







Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau -Guadeloupe

Rapport final

BRGM/RP-56766-FR Juin 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2008 08EAUK02

A. Dumon, E. Bourdon, P. Lachassagne, B. Ladouche

Le Directeur du Service Géologique Régional de Guadeloupe :

J.M. Mompelat

Date: 27/07/2009

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





Mote alás : hydrogáalogia, hassin varsant. Párou Guadalouna, produits phytosanitaires
Mots clés : hydrogéologie, bassin versant, Pérou, Guadeloupe, produits phytosanitaires En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Dumon A., Bourdon E., Lachassagne P., Ladouche B. (2009) — Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe. BRGM/RP-56766-FR. 89 p., 38 ill., 3 ann.
© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La DIREN Guadeloupe a sollicité le Brgm, dans le cadre de ses actions de Service Public (fiche SP 08EAUK02), en vue de réaliser une étude hydrogéologique du bassin versant pilote de la rivière Pérou (commune de Capesterre-Belle-Eau), avec pour objectif de proposer un réseau de surveillance qualitatif des eaux souterraines. Ce réseau doit permettre d'évaluer l'impact des actions de réduction des rejets de produits phytosanitaires dans le milieu naturel menées par le GREPP sur ce bassin versant.

Cette étude, financée dans le cadre de l'avenant n^o à la convention nationale ONEMA-Brgm 2008-2009, a consisté en :

- une synthèse des données existantes sur le secteur étudié ;
- des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain (identifications des formations présentes, localisation de sources et contexte d'émergence, mesures physico-chimiques in situ, évaluation de débits, ...), le long de la rivière Pérou et de ses principaux affluents, des rivières des Pères, Saint-Denis, du Grand Carbet et de la ravine Dumanoir;
- une caractérisation hydrochimique des principales rivières et sources du secteur étudié (analyse des éléments majeurs, de certains éléments traces, de composés azotés et de pesticides par le laboratoire MMA (Métrologie, Monitoring, Analyse) du Brgm sur huit prélèvements d'eau).

Ces travaux ont permis de définir un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement des unités hydrogéologiques du secteur étudié. Quatre unités hydrogéologiques ont été identifiées: les laves massives de la Montagne de Capesterre (UH1) peu perméables associées à la rivière Pérou, les nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2) alimentant les rivières des Pères et St-Denis, les formations des lahars-coulées de débris (UH3) au sein desquelles des sources à faible débits ont été localisées, et les nuées ardentes du Grand Carbet (UH4) alimentant vraisemblablement la ravine Dumanoir et la rivière du Grand Carbet.

Au regard des conclusions de cette étude, à savoir une contribution faible des eaux souterraines à l'écoulement de la rivière Pérou, la définition de points de surveillance de la qualité des eaux souterraines représentatifs du bassin hydrogéologique de cette rivière n'est pas envisageable, et apparaît même peu pertinente. La présence d'eau souterraine profonde sur ce bassin versant, sans lien hydraulique avec la rivière Pérou, n'est cependant pas à exclure. Un forage de reconnaissance peut être envisagé au droit des parcelles « tests » afin de mettre en évidence une ressource profonde éventuelle et d'acquérir des connaissances sur la qualité de ces eaux souterraines.

Les résultats de cette étude permettront cependant d'une part d'améliorer la connaissance hydrogéologique du Sud de la Basse-Terre, et d'autre part de compléter le diagnostic du bassin versant réalisé par le GREPP (diagnostic CORPEN), sur le volet concernant les eaux souterraines.

Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe

Sommaire

1.	Introduction	9
2.	Synthèse des données disponibles	11
	2.1. CONTEXTE PHYSIQUE	11
	2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	15
	2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	19
3.	Caractérisation géologique et hydrogéologique de terrain	23
	3.1. PROGRAMME DES RECONNAISSANCES DE TERRAIN	23
	3.2. STRUCTURE GEOLOGIQUE 3.2.1. Description des formations présentes. 3.2.2. Carte géologique du secteur d'étude	27
	3.3. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE 3.3.1. Caractérisation des principales sources localisées 3.3.2. Mesures physico-chimiques en rivières 3.3.3. Détermination des débits spécifiques d'étiage	41 46
	3.4. PREMIER MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE	55
4.	Caractérisation hydrochimique	61
	4.1. METHODOLOGIE	61
	4.2. INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES	65
5.	Synthèse hydrogéologique	79
6.	Proposition d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines	85

7. Conclusion	87
8. Bibliographie	89
Liste des illustrations	
Illustration 1 : localisation du bassin versant de la rivière Pérou (fond carte IGN n°4605 GT, 2002 et BD Carthage)	13
Illustration 2 : carte des pentes du secteur de Capesterre-Belle-Eau (traitement du MNT 50 - IGN)	14
Illustration 3 : géologie du bassin versant de la rivière Pérou (d'après la carte géologique BRGM, 1966)- Légende en annexe 1	17
Illustration 4 : géologie du bassin versant de la rivière Pérou (d'après la carte géologique du massif de la Soufrière IPGP-BRGM, 1989)- Légende en annexe 2	18
Illustration 5 : schéma conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le site de Féfé (Charlier, 2007)	21
Illustration 6 : itinéraires parcourus sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (fond carte IGN 4605 GT, 2002 et BD Carthage)	25
Illustration 7 : alluvions dans le lit de la rivière du Grand Carbet (blocs centimétriques à plurimétriques de compositions très hétérogènes)	28
Illustration 8 : exemple d'altération dans les formations superficielles au nord immédiat de la Rivière Pérou. Le substratum est constitué essentiellement d'argiles et d'oxydes de fer et d'aluminium. Il s'est formé aux dépends de laves massive ou des coulées de débris.	29
Illustration 9 : les laves andésitiques à plagioclase et pyroxène de la Montagne de Capesterre dans leur forme massive, parcourues par des fractures subverticales acquises lors du refroidissement de la lave	30
Illustration 10 : les laves andésitiques de la Montagne de Capesterre avec un débit en plaquette sub-horizontal hérité du fluage plastique de la lave lors de son refroidissement lent.	31
Illustration 11 : exemple de dépôts de coulées de débris dans la rivière Pérou présentant un reste de tronc d'arbre (au ras de l'eau) et au-dessus, une cavité profonde probablement issue de la disparition d'un autre tronc. La bouteille de cola dans la cavité donne l'échelle	33
Illustration 12: les dépôts de lahars sur la côte de Capesterre. Observer la nature extrêmement hétérogène des blocs arrondis dans la matrice argileuse très indurée	34
Illustration 13 : les dépôts pyroclastiques de Féfé. A gauche, les "block-and-ash flow" constitués de blocs anguleux (taille environ 40 cm de diamètre) dans une matrice cendreuse de teinte rose. A droite, les dépôts de nuées ardentes plus fins (observer le litage du dépôt au-dessus du marteau) reposant directement sur les dépôts de lahars	35
Illustration 14 : à gauche, les dépôts de nuées ardentes des Petites Mamelles (rivière des Pères) constitués de blocs d'andésite anguleux dans une matrice cendreuse	

relativement indurée. A droite, les coulees de debris/lahars constituées de blocs de compositions très hétérogènes, souvent arrondis dans une matrice argileuses très résistante (également dans le fond de la rivière des Pères)	37
Illustration 15: les dépôts pyroclastiques du Grand Carbet. A gauche, proche de l'embouchure du Grand Carbet, un ensemble de 2 dépôts séparés par une fine couche de cendres grises relativement fraîche. Le dépôt inférieur présente un profil d'altération net. Le dépôt supérieur est plus frais et montre des blocs décimétriques à métriques dans une matrice cendreuse. L'ensemble est recouvert par une coulée de ponces (peu visible sur la photo). A droite, les dépôts supérieurs du Grand Carbet plus riches en cendres et présentant un litage et un grano-classement remarquables	38
Illustration 16 : carte géologique du secteur de Capesterre-Belle-Eau (réalisée sur la base des reconnaissances de terrain)	39
Illustration 17 : localisation des sources sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (carte IGN n°4605 GT, 2002 et BD Carthage)	43
Illustration 18 : caractéristiques des sources identifiées sur le secteur de Capesterre- Belle-Eau	44
Illustration 19 : photo de la source Pérou (dans le bourg de Capesterre-Belle-Eau)	45
Illustration 20 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant de la rivière Pérou (21 – 24 avril 2008)	46
Illustration 21 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant des rivières Des Pères et Saint-Denis (21 – 24 avril 2008)	48
Illustration 22 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant de la rivière du Grand Carbet (21 – 24 avril 2008)	49
Illustration 23 : courbe de conductivité en fonction du temps sur la rivière sans nom (jaugeage au sel – 22 avril 2008)	50
Illustration 24 : localisation des débits estimés sur le terrain (fond carte IGN 4605 GT et BD Carthage)	53
Illustration 25 : débits spécifiques d'étiage des rivières du secteur de Capesterre-Belle -Eau (calculés à partir des débits estimés sur le terrain du 21 au 24 avril 2008)	54
Illustration 26 : premier modèle conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (réalisé à partir des observations de terrain)	57
Illustration 27 : localisation des points de prélèvements d'eau souterraine et de surface sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (fond carte IGN 4605 GT,2002 et BD Carthage)	63
Illustration 28 : éléments majeurs et traces analysées sur les prélèvements d'eau souterrraine et de surface du secteur d'étude	67
Illustration 29 : diagramme de Piper des eaux souterraines et de surface prélevées sur le secteur d'étude	70
Illustration 30 : évolution des teneurs en nitrate en fonction des teneurs en chlorure	71
Illustration 31 : calcul de la signature géochimique des eaux de la rivière St-Denis en amont de la confluence avec la rivière des Pères	72
Illustration 32 : évolution des teneurs en chlordécone en fonction des teneurs en	70

Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe

Illustration 33 : évolution des teneurs en Chlordécone 5b-Hydro en fonction des teneurs en Chlordécone
Illustration 34 : évolution des teneurs en magnésium en fonction des teneurs en chlorure
Illustration 35 : évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en magnésium 76
Illustration 36 : évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en silice76
Illustration 37 : calcul de la signature géochimique global du pôle eau souterraine qui contribue à l'alimentation des rivières Des Pères et de St-Denis entre l'amont et l'aval
Illustration 38 : carte synthétique des bassins versants topographiques et des unités hydrogéologiques du secteur de Capesterre-Belle-Eau83
Liste des annexes
Annexe 1 Légende de la carte géologique de la Basse-Terre (BRGM,1966)91
Annexe 2 Légende de la carte géologique du massif de la Soufrière (IPGP-BRGM, 1989)95
Annexe 3 Résultats des analyses d'eaux souterraines et de surface

1. Introduction

La pollution des eaux par les produits phytosanitaires est un problème chronique en Guadeloupe. Le Sud de la Basse-Terre, zone stratégique d'alimentation en eau potable, est particulièrement touché par ces pollutions d'origine agricole. Cependant, le fonctionnement hydrogéologique de l'île de la Basse-Terre est mal connu, notamment parce que l'organisation des unités volcaniques constitutives de l'île est complexe et que les données géologiques disponibles ne permettent pas une bonne compréhension de ces structures. De plus, la majorité des études menées ont eu pour objectif de désigner localement des cibles de prospection en vue d'une exploitation directe de la ressource en eau. La structure et le fonctionnement global des systèmes aquifères de la Basse-Terre n'ont donc jamais été décrits. Par conséquent, les mécanismes de transfert des pollutions par les produits phytosanitaires sont difficiles à étudier, et la vulnérabilité des eaux souterraines très mal connue.

Le groupe de travail « bassin versant » du GREPP, piloté par la DIREN Guadeloupe, a décidé de mettre en œuvre des actions visant à réduire les rejets de produits phytosanitaires dans le milieu naturel sur le bassin versant expérimental de la rivière Pérou situé sur le territoire communal de Capesterre-Belle-Eau.

La DIREN Guadeloupe a sollicité le Brgm, dans le cadre de ses actions de Service Public (fiche SP 08EAUK02), en vue de réaliser une étude hydrogéologique du bassin versant pilote de la rivière Pérou, avec pour objectif de proposer un réseau de surveillance qualitatif des eaux souterraines. Ce réseau doit permettre d'évaluer l'impact des actions menées par le GREPP sur ce bassin versant.

Cette étude intéresse le plan d'action chlordécone en Guadeloupe 2008-2010, action 8 : «poursuivre les études sur les transferts sol-eau et en tirer des prévisions sur la dynamique de la pollution pour les zones à enjeux et pour les milieux aquatiques ». Elle est financée dans le cadre de l'avenant n°3 à la convention nationale 2008-2009 sur la connaissance, le suivi et la gestion des eaux souterraines signée entre l'ONEMA et le Brgm. Elle consiste en :

- un recueil et une synthèse des données bibliographiques et cartographiques disponibles sur le secteur du bassin versant de la rivière Pérou ;
- des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain le long de la rivière Pérou et de ses principaux affluents, et des rivières des Péres, Saint-Denis et du Grand Carbet en vue de proposer un schéma conceptuel du secteur:
- des prélèvements d'eau souterraine et de surface sur le secteur d'étude afin de valider ou de réviser les hypothèses de terrain par une approche hydrochimique;
- la définition de points de surveillance de la qualité des eaux souterraines sur le bassin versant de la rivière Pérou.

2. Synthèse des données disponibles

2.1. CONTEXTE PHYSIQUE

La rivière Pérou est située sur la commune de Capesterre-Belle-Eau dans le sud de la Basse-Terre. Son bassin versant s'étire sur une superficie de 12,8 km² d'est en ouest sur le flanc oriental du massif volcanique de la Soufrière (Illustration 1), et présente de fortes pentes de 20 à 50 % (cf. Illustration 2).

La rivière Pérou est un affluent de la Grande Rivière de Capesterre. Ces deux rivières prennent leur source au niveau des massifs de Carmichaël et de la Grande Découverte.

D'après la carte pédologique au 1/50 000 de la Basse-Terre (INRA, 1969), et les observations de terrain du CIRAD (février 2008), la partie amont du bassin versant est composée d'andosols (sols à allophanes), et la partie aval de nitisols (sols bruns rouille à halloysites).

Le Parc National de Guadeloupe occupe 7,3 km² en amont de ce bassin versant. La surface agricole utile est de 3,3 km² dont 73 % est cultivée. Les cultures se répartissent en 158 ha de bananes, 61 ha de canne à sucre et moins de 10 ha de cultures diverses (ignames et tubercules, ananas, fleurs, plantes aromatiques, agrumes).

Les caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière Pérou sont détaillées dans le diagnostic CORPEN réalisé par la DIREN et le CIRAD en septembre 2007.

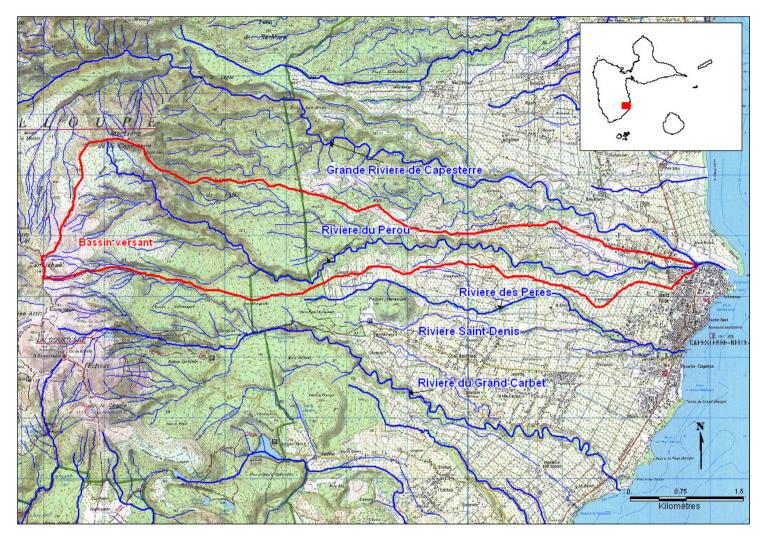


Illustration 1 : localisation du bassin versant de la rivière Pérou (fond carte IGN n 4605 GT, 2002 et BD Carthage)

13

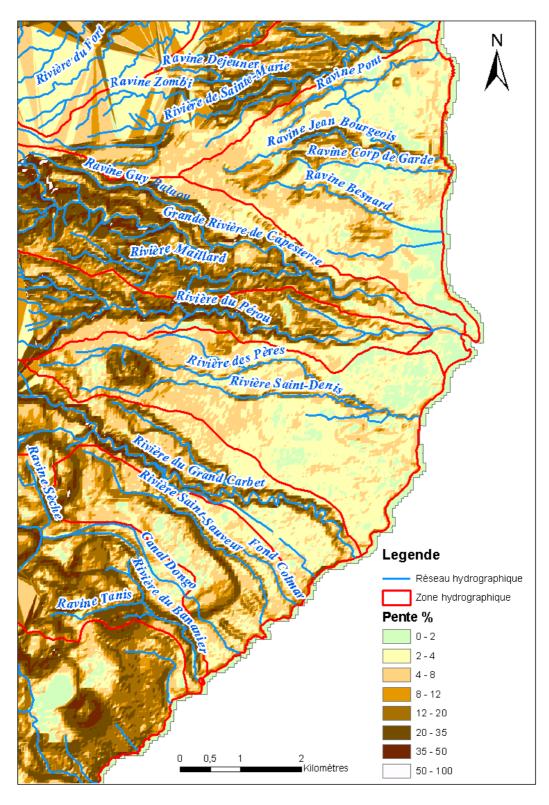


Illustration 2 : carte des pentes du secteur de Capesterre-Belle-Eau (traitement du MNT 50 - IGN)

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique au 1/50 000 de la Basse-Terre (BRGM, 1966), le bassin versant de la rivière Pérou comporterait les formations suivantes (Illustration 3 et légende en annexe 1) :

- a: alluvions des rivières ;
- Q_{αb} : brèches andésitiques des volcans à coupole inversée quaternaires ;
- P_{αb}: brèches andésitiques pliocènes ;
- p_{ol}: lapillis et ponces dacitiques pliocènes ;
- I : complexe volcanique antémiocène.

Cette carte géologique datant de 1966 n'est pas fiable et elle est amenée à être révisée. La partie sud Basse-Terre a été détaillée en 1988 lors de la réalisation de la carte géologique du massif de la Soufrière au 1/20 000 (IPGP-BRGM). D'après cette carte, le bassin versant de la rivière Pérou comporte les formations suivantes (Illustration 4 et légende en annexe 2) :

- F: alluvions;
- **G3**: coulées massives superposées d'andésite sombre à deux pyroxènes (phase Grande Découverte);
- HαX3 : hyaloclastites et nuée ardente de nature andésitique (volcanisme de la chaîne de Bouillante);
- LhX1 : lahar ou coulée de débris (volcanisme de la Chaîne Axiale) ;
- **X1** : coulées massives d'andésite sombre à deux pyroxènes (volcanisme de la Chaîne Axiale).

Le bassin versant de la rivière Pérou est situé en limite de la carte géologique du massif de la Soufrière. Les reconnaissances géologiques de terrain permettront d'une part de compléter et de préciser les formations cartographiées sur cette carte datant de 1988, et d'autre part d'actualiser les informations de la carte réalisée en 1966.

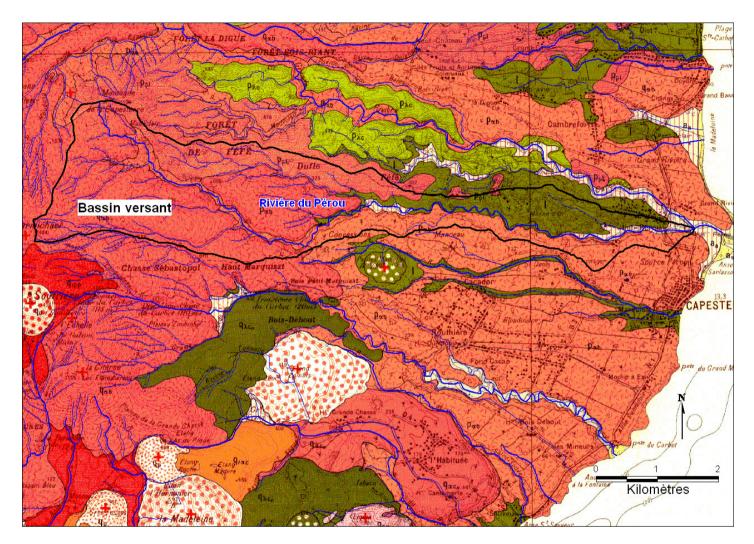


Illustration 3 : géologie du bassin versant de la rivière Pérou (d'après la carte géologique BRGM, 1966)- Légende en annexe 1

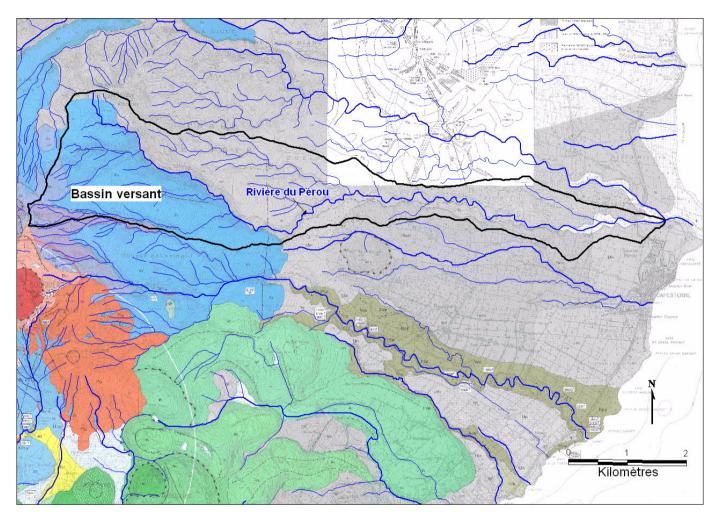


Illustration 4 : géologie du bassin versant de la rivière Pérou (d'après la carte géologique du massif de la Soufrière IPGP-BRGM, 1989)-Légende en annexe 2

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.3.1. Synthèse des rapports Brgm (1990)

Des études hydrogéologiques ont été réalisées par le Brgm dans les années 1990, dans le cadre de recherche en eau souterraine dans le sud de la Basse-Terre (cf. liste bibliographique du chapitre 7). Ces études ont permis de caractériser, d'un point de vue hydrogéologique, quatre types de formation volcanique :

- les coulées de laves (et les hyaloclastites) qui peuvent présenter une perméabilité de fissures. En raison du comportement mécanique rigide des laves massives, la seule perméabilité qui peut se développer est une perméabilité de fissures (fissuration primaire liée au refroidissement de la lave débit en plaquettes à la base de la coulée et en prismation ou débit en plaques en formes de tourbillon à l'avancée, et fissuration secondaire résultant des contraintes tectoniques). Les hyaloclastites présentent une faible perméabilité intrinsèque liée à une porosité d'interstices limitée. Des coulées de lave interstratifiées, et une fracturation d'origine tectonique peuvent leur conférer localement des propriétés aquifères. Les temps de transfert dans ces aquifères sont rapides et il y a peu de filtration, d'où une vulnérabilité vis-à-vis de la qualité des eaux souterraines ;
- les formations pyroclastiques (coulées de ponces, nuées ardentes et dépôts pliniens) et alluviales qui peuvent présenter une perméabilité d'interstices. Les coulées de ponces présentent de fortes porosités mais un faible pouvoir transmissif excepté si des niveaux plus grossiers jouent le rôle de drains. Les nuées ardentes offrent de fortes perméabilités d'interstices et s'altèrent lentement, mais constituent des réservoirs peu capacitifs car d'extension limitée (fonds de vallées). Les dépôts pliniens présentent de bonnes perméabilités d'interstices dans les niveaux grossiers, mais s'altèrent rapidement : oxydation à l'air libre, et malgré leur forte extension spatiale ont une faible épaisseur (réservoirs limités). Ces formations non compétentes ne développent pas de perméabilité de fissures liée à la tectonique ;
- les coulées de débris sont très hétérogènes, les blocs hydrothermalisés sont peu perméables, mais les niveaux détritiques plus grossiers ont une bonne perméabilité. Ces formations peuvent développer à grande échelle une perméabilité de fissures liée à la tectonique :
- les lahars, d'extension limitée au fond des vallées, constituent des formations peu perméables et jouent généralement le rôle d'imperméables locaux.

Le comportement des roches volcaniques est complexe et anisotrope. Il faut, outre les propriétés hydrogéologiques primaires, tenir compte de trois facteurs :

- l'altération climatique (ou supergène), très active en milieu tropical chaud et humide :
- l'altération hydrothermale (ou endogène), liée à l'activité actuelle ou passée du volcan de la Soufrière;

- la tectonique active (principalement dans les formations compétentes : laves massives).

L'altération supergène, associée localement à l'altération endogène induit la perte des perméabilités d'interstices et le colmatage des fractures. Dans les formations compétentes, seule l'activité tectonique en réactivant les fractures maintient l'ouverture de certaines d'entre elles, autorisant alors circulations et stockages.

2.3.2. Apports de la thèse de Charlier sur le bassin versant Féfé (2007)

La thèse de Jean-Baptiste Charlier (2007) réalisée au CIRAD Guadeloupe, et coencadrée par le Brgm sur les aspects hydrogéologiques et hydrochimiques, porte sur l'étude du fonctionnement et la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical. Le bassin versant étudié est celui de la ravine Féfé, d'une superficie de 17,8 ha, qui est situé dans la partie amont du bassin versant de la rivière Pérou.

Les reconnaissances géologiques effectuées sur ce bassin versant (observations de terrain, interprétation des sondages carottés et destructifs) ont permis d'identifier et de caractériser cinq principaux types de formations géologiques :

- des brèches volcaniques très altérées (argiles compactes);
- une superposition de trois coulées de laves fissurées et peu altérées, présentant des alluvions et des cendres inter-stratifiées mises en place dans des paléovallées;
- des coulées pyroclastiques de type nuées ardentes formant le sol du plateau de Pérou ;
- des lahars :
- des dépôts pyroclastiques récents (volcanisme de la Chaîne de Bouillante ou de la Soufrière) lapillis ponceux, en partie altérés et inter-stratifiés avec des niveaux de cendres indurés, qui recouvrent la majorité du secteur sur une épaisseur de 5 à 9 mètres.

Des sources ont été localisées à l'interface brèches altérées et nuées ardentes avec un débit total de l'ordre de 0,1 m³/s en carême, ainsi que des sources à faibles débits (de l'ordre de 5 l/s) localisées dans les lapillis et les laves. Ces dernières présentent des débits croissants vers l'aval.

Sur la base de ces reconnaissances de terrain, un schéma conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le secteur étudié de Féfé a été proposé (cf. Illustration 5).

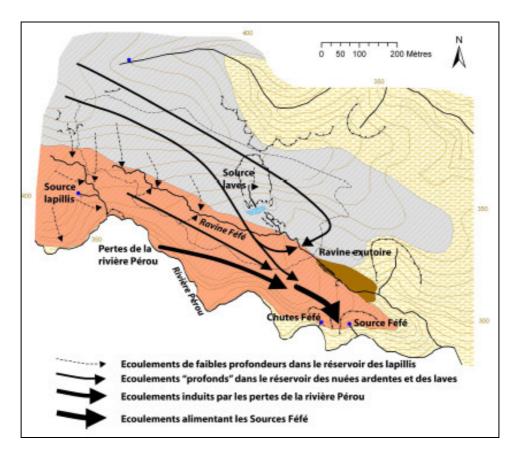


Illustration 5 : schéma conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le site de Féfé (Charlier, 2007)

Le site de Féfé a été instrumenté pour un suivi de la pluie, du débit de la ravine Féfé et de la piézométrie (nappe superficielle et nappe profonde). Des tests hydrauliques ont été effectués dans les piézomètres, et ont permis d'estimer les paramètres hydrodynamiques des formations recoupées :

- les **lapillis** présentent des perméabilités de 5.10⁻⁶ à 5.10⁻⁵ m/s ;
- les **nuées ardentes** présentent des perméabilités de 1,5.10⁻⁷ à 2,2.10⁻⁵ m/s :
- les laves interstratifiées avec alluvions présentent des perméabilités de 7,2.10⁻⁷ à 5,9.10⁻⁶ m/s;
- les **brèches argilisées** présentent des perméabilités de 2,2.10⁻⁷ à 4,5.10⁻⁷ m/s.

Ce suivi quantitatif réalisé sur une année (2003) a permis d'établir un bilan hydrologique du bassin versant de Féfé. Les précipitations sur le secteur d'étude sont de 4 229 mm/an, l'évapotranspiration représente 31 % de la pluie, le ruissellement hortonien est prédominant (27 % de la pluie), la recharge de la nappe superficielle est quasi-nulle, et la recharge de la nappe profonde est importante (42 % de la pluie).

L'analyse des fluctuations piézométriques a permis, par ailleurs, de caractériser la réactivité aux précipitations des aquifères traversés :

 réaction rapide dans les lapillis qui seraient influencés par des écoulements de subsurface; Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe

- réactions lentes dans les nuées ardentes et les laves traduisant un effet tampon et retardé;
- réactions bimodales dans les aquifères compartimentés (lapillis et nuées/laves),
 le compartiment profond serait relativement bien isolé des influences de surface.

Une modélisation hydrologique a été réalisée sur le bassin versant de Féfé à l'aide du modèle distribué MHYDAS. Cette modélisation tient compte du ruissellement (onde diffusante), des échanges nappe-fossé (loi Darcy), de la nappe superficielle, et de la redistribution de la pluie par la plante (stemflow du bananier). Les écoulements souterrains profonds, et le transfert de pesticides n'ont pas été simulés dans ce modèle.

3. Caractérisation géologique et hydrogéologique de terrain

3.1. PROGRAMME DES RECONNAISSANCES DE TERRAIN

Les relevés de terrain étaient initialement prévus sur la rivière Pérou et ses principaux affluents. Après les premières reconnaissances de terrain le long de la rivière Pérou, il s'est avéré nécessaire, pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur, d'étendre les prospections aux rivières Des Pères, Saint-Denis et du Grand Carbet situées au sud du bassin versant de Pérou. Les sources repérées au niveau du bourg de Capesterre-Belle-Eau, sources Pérou et Marigot, ont également fait l'objet de relevés de terrain. La carte des itinéraires parcourus est donnée en Illustration 6.

Ces reconnaissances de terrain, effectuées en avril et en juin 2008 pendant le carême (période de soutien des cours d'eau par les eaux souterraines), ont consisté en :

- des levers géologiques et hydrogéologiques conjoints le long des rivières et de leurs principaux affluents;
- l'identification des principales sources avec la réalisation de mesures physicochimiques in-situ (conductivité, température, etc.), l'évaluation de leur débit et la détermination de leur contexte d'émergence;
- l'appréciation des relations nappe rivière sur la base d'évaluations du débit des cours d'eau de l'amont vers l'aval et de mesures physico-chimiques in-situ (conductivité, température, etc.).

La conductivité reflète globalement la minéralisation d'une eau. Ces profils permettent de détecter des apports souterrains susceptibles de modifier les caractéristiques chimiques des eaux de surface par des anomalies dans les valeurs de conductivité et de température mesurées.

Les sources sont les meilleurs indices de surface permettant de mettre en évidence la présence d'eau souterraine sur un secteur. L'inventaire de ces sources et la caractérisation de leur contexte d'émergence permettent d'identifier les formations ayant un bon potentiel aquifère.

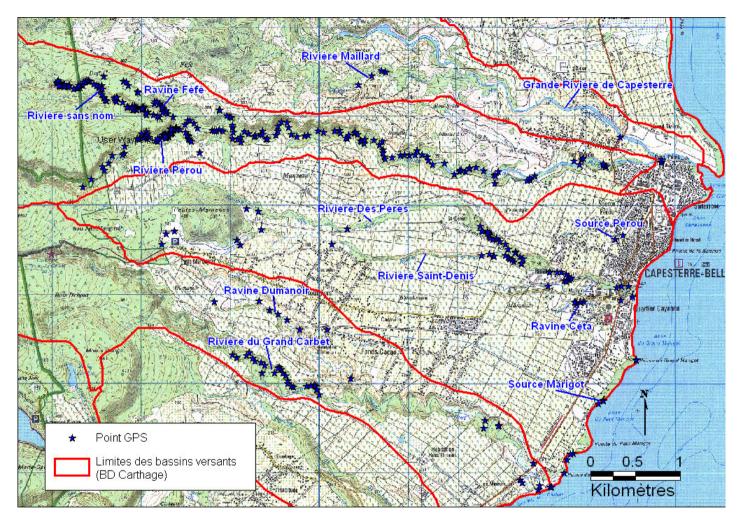


Illustration 6 : itinéraires parcourus sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (fond carte IGN 4605 GT, 2002 et BD Carthage)

Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau - Guadeloupe

3.2. STRUCTURE GEOLOGIQUE

Les reconnaissances géologiques de cette étude ont consisté en une approche assez sommaire permettant de différencier les grandes unités géologiques présentes sur le territoire sans descriptions de détail. Il était en effet nécessaire de ré-évaluer singulièrement les données de carte géologique à 1/50 000 de Basse-Terre datant de 1966 et de faire la synthèse avec les formations décrites un peu plus au sud (à la limite nord de la Carte Géologique de la Soufrière datant de 1988) et des données encore plus récentes (Ex : Charlier et al. 2007).

En raison de la topographie peu accidentée (notamment dans la partie basse de la zone d'études) et de la forte anthropisation des parcelles planes (cultures de la banane et de la canne), l'essentiel des observations se sont faites dans les ravines et les lits des rivières parcourant la zone (cf. Illustration 2).

On rappellera en préambule que le bassin de la rivière Pérou représente une zone de transition très nette (décrite comme une zone de faille majeure dans plusieurs études ; ex : Feuillet, 2000) puisque les laves massives anciennes (attribuées au Complexe de la Montagne de Capesterre) se retrouvent systématiquement dans le lit de la rivière ou au Nord de celle-ci, mais qu'un seul affleurement a été décrit plus au sud. Au sud de la zone (au-delà de la rivière du Grand Carbet), les laves massives décrite sont celles (récentes) du Massif de la Madeleine et notamment l'imposante coulée de l'Habituée.

3.2.1. Description des formations présentes

Les différentes formations reconnues sur le secteur d'études sont décrites ci-après.

- Les formations superficielles. On en distingue 2 catégories principales.

La première sont les alluvions qui se retrouvent essentiellement dans la partie basse du lit de la rivière Pérou et notamment à la confluence avec la Grande Rivière de Capesterre. Elles sont constituées essentiellement de blocs roulés d'origine volcanique, très hétérogènes en nature et taille (cf. Illustration 7). Les alluvions sont également présentes dans l'ensemble des lits de rivières et également en formations anciennes entaillées verticalement par le lit actuel des rivières. Les colluvions sont des éboulis de bas de pente dans certaines ravines qui débouchent sur les rivières ou le long des pentes de ces dernières, riches en argiles fines et en blocs généralement arrondis. Elles sont le siège de nombreux écoulements hypodermiques. Colluvions et alluvions des parties hautes des rivières n'ont généralement pas été cartographiées.

Les formations d'altération superficielle sont présentent sur l'ensemble de la zone étudiée. On en distingue 2 types. En partie basse des reliefs, elles se composent de formations argileuses de teinte rouge comprenant quelques reliques de blocs de laves presque entièrement altérés (cf. Illustration 8). La plupart du temps, il est difficile de déterminer si ces formations superficielles se sont développées au détriment des laves massives ou des ensembles coulées de débris/lahars (cf. plus bas). Elles peuvent

dépasser plusieurs mètres d'épaisseur. En partie haute des reliefs et notamment sur le plateau de Féfé, les formations d'altérations superficielles sont constituées d'une matrice argilo-sableuse riches en minéraux altérés résiduels. Il semblerait qu'elles se soient essentiellement formées aux dépends de formations pyroclastiques de types couches ou coulées de ponces dont elles ont gardée la structure. Ces formations n'ont pas été non plus cartographiées.



Illustration 7 : alluvions dans le lit de la rivière du Grand Carbet (blocs centimétriques à plurimétriques de compositions très hétérogènes)



Illustration 8 : exemple d'altération dans les formations superficielles au nord immédiat de la Rivière Pérou. Le substratum est constitué essentiellement d'argiles et d'oxydes de fer et d'aluminium. Il s'est formé aux dépends de laves massive ou des coulées de débris.

- Les laves massives de la Montagne de Capesterre (Chaîne Axiale). Elles se retrouvent de manière quasi-continue dans le lit ou sur les rives de la rivière Pérou ainsi que dans la rivière sans nom, en alternance avec des coulées de débris. Il s'agit essentiellement d'une andésite (basique à acide) de couleur gris clair à sombre la plupart du temps contenant essentiellement des pyroxènes et des plagioclases en quantités variables. Elles se présentent soit en coulées massives affectées par de grandes fractures sub-verticales typiques du retrait thermique lors du refroidissement de la coulée, soit en coulées à débit en plaquette dont la formation est liée au fluage tardif de la lave en cours de refroidissement (cf. Illustration 9 et Illustration 10). Le débit en plaquette de la lave s'accompagne généralement d'une altération plus importante de la lave, parfois en « pelures d'oignons ». Localement, la roche présente une structure bréchifiée typique des sommets et semelles de coulées de lave. Au nord de la Rivière Pérou, on retrouve ces laves avec les même caractéristiques à la fois dans, et en dehors de, la rivière Maillard en encore plus au nord dans la rivière de Capesterre. Compte-tenu du relief plus perturbé au nord de la rivière Pérou, on peut supposer que les laves de la Montagne de Capesterre forment le soubassement principal de cette région. Dans la partie haute du bassin versant, des forages carottés ont été réalisés sur le plateau Féfé et montre la présence de ces laves grises à environ 8 à 10 mètres de profondeur, sous une formation de type pyroclastique peu à très

altéré (Charlier et al., 2007). A grande profondeur, elles alternent avec des couches de cendres grises et des niveaux d'altération représentant probablement des paléosurfaces. Dans la partie basse de la rivière Pérou, ces laves disparaissent entièrement au profit des alluvions et/ou des coulées de débris/lahars. Cependant, leur présence est avérée en aval du bassin versant au lieu-dit llet Pérou où des forages ont retrouvé cette formation lavique à 3.5 mètres de profondeur seulement (surmontée par des formations d'altération superficielle; Source BSS). Boudon et al. (1988) indiquent la présence exceptionnelle de ces laves au sud-est des Petites Mamelles sur l'actuel lieu d'édification du barrage Dumanoir. Nous n'avons pas pu observer directement cet affleurement de lave et les études géologiques de 1989 (Rançon et al., 1989) pour la construction du barrage n'indiquent qu'un affleurement limité de lave andésitique sombre. Nous n'en avons donc pas tenu compte dans la cartographie.

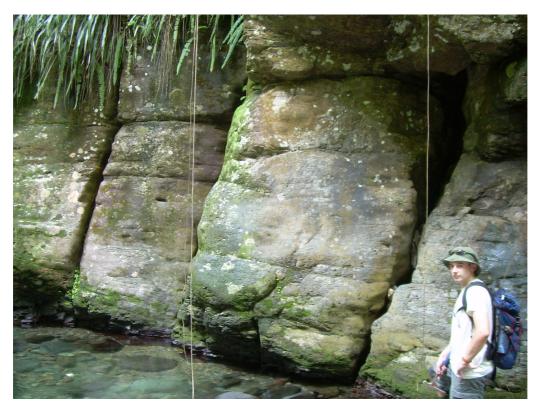


Illustration 9 : les laves andésitiques à plagioclase et pyroxène de la Montagne de Capesterre dans leur forme massive, parcourues par des fractures subverticales acquises lors du refroidissement de la lave.



Illustration 10 : les laves andésitiques de la Montagne de Capesterre avec un débit en plaquette sub-horizontal hérité du fluage plastique de la lave lors de son refroidissement lent.

- Les coulées de débris/lahars. Dans la pratique, il est assez délicat de différencier sur le terrain les dépôts issu d'une coulée de débris et ceux d'un lahar (à l'échelle d'un affleurement). Les lahars sont généralement confinés aux partie basses du relief (et empruntent le réseau hydrographique pré-existant) alors que les coulées de débris (effondrement sectoriel partiel d'un volcan) ont une extension beaucoup plus grande et remodèlent complètement le paysage. Du point de vue textural, les coulées de débris sont généralement plus riches en blocs anguleux (issus du démantèlement brutal de massifs volcaniques) parfois pluri-décamétriques (en dehors des mégablocs) et les lahars sont plus riches en éléments arrondis issus de la remobilisation de terrains superficiels. Les deux peuvent contenir des restes de végétaux emprisonnés lors du mouvement de masse du matériel (cf. Illustration 11). En laboratoire, il est possible de faire une distinction sur l'étude de la matrice argileuse des deux formations. En

pratique sur le terrain, les deux types de formation sont souvent largement imbriqués. Nous avons donc choisi de ne pas distinguer les deux types de formation, d'autant plus qu'au niveau hydrogéologique, leur comportement est identique, puisque toutes deux sont constituées de blocs de lave de nature hétérogène emballés dans une matrice argileuse. Ces deux types de dépôts constituent généralement des formations très indurées. Il est peu probable que tous les affleurements cartographiés appartiennent à un seul évènement (même type de coulées de débris). Les coulées de débris/lahars sont particulièrement bien représentées sur l'ensemble du littoral de Capesterre (mais les lahars y sont dominants (cf. Illustration 12). Elles y affleurent de manière quasicontinue entre les alluvions de la Rivière Pérou au Nord et les dépôts du Grand Carbet au Sud (qui les recouvrent nettement). A l'intérieur des terres, on les retrouve dans la ville même de Capesterre-Belle-Eau et surtout dans le lit de la rivière des Pères et celle de St-Denis. Elles sont clairement recouvertes au niveau de ces deux ravines par les dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles. En dehors de ces deux zones, il est délicat de déterminer la limite géologique entre les deux formations en raison d'une anthropisation importante de toute la zone au relief sub-horizontal. Il se pourrait que les dépôts pyroclastiques descendent en réalité bien plus bas. Nous avons choisi cette délimitation en raison de la présence d'une rupture de pente dans la topographie.

Dans la partie haute du bassin versant, on retrouve ces dépôts de manière ponctuelle en rive droite et surtout en amont de l'ensemble volcanique des Petites Mamelles, ce qui laisserait supposer que ce dernier est entièrement construit avec les coulées de débris issues du démantèlement du Massif de la Grande Découverte (essentiellement lavique). Ces coulées de débris sont d'ailleurs en contact direct avec les laves massives de la Grande Découverte, notamment au niveau de la Deuxième Chute du Carbet (Boudon et al., 1988). Ces dépôts sont également bien visibles sur le relief séparant la rivière sans nom de la rivière Pérou, et ce, jusque dans le lit de la rivière sans nom où ils recouvrent quasiment entièrement les laves de la Montagne de Capesterre. En aval de la confluence des rivières sans nom et Pérou, les dépôts présentent encore des restes de troncs d'arbres non-calcinés (cf. Illustration 11). Dans cette zone, les dépôts de coulées de débris/lahars pourraient provenir aussi bien d'effondrements partiels de la grande Découverte ou ce celle de la Montagne de Capesterre (ou des deux à la fois). A l'aval de la confluence de la rivière sans nom/ et de la ravine Féfé, ces dépôts de coulées de débris/lahars sont visibles en rive gauche également. Leur extension est cependant difficile à déterminer, notamment au Nord de la rivière où les formations superficielles (types argiles rouges) ont plusieurs mètres d'épaisseur et ne permettent pas d'appréhender aux dépends de quelle formation ils se sont formés. Localement, sur le plateau, ils sont en contact direct avec les dépôts pyroclastiques de Féfé selon Charlier et al. (2007).



Illustration 11 : exemple de dépôts de coulées de débris dans la rivière Pérou présentant un reste de tronc d'arbre (au ras de l'eau) et au-dessus, une cavité profonde probablement issue de la disparition d'un autre tronc. La bouteille de cola dans la cavité donne l'échelle.



Illustration 12: les dépôts de lahars sur la côte de Capesterre. Observer la nature extrêmement hétérogène des blocs arrondis dans la matrice argileuse très indurée.

- Les dépôts pyroclastiques de Féfé. Ces dépôts sont très bien visibles dans la partie haute de la rivière sans nom, aussi bien dans le fond de la rivière que sur ses rives hautes où ils reposent clairement sur les dépôts de coulées de débris/lahars. Par ailleurs, sur le plateau Féfé, les forages carottés ont recoupé cette formation (quoique très altérée) en partie supérieure du forage, mais ils s'y trouvent en contact direct avec les laves massives de la montagne de Capesterre, ce qui laisse présager une géométrie complexe entre ces formations. Deux types de dépôts principaux ont été reconnus dans ces formations pyroclastiques. Le premier est constitué de dépôts dits de « Block-and Ash Flow - BAF). Les BAF sont caractéristiques des évènements de destruction de dômes ou de dômes-coulées encore relativement chauds. Dans le cas de la rivière sans nom, ils se présentent sous la forme de grands dépôts verticaux constitués de blocs pétrographiquement très homogènes et très anguleux, de taille

centimétrique à métrique et de teinte rosée dans une matrice cendreuse très peu indurée également très homogène et de même teinte (cf. Illustration 13). Bien que formant des falaises imposantes (10 mètres dans ce cas), ce dépôt est relativement peu induré et se désagrège facilement au marteau. Localement, (notamment dans la partie la plus haute de la rivière), ce dépôt a perdu presque entièrement sa matrice cendreuse et se trouve simplement constitué de blocs anguleux extrêmement altérés. Localement, il montre un granoclassement très net. Associés à ces BAF, on retrouve des dépôts de nuées ardentes classiques constituées de cendres grises finement litées riches en petits blocs anguleux (cf. Illustration 11) et pouvant dépasser 10 mètres d'épaisseur. Localement, on les retrouve au-dessus des dépôts de BAF mais également en fond de rivière. La genèse de ces deux formations (qui se mettent préférentiellement en place dans les points bas de la topographie) semblent commune et leurs relations spatiales sont difficiles à appréhender. En rive gauche de la rivière sans nom, les dépôts de nuées ardentes constitués de cendres fines, de petits blocs anguleux et de ponces (montrant un litage général) reposent directement sur les dépôts de coulées de débris/lahars. En l'absence d'une étude pétrographique et géochronologique détaillée de ces dépôts pyroclastiques, leur origine reste incertaine. Ils pourraient être liés à l'activité de la Chaîne Axiale (Montagne de Capesterre) ou celle de la Grande Découverte. Leur position stratigraphique haute (au-dessus des laves de la Montagne de Capesterre et des coulées de débris/lahars) et surtout leur aspect très frais localement plaident en faveur d'une mise en place récente durant l'activité de la Grande Découverte.





Illustration 13 : les dépôts pyroclastiques de Féfé. A gauche, les "block-and-ash flow" constitués de blocs anguleux (taille environ 40 cm de diamètre) dans une matrice cendreuse de teinte

rose. A droite, les dépôts de nuées ardentes plus fins (observer le litage du dépôt au-dessus du marteau) reposant directement sur les dépôts de lahars.

- Le dôme et les dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles. Située entre la rivière Pérou et celle du Grand Carbet, l'activité volcanique des Petites Mamelles est classiquement rattachée à celle de la Chaîne de Bouillante (bien que située sur la côte opposée et malgré l'absence de datation radiochronométrique; Boudon et al., 1988). Ce rapprochement est largement du au caractère monogénique des Petites Mamelles (comme l'ensemble des édifices de la Chaîne de Bouillante) et une date de mise en place supposée (compte-tenu de l'activité volcanique datée aux alentours) contemporaine de celle des édifices de Bouillante. L'édifice des Petites Mamelle sensu stricto que nous n'avons pas pu échantillonner est supposé être soit un dôme de laves massives, soit le cœur soudé d'un cône de hyaloclastites. Cet appareil a donné naissance à des nuées ardentes constituées de petits blocs massifs d'andésites. Ces dernières s'observent particulièrement bien dans le lit de la Rivière des Pères et celles de Saint-Denis où elles forment des ensembles relativement massifs de plusieurs mètres de haut qui reposent clairement sur les dépôts de coulées de débris (cf. Illustration 14). Localement, elles peuvent constituer le fond du lit de la rivière. Le contact entre les dépôts de nuées ardentes et les lahars ne peut être suivi le long des deux rivières qui deviennent très impraticables en amont en raison d'une végétation extrêmement dense. Les dépôts de nuées ardentes des Petites Mamelles s'observent également en partie haute de la Rivière des Pères (proche du dôme des Petites Mamelles) avec des dépôts d'une dizaine de mètres d'épaisseur, vraisemblablement recouverts d'une couche de ponces blanches qui n'a pas pu être observée directement. Comme déjà indiqué ci-dessus, l'extension exacte de ces dépôts de nuées ardentes est difficilement visible en dehors des rivières, en raison du relief très peu accidenté (lui-même inhérent à la nature des formations mises en place). Ils pourraient notamment s'étendre bien plus à l'Est que supposé en direction de la mer. A l'ouest des Petites Mamelles, la présence de ces dépôts est largement hypothétique.





Illustration 14: à gauche, les dépôts de nuées ardentes des Petites Mamelles (rivière des Pères) constitués de blocs d'andésite anguleux dans une matrice cendreuse relativement indurée. A droite, les coulées de débris/lahars constituées de blocs de compositions très hétérogènes, souvent arrondis dans une matrice argileuses très résistante (également dans le fond de la rivière des Pères).

- Les dépôts pyroclastiques du Grand Carbet. Ces derniers ont été bien étudiés par Bondon et al. (1988) dans le cadre de la réalisation de la carte du massif de la Soufrière dont ils font indubitablement génétiquement partie. Leur extension est bien délimitée en bordure de côte mais les relations avec les dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles sont moins connues. Elles sont parfaitement visibles le long de la Rivière du Grand Carbet et jusque sur le plateau où nous avons pu les observer. Il s'agit d'un ensemble de coulées de ponces et de nuées ardentes d'aspect et de nature variés (avec des indices de remaniement par endroits). Les coulées de ponces sont constituées de ponces brunâtres et de scories noirâtres emballées dans une matrice de cendres vitreuses de même composition andésitique. Les datations au carbone 14 des bois qu'elles contiennent ont donné des âges supérieurs à 38 500 BP. Les nuées ardentes sont constituées de blocs parfois métriques emballés dans une matrice cendreuse (cf. Illustration 15). L'origine exacte de ces brèches pyroclastiques n'est pas clairement établie mais pourrait être liée à l'activité de la Madeleine ou celle du volcan de la Grande Découverte ou du Carmichaël).





Illustration 15: les dépôts pyroclastiques du Grand Carbet. A gauche, proche de l'embouchure du Grand Carbet, un ensemble de 2 dépôts séparés par une fine couche de cendres grises relativement fraîche. Le dépôt inférieur présente un profil d'altération net. Le dépôt supérieur est plus frais et montre des blocs décimétriques à métriques dans une matrice cendreuse. L'ensemble est recouvert par une coulée de ponces (peu visible sur la photo). A droite, les dépôts supérieurs du Grand Carbet plus riches en cendres et présentant un litage et un granoclassement remarquables.

- Les laves massives de la Grande Découverte. Situées en partie haute de la zone, nous les avons reportées sur la cartographie pour information car nous de les avons pas observé directement. Boudon et al. (1988) indiquent qu'elles constituent l'essentiel du volume du massif de la Soufrière et sont constituées d'un empilement de coulées de laves peu épaisses de composition andésitique monotone qui affleurent sporadiquement à la périphérie du massif (et notamment au niveau du ressaut de la troisième chute du Carbet). Le démantèlement du volcan de la Grande Découverte aurait pu fournir l'essentiel des coulées de débris rencontrées sur la zone d'étude.

3.2.2. Carte géologique du secteur d'étude

Sur la base des reconnaissances géologiques de terrain effectuées, une carte géologique du secteur étudié a été proposée (cf. Illustration 16). Cette carte servira de support pour le modèle conceptuel des écoulements souterrains du secteur étudié.

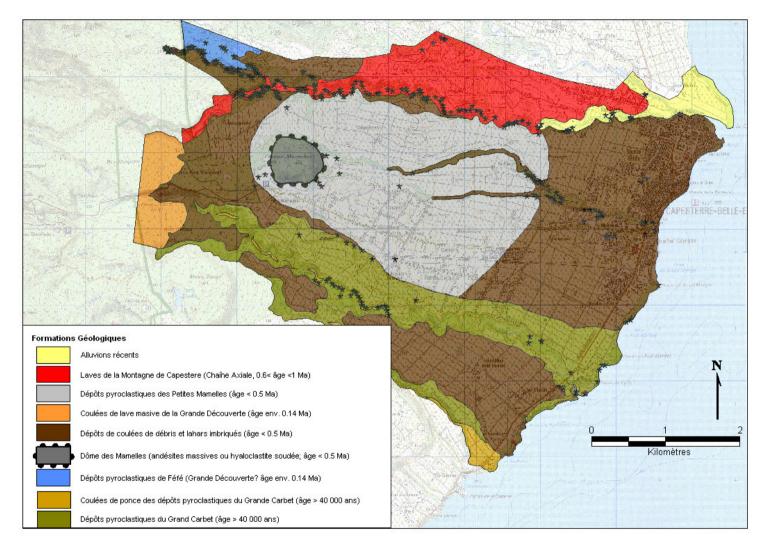


Illustration 16 : carte géologique du secteur de Capesterre-Belle-Eau (réalisée sur la base des reconnaissances de terrain)

3.3. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

3.3.1. Caractérisation des principales sources localisées

Les sources identifiées sur le terrain ont été localisées par GPS (cf. Illustration 17). Les relevés de terrain effectués sur ces sources (mesures physico-chimiques in situ, débit, définition du contexte d'émergence) sont regroupés en Illustration 18.

Elles correspondent principalement à des émergences diffuses difficilement quantifiables. Ces émergences diffuses présentent des conductivités très variables (de 60 à 340 $\mu S/cm$). Ces valeurs de conductivité sont comparées au § 3.2.2 avec les mesures in situ réalisées dans les rivières de la zone d'étude, en vue de détecter une éventuelle contribution des eaux souterraines à la minéralisation des rivières.

Seules deux sources ponctuelles ont été mises en évidence sur le secteur étudié. Il s'agit de la source de Pérou, située dans le bourg de Capesterre-Belle-Eau (cf. Illustration 19), et la source Marigot sur le littoral. Ces deux sources émergent au sein des formations de lahars - coulées de débris réputées peu perméables. La condition d'émergence de ces sources se ferait soit à l'interface d'une inter-coulées, soit à la base d'une coulée constituée d'éléments plus grossiers (donc plus perméables). Les débits mesurés au seau sont relativement faibles (respectivement de 0,4 l/s et 4,7 l/s pour la source Marigot et la source Pérou).

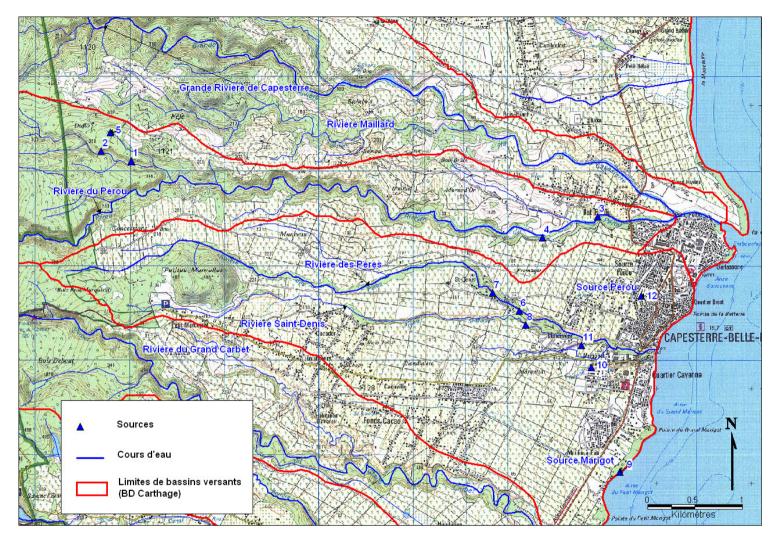


Illustration 17 : localisation des sources sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (carte IGN n°4605 GT, 2002 et BD Carthage)

Localisation	Numéro de la source	X_WGS84	Y_WGS84	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)	Type de source	Condition d'émergence
	1	648023.28	1776104.75	90.4	27.9	Emergences diffuses RG	Contact nuées ardentes - coulées de débris
	2	647704.3	1776208.39	60.5	23.5	Emergences diffuses RG	Contact nuées ardentes - coulées de débris
Rivière Pérou	3	652957.14	1775519.23	157.5	25.4	Emergences diffuses RG	Alluvions récentes
	4	652376.61	1775295.36	308	26.3	Emergences diffuses RD	Contact alluvions récentes - coulées de débris
	5	647806.59	1776406.63	243	25.4	Emergences diffuses RD	Nuées ardentes
Bi i i a Baa Bi aa	6	652131.3	1774512.05	263	27.5	Emergences diffuses RD	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars
Rivière Des Pères	7	651847.51	1774703.3	250	26.4	Emergences diffuses RD	Contact nuées ardentes - coulées de débris
Rivière St-Denis	8	652196.69	1774369.65	282	26.6	Emergences diffuses RD	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars
Marigot	9	653193.89	1772811.72	300	27.4	Source ponctuelle captée	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars
Ravine Céta	10	652888.68	1773917.87	336	27.1	Emergences diffuses RD	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars
navirie Ceta	11	652784.32	1774155.06	319	26.7	Emergences diffuses RD	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars
Source Pérou	12	653418.05	1774673.06	298	27	Source ponctuelle	Dépôts imbriqués coulées de débris-lahars

Illustration 18 : caractéristiques des sources identifiées sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau

(localisation GPS, mesures physico-chimiques in situ (21 – 24 avril 2008), contexte d'émergence)- RG = rive gauche, RD = rive droite



Illustration 19 : photo de la source Pérou (dans le bourg de Capesterre-Belle-Eau)

3.3.2. Mesures physico-chimiques en rivières

Des mesures physico-chimiques in situ (conductivité, température, etc.) ont été réalisées le long de la rivière Pérou et de ses principaux affluents, et le long des rivières au sud : rivières Des Péres et Saint-Denis et ravine Céta, ravine Dumanoir et rivière du Grand Carbet. Les données recueillies sur ces différents bassins versants sont regroupées en Illustration 20, Illustration 21 et Illustration 22). Elles sont comparées aux valeurs de conductivité relevées sur les différentes sources identifiées sur le secteur d'étude (cf. § 3.3.1).

Bassin versant de la rivière Pérou

Rivière	Localisation	Cote (m)	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
	Amont	315	50,2	25,8
Rivière Pérou	Après confluence affluent amont Pérou (intermédiaire)	220 - 85	71,5 - 75,5	23,1 - 25
	Aval	65 - 20	86,9 - 96,9	27,6 - 27,2
Affluent	Amont perte totale	380	52,5	23,3
amont Pérou (rivière sans nom)	Intermédiaire (aval perte totale)	300 - 330	63,3 - 53,1	26,5 - 23,8
	Aval confluence ravine Féfé	250	70,1	27,5
Ravine Féfé	Amont	320	122,2	26,1
naville i ele	Aval	295 - 275	113,9 - 111,8	27,6 - 27,8
Grande Rivière de Capesterre	Prise d'eau AEP La Digue	206	68,1	24
	Amont confluence avec Rivière Pérou	25	89,4	28,4
	Aval confluence avec Rivière Pérou	15	92,6	30,3

Illustration 20 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant de la rivière Pérou (21 – 24 avril 2008)

Les conductivités relativement faibles relevées sur la rivière Pérou (de 50 à 97 μ S/cm de l'amont vers l'aval), indiqueraient au premier abord qu'il n'y a pas ou peu de contribution souterraine à l'écoulement de cette rivière. Quelques émergences diffuses ont été identifiées au sein des alluvions à l'aval de la rivière Pérou, avec des conductivités allant de 157 à 308 μ S/cm.

Le principal affluent rive gauche de la rivière Pérou, est la rivière sans nom située en amont du bassin versant de Pérou. Cette rivière présente de faibles valeurs de conductivité (50 à 70 μ S/cm), sensiblement similaires à celles relevées à l'amont de la rivière Pérou. Les émergences diffuses identifiées en rive gauche de la rivière sans nom présentent également des conductivités relativement faibles (de 60 à 90 μ S/cm). Ces eaux souterraines sont peu chargées en minéraux, et n'influencent pas de manière significative la minéralisation des eaux de la rivière.

Seule la ravine Féfé, affluent rive gauche de la rivière sans nom, semble marquée par des apports plus significatifs d'eau souterraine. Les émergences diffuses en amont de la ravine présentent une conductivité relativement élevée (243 μ S/cm), et les conductivités relevées le long de la ravine elle-même sont plus fortes que les autres rivières du bassin versant (111 à 122 μ S/cm). Cependant il s'agit d'un phénomène localisé qui n'influence pas la minéralisation de la rivière Pérou.

Rivières Des Pères et Saint-Denis

Rivière	Localisation	Cote (m)	Conductivité (μS/cm)	Température (°C)
	Amont	215	138,9	24,4
Rivière Des Pères	Intermédiaire	160	159	25,1
	Aval	75 - 25	195,1 - 222	27,2
Rivière Saint-Denis	Amont	340	104,3	23,7
	Intermédiaire	170	158,1	26,1
	Aval	70 - 25	197,8 - 231	27,6
Aval confluence Des	Blondinières	25	228	27,5
Pères et Saint-Denis	Bourg	10	237	26,8
Deada a Oile	Amont	25	341	27,3
Ravine Céta	Aval	10	346	26,7

Illustration 21 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant des rivières Des Pères et Saint-Denis (21 – 24 avril 2008)

Les conductivités mesurées sur ces deux rivières sont relativement élevées (> 100 μ S/cm), et augmentent de façon similaire vers l'aval (> 200 μ S/cm). Les émergences diffuses identifiées à l'aval de ces deux cours d'eau, dont les conductivités sont comprises entre 250 et 282 μ S/cm, contribueraient de manière significative à la minéralisation des ces deux rivières.

La ravine Céta, située à l'aval des rivières Des Pères et Saint-Denis, sans lien hydrologique avec ces deux cours d'eau, est fortement marquée par les apports d'eau

souterraine. Les conductivités mesurées le long de cette ravine sont similaires à celles des sources identifiées en amont de la ravine (> 300 µS/cm).

Rivière du Grand Carbet

Rivière	Localisation	Cote (m)	Conductivité (µS/cm)	Température (℃)
Ravine Dumanoir	Amont	180	297	26,7
Havine Dumanoir	Aval	110	315	28,5
	Amont	200	244	23,6
Rivière du Grand Carbet	Intermédiaire	120	229	24,2
	Aval	40	223	26,8

Illustration 22 : mesures in situ de conductivité et de température des cours d'eau du bassin versant de la rivière du Grand Carbet (21 – 24 avril 2008)

Ces deux rivières présentent des conductivités relativement élevées par rapport aux autres rivières du secteur de Capesterre-Belle-Eau (> $200-300~\mu S/cm$). Aucune émergence d'eau souterraine n'a été identifiée sur ces deux cours d'eau lors des reconnaissances de terrain. Ces fortes conductivités peuvent traduire soit un ruissellement sur des formations géologiques relarguant plus de minéraux, soit une alimentation par des eaux souterraines ayant eu un temps de résidence suffisant pour acquérir une minéralisation via les interactions eau-roche. La possibilité de mélanges d'eaux superficielles infiltrées avec des eaux minérales profondes provenant du système hydrothermal du Carbet n'est pas à exclure (rivière du Grand Carbet).

Globalement, les rivières du bassin versant de la rivière Pérou sont peu marquées par des apports souterrains (excepté le phénomène localisé de la ravine Féfé), alors que les rivières situées au sud de ce bassin versant présentent des indices forts de contribution souterraine aux écoulements de surface.

3.3.3. Détermination des débits spécifiques d'étiage

Une autre approche pour appréhender la contribution relative des eaux souterraines aux écoulements de surface, est de déterminer les débits spécifiques des rivières. Ces débits spécifiques ont été calculés à partir des débits d'étiage estimés sur le terrain, et des surfaces topographiques des bassins versants concernés (calculées sur SIG). Les données sont regroupées en Illustration 24 et en Illustration 25.

Les débits d'étiage des différentes rivières du secteur d'étude ont été estimés sur le terrain lorsque c'était possible selon les méthodes ci-après :

- jaugeage volumétrique au seau :

Cette méthode "volumétrique" (ou jaugeage capacitif) permet de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient (seau) d'une contenance déterminée. Compte tenu des aspects pratiques inhérents à la méthode de mesure (taille du récipient nécessaire, incertitude sur la mesure du temps, aménagement spécifique éventuel), cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus.

La formule Qc = V/T (où V est le volume du seau en litres et T le temps en secondes mis pour le remplir) donne le débit (en I/s). L'erreur de mesure est faible avec ce système et peut être estimée en fonction de l'imprécision sur le temps de remplissage et le volume du seau (0,1 I/s).

- jaugeage chimique au sel à l'aide d'une sonde conductimétrique :

Cette méthode s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent ou pour lesquels on ne trouve pas de section se prêtant à des jaugeages au moulinet. Dans ce cas, on injecte en un point du cours d'eau une masse connue de sel (NaCl) diluée dans un volume d'eau de la rivière. On place une sonde conductimétrique en aval de l'injection, à une distance suffisamment longue pour que le mélange soit bon. La sonde mesure la conductivité électrique de l'eau au cours du passage du nuage de sel. On peut alors tracer la courbe conductivité en fonction du temps (cf. Illustration 23). Le débit est alors obtenu par intégration de la concentration au cours du temps.

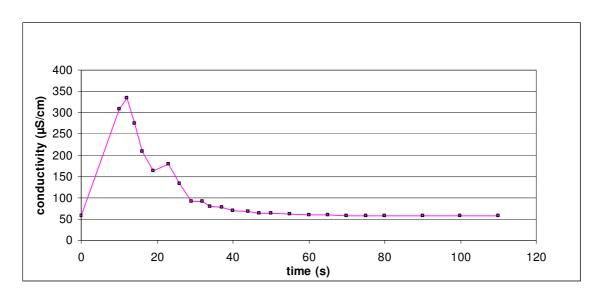


Illustration 23 : courbe de conductivité en fonction du temps sur la rivière sans nom (jaugeage au sel – 22 avril 2008)

L'erreur sur la mesure est estimée à 2 l/s.

jaugeage par exploration du champ de vitesse au niveau de seuils (ponts, ...) :

Rappelons que la vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme dans la section transversale d'un cours d'eau. Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours. Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

Le débit Q [m³/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m²] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation :

$$Q = V 'S$$
.

La section d'écoulement peut être évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur. Plusieurs méthodes permettent de déterminer la vitesse moyenne de l'eau.

L'erreur sur la mesure est estimée à 1 l/s.

calcul de débit à partir de l'équation de bilan ci-après :

$$C_T^*Q_T = C_1^*Q_1 + C_2^*Q_2$$
 eq(1)

Avec:

 C_T , la concentration mesurée à l'aval de la confluence des rivières Des Pères et Saint-Denis et Q_T le débit associé ;

 C_1 , la concentration de la rivière Des Pères mesurée à l'amont de la confluence avec la rivière St Denis et Q_1 le débit associé ;

 C_2 , la concentration de la rivière St Denis mesurée à l'amont de la confluence avec la rivière Des Pères (non mesurée) et Q_2 le débit associé.

L'erreur sur la mesure dépend de la méthode employée pour évaluer les débits (entre 0,1 et 2 l/s).

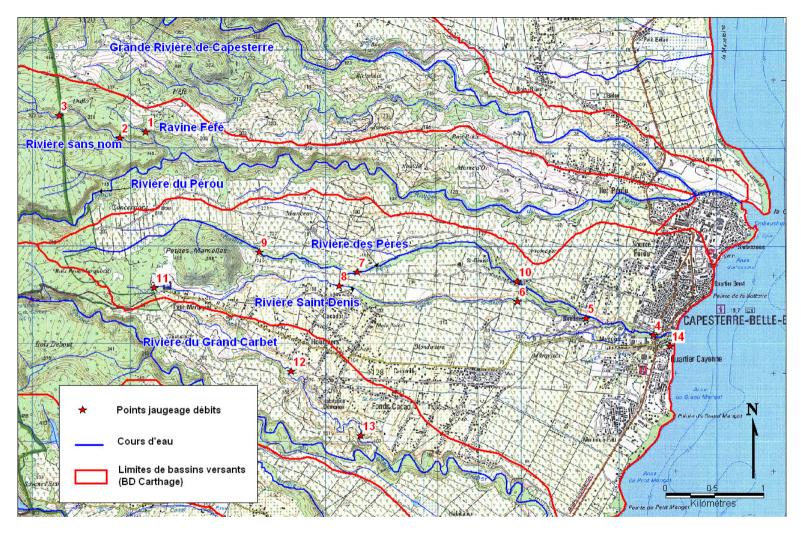


Illustration 24 : localisation des débits estimés sur le terrain (fond carte IGN 4605 GT et BD Carthage)

Rivière	Numéro du point jaugeage	X_WGS	Y_WGS	Débit estimé (I/s)	Surface SIG du bassin versant (Km²)	Débit spécifique (I/s/Km²)	Méthode de jaugeage
Ravine Féfé	1	648166.81	1776168.71	15	0.23	65.2	seau
Affluent amont Pérou	2	647900.92	1776107.29	20	1.75	11.4	seau
(rivière sans nom)	3	647281.75	1776333.53	46	1.31	35.1	sel
Aval confluence Des Pères-St-Denis	4	653355.35	1774084.86	200	6.43	31.1	calcul seuil
	5	652672.99	1774256.31	133	2.34	57.0	calcul bilan
Rivière Saint-Denis	6	651967.51	1774429.83	93	1.85	50.3	calcul bilan
Titviere danit Beins	8	650145.2	1774586.48	9.5	1.06	9.0	seau
	11	648250.04	1774570.74	2.2	0.23	9.6	seau
	7	650327.74	1774728.35	15	1.47	10.0	seau
Rivière Des Pères	9	649330.92	1774939.04	12	1.02	11.8	seau
	10	651963.23	1774633.83	46	2.63	17.6	calcul seuil
Ravine Dumanoir	12	649653.84	1773717.11	4	0.64	6.3	calcul seuil
naville Dumanoir	13	650364.74	1773057.92	20	1.07	18.7	calcul seuil
Ravine Céta	14	653527.21	1773973.29	5.5	0.62	8.9	seau

Illustration 25 : débits spécifiques d'étiage des rivières du secteur de Capesterre-Belle –Eau (calculés à partir des débits estimés sur le terrain du 21 au 24 avril 2008)

Ces données n'étant pas exhaustive sur le secteur étudié, et notamment ne disposant pas de données de débits pour les parties aval de ces rivières, la comparaison de la productivité des différents bassins versants entre eux s'avère peu significative.

Cependant, quelques informations se dégagent de ces calculs de débits spécifiques d'étiage :

- les forts débits spécifiques calculés sur la ravine Féfé et la rivière sans nom semblent indiquer qu'il existe une contribution significative des eaux souterraines aux écoulements de ces cours d'eau ;
- les rivières Des Pères et Saint-Denis présentent un comportement hydrologique similaire avec des débits spécifiques importants qui augmentent vers l'aval. Ces données confirment les hypothèses émises au regard des mesures physicochimique in situ d'un fort soutien par les eaux souterraines de ces rivières;
- la ravine Dumanoir présente une productivité qui augmente vers l'aval, ce qui pourrait être l'indice d'apports d'eau souterraine significatifs.

3.4. PREMIER MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE

Le premier modèle conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau proposé (cf. Illustration 26) a été réalisé à partir de la carte géologique, établie sur la base des observations de terrain, et des mesures physico-chimiques in situ (conductivité notamment) des eaux superficielles et souterraines du secteur étudié.

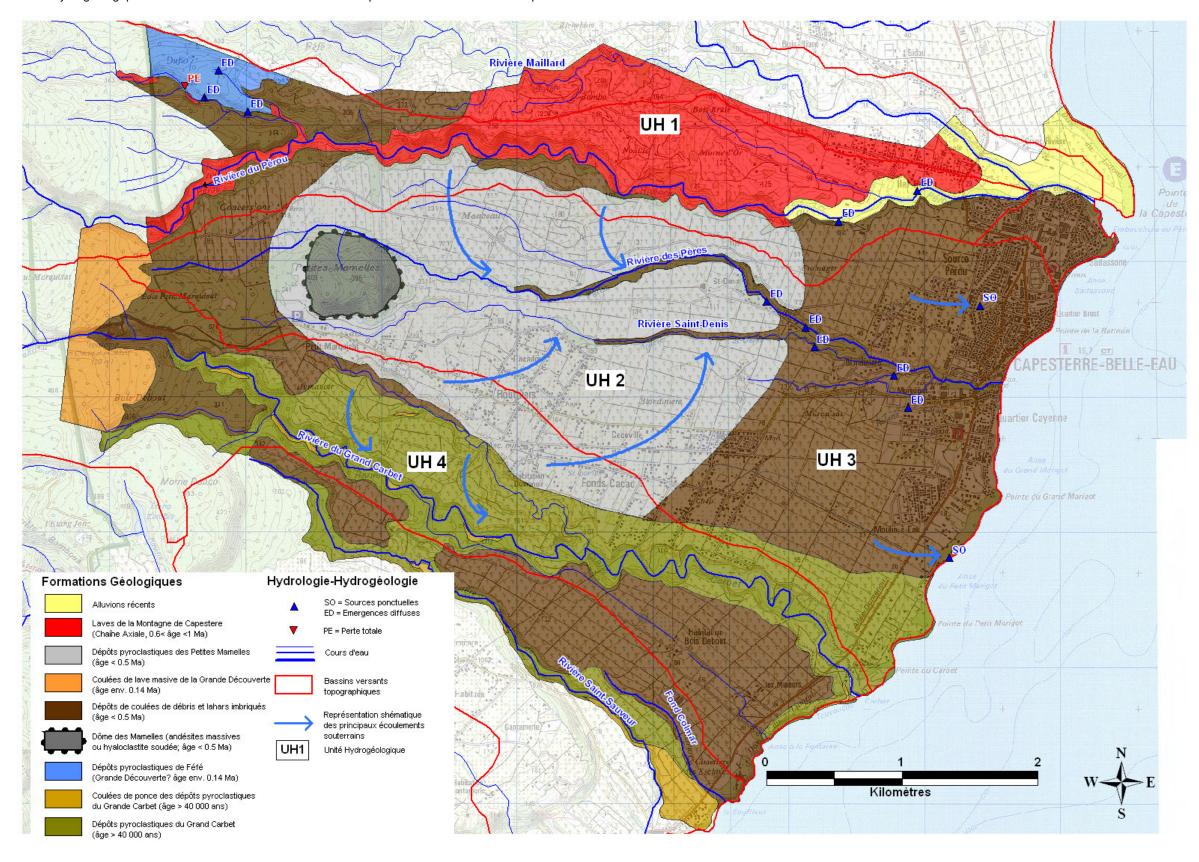


Illustration 26 : premier modèle conceptuel représentant les écoulements souterrains sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (réalisé à partir des observations de terrain)

BRGM/RP-56766-FR – Rapport final

BRGM/RP-56766-FR – Rapport final

Quatre unités hydrogéologiques (notées UH1, UH2, UH3 et UH4) ont été identifiées :

- UH 1 = unité hydrogéologique des laves massives de la Montagne de Capesterre : ces formations qui comportent des profils d'altération épais sont les plus anciennes identifiées sur le secteur d'étude. Elles y forment le substratum qui s'approfondit vraisemblablement fortement vers le Sud. Les seules zones d'affleurement de ces laves massives se retrouvent le long de la rivière Pérou (hors système « Féfé » en amont). Ces formations, si elles ont conservé une certaine perméabilité à l'échelle de la coulée (débit en plaquette) ou de certaines inter-coulées, ne présentent pas de perméabilité significative en grand au regard de l'absence d'affluents significatifs à la rivière Pérou, et de la conductivité relativement faible de la rivière (de l'ordre de 75 $\mu S/cm$) sans évolution significative vers l'aval.
- UH 2 = unité hydrogéologique des dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles : ces dépôts correspondent à des nuées ardentes qui se sont mises en place dans une paléovallée orientée vers les rivières des Pères et Saint Denis. Elles forment un plateau totalement occupé par une activité agricole cannière et bananière. Ces formations présentent une perméabilité d'interstices. Des apports diffus ont été identifiés le long des rivières recoupant cette formation (rivières des Pères et St-Denis) au contact avec les lahars sous-jacents moins perméables (même type d'aquifère et conditions d'émergences que sur le secteur de « Féfé »). Ces deux rivières présentent des conductivités relativement élevées (de l'ordre de 200 μS/cm) qui augmentent de manière similaire sur ces deux rivières vers l'aval. Ces fortes conductivités témoignent d'une contribution d'eaux souterraines plus minéralisées aux écoulements de surface. Le plateau Fromager Manceau est vraisemblablement drainé par la rivière des Pères et non par la rivière Pérou. La partie sud de ce plateau, au niveau de Cacador Marquisat, est à première vue drainée par la rivière Saint Denis, très peu d'eau s'écoulant vers la rivière Dumanoir.
- UH 3 = unité hydrogéologique des dépôts de coulées de débris et lahars imbriqués : ces formations sont globalement peu perméables. Les apports d'eau souterraine identifiés sur cette formation (émergences diffuses le long des ravines et sources ponctuelles du bourg et du littoral) présentent des conductivités relativement élevées (de l'ordre de 300 $\mu\text{S/cm}$), en comparaison à celles mesurées dans les autres unités hydrogéologiques (UH2 ou UH1), ce qui traduit un temps de résidence plus long. Les ravines de ce secteur présentent également des conductivités relativement élevées (> 200 $\mu\text{S/cm}$). Ces formations constituent vraisemblablement un imperméable relatif vis-à-vis de l'aquifère des nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2) sus-jacent.
- UH 4 = unité hydrogéologique des dépôts pyroclastiques du Grand Carbet : ces formations correspondent à des nuées ardentes plus récentes que celles associées au système des Petites Mamelles. Ces nuées ardentes se sont mises en place dans la paléovallée du grand Carbet, limitée au Nord par la ravine Dumanoir. Aucune émergence n'a été identifiée le long de la ravine Dumanoir ou de la rivière du Grand

Carbet. Les conductivités mesurés sur ces deux cours d'eau est de l'ordre de 200 $\mu S/cm$. La conductivité de la rivière du Grand Carbet diminue vers l'aval.

4. Caractérisation hydrochimique

4.1. METHODOLOGIE

4.1.1. Prélèvements

A l'issue du premier modèle conceptuel proposé (cf. Illustration 26), des points de prélèvements d'eau souterraine et de surface ont été déterminés en concertation avec la DIREN Guadeloupe en vue de réaliser des analyses chimiques permettant de caractériser les interactions eau-roche et les apports anthropiques. L'objectif de ces analyses est principalement de compléter, par une approche hydrochimique, la connaissance de la structure et du fonctionnement du bassin issue des approches quantitatives.

Les huit points de prélèvements choisis sont localisés en Illustration 27. Il s'agit :

- d'un point amont et un point aval sur la rivière Pérou en vue de caractériser l'unité hydrogéologique UH1;
- d'un point amont et un point aval sur les rivières Des Pères et Saint-Denis en vue de caractériser l'unité hydrogéologique UH2 ;
- des sources ponctuelles de Pérou (dans le bourg) et de Marigot (sur le littoral) en vue de caractériser l'unité hydrogéologique UH3.

Il a été décidé de ne pas caractériser l'unité hydrogéologique UH4, concernant la rivière du Grand Carbet. Cette unité n'est pas en relation avec l'unité hydrogéologique UH1 intéressant le bassin versant de la rivière Pérou. Une meilleure compréhension du fonctionnement de ce système ne sera pas déterminant dans la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin versant qui nous intéresse, à savoir le bassin versant de la rivière Pérou.

L'échantillonnage de ces points d'eau a été réalisé par le Brgm en octobre 2008 selon un protocole adapté aux analyses réalisées.

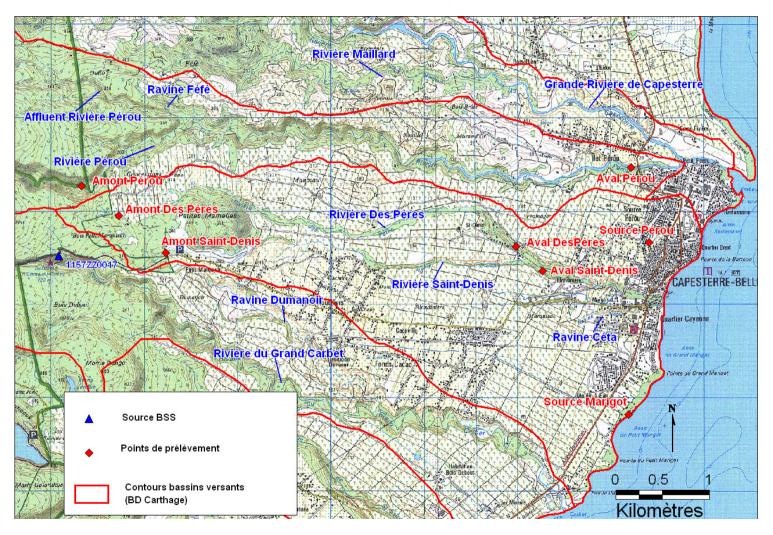


Illustration 27 : localisation des points de prélèvements d'eau souterraine et de surface sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau (fond carte IGN 4605 GT,2002 et BD Carthage)

4.1.2. Paramètres analysés

Les paramètres analysés sur les eaux échantillonnées ont été définis en concertation avec la DIREN. Il s'agit :

- des éléments majeurs ;
- du bore et du strontium ;
- du carbone organique dissous ;
- de la silice :
- de pesticides (IAMPA, Glyphosate, diurion, chlordécone, chlordécone 5b-hydro, 2,4-D, fosthiazate, cadusafos) ;
- du manganèse et du fer total,
- des sulfites et des sulfures.
- des nitrites.

Les analyses ont été effectuées par le service MMA (Métrologie, Monitoring, Analyse) du BRGM à Orléans (accrédité COFRAC), selon les normes NF EN ISO/CEI 17025 et du document COFRAC LAB REF 02, référence des laboratoires et de l'ISO 9001-2000.

Le service Métrologie, Monitoring, Analyse est accrédité par la section Laboratoires du COFRAC (n°1-0251), depuis 1994, pour l'analyse des eaux (programme 100-1) et ce, pour la détermination d'environ 70 paramètres minéraux et 8 familles de composés organiques dans les eaux propres et dans les eaux résiduaires urbaines et industrielles, depuis 1997, pour l'analyse des sols en relation avec l'environnement (programme134), pour 5 paramètres, depuis 1998, pour la recherche de silice cristalline dans l'air (programme 94), depuis janvier 2001, pour l'analyse des sédiments et des boues (programme 156) pour la détermination de 13 paramètres minéraux et de 2 familles de composés organiques. De plus, le service Métrologie, Monitoring, Analyse possède les agréments n° 1, 2, 3, 4, 5, 9 et 10 du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, pour l'analyse des eaux.

Les résultats analytiques sont présentés en annexe 3.

4.2. INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES

4.2.1. Approche méthodologique

L'objectif de cette étude est d'identifier sur la base des prélèvements géochimiques effectués sur les rivières du Pérou, des Pères et de St-Denis, et sur les sources de Pérou et de Marigot, le rôle joué par les eaux souterraines dans le fonctionnement hydrogéologique des bassins versants étudiés. La caractérisation hydrogéochimique a été réalisée par l'interprétation des diagrammes binaires qui permet la comparaison d'information apportées par deux éléments (ou des rapports entre éléments). L'approche méthodologique repose dans un premier temps sur l'identification et la caractérisation de la signature de l'eau de recharge qui contribue à alimenter les aquifères, puis dans un second temps par la caractérisation de la « référence naturelle », qui n'a pas subi l'influence d'apports anthropiques, afin de qualifier les processus de minéralisation de l'eau uniquement due à l'interaction eau-roche. Les informations apportées par chaque traceur sont ensuite confrontées les unes aux autres dans le but de conceptualiser le fonctionnement hydrochimique des hydrosystèmes étudiés.

Outre les informations géochimiques relatives à la campagne géochimique d'octobre 2008, cette étude s'appuie sur les travaux récents réalisés sur le petit bassin versant expérimental de Féfé (Charlier, 2008, Charlier et al, 2008, 2009). Les informations géochimiques des points d'eau souterraine référencés dans le secteur d'étude ont également été utilisés dans cette étude (données des banques ADES et Infoterre). Les données sur la chimie des précipitations du secteur d'étude ont également été utilisées (Charlier, 2008; Rad et al, 2007).

Nous présentons en Illustration 28 pour les éléments majeurs et traces analysés lors de cette étude, les différentes origines possibles qui peuvent contribuer à la minéralisation des eaux. Les éléments majeurs et traces dans les eaux de surface et souterraines du système ont quatre origines possibles : (i) la pluie, et les trois processus de minéralisation détaillés suivant (ii) l'interaction avec la roche (dissolution de minéraux), (iii) l'apport anthropique (fertilisants et amendements en parcelle, remblaiements des chemins d'exploitation, porcherie et eaux usée), et (iv) les processus redox en milieu anaérobie. Les formations du secteur d'étude sont issues d'un volcanisme éruptif andésitique ; les minéraux les plus représentés sont les plagioclases, les feldspaths alcalins, le quartz et les pyroxènes. L'utilisation d'intrants en bananeraies est très importante, autant au niveau des produits phytosanitaires, que des fertilisants NPK (Azote, Phosphore, Potassium) et des amendements pour des sols acides. L'impact dû aux rejets issus des hangars d'emballage et des porcheries doit être évalué localement. Les exploitations modifient également le milieu par la construction de chemins agricoles qui en Basse-Terre, île volcanique, sont remblayés avec du calcaire concassé provenant des carrières de la Grande-Terre.

Elément	Origine pluie	Origine minérale	Origines anthropiques	Processus d'oxydo-réduction
CI	3 <cl<15 l<br="" mg="">suivant l'altitude</cl<15>	Oui, si halite	Fertilisants KCIEaux usées	non
SiO2	trace	Oui, quartz; plagioclases; pyroxène	non	non
Na, Ca	1.5 <na<7 l<br="" mg="">0.1<ca<0.6 l<br="" mg="">suivant l'altitude</ca<0.6></na<7>	Oui, plagioclase (limite andésine labrador) (Na,Ca)Al2Si2O8 ; Gypse (CaSO4)	 Ca: amendements calciques (1t/an/ha) sous forme de calcaire concassé fréquemment opérés en bananeraie due au pH acide des sols; pistes remblayées en calcaire. Na: Apports de (NaBO2) 	non
Mg, Fe, Mn	0.2 <mg<0.8 l<br="" mg="">suivant l'altitude</mg<0.8>	Oui, pyroxènes du type hypersthène (Mg,Fe)SiO3); minéraux manganésifères	Mg : fertilisants (MgSO4)	Fe, Mn : augmentation lors de la dénitrification en contexte réducteur
К	0.07 <k<1.2 l<br="" mg="">suivant l'altitude</k<1.2>	Oui, feldspaths alcalins : KalSi3O8	K : fertilisants azotés type NPK ; Fertilisants KCI	non
NO3, NH4, P	NO3 : 1 à 2 mg/l	non	Eaux usées fertilisants NPK	Minéralisation de la matière organique (MO) => production de NO3 Dénitrification en milieu anaérobique, réducteur => « disparition » de NO3
SO4	SO4:1 à 2 mg/l	Oui, si gypse	 Fertilisants MgSO4 Eaux usées hangars d'emballage où le bac de trempage des bananes contient du sulfate d'alumine pour la floculation du latex des fruits. 	Oxydation sulfure, minéralisation de la MO Dénitrification autotrophe=> production de SO4
HCO3	HCO3 : de l'ordre de 5 mg/l	Oui Origine biogénique (CO2 du Sol)	 Amendements calciques (1t/an/ha) sous forme de calcaire concassé fréquemment opérés en bananeraie due au pH acide des sols pistes remblayées en calcaire 	Augmentation possible lors de la dénitrification

Illustration 28 : éléments majeurs et traces analysées sur les prélèvements d'eau souterrraine et de surface du secteur d'étude

BRGM/RP-56766-FR – Rapport final

4.2.2. Caractérisation géochimique des eaux du secteur d'étude

Classification des eaux dans un diagramme de piper

Les caractéristiques générales des eaux peuvent être identifiées dans un diagramme de piper (Illustration 29). Ce diagramme permet une représentation des principaux anions et cations sur deux triangles distincts dont les cotés témoignent des teneurs relatives des ions majeurs par rapport au total de ces ions. Les concentrations sont exprimées en meq/l. Dans le losange est reportée l'analyse globale de l'échantillon, la position relative du point permettant de qualifier le faciès chimique de l'eau.

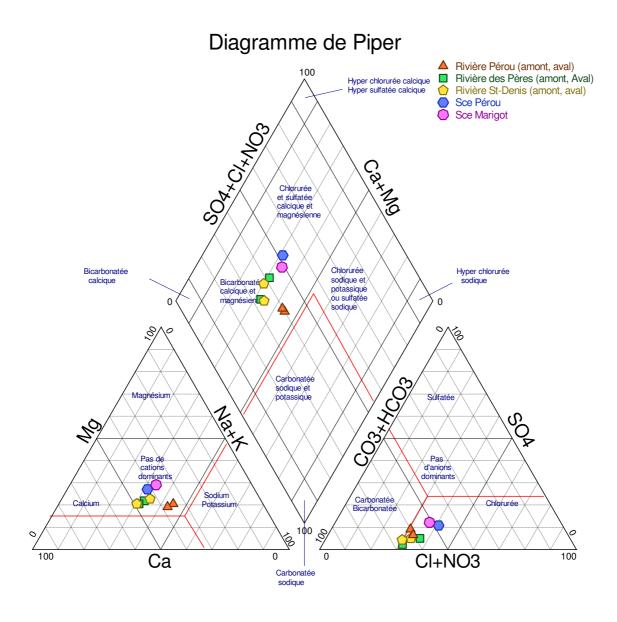


Illustration 29 : diagramme de Piper des eaux souterraines et de surface prélevées sur le secteur d'étude

Les eaux souterraines (source Pérou et Marigot) et les eaux de surface échantillonnées dans les rivières Pérou, St-Denis et des Pères présentent globalement un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Les eaux des sources Pérou et Marigot se distinguent des autres eaux par une petite composante chlorurée-sulfatée et contiennent du nitrate. Les eaux échantillonnées ne présentent pas de cations dominants.

Diagramme NO3 versus Cl

La relation entre le nitrate et le chlorure permet de qualifier les eaux des hydrosystèmes vis-à-vis des phénomènes de pollutions anthropiques (Illustration 30). L'utilisation conjointe d'intrant azotés et de fertilisant potassique de type (KCI) conduisent à augmenter les teneurs en nitrate et en chlorure des eaux dans l'hydrosystème. L'apport d'eau usée à l'hydrosystème conduit également à une augmentation des teneurs en CI et NO3. Lorsque le milieu est réducteur, le phénomène de dénitrification se traduit par une diminution des teneurs en nitrate, le phénomène pouvant s'accompagner d'une augmentation des teneurs en Fe et Mn.

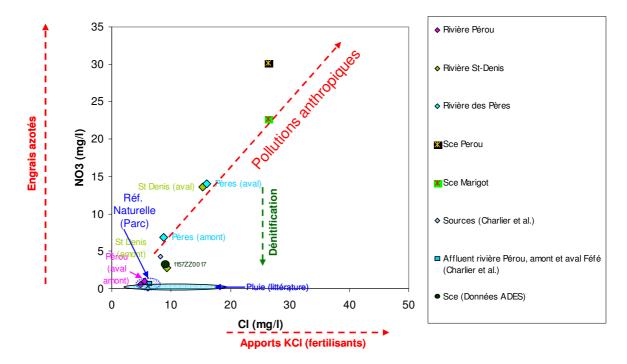


Illustration 30 : évolution des teneurs en nitrate en fonction des teneurs en chlorure

Les eaux de pluies présentent de faibles teneurs en nitrates (qq mg/l) et des teneurs variables en chlorures, comprises entre 12 et 3 mg/l selon la localisation en altitude (gradient altitudinal). En altitude, les eaux de pluie sont moins minéralisées en chlorures que celles du littoral. Les eaux de sources (Charlier, 2007) et les eaux de la rivière Pérou au niveau du Parc National présentent de faibles teneurs en chlorure et nitrate, et permettent de qualifier la signature géochimique des pôles naturel en altitude (eaux de surface, source des lapillis).

Les eaux de la rivière Pérou présentent des teneurs en CI et NO3 comparable à celle de la référence naturelle (eaux du Parc National). Entre l'amont et l'aval, les signatures en CI et NO3 semblent ne pas évoluer ce qui suggèrent que l'hydrosystème est pas ou peu affectés par les phénomènes de pollution anthropique. Signalons la présence de Chlordécone (0.57 µg/l) dans les eaux de la rivière dans la partie aval du bassin

versant. De manière globale, le bassin versant de la rivière Pérou apparaît peu affecté par les activités anthropiques de type agricole.

Les eaux de la rivière des Pères et St-Denis dans la partie amont du bassin versant (cf. carte localisation en Illustration 27) présentent des signatures significativement différentes de celle de la référence naturelle, ce qui suggèrent que les eaux sont déjà impactées par les activités anthropiques de type agricole. La présence de pesticides (cf. annexe 3) dans les eaux de surface de la partie amont des bassins versant de la rivière des Pères (Chlordécone) et St-Denis (Chlordécone, Phostiasate et AMPA) renforce également cette interprétation.

Les eaux de la rivière des Pères et les eaux de la rivière St-Denis, échantillonnées à l'aval de la confluence avec la rivière des Pères, présentent des teneurs en nitrate et chlorure comparables (cf. annexe 3). Sur la base des débits mesurés (cf. tableau en Illustration 25) et des concentrations mesurées, nous pouvons estimer la signature géochimique de l'eau de la rivière St-Denis en amont de la confluence avec la rivière des Pères à l'aide de l'équation de bilan suivante :

Avec:

Ct, la concentration de la rivière St-Denis mesurée à l'aval de la confluence avec la rivière Des Pères et Qt le débit associé (Qt= 200l/s, cf. tableau en Illustration 25) ;

C1, la concentration de la rivière Des Pères mesurée à l'amont de la confluence avec la rivière St Denis et Q1 le débit associé (Q1= 67 l/s, cf. tableau en Illustration 25);

C2, la concentration de la rivière St Denis à l'amont de la confluence avec la rivière Des Pères (non mesurée) et Q2 le débit associé (Q2= 133 l/s, cf. tableau en Illustration 25) ;

Nom		Débit	%		CI	NO3	Chlordécone	Chlordécone 5b-Hydro	Ca	Mg	Na	K	Si
		I/s			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
St denis aval (aval confluence Père)	Qt	200		Concentrations mesurées (Ct)	15.3	13.6	3.46	0.59	19.8	5	12.2	3	63.3
Pères aval (amont confluence)	Q1	67	34%	Concentrations mesurées (C1)	16	14	2.98	0.3	17.8	4.6	11.4	2.9	58.9
St Denis aval (amont confluence Père)	Q2	133	67%	Concentrations estimées (C2)	14.9	13.4	3.70	0.74	20.8	5.2	12.6	3.1	65.5

Illustration 31 : calcul de la signature géochimique des eaux de la rivière St-Denis en amont de la confluence avec la rivière des Pères

Les résultats des calculs (cf. Illustration 31) indiquent que les concentrations en chlorure (CI = 14.9 mg/l) et en nitrate (NO3 = 13.4 mg/l) de l'eau de la rivière St-Denis en amont de la confluence sont comparables à celles de la rivière des Pères (CI = 16 mg/l, NO3 = 14 mg/l).

La présence de chlordécone dans les eaux de la rivière des Pères (2.98 μ g/l) et de St-Denis en aval de la confluence (3.54 μ g/l) à des concentrations supérieures suggèrent que les eaux de la rivière St-Denis en amont de la confluence sont d'avantage chargées en chlordécone que celles de la rivière des Pères (concentration estimée en chlordécone de l'ordre de $3.7~\mu g/l$). Une constatation similaire peut être faite pour la chlordécone 5b-Hydro (concentration estimée en Chlordécone 5b-Hydro de l'ordre de $0.74~\mu g/l$). Ces teneurs élevées mesurées dans les eaux de surface sont à mettre en relation avec la présence des bananeraies fortement représentés à l'échelle des deux sous bassins versants.

D'une manière générale, on montre que les teneurs en chlordécone sont corrélées positivement aux teneurs en chlorures (Illustration 32), les eaux les plus chargées en chlorure apparaissant les plus polluées par les pesticides. Il existe également une corrélation positive entre les teneurs en Chlordécone 5b-Hydro et les teneurs en Chlordécone (Illustration 33). Les teneurs en Phostiasate n'apparaissent pas corrélées aux teneurs en chlorure et Chlordécone (figures non présentées).

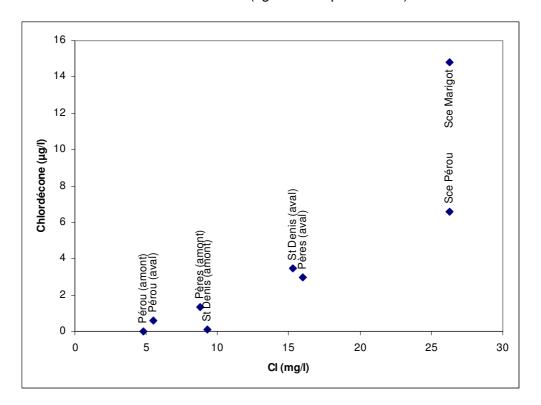


Illustration 32 : évolution des teneurs en chlordécone en fonction des teneurs en chlorure

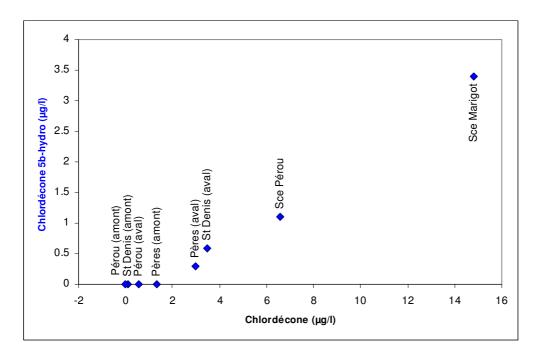


Illustration 33 : évolution des teneurs en Chlordécone 5b-Hydro en fonction des teneurs en Chlordécone

Diagrammes Mg versus Cl, Na vs Mg et Na vs Si

La relation entre le chlorure et le magnésium (Illustration 34) permet de qualifier les eaux des hydrosystèmes vis-à-vis des phénomènes de pollutions anthropiques (CI) et également vis-à-vis des interactions eaux-roches. Les relations entre le sodium et le magnésium (Illustration 35) et le sodium et la silice (Illustration 36) permettent de qualifier les eaux vis-à-vis des interactions eaux-roches. Plus les teneurs en magnésium, sodium et silice sont importantes, plus l'eau a été en contact avec les formations géologiques. Ces traceurs apportent ainsi des informations qualitatives vis-à-vis du temps de résidence de l'eau dans l'hydrosystème et également sur l'importance des eaux souterraines dans le fonctionnement hydrologique des cours d'eau.

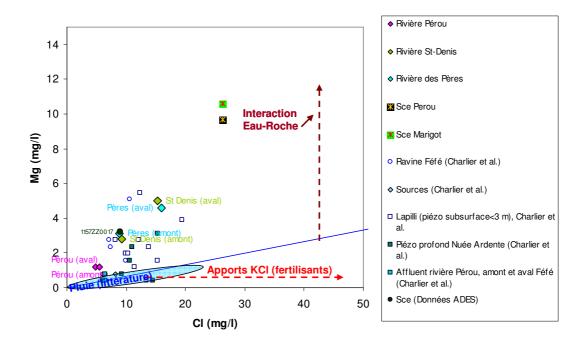


Illustration 34 : évolution des teneurs en magnésium en fonction des teneurs en chlorure

Les eaux de la rivière Pérou et l'affluent de la rivière Pérou (rivière sans nom), en amont et en aval du bassin versant expérimental de la ravine Féfé (Charlier et al, 2009), présentent de faibles teneurs en magnésium et de faibles teneurs en chlorures (Illustration 34). Ces eaux de surface issues du Parc National ne sont pas impactées par les activités anthropiques. Les faibles teneurs en magnésium (de l'ordre de 1 à 1.5 mg/l) indiquent que les eaux ont peu interagit avec la formation géologique ce qui suggère un faible temps de résidence de l'eau dans le système. Les teneurs en magnésium et sodium de la rivière Pérou sont comparables aux teneurs mesurées aux sources échantillonnées par Charlier dans les Lapilli, ce qui suggère que la rivière Pérou est principalement alimentée par les écoulements de sub-surface (peu profonds).

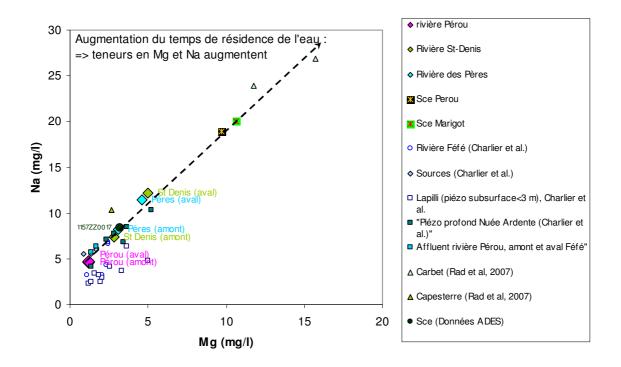


Illustration 35 : évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en magnésium

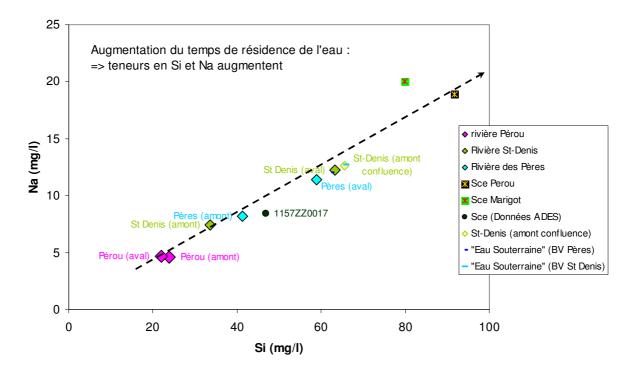


Illustration 36 : évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en silice

L'eau de la rivière Pérou échantillonnée dans la partie aval du bassin versant présente des concentrations en chlorure, en nitrate, en magnésium, en silice et en sodium comparables à celles de l'eau échantillonnée à l'amont (cf. annexe 3). Ce résultat suggère un quasi absence d'alimentation par les eaux souterraines entre l'amont et l'aval contrairement à ce qui est observé pour la rivière des Pères et de St-Denis. Pour ces deux cours d'eau, la concentration en magnésium entre l'amont et l'aval a augmenté d'un facteur 1.5 pour la rivière des Pères et d'un facteur 1.8 pour la rivière St Denis. Pour le chlorure, les facteurs d'enrichissement entre l'amont et l'aval sont respectivement de 1.8 et de 1.6 pour les rivières des Pères et de St-Denis.

Pour la rivière des Pères, compte tenu des débits mesurés à l'amont (11 l/s) et à l'aval (67 l/s), l'augmentation observée de la minéralisation entre l'amont et l'aval du cours d'eau est à rattacher à la contribution des eaux souterraines. Une conclusion comparable peut être également avancé pour la rivière St-Denis (débits mesurés à l'amont =2 l/s et à l'aval =133 l/s).

Sur la base d'un débit de contribution global de l'ordre de 55 l/s pour la rivière Des Pères et de l'ordre de 130 l/s pour la rivière St-Denis, nous avons cherché à estimer la signature géochimique globale des eaux souterraines qui contribuent à l'alimentation des cours d'eau. Les résultats sont reportés en Illustration 37. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'une équation de bilan chimique comparable à celle décrite précédemment (eq.1).

Nom	Débit		CI	NO3	Chlordécone	Chlordécone 5b-Hydro	Ca	Mg	Na	K	Si
	l/s		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Pères amont	11	Concentrations mesurées	8.8	6.9	1.35	0	10.6	3.1	8.2	0.9	41.3
Pères aval (amont confluence)	67	Concentrations estimées	16	14	2.98	0.3	17.8	4.6	11.4	3	58.9
Aquifère (BV Pères)	56	Concentrations estimées	17.4	15.4	3.30	0.36	19.2	4.9	12.0	3.4	62.4

Nom	Débit		CI	NO3	Chlordécone	Chlordécone 5b-Hydro	Ca	Mg	Na	K	Si
	l/s		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
St Denis amont	2.2	Concentrations mesurées	8.8	6.9	1.35	0	10.6	3.1	8.2	1	41.3
St Denis (amont confluence)	133	Concentrations estimées	14.9	13.4	3.70	0.7	20.8	5.2	12.6	3.1	65.5
Aquifère (BV St Denis)	130.8	Concentrations estimées	15.1	13.5	3.7	0.75	21.0	5.2	12.7	3.1	65.9

Illustration 37 : calcul de la signature géochimique global du pôle eau souterraine qui contribue à l'alimentation des rivières Des Pères et de St-Denis entre l'amont et l'aval

De manière globale, les eaux souterraines qui contribuent à alimenter la rivière St-Denis apparaissent légèrement plus minéralisées en Na, Mg et Si que celles qui contribue à l'alimentation de la rivière des Pères. Ce résultat laisse suggérer que les eaux souterraines du bassin versant de St-Denis ont un temps de résidence plus important dans l'hydrosystème que celles qui contribuent à l'alimentation de la rivière

des Pères. Du point de vue de la qualité, les eaux souterraines qui contribuent à alimenter les deux cours d'eau présentent des teneurs comparables et significatives en pesticide (chlordécone > 3 µg/l, notamment). D'un point de vue des teneurs en nitrate et chlorure, les eaux souterraines du bassin versant de la rivière des Pères apparaissent globalement légèrement plus impactées par les pratiques agricoles que celles du bassin versant de la rivière St-Denis.

La minéralisation des eaux souterraines qui contribuent à alimenter les cours d'eau des Pères et de St-Denis apparait intermédiaire à celle des eaux des sources Pérou et Marigot d'une part, et du point d'eau BSS (1157ZZ0017) d'autre part. Les connaissances actuelles obtenues sur la base des éléments majeurs ne permettent pas de conclure quant à l'origine de ces différences de minéralisation. En d'autre terme, sommes-nous en présence d'eau ayant des temps de résidence différents au sein de l'hydrosystème? ou sommes-nous en train de qualifier des signatures géochimiques de réservoirs (formation) différents?

Les sources du Pérou et Marigot apparaissent localisées dans les dépôts de coulés de débris et lahars imbriqués (UH3 cf. carte en Illustration 26). La forte minéralisation de ce deux sources suggèrent l'existence de temps de résidence important de l'eau dans la formation ce qui peut également traduire un faible hydrodynamisme.

La minéralisation plus faible des eaux souterraines qui contribuent à alimenter les rivières des Pères et de St-Denis suggèrent donc un temps de résidence plus faible. Cette minéralisation plus faible peut également caractériser une signature géochimique d'eau issue d'une autre formation, en l'occurrence des nués ardente des Mamelles (UH2 cf. carte en Illustration 26).

La rivière du Pérou apparaît localisée principalement dans la coulée de lave massive de la zone axiale. L'absence de contribution d'eau souterraine entre l'amont et l'aval laisse suggérer que cette formation est peu ou pas aquifère.

5. Synthèse hydrogéologique

Les résultats hydrochimiques, confrontés aux observations géologiques et hydrogéologiques de terrain, permettent de valider le modèle conceptuel des écoulements souterrains du secteur étudié proposé en Illustration 26, à savoir la distinction entre quatre unités hydrogéologiques :

- UH 1 = unité hydrogéologique des laves massives de la Montagne de Capesterre : ces formations qui comportent des profils d'altération épais sont les plus anciennes identifiées sur le secteur d'étude. Elles y forment le substratum qui s'approfondit vraisemblablement fortement vers le Sud. Les seules zones d'affleurement de ces laves massives se retrouvent le long de la rivière Pérou (hors système « Féfé » en amont). Ces formations, si elles ont conservé une certaine perméabilité à l'échelle de la coulée (débit en plaquette) ou de certaines inter-coulées, ne présentent pas de perméabilité significative en grand au regard de l'absence d'affluents significatifs à la rivière Pérou, et de la conductivité relativement faible de la rivière (de l'ordre de 75 μ S/cm) sans évolution significative vers l'aval. L'analyse hydrochimique confirme qu'il y a peu ou pas de contribution des eaux souterraines à l'écoulement de la rivière Pérou, et par conséquent que les laves massives semblent peu ou pas aquifères. Par ailleurs, la rivière Pérou apparait peu impactée par les activités anthropiques.
- UH 2 = unité hydrogéologique des dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles : ces dépôts correspondent à des nuées ardentes qui se sont mises en place dans une paléovallée orientée vers les rivières des Pères et Saint Denis. Elles forment un plateau totalement occupé par une activité agricole cannière et bananière. Ces formations présentent une perméabilité d'interstices. Des apports diffus ont été identifiés le long des rivières recoupant cette formation (rivières des Pères et St-Denis) au contact avec les lahars sous-jacents moins perméables (même type d'aquifère et conditions d'émergences que sur le secteur de « Féfé »). Ces deux rivières présentent des conductivités relativement élevées (de l'ordre de 200 µS/cm) qui augmentent de manière similaire sur ces deux rivières vers l'aval. Ces fortes conductivités témoignent d'une contribution d'eaux souterraines plus minéralisées aux écoulements de surface. Le plateau Fromager – Manceau est vraisemblablement drainé par la rivière des Pères et non par la rivière Pérou. La partie sud de ce plateau, au niveau de Cacador -Marquisat, est à première vue drainée par la rivière Saint Denis, très peu d'eau s'écoulant vers la rivière Dumanoir. Les rivières des Pères et St-Denis présentent globalement une chimie comparable qui confirme une forte contribution des eaux souterraines à l'écoulement de ces cours d'eau. Ces deux rivières apparaissent par ailleurs très impactées par les activités agricoles.
- UH 3 = unité hydrogéologique des dépôts de coulées de débris et lahars imbriqués : ces formations sont globalement peu perméables. Les apports d'eau souterraine identifiés sur cette formation (émergences diffuses le long des

ravines et sources ponctuelles du bourg et du littoral) présentent des conductivités relativement élevées (de l'ordre de 300 $\mu S/cm$), en comparaison à celles mesurées dans les autres unités hydrogéologiques (UH2 ou UH1), ce qui traduit un temps de résidence plus long. Les ravines de ce secteur présentent également des conductivités relativement élevées (> 200 $\mu S/cm$). Ces formations constituent vraisemblablement un imperméable relatif vis-à-vis de l'aquifère des nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2) sus-jacent. Les sources Pérou et Marigot se distinguent chimiquement des rivières des Pères et Saint-Denis (signature d'une circulation dans les lahars), avec un temps de résidence plus long traduisant un faible hydrodynamisme. Les formations des lahars — coulées de débris apparaissent moins perméables que celles des nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2). Ces deux sources sont également fortement impactées par les activités agricoles.

- UH 4 = unité hydrogéologique des dépôts pyroclastiques du Grand Carbet : ces formations correspondent à des nuées ardentes plus récentes que celles associées au système des Petites Mamelles (UH2). Ces nuées ardentes se sont mises en place dans la paléovallée du grand Carbet, limitée au Nord par la ravine Dumanoir. Aucune émergence n'a été identifiée le long de la ravine Dumanoir ou de la rivière du Grand Carbet. Les conductivités mesurés sur ces deux cours d'eau est de l'ordre de 200 μS/cm. La conductivité de la rivière du Grand Carbet diminue vers l'aval. Cette unité hydrogéologique n'a pas fait l'objet d'une caractérisation hydrochimique. Des prélèvements d'eau sur la ravine Dumanoir et sur la rivière du Grand Carbet permettraient de mettre en évidence une contribution des eaux souterraines à l'écoulement de ces cours d'eau, et de définir la relation hydraulique entre les deux aquifères des nuées ardentes (UH2 et UH3).

Le lien lithologie/hydrogéologie n'est pas forcément évident au sein de ces formations relativement récentes. Au regard des données bibliographiques (cf. chapitre 2), les formations potentiellement les plus perméables sont les laves massives fracturées, les nuées ardentes et les alluvions. Les lahars et coulées de débris sont considérés comme des formations peu perméables, qui jouent plutôt le rôle d'imperméable ou de semi-perméable localement.

Les reconnaissances de terrain et l'hydrochimie ont permis de mettre en évidence le fait que les laves massives (UH1) affleurant le long de la rivière Pérou ne constituent pas un aquifère significatif (aucune contribution souterraine à l'écoulement de la rivière Pérou). L'hydrogéologie sur le bassin versant de la rivière Pérou se résume à deux phénomènes localisés : d'une part le petit système aquifère des nuées ardentes de « Féfé » en amont, et le système aquifère des alluvions associées à la rivière à l'aval. Ces aquifères d'extension limitée n'influent pas de manière significative sur la minéralisation de la rivière Pérou.

Les apports souterrains les plus significatifs ont été identifiés le long des rivières Des Pères et Saint-Denis dans les nuées ardentes (UH2) qui constitue l'aquifère principal du secteur d'étude. Les écoulements souterrains semblent drainés quasi-exclusivement par ces deux rivières.

Deux sources ponctuelles ont été mises en évidence dans les formations des lahars-coulées de débris (UH3). Ces formations sont assez récentes pour présenter une certaine perméabilité. Cependant les faibles débits mesurés sur ces sources (< 5 l/s) indiquent que cette perméabilité reste médiocre.

L'unité hydrogéologique des nuées ardentes du Grand Carbet (UH4) n'a pas pu être caractérisée en l'absence de données complémentaires apportées par l'hydrochimie. Le comportement hydrodynamique de cette unité serait à rapprocher de l'unité hydrogéologique des nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2).

Le classement de ces unités hydrogéologiques en terme d'importance de la contribution souterraine aux écoulements de surface, de la plus forte à la plus faible est la suivante : UH2 > UH4 > UH3 > UH1.

Les bassins versants topographiques et les unités hydrogéologiques des rivières étudiées du secteur de Capesterre-Belle-Eau sont délimités en Illustration 38.

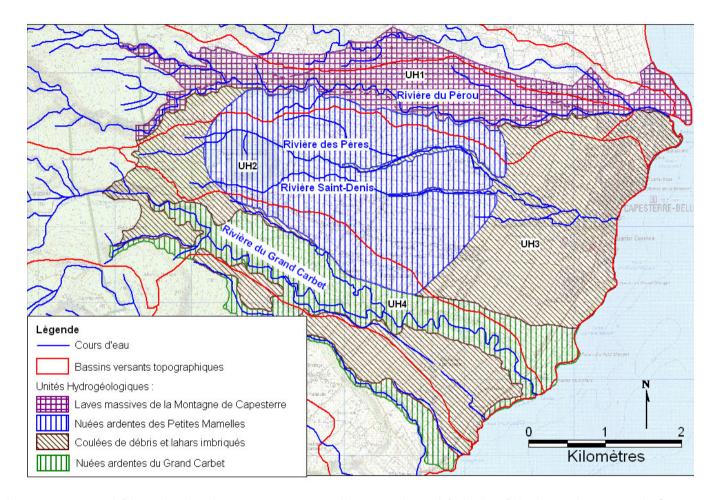


Illustration 38 : carte synthétique des bassins versants topographiques et des unités hydrogéologiques du secteur de Capesterre-Belle-Eau

6. Proposition d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines

Sur la base du modèle conceptuel proposé et des résultats des analyses chimiques, il apparait d'une part que la rivière Pérou n'est pas marquée sur le plan hydrologique par une contribution d'eaux souterraines (conductivité relativement faible et sans évolution significative amont-aval), et d'autre part qu'elle est peu impactée par les pollutions d'origine agricole. Au regard de ce constat, la définition de points de surveillance de la qualité des eaux souterraines représentatifs du bassin hydrogéologique de cette rivière n'est pas envisageable, et apparaît même peu pertinente.

La présence d'eau souterraine profonde sur ce bassin versant, sans lien hydraulique avec la rivière Pérou, n'est cependant pas à exclure. La mise en évidence d'une telle ressource nécessitera de mettre en œuvre des méthodes de prospection hydrogéologiques lourdes et coûteuses (géophysique, forages de reconnaissance). Il peut être envisagé dans ce cas de mettre en œuvre une approche directe par forage d'exploration au droit des parcelles cultivées « tests ». Cette méthode n'exclut pas totalement le risque de non représentativité des sites de prélèvements. L'objectif sera d'acquérir des connaissances sur la ressource en eau souterraine profonde sur le bassin versant de la rivière Pérou, et de caractériser la qualité de ces eaux souterraines (pas de connaissance à l'heure actuelle de cette ressource profonde, ni de son état chimique et donc de l'impact des pratiques agricoles). Il convient cependant de noter que l'aire d'alimentation correspondante se situerait essentiellement en amont de la zone anthropisée, au sein du Parc National. Aussi, si cette ressource profonde devait être avérée, la pertinence de son suivi vis-à-vis des pratiques culturales n'est pas évidente.

Une autre option envisageable pour la mise en œuvre par le GREPP d'un référentiel de techniques culturales permettant de limiter le rejet de produits phytosanitaires dans le milieu naturel, est de choisir un bassin versant expérimental sur lequel la contribution souterraine aux écoulements de surface apparait plus marquée (rivières des Pères et Saint-Denis sur l'unité hydrogéologique des nuées ardentes des Petites-Mamelles UH2). Dans ce cas, les points de surveillance à mettre en place pour le suivi qualitatif des eaux souterraines consisteraient, en l'absence de source intégratrice de la nappe, en la localisation de sites de suivi qualitatif en rivières représentatifs de la qualité des eaux souterraines. La détermination de tels sites de prélèvements devra être basée sur une étude préalable des débits (modélisation pour quantifier la part de contribution souterraine aux écoulements de surface), et les éventuelles sources de contamination devront être identifiées. Il convient, entre autres, d'éliminer les stations influencées par un barrage ou des rejets de station d'épuration. Les prélèvements devront s'effectuer en étiage (contribution totale ou majoritaire des eaux souterraines aux écoulements de surface), et hors évènements pluvieux, afin de s'assurer de la meilleure représentativité possible vis-à-vis de la qualité des eaux souterraines suivies.

Il est également nécessaire de suivre en parallèle les débits des cours d'eau. Cette méthode ne permet cependant pas de suivre la qualité des eaux souterraines en hivernage, et est inadaptée en cas de cours d'eau à sec en carême.

7. Conclusion

L'étude hydrogéologique du secteur de Capesterre-Belle-Eau réalisée par le Brgm a consisté en :

- une synthèse des données existantes sur le secteur étudié ;
- des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain (formations présentes, localisation de sources et contexte d'émergence, mesures physicochimiques in situ, évaluation de débits, ...), le long de la rivière Pérou et de ses principaux affluents, des rivières des Pères, Saint-Denis, du Grand Carbet et de la ravine Dumanoir ;
- une caractérisation hydrochimique des principales rivières et sources du secteur étudié (analyse des éléments majeurs, de certains éléments traces, de composés azotés et de pesticides par le laboratoire MMA du Brgm sur huit prélèvements d'eau).

Ces travaux ont permis de définir un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement des unités hydrogéologiques du secteur étudié. Quatre unités hydrogéologiques ont été identifiées : les laves massives de la Montagne de Capesterre (UH1) peu perméables associées à la rivière Pérou, les nuées ardentes des Petites Mamelles (UH2) alimentant les rivières des Pères et St-Denis, les formations des lahars-coulées de débris (UH3) au sein desquelles des sources à faible débits ont été localisées, et les nuées ardentes du Grand Carbet (UH4) alimentant vraisemblablement la ravine Dumanoir et la rivière du Grand Carbet.

L'objectif de cette étude était de proposer, sur la base de ce modèle conceptuel, des points de surveillance de la qualité des eaux souterraines représentatifs du bassin hydrogéologique de la rivière Pérou. Ces points de surveillance devaient permettre d'évaluer l'impact des actions mises en œuvre par le GREPP sur les eaux souterraines de ce bassin versant expérimental (référentiel de techniques culturales permettant de limiter le rejet de produits phytosanitaires dans le milieu naturel). Cependant au regard des conclusions de cette étude, à savoir une contribution faible des eaux souterraines à l'écoulement de la rivière Pérou, la définition de points de surveillance de la qualité des eaux souterraines représentatifs du bassin hydrogéologique de cette rivière n'est pas envisageable, et apparaît même peu pertinent. La présence d'eau souterraine profonde sur ce bassin versant, sans lien hydraulique avec la rivière Pérou, n'est cependant pas à exclure. Un forage de reconnaissance peut être envisagé au droit des parcelles « tests » afin de mettre en évidence une ressource profonde éventuelle et d'acquérir des connaissances sur la qualité de ces eaux souterraines.

Les résultats de cette étude permettent cependant d'une part d'améliorer la connaissance hydrogéologique du Sud de la Basse-Terre, et d'autre part de compléter le diagnostic du bassin versant réalisé par le GREPP (diagnostic CORPEN), sur le volet concernant les eaux souterraines.

8. Bibliographie

Hydrogéologie

BARAT A., (1984) – Etude du rôle des eaux souterraines dans le mécanisme des éruptions phréatiques. Application à la Montagne Pelée de Martinique et à la Soufrière de Guadeloupe. Thèse université de Bordeaux III, p. 63 à 156.

RANCON JP., PETIT V. et FOUCHER J.L., (1989) – Projet de barrages, sites de Dumanoir et Moreau. Synthèse des investigations géologiques, géophysiques et hydrogéologiques préliminaires – Rapport BRGM 89 GLP 151, 28 p., 15 fig., 6 annexes.

DUTARTRE Ph. Et DELPONT G., (1989) - Utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT pour la prospection hydrogéologique en milieu fissuré volcanique. Exemple de Basse-Terre, Guadeloupe - Rapport BRGM R 30158 TED DT 89, 61 p., 21 fig., 17 pl.

DUTARTRE Ph. Et DELPONT G., (1990) - Recherche d'eau en contexte volcanique. Etude de quatre bassins versants, Guadeloupe - Petites Antilles. Télédétection et croisement de données multisources – Rapport BRGM R 30386 TED SGN 90, 32 p., 6 fig., 9 pl.

DUTARTRE Ph. Et GROS Y., (1990) - Télédétection et hydrogéologie en milieu volcanique. Etats de contraintes actuels et récents sur Basse-Terre, Guadeloupe - Antilles Françaises). Application à la prospection hydrogéologique des milieux volcaniques – Rapport BRGM R 31095 TED GEO 90, 48 p., 14 fig., 1 pl. photo, 2 annexes.

MOMPELAT P. et PETIT V., (1990) – Mise en évidence des zones à bonne potentialité hydraulique par croisement d'images SPOT et de cartes thématiques numérisées. Zone du Grand-Carbet, Guadeloupe – Rapport BRGM R 31576 ANT 4S 90, 25p., 18 fig.

Parc National de la Guadeloupe - Aménagement hydroélectrique de la rivière du Grand-Carbet et de la rivière du Pérou – Rapport de la commission scientifique 1990, 9p., 6 annexes.

Hydrochimie

BRENOT A., ALLIER D., DUMON A., (2008) – Identification des zones à risques de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Guadeloupe – Rapport BRGM RP-55709-FR, 102p.

Charlier J.B. (2007). Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical, PhD, Montpellier : CIRAD, 246 p.

Charlier J.-B., P. Cattan, R. Moussa, and M. Voltz (2008). Hydrological behaviour and modelling of a volcanic tropical cultivated catchment. *Hydrological Processes* 22(22):4355-4370.

Charlier J.B., Lachassagne P., Ladouche B., Cattan P. ^a, Moussa R., Voltz M. (2009, soumis). Structure and hydrogeological functioning of a tropical humid andesitic basin: a multi-disciplinary experimental approach, J. of Hydrology.

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

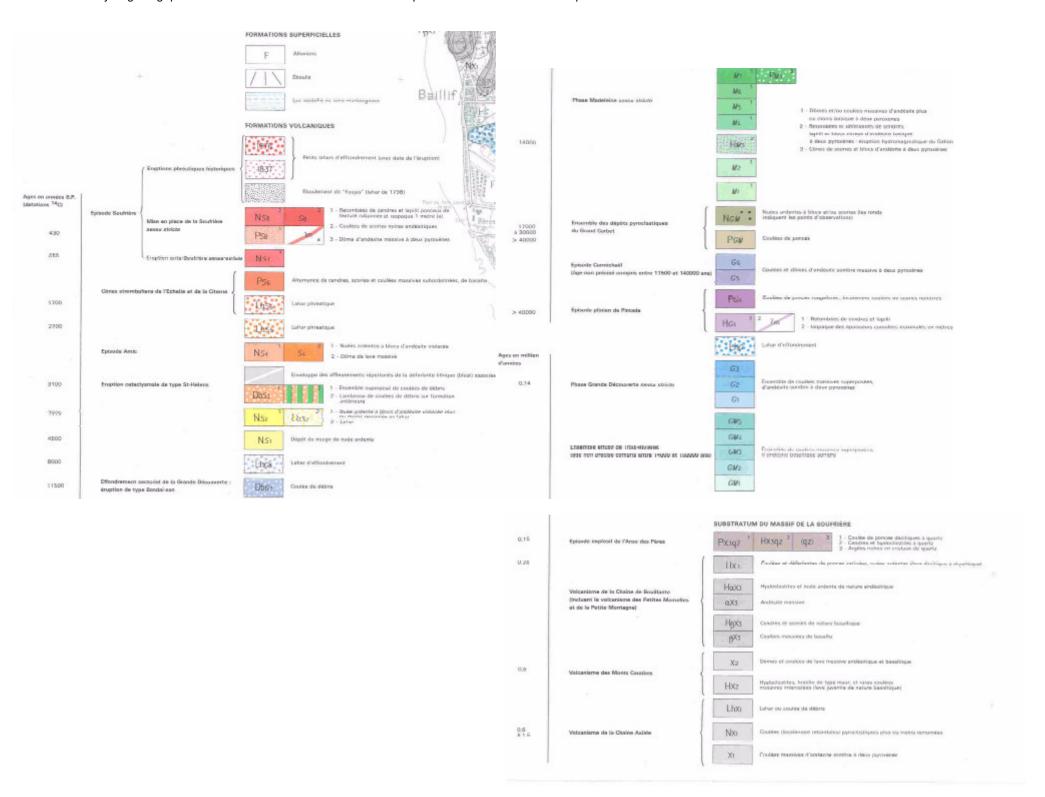
Annexe 1

Légende de la carte géologique de la Basse-Terre (BRGM,1966)



Annexe 2

Légende de la carte géologique du massif de la Soufrière (IPGP-BRGM, 1989)



BRGM/RP-56766-FR – Rapport final

Annexe 3

Résultats des analyses d'eaux souterraines et de surface



RAPPORT D'ESSAIS

08-6-041-B / 2

Provenance: BV Pérou

Nature échantillon: EAU

8 Nombre:

Echantillons réceptionnés le :

05/11/2008

Analyses commencées le :

05/11/08

Référence commande : PSP07GUA24|1

Demandeur: DUMON Amandine

Adresse: SAR/GGR AT/SGR GUA

Le Houelmont

97113 GOURBEYRE France

Secteur analytique	Ingénieur technique
Analyse des composés organiques	A.BERREHOUC

Résultats validés par le(s) ingénieur(s) technique(s)

Visa:

D.MARTINEAU

Responsable enregistrement et suivi des dossiers d'analyses

Téléphone: 02.38.64.30.17

Télécopie: 02.38.64.39.25

le: 12-MAI-2009

Nombre de pages: 5

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais. La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission: 100017238

Rapport d'essais : 08-6-041-B / 2

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le secteur analytique :

Analyse des composés organiques

Le mode opératoire	Méthode BRGM		Méthode BRGM.
est utilisé pour doser :			
Chlordecone 5b-hydro	***************************************		
Le mode opératoire	MO037		Analyse du chlordecone : Extraction liquide/liquide, analyse par CPG/SM
Code Sandre: 45	1		
est utilisé pour doser :			
Chlordécone			
Le mode opératoire	MO218		Selon les phytosanitaires extraction liquide/liquide à pH neutre ou acide, extraction liquide/solide à pH neutre ou acide et analyse par CLHP/UV/SM ou GC/MS.
est utilisé pour doser :			
2,4,D		Cadusafos	
Diuron		Phostiasate	
Le mode opératoire	MO302		Dosage du glyphosate et de son métabolite AMPA dans des échantillons d'eau - Méthode par HPLC/fluorimétrie
est utilisé pour doser :			
АМРА		Glyphosate	

Commentaire du laboratoire :

brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission: 100017238 Rapport d'essais: 08-6-041-B / 2

Commentaire général :

Les échantillons reçus non conditionnés selon les recommandations en vigueur (normes d'analyse ou norme NF EN ISO 5667-3) font l'objet d'un commentaire du laboratoire. Le mode et la durée de conservation avant réception au laboratoire sont de la responsabilité de l'organisme préleveur.

Tout échantillon concernant des études d'environnement est détruit un mois après la remise des résultats sauf demande du client.

Pour les solides : résultats exprimés sur matière sèche.

RESULTATS : les limites de quantification ont été estimées sur des matrices synthétiques ou des solutions étalon. Elles sont susceptibles d'être modifiées en fonction de la nature des échantillons.

Les incertitudes des paramètres accrédités peuvent être fournis sur demande.

UNITES : elles peuvent être différentes selon les éléments

g/l, mg/l, µg/l (1µg/l=0.001mg/l), ng/l (1ng/l=0.001µg/l) % (pourcentage massique) mg/kg (1mg/kg=0.0001%), µg/kg (1µg/kg=0.001mg/kg)

µg=microgramme, ng=nanogramme

Commentaire pour les gaz:

- gaz libres: résultats exprimés en % (pourcentage volumique)
- gaz dissous: résultats exprimés en mole/l

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission: 100017238

Rapport d'essais : 08-6-041-B / 2

			Lims Labo Client	200114059 1 Amont Pérou	200114060 2 Amont des Pères	200114061 3 Aval des Pères	200114062 4 Aval St Denis
Elément	Unité	L.Q**	CS ***	29/10/08	29/10/08	29/10/08	29/10/08
Cientent	Office	L.Q	US ***			.,	- 11.
Cadusafos	μg/l	0.05	1863	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Chlordécone	µg/l	0.1	1866	< 0.1	1.35	2.98	3.46
Chlordecone 5b-hydro	hā\I	0.1		< 0.1	< 0.1	0.30	0.59
Phostiasate	hã\Į	0.01	2744	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
2,4,D	µg/l	0.01	1141	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Diuron	µg/l	0.02	1177	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
AMPA	µg/l	0.1	1907	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Glyphosate	hā\ _l	0.1	1506	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

brgm TABLEAU DE RESULTATS

ld soumission: 100017238

Rapport d'essais : 08-6-041-B / 2

Unité	LQ**		30/10/08	Aval Pérou 30/10/08	Source Pérou 30/10/08	Source Marigot 30/10/08
		CS ***				
µg/l	0.05	1863	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
µg/l	0.1	1866	0.106	0.572	6.57	14.8
µg/l	0.1		< 0.1	< 0.1	1.10	3.40
µg/l	0.01	2744	0.021	0.018	< 0.01	< 0.01
µg/l	0.01	1141	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
µg/l	0.02	1177	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
μg/l	0.1	1907	0.187	< 0.1	< 0.1	< 0.1
µg/l	0.1	1506	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	hây hây hây hây	μg/l 0.1 μg/l 0.01 μg/l 0.01 μg/l 0.01 μg/l 0.02 μg/l 0.1	µg/l 0.1 1866 µg/l 0.1 µg/l 0.01 2744 µg/l 0.01 1141 µg/l 0.02 1177 µg/l 0.1 1907	μg/l 0.1 1866 0.106 μg/l 0.1 < 0.1 μg/l 0.01 2744 0.021 μg/l 0.01 1141 < 0.01 μg/l 0.02 1177 < 0.02 μg/l 0.1 1907 0.187	μg/l 0.1 1866 0.106 0.572 μg/l 0.1 < 0.1 < 0.1 μg/l 0.01 2744 0.021 0.018 μg/l 0.01 1141 < 0.01 < 0.01 μg/l 0.02 1177 < 0.02 < 0.02 μg/l 0.1 1907 0.187 < 0.1	μg/l 0.1 1866 0.106 0.572 6.57 μg/l 0.1 < 0.1 < 0.1 1.10 μg/l 0.01 2744 0.021 0.018 < 0.01 μg/l 0.01 1141 < 0.01 < 0.01 < 0.01 μg/l 0.02 1177 < 0.02 < 0.02 μg/l 0.1 1907 0.187 < 0.1 < 0.1

^{**} LQ : Limite de quantification

FIN DU RAPPORT D'ESSAIS

le: 12-MAI-2009

^{***} CS : Code Sandre





RAPPORT D'ESSAIS

08-6-041-A / 3

Provenance: BV Pérou

Nature échantillon: EAU

Nombre: 8

Echantillons réceptionnés le : 05/11/2008

Analyses commencées le : 05/11/08

Référence commande: PSP07GUA24|1

Demandeur: DUMON Amandine

Adresse: SAR/GGR AT/SGR GUA

Le Houelmont

97113 GOURBEYRE France

Secteur analytique	Ingénieur technique
Analyse inorganique des eaux et des solides	T.CONTE

Résultats validés par le(s) ingénieur(s) technique(s)

Visa:

D.MARTINEAU

Responsable enregistrement et suivi des dossiers d'analyses

Téléphone: 02.38.64.30.17

Télécopie: 02.38.64.39.25

le\: 06-FEV-2009

Nombre de pages:

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais. La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation qui sont identifiés par le symbole *. Laboratoire agréé par le ministère chargé de l'environnement - se reporter à la liste des laboratoires sur le site du ministère.

Siège

Tour Mirabeau - 39-43, quai André-Citroên, 75739 Paris Cedex 15- France Tél. 01 40 58 89 00 - Fax 01 40 58 89 33

Centre scientifique

3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France Tél. 02 38 64 34 34 - Fax 02.38.64.35.18

brgm Etablissement public à caractère industriel et commercial - RCS 58 b 5614 Paris - SIRET 58205614900419

brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission: 100017237

Rapport d'essais: 08-6-041-A / 3

* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le secteur analytique :

Analyse inorganique des eaux et des solides

Le mode opératoire	Méthode BRGM		Méthode BRGM				
est utilisé pour doser :							
Fe2 (Fer ferreux)		S= (Sulfure:	s)				
SO3 (Sulfites)							
Le mode opératoire	MO108		Analyse d'éléments traces par ICP/MS.				
est utilisé pour doser :							
*B (Bore)		*Mn (Manga	anèse)				
*Sr (Strontium)							
Le mode opératoire	NF EN ISO 10304		Méthode par chromatographie ionique(DIONEX)selon NF EN ISO 10304-1 (Juin 1995) pour les eaux faiblement contaminées et NF EN				
Code Sandre: 26	6		ISO 10304-2 pour les eaux usées (Sept 1996). Evaluation des aires de				
est utilisé pour doser :			pics.				
*Cl (Chlorures)		*NO3 (Nitra	(Nitrates exprimés en NO3)				
*SO4 (Sulfates)							
Le mode opératoire Code Sandre: 61	NF EN ISO 11732 1	AOU-05	Détermination de l'azote ammoniacal dans les eaux par analyse en flux(FFA et FIA) et détection spectrométrique.				
est utilisé pour doser : *NH4 (Ammonium expr	imé en NH4)						
Le mode opératoire Code Sandre : 30	NF EN ISO 11885	MAR-98	Analyse par ICP - spectrométrie d'émission.				
est utilisé pour doser :	•						
*Ca (Calcium)		*Fe (Fer)					
*K (Potassium)		*Mg (Magné	ésium)				
*Na (Sodium)		*SiO2 (Silice	·				
Le mode opératoire Code Sandre : 23 est utilisé pour doser : HCO3 (Bicarbonates)	NF EN ISO 9963-1 4	FEV-96	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie selon NF EN ISO 9963-1, CO3/HCO3 calculés à partir des valeurs de l'alcalinité (hypothèse alcalinité uniquement due à CO3, HCO3)				

brgm LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission: 100017237 Rapport d'essais: 08-6-041-A / 3

* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Le mode opératoire **NF EN 1484 JUL-97** Méthode par oxydation persulfate de sodium à chaud. Code Sandre: 274 est utilisé pour doser : *COD (C.org. dissous) Le mode opératoire NF EN 26777 **MAI-93** Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. Code Sandre: 229 est utilisé pour doser : *NO2 (Nitrites exprimés en NO2)

Commentaire du laboratoire :

Commentaire général :

Les échantillons reçus non conditionnés selon les recommandations en vigueur (normes d'analyses ou norme NF EN ISO 5667-3) font l'objet d'un commentaire du laboratoire. Le mode et la durée de conservation avant réception au laboratoire sont de la responsabilité de l'organisme préleveur.

Tout échantillon concernant des études d'environnement est détruit un mois après la remise des résultats sauf demande du client.

Pour les solides : résultats exprimés sur matière sèche.

RESULTATS : les limites de quantification ont été estimées sur des matrices synthétiques ou des solutions étalon. Elles sont susceptibles d'être modifiées en fonction de la nature des échantillons

Les incertitudes des paramètres accrédités peuvent être fournis sur demande.

UNITES : elles peuvent être différentes selon les éléments

g/l, mg/l, µg/l (1µg/l=0.001mg/l), ng/l (1ng/l=0.001µg/l)

% (pourcentage massique)

mg/kg (1mg/kg=0.0001%), µg/kg (1µg/kg=0.001mg/kg)

µg=microgramme, ng=nanogramme

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission: 100017237

Rapport d'essais : 08-6-041-A / 3

Elément	Unité	LQ**	Lims Labo Client	200114051 1 Amont Pérou 29/10/08	200114052 2 Amont des Pères 29/10/08	29/10/08	200114054 4 Aval St Denis 29/10/2008
*COD (C.org. dissous)	mg/l	0.5	1841	1.4	< 0.5	0.7	0.9
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374	3.4	10.6	17.8	19.8
*Mg (Magnésium)	mg/l	0.5	1372	1.2	3.1	4.6	5.0
*Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375	4.6	8.2	11.4	12,2
*K (Potassium)	mg/l	0.5	1367	0.6	0.9	3.0	2.9
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	mg/l	0.1	1335	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	5	1327	17	47	66	74
*Cl (Chlorures)	mg/l	0.5	1337	4.8	8.8	16.0	15.3
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	0.5	1340	< 0.5	6.9	14.0	13.6
*SO4 (Sulfates)	mg/l	0.5	1338	2.0	1.2	4.5	4.6
*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	mg/l	0.01	1339	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*B (Bore)	µg/l	10	1362	< 10	< 10	< 10	< 10
*Fe (Fer)	mg/l	0.02	1393	0.03	< 0.02	< 0.02	< 0.02
*Mn (Manganèse)	µg/l	5	1394	< 5	< 5	< 5	< 5
*SiO2 (Silice)	mg/l	0.5	1348	23.8	41.3	58.9	63.3
*Sr (Strontium)	µg/i	2	1363	< 2	< 2	< 2	< 2
Fe2 (Fer ferreux)	hā\[25		33	< 25	< 25	28
S= (Sulfures)	mg/l	0.1	1355	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
SO3 (Sulfites)	mg/l	3	1086	< 3	< 3	< 3	< 3

le: 06-FEV-2009

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission: 100017237

Rapport d'essais : 08-6-041-A / 3

			Lims Labo Client	200114055 5 Amont St Denis	200114056 6 Aval Pérou	200114057 7 Source Pérou	200114058 8 Source Marigot
Elément	Unité	LQ**	CS ***	30/10/08	30/10/08	30/10/08	30/10/08
*COD (C.org. dissous)	mg/l	0.5	1841	0.6	1.8	< 0.5	< 0.5
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374	8.7	24.7	3.9	22,5
*Mg (Magnésium)	mg/l	0.5	1372	2.8	9.7	1.2	10.6
*Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375	7.4	18.9	4.7	20.0
*K (Potassium)	mg/l	0.5	1367	1.0	3.9	0.7	5.5
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	mg/l	0.1	1335	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	5	1327	41	88	19	94
*Cl (Chlorures)	mg/l	0.5	1337	9.3	26.3	5.5	26.3
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	0.5	1340	2.8	30.2	1.0	22.7
*SO4 (Sulfates)	mg/l	0.5	1338	2.1	15.6	1.6	17.7
*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	mg/l	0.01	1339	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*B (Bore)	μg/l	10	1362	< 10	< 10	< 10	< 10
*Fe (Fer)	mg/I	0.02	1393	< 0.02	< 0.02	0.02	< 0.02
*Mn (Manganèse)	μg/l	5	1394	< 5	< 5	< 5	< 5
*SiO2 (Silice)	mg/l	0.5	1348	33.7	91.6	22.0	79.9
*Sr (Strontium)	µg/i	2	1363	< 2	< 2	< 2	< 2
Fe2 (Fer ferreux)	μg/l	25		< 25	50	< 25	< 25
S= (Sulfures)	mg/l	0.1	1355	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
SO3 (Sulfites)	mg/l	3	1086	< 3	< 3	< 3	< 3

^{**} LQ : Limite de quantification

le: 06-FEV-2009

^{***} CS : Code Sandre



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

Service géologique régional de Guadeloupe Houëlmont

Route de l'Observatoire 97113 – Gourbeyre - Guadeloupe Tél. : 05 90 41 35 48