994) Crustal geochemistry in the Wawa-Foleyet region, Ontario. *Can. J. Earth Sci.* 31(7), 1104–1121.
- Soubrand-Colin M. (2004) Localisation, distribution et mobilité des ETM dans des sols développés sur roches basaltiques en climat tempéré. Thèse de l'Université de Limoges, p 133.
- Taïlamé A.-L. (2013) – Étude du fond géochimique des cours d'eau de Martinique – Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-62943-FR,
- Taïlamé A.-L. et Lions J. (2017) – Étude du fond hydro-géochimique des cours d'eau de Martinique – Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-65257-FR
- Taylor S. R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust—a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 1273–1285.
- Taylor S. R. and McLennan S. M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Taylor S. R. and McLennan S. M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.* 33, 241–265.
- Thomas YF., Feiss C., Saffache P. (2004) Transfert continent-Océan : étude du colmatage et de la concentration en métaux lourds en baie du Marin (Martinique). *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, vol. 59, 93-100.
- Ure A.M., Berrow M.L. (1982). *The Elemental Constituents of Soils in Environmental Chemistry: Volume 2*, pp94-204.

- Vincent P. C. (1971) Rapport sur une mission effectuée en mai 1971 sur les indices de cuivre des Antilles. Rapport BRGM 71 SGN 220 GIT, 17 p et annexes.
- Villaseca C., Downes H., Pin C., and Barbero L. (1999) Nature and composition of the lower continental crust in central Spain and the granulite-granite linkage: inferences from granulitic xenoliths. *J. Petrol.* 40 (10), 1465–1496.
- Wedepohl H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 1217–1239.
- Wedepohl K. H. (1969–1978) *Handbook of Geochemistry*. Springer, Berlin.
- Westercamp, D., Andreieff, P., Bouysse, P., Cottez, S., Battistini, R., 1989. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Martinique – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 246 p.
- Westercamp, D., Pelletier, B., Thibaut, P.M., Trainau, H., Andreieff, P., 1990. Carte géologique de la France (1/50.000), feuille Martinique.

Annexe 1

Localisation des prélèvements et des formations hydrothermales du Lamentin (extrait de Labbé et Jourde, 1990)



Annexe 2

Résultats d'analyses du cuivre (en rouge) des sédiments de rivière (extrait de Labbé et Jourde, 1990)

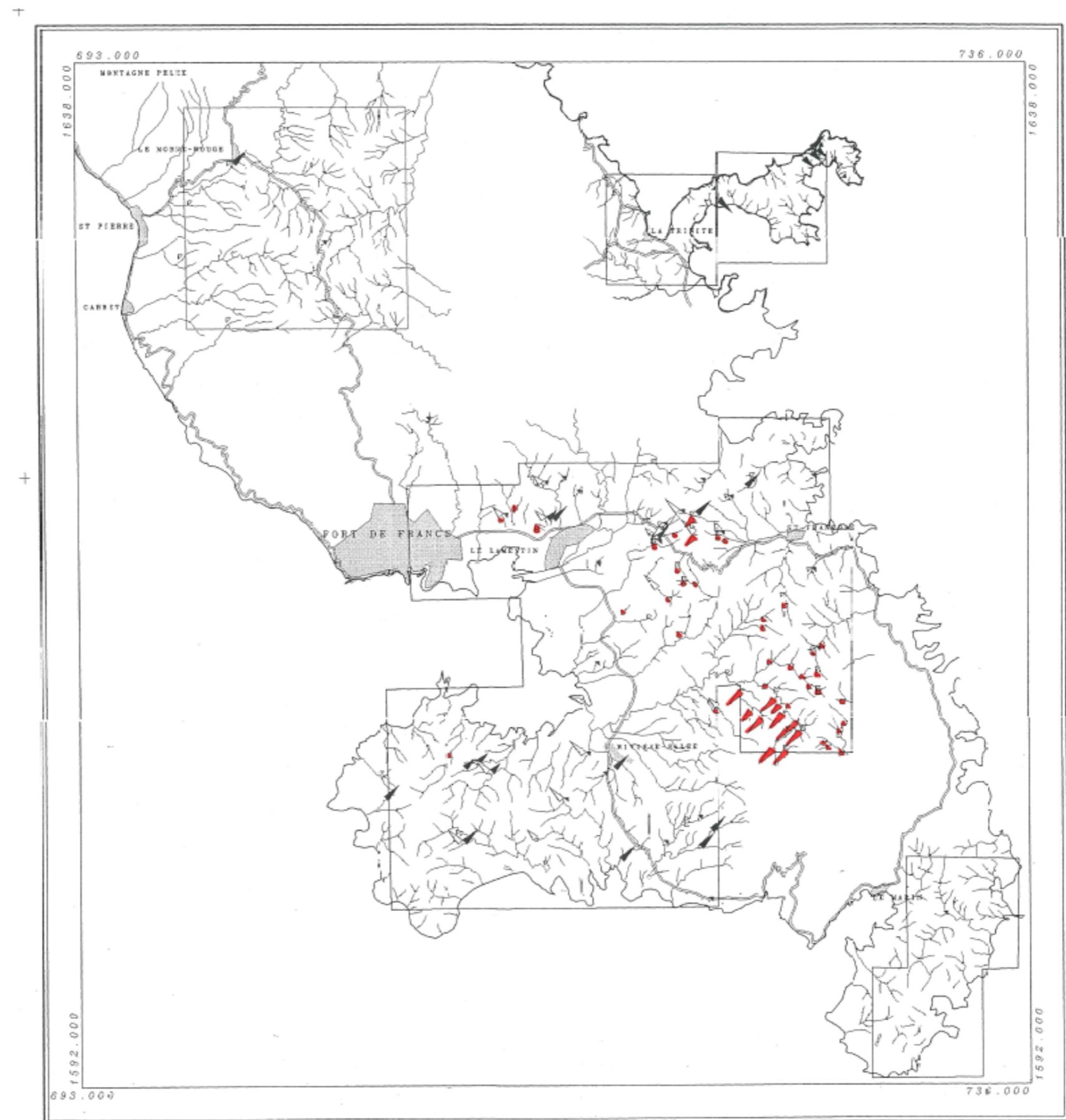


SYNDICAT BRGM-CORONA
PROJET OR MARTINIQUE

GEOCHIMIE STREAM SEDIMENTS

CARTE DES ANOMALIES

DE Pb, Zn, Cu, Ag



Annexe 3

Résultats d'analyses en cuivre issus de la thèse de Pons (1987)

Groupe	Localisation	Cu (mg/kg)	Origine
Carbet / Jacob	Andésite du Morne Jacob	47	Altérites_Pons
Carbet / Jacob	Dacite des Pitons du Carbet	27	Altérites_Pons
Carbet / Jacob	Falaise de Bellefontaine	39	Altérites_Pons
Carbet / Jacob	Tufs du Pliocène de Fort de France	30	Altérites_Pons
Carbet / Jacob	Lahars du morne Jacob	49	Altérites_Pons
Complexe de base Caravelle	Caravelle bois vert	18	Altérites_Pons
Complexe de base Sainte Anne	Basalte Pointe des Salines	111	Altérites_Pons
Miocène	Argile de la poterie des trois Ilets hydrothermalisme	153	Altérites_Pons
Miocène	Trois ilets	35	Altérites_Pons
Miocène Sud	Basalte du Marin	152	Altérites_Pons
Pelée / Conil	Andésite de la montagne Pelée	17	Altérites_Pons
Trois Ilets	Basalte sous Dacite du Diamant	377	Altérites_Pons
Trois Ilets	Dacite du Diamant	53	Altérites_Pons
Vauclin-Pitault	Tufs du Vauclin	42	Altérites_Pons
Vauclin-Pitault	Labradorite du Vauclin	53	Altérites_Pons
Vauclin-Pitault	Basalte de la Pointe Faula	220	Altérites_Pons

Annexe 4

Résultats d'analyses en cuivre issus de la thèse de Escalant (1988)

Groupé	Numéro échantillon	X	Y	Période	Localisation	Cu (mg/kg)	Origine
Carbet / Jacob		709150	1616638	5,5 Ma	Riviere Ducleos	77	Escalant G1
Carbet / Jacob	107	707899	1619728	5,5 Ma	Quartier Tivoli (N Fort de France)	153,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	108	707869	1620144	5,5 Ma	Quartier Tivoli (N Fort de France)	172,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	170	709698	1617810	5,5 Ma	Quartier l'Entraide (Fort de France)	167,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	218	699161	1632087	2,5 Ma	Quartier Morne Etoile (Saint Pierre)	56	Escalant G3
Carbet / Jacob	225	704189	1635150	2,5 Ma	Pied crête du Cournan (Macintosh, alt.500m, Morne Rouge)	122	Escalant G3
Carbet / Jacob	215	698893	1622655	2,5 Ma	Distillerie Fond Laillet (Bellefontaine)	53	Escalant G3
Carbet / Jacob	219	708907	1630095	2,5 Ma	Morne Bellevue (alt.694m, SE Morne Jacob)	56	Escalant G3
Carbet / Jacob	221	699638	1629717	2,5 Ma	S Observatoire Morne des Cadets (alt.380m, Fond Saint Denis)	32	Escalant G3
Carbet / Jacob		720588	1613965	2,5 Ma	Morne Vert	77	Escalant G3
Carbet / Jacob	222	707207	1642064	5,5 Ma	Point Laroche (NE Ajoupa Bouilon)	161	Escalant G3
Carbet / Jacob		700879	1620394	5,5 Ma	Riviere Case Pilote (NE Case Pilote)	89	Escalant G3
Carbet / Jacob	201	707902	1619736	5,5 Ma	Quartier Tivoli Fort de France	96	Escalant G1
Carbet / Jacob	43	701540	1630515	12,5 Ma	Flanc W Morne Lacroix (alt. 400m Fond Saint Denis)	85	Escalant G1
Carbet / Jacob	44	702636	1628812	12,5 Ma	Morne Man Roy (alt. 500m, SE Fond Saint Denis)	114	Escalant G1
Carbet / Jacob	208	706522	1615553	1,9 Ma	Carrière Chapelle ravine Petit Paradis (Bellevue, Fort de France)	30,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	203	708148	1617282	1,9 Ma	Carrière Citron-Trenelle (Fort de France)	35,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	205	707690	1617030	1,9 Ma	Quartier Pont de chaîne (Fort de France)	35,0	Escalant G2
Carbet / Jacob	210	706790	1617810	1,9 Ma	Carrière quartier Fond Didier (N Fort de France)	66	Escalant G3
Carbet / Jacob		706960	1616292	1,9 Ma	Rond Point du Vietnam Hero à que (Fort de France)	84	Escalant G3
Carbet / Jacob		696132	1625170	2 Ma	Pointe Guotony (Carbet)	19	Escalant G3
Carbet / Jacob		706022	1625275		Village Colson (Pitons du Carbet)	37	Escalant G3
Complexe de base Caravelle	51	725651	1633442	32 Ma	Chemin habitation Ferret (alt.100m, presqu'île de la caravelle)	81	Escalant G1
Complexe de base Caravelle	45	726408	1631540	32 Ma	Moulin à vent, anse l'Etang (alt. 100m, presqu'île de la caravelle)	41	Escalant G1
Complexe de base Caravelle	53	725060	1632205	32 Ma	Quartier Morne Pavillon (alt.100m, presqu'île de la caravelle)	20	Escalant G1
Complexe de base Caravelle	50	726069	1631940	16 Ma	chemin habitation Ferret (alt.100m, presqu'île de la Caravelle)	185,0	Escalant G2
Complexe de base Sainte Anne	200	733314	1597249	32 Ma	Point Macre, quartier cap Ferre (presqu'île de Sainte Anne)	30	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	92	733415	1601159	32 Ma	Ancienne distillerie S quartier can chevalier (presqu'île de Sainte Anne)	83	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	115	731122	1592881	19 Ma	Route W Piton Creve côte (alt.60m, presqu'île de Sainte Anne)	52	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	40	731169	1592765	19 Ma	Pointe d'enfer, savance des petrifications	104	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	39	731061	1592971	19 Ma	Pointe d'enfer, savance des petrifications	70	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	127	731817	1595696	19 Ma	Piton Creve côte (sondage)	44	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	126	731680	1596252	19 Ma	Piton Creve côte (sondage)	45	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	37	733512	1600758	19 Ma	Pointe d'enfer, savance des petrifications	57	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	86	731395	1598561	19 Ma	SE habitation Baie des Anglais (alt. 30m)	66	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	87	733511	1600610	19 Ma	SE habitation Baie des Anglais (alt. 30m)	72	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	94	729700	1597035	19 Ma	Route quartier Chamfleury (100m après le pont)	78	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	119	731397	1598326	19 Ma	E quartier Chamfleury (1km après la fin de la route)	22	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	122	731393	1598749	19 Ma	Carrière E le Marin, bord D. 9	5	Escalant G1
Complexe de base Sainte Anne	117	733242	1599241	19 Ma	N quartier fond Repos (alt. 60m)	100,0	Escalant G2
Complexe de base Sainte Anne	199	735927	1601962	19 Ma	Pointe Macre (Sainte Anne)	148,0	Escalant G2
Complexe de base Sainte Anne	123	731444	1604030	10,5 Ma	Route quartier La Mancelle (N quartier Courbaril, N Marin)	86	Escalant G1
Miocène		728262	1598617	10,5 Ma	Marin (Presqu'île de Sainte Anne)	225,0	Escalant G2
Miocène	124	729901	1604110	10,5 Ma	Route quartier Morne Sulpice (N Marin)	183,0	Escalant G2
Miocène		713590	1609360	6,5 Ma	Ilet Gros ilets (N Trois ilets, baie de Fort de France)	6	Escalant G3
Miocène	183	708059	1607930	8Ma	Morne Charles Pied (Anse à l'Ane, W Trois ilets)	101	Escalant G3

Fond géochimique du cuivre en Martinique

Groupé	Numéro échantillon	X	Y	Période	Localisation	Cu (mg/kg)	Origine
Miocène	171	719697	1610369	9 Ma	Carriere quartier Barinton (point cote 212m, S Ducas)	34	Escalant G3
Miocène	172	721098	1610217	9 Ma	Carriere Riviere des Coulisses (point cote 71m, St Esprit)	18	Escalant G3
Miocène	176	722893	1606953	9 Ma	Carriere Morne Massonville (E riviere Salee)	23	Escalant G3
Miocène	177	719740	1607400	9 Ma	Habitation La Digue, Riviere Trenelle (alt. 28m, E riviere Salee)	28	Escalant G3
Miocène	188	726495	1598514	9 Ma	ruines Point Borgnesse (S Riviere Pilote)	20	Escalant G3
Miocène	196	721220	1604169	9 Ma	Quartier des caillles, chemin bord riviere Oman (S quartier Desmarinieres)	122	Escalant G3
Miocène	197	722951	1604305	9 Ma	Quartier grandes fleurs (point cote 188m, S quartier Desmarinieres)	92	Escalant G3
Miocène		722785	1600572	9 Ma	Tranchee autoroute Sainte Luce	13	Escalant G3
Miocène		724281	1600635	9 Ma	Tranchee autoroute Sainte Luce	27	Escalant G3
Miocène		717797	1612511	9 Ma	Carriere quartier Fond Panier (W Ducas)	28	Escalant G3
Vauclin-Pitault	231	725036	1615742	16 Ma	Quartier Morne Courbaril (N fran -ois)	184	Escalant G1
Vauclin-Pitault	191	725045	1615590	16 Ma	Pointe du clapotage (point cote 69m, Ne Robert)	160	Escalant G1
Vauclin-Pitault	185	727174	1615204	16 Ma	N habitation Pointe Savane (point cote 69m, Ne Robert)	92	Escalant G1
Vauclin-Pitault	129	729112	1615442	16 Ma	Carriere habitation Union Dostaly (S Fran -ois)	80	Escalant G1
Vauclin-Pitault		724494	1626186	16 Ma	Carriere S habitation Union Dostaly (S Fran -ois)	89	Escalant G1
Vauclin-Pitault	71	724540	1626957	16 Ma	Carriere habitation des deux Courants (S Fran -ois)	27	Escalant G1
Vauclin-Pitault	70	725103	1619333	16 Ma	Carriere habitation des deux Courants (S Fran -ois)	25	Escalant G1
Vauclin-Pitault	73	729151	1615243	16 Ma	Carriere Bois Soldat (S Fran -ois)	27	Escalant G1
Vauclin-Pitault	71	724540	1626957	16 Ma	Carriere habitation des deux Courants (S Fran -ois)	27	Escalant G1
Vauclin-Pitault	71	724540	1626957	16 Ma	Carriere habitation des deux Courants (S Fran -ois)	27	Escalant G1
Vauclin-Pitault	104	722112	1620667	12,5 Ma	Flanc N Morne Pavillon	100	Escalant G1
Vauclin-Pitault	80	722289	1622161	12,5 Ma	Carriere Pointe Champomont (S Robert)	138	Escalant G1
Vauclin-Pitault	101	723350	1619200	12,5 Ma	Quartier La Monnerot, bord N1	140	Escalant G1
Vauclin-Pitault	103	719309	1619333	12,5 Ma	Qaurtier Sarraut, point cote 201m (NW morne Pitault)	124	Escalant G1
Vauclin-Pitault	79	721116	1617961	12,5 Ma	Carriere SW rhumerie du Robert	80	Escalant G1
Vauclin-Pitault	69	715168	1617641	12,5 Ma	Carriere Morne Dore, distillerie Petit Pre (N Lamentin)	25	Escalant G1
Vauclin-Pitault	228	725128	1619167	14,5 Ma	Habitation Duferret (W Trinite)	102	Escalant G1
Vauclin-Pitault	160	726137	1618080	16 Ma	Carritere Route habitation La Pointe (N Fran -ois)	65,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault		726080	1624673	16 Ma	Ilet -á l'eau (Robert)	161,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	193	733642	1610811	9,5 Ma	N Anse Balahou, Pointe du Vauclin	76,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	194	733812	1611671	9,5 Ma	Pointe du Vauclin (point cote 62m)	132,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault		733988	1611669	9,5 Ma	Pointe du Vauclin (point cote 69, N Vauclin)	237,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	230	728005	1610431	9,5 Ma	Sommet montagne du Vauclin	245,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	77	733615	1608546	9,5 Ma	Pointe Faula	301,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	95	719251	1616896	12,5 Ma	Quartier riviere Cale -on (Bord N6 et riviere Morne Pitault)	218,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	97	720963	1617706	12,5 Ma	Sommet Morne Pavillon (alt.340m)	230,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	96	720957	1617861	12,5 Ma	Sommet Morne Pavillon (alt.340m)	232,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault		728734	1602936	19 Ma	Rocher Zombis, Mare Capron (Riviere Pilote)	225,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	68	715613	1617739	12,5 Ma	Carriere Morne Dore, distillerie Petit Pre (N Lamentin)	107,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault		709616	1615496	12,5 Ma	Quartier de la TSF (Fort de France)	163,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	75	731624	1611018	12,5 Ma	Carriere habitation Benguette (N Vauclin)	103,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	167	728833	1608559	12,5 Ma	S quartier Plaisance, bord D5	207,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	138	731080	1611859	12,5 Ma	Intersection N1 - chemin habitation Sans Souci	225,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	164	728455	1609728	12,5 Ma	Flanc S Montagne du Vauclin, bord route (alt.200m)	276,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	226	716688	1629681	14,5 Ma	Sucrerie Bassignac (W Trinite)	108,0	Escalant G2
Vauclin-Pitault	192	732405	1607200	14,5 Ma	Savane de Paquemar (alt. 140m)	360,0	Escalant G2



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

Direction régionale Martinique
4, lotissement Miramar
Route de Pointe des Nègres
97200 Fort-de-France
Tél. : 0596 71 17 70