

Partenariat 2013 – ONEMA/ODE972-Action IV.5.1.a du SNDE DOM



CHLOR-EAU-SOL

Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais

Rapport final

J.-B. CHARLIER, L. ARNAUD, L. DUCREUX, B. LADOUCHE, B. DEWANDEL (BRGM)

J. PLET, M. LESUEUR-JANNOYER, P. CATTAN (CIRAD)

Janvier 2015

Document élaboré dans le cadre de :
La Directive Cadre sur l'Eau

- **AUTEURS**

BRGM

Jean-Baptiste CHARLIER (BRGM), j.charlier@brgm.fr

Luc ARNAUD (BRGM), l.arnaud@brgm.fr

Laure DUCREUX (BRGM), l.ducieux@brgm.fr

Bernard LADOUCHE (BRGM), b.ladouche@brgm.fr

Benoit DEWANDEL (BRGM), b.dewandel@brgm.fr

CIRAD

Joanne PLET

Magalie LESUEUR-JANNOYER (CIRAD), magalie.jannoyer@cirad.fr

Philippe CATAN (CIRAD), philippe.cattan@cirad.fr

- **CORRESPONDANTS**

ONEMA : Claire BILLY, claire.billy@onema.fr

Partenaire : Laurence GOURCY, correspondante ONEMA (BRGM), l.gourcy@brgm.frr

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : France

Citations locales : bassin versant de la Rivière du Galion (Martinique) et bassin versant des rivières Pérou-Pères (Guadeloupe)

Niveau de lecture : Professionnels, experts

- **RESUME**

Dans le cadre de la mise en place en 2012 de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles (OPA-C), le projet CHLOR-EAU-SOL (projet BRGM / CIRAD / ONEMA / ODE) vise à caractériser la contamination par la chlordécone (CLD) des sols et des eaux des deux sites pilotes en Guadeloupe et Martinique. Les deux sites de Pérou-Pères et du Galion présentent des contextes pédologiques, géologiques et hydrogéologiques contrastés, à eux deux représentatifs des hydrosystèmes cultivés aux Antilles.

Le volet Sol et eaux superficielles de CHLOR-EAU-SOL – qui fait l'objet du rapport CIRAD (1^{ère} partie du présent document) – a pour principal objectif de comprendre les processus de transfert de la CLD des sols vers les eaux superficielles : i) en caractérisant la contamination des sols des deux bassins pilotes, et ii) en proposant des sites et des protocoles de suivi.

Lors de la poursuite de ce projet, il s'agira de mener des études plus fines afin de comprendre plus précisément les processus de transfert de la chlordécone des sols vers les eaux et la variabilité spatiale et temporelle de cette pollution diffuse. L'objectif global finalisé est de trouver des solutions pour sa gestion et ainsi limiter les risques qu'elle présente sur la santé, l'environnement et l'économie.

Le volet Eaux souterraines de CHLOR-EAU-SOL – qui fait l'objet du rapport BRGM (2^{ème} partie du présent document) – vise à mieux comprendre la dispersion de la CLD dans les eaux souterraines et de surface en étiage : i) en améliorant la compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes volcaniques tropicaux hétérogènes, et ii) en identifiant les facteurs expliquant la forte variabilité des concentrations en leur sein. La démarche - adoptée pour les deux sites - combine une reconnaissance géologique, une approche hydrodynamique, une approche hydrogéochimique, et la caractérisation de la contamination des eaux.

La compilation de l'ensemble des résultats a permis de définir un premier schéma de fonctionnement hydrogéologique des milieux volcaniques andésitiques en lien avec la diversité géologique des paysages agricoles antillais. L'amélioration de la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu a permis de définir un premier schéma conceptuel de la contamination des eaux souterraines et des eaux de surface en étiage et de mieux comprendre la dispersion de la molécule dans l'environnement. Ces résultats globalement transposables à l'ensemble des bassins agricoles antillais peuvent être utilisés comme guide pour aider les gestionnaires à optimiser les réseaux de suivi qualité.

- **MOTS-CLES : CHLORDECONE ; ANTILLES ; HYDROSYSTEME VOLCANIQUE ; CONTAMINATION ; OPA-C.**

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

Dans le cadre de la mise en place de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles (OPA-C), le projet CHLOR-EAU-SOL (projet BRGM / CIRAD / ONEMA / ODE) a été proposé pour contribuer à la mise en place de l'instrumentation des deux sites pilotes de Guadeloupe et de Martinique et valoriser les données acquises. Ce projet a permis de travailler sur la caractérisation de la contamination par la Chlordécone (CLD) des sols et des eaux des deux bassins pilotes antillais d'OPA-C, celui de Pérou-Pères en Guadeloupe et celui du Galion en Martinique.

Le volet Sol et eaux superficielles, mené par le CIRAD, visait à mieux comprendre les processus de transfert de la CLD des sols vers les eaux superficielles.

Ce projet a permis de compléter la caractérisation de la contamination par la chlordécone dans les eaux superficielles et les sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais et de proposer des localisations et des protocoles de suivi pour l'étude de processus de transfert de polluant.

Lors de la poursuite de ce projet, il s'agira de mener des études plus fines afin de comprendre plus précisément les processus de transfert de la chlordécone des sols vers les eaux et la variabilité spatiale et temporelle de cette pollution diffuse. L'objectif global finalisé est de trouver des solutions pour sa gestion et ainsi limiter les risques qu'elle présente sur la santé, l'environnement et l'économie.

Le projet RIVAGE (Réduire les Impacts environnementaux des pratiques Agricoles) qui débutera fin 2014, intégrera ces études et intégrera d'autres pesticides tout en s'intéressant également aux aspects socio-économiques de cette problématique.

Le volet Eaux souterraines de ce projet, conduit par le BRGM, visait à mieux comprendre la dispersion de la CLD dans les eaux souterraines et de surface, en période d'étiage i) en améliorant la compréhension du fonctionnement de ces hydrosystèmes volcaniques tropicaux hétérogènes et ii) en identifiant les facteurs expliquant la forte variabilité des concentrations en leur sein.

L'identification des facteurs expliquant la variabilité des teneurs en CLD dans les eaux a été rendue possible après avoir caractérisé le fonctionnement hydrogéologique des deux sites, qui présentent des contextes hydrogéologiques contrastés et qui sont représentatifs des hydrosystèmes cultivés aux Antilles. La démarche combine une reconnaissance géologique, une approche hydrodynamique, une approche hydrogéochimique et la caractérisation conceptuelle des mécanismes contrôlant la contamination des eaux par la CLD.

Les reconnaissances géologiques ont permis d'actualiser la carte géologique des formations récentes (<1Ma) du secteur Pérou en Guadeloupe et de mieux caractériser les formations superficielles des formations anciennes (2 à 15 Ma) en Martinique. Les résultats montrent une forte diversité des lithologies à l'échelle du bassin, mais également à l'échelle locale du fait de l'empilement complexe des coulées volcaniques variées (laves, coulées pyroclastiques, de débris, etc.). Le niveau d'altération des formations géologiques s'est révélé être un critère important à prendre en compte pour mieux comprendre la compartimentation des aquifères.

L'interprétation d'essais de pompage longue durée a permis de préciser les propriétés hydrodynamiques de certains aquifères en lien avec le type de lithologie, le degré d'altération ou encore la géométrie des coulées. L'analyse des tests a quasi systématiquement mis en évidence des effets de drainance et une compartimentation des aquifères que l'on peut rattacher au mode de dépôt de coulées volcaniques empilées et emboîtées au sein de paléo-vallées, ainsi qu'à l'altération et à la fracturation qui affecte les formations plus anciennes.

L'approche hydrochimique et isotopique (isotopes du strontium et stables de l'eau), couplée à une datation des eaux par les CFC et SF₆, a permis de mieux caractériser la nature des réservoirs aquifères, les temps de résidence des eaux (temps d'interaction eau-roche et âge apparent) et les mélanges entre les masses d'eau et les eaux de surface en étiage. Une stratification des écoulements et de l'âge des eaux, liée à la lithologie et à la géométrie des aquifères a été mise en évidence. Des axes de drainage souterrain correspondant aux paléo-vallées drainant - à l'aval - des eaux

rechargées en altitude ont été identifiés. Des relations nappes-rivières de différent type ont également été mises en évidence sur les deux sites, puisque les cours d'eau sont alimentés principalement par les eaux souterraines des aquifères « profonds » dans les formations récentes du site Guadeloupéen et par les eaux des aquifères perchés dans les formations d'altérites anciennes du site Martiniquais.

La caractérisation de la contamination des eaux par la CLD montre globalement de plus fortes concentrations dans les eaux souterraines que dans celles de surface (jusqu'à 400 fois la norme de potabilité des eaux). La représentation spatiale des concentrations en CLD dans les eaux a montré une nette augmentation de la CLD vers l'aval du bassin, en lien avec le niveau de contamination des sols au sein des impluviums. L'autre facteur expliquant la variabilité des mesures de CLD dans les eaux souterraines est le temps de résidence moyen des eaux.

La compilation de l'ensemble des résultats a permis de définir un premier schéma de fonctionnement hydrogéologique des milieux volcaniques andésitiques en lien avec la diversité géologique des paysages agricoles antillais.

L'amélioration de la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu a permis de définir un premier schéma conceptuel de la contamination des eaux souterraines et des eaux de surface en étiage et de mieux comprendre la dispersion de la molécule dans l'environnement.

Ces résultats globalement transposables à l'ensemble des bassins agricoles antillais peuvent être utilisés comme guide pour aider les gestionnaires à optimiser les réseaux de suivi qualité des hydrosystèmes volcaniques antillais, par une utilisation ciblée des différents marqueurs du temps de résidence des eaux en fonction de la lithologie, du degré d'altération des formations et de l'occupation du sol. L'observation de plus fortes contaminations des eaux souterraines comparativement aux eaux de surface du réseau hydrographique principal montrent le besoin d'étendre systématiquement le suivi qualité aux eaux souterraines. Enfin, il faut également noter que l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre dans ce projet est une méthodologie efficace pour identifier les aquifères non contaminés des bassins cultivés (ayant des temps de résidence longs) ; ceux-ci pouvant se substituer aux captages en rivière qui apparaissent plus vulnérables lorsqu'ils sont situés au sein de la partie cultivée.

CHLOR-EAU-SOL – volet EAUX SOUTERRAINES

Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais

Rapport final

BRGM/RP-64142-FR
janvier 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM 2013

J.-B. Charlier, L. Arnaud, L. Ducreux, B. Ladouche, B. Dewandel

Vérificateur :

Nom : Yvan Caballero

Date : 11/12/2014

Signature :



Approbateur :

Nom : JC Audru

Date : 13/01/2015

Signature :


Signature numérique

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

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

Mots-clés :

Chlordécone ; Antilles ; hydrosystème volcanique ; contamination ; OPA-C

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

Charlier J.-B., Arnaud L., Ducreux L., Ladouche B., Dewandel B. (2014) – CHLOR-EAU-SOL – volet EAU Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais. Rapport final. BRGM/RP-64142-FR, 160p.

Synthèse

Dans le cadre de la mise en place de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles (OPA-C), le projet CHLOR-EAU-SOL (projet BRGM / CIRAD / ONEMA / ODE) a été construit pour appuyer la mise en place de l'instrumentation des forages sur les deux sites pilotes de Guadeloupe et de Martinique. L'objectif global du projet CHLOR-EAU-SOL vise à caractériser la contamination des sols et des eaux des bassins pilotes antillais d'OPA-C. Le volet EAU de ce projet – qui fait l'objet de ce rapport BRGM – vise à mieux comprendre la dispersion de la CLD dans les eaux souterraines et de surface en étiage : i) en améliorant la compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes volcaniques tropicaux hétérogènes, et ii) en identifiant les facteurs expliquant la forte variabilité des concentrations en leur sein.

L'identification des facteurs expliquant la variabilité des teneurs en CLD dans les eaux a été rendue possible après avoir défini le fonctionnement hydrogéologique des deux sites de Pérou-Pères en Guadeloupe et du Galion en Martinique qui présentent des contextes hydrogéologiques contrastés, à eux deux représentatifs des hydrosystèmes cultivés aux Antilles. La démarche combine une reconnaissance géologique, une approche hydrodynamique, une approche hydrogéochimique, et la caractérisation de la contamination des eaux.

Les reconnaissances géologiques ont permis d'actualiser la carte géologique des formations récentes (<1Ma) du secteur Pérou en Guadeloupe et de mieux caractériser les formations superficielles des formations anciennes (2 à 15 Ma) en Martinique. Les résultats montrent une forte diversité des lithologies à l'échelle du bassin, mais également à l'échelle locale du fait de l'empilement complexe des coulées volcaniques variées (laves, coulées pyroclastiques, de débris, etc.). Le niveau d'altération des formations géologiques est un critère important à prendre en compte pour mieux comprendre la compartimentation des aquifères.

L'interprétation d'essais de pompage longue durée a permis de préciser les propriétés hydrodynamiques de certains aquifères en lien avec le type de lithologie, le degré d'altération ou encore la géométrie des coulées. L'analyse des tests a quasi systématiquement mis en évidence des effets de drainance et une compartimentation des aquifères que l'on peut rattacher au mode de dépôt de coulées volcaniques empilées et emboîtées au sein de paléo-vallées.

L'approche hydrochimique et isotopique (isotopes du strontium et stables de l'eau), couplée à une datation des eaux par les CFC et SF₆ a permis de mieux caractériser la nature des réservoirs aquifères, les temps de résidence des eaux (temps d'interaction eau-roche et âge apparent), et les mélanges entre les masses d'eau et les eaux de surface en étiage. Une stratification des écoulements et de l'âge des eaux, liée à la géologie et à la géométrie des aquifères a été mise en évidence. À l'aide de cette méthode, nous avons pu identifier des axes de drainage souterrain au sein de paléo-vallées qui drainent - à l'aval - des eaux rechargées en altitude. De fortes relations nappes-rivières ont également été mises en évidence sur le réseau hydrographique principal alimenté principalement par les eaux souterraines des aquifères « profonds » sur les formations récentes et par les eaux des aquifères perchés dans les formations d'altérites sur les formations anciennes.

Les principaux résultats de la caractérisation de la contamination des eaux par la CLD montrent globalement de plus fortes concentrations dans les eaux souterraines que dans celles de surface (jusqu'à 400 fois la norme de potabilité des eaux). La représentation spatiale des concentrations en CLD dans les eaux a montré une nette augmentation de la CLD vers l'aval du bassin en lien avec le niveau de contamination des sols au sein des impluviums. L'autre facteur expliquant la variabilité des mesures de CLD dans les eaux souterraines est le temps de résidence moyen des eaux.

La compilation de l'ensemble des résultats a permis de définir un premier schéma de fonctionnement hydrogéologique des milieux volcaniques andésitiques qui composent le paysage agricole antillais. L'amélioration de la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu a permis de définir un premier schéma conceptuel de la contamination des eaux souterraines et des eaux de surface en étiage et de mieux comprendre la dispersion de la CLD dans l'environnement.

Ces résultats globalement transposables à l'ensemble des bassins agricoles antillais peuvent être utilisés comme guide pour aider les gestionnaires à optimiser les réseaux de suivi qualité des hydrosystèmes volcaniques antillais, par une utilisation ciblée des différents marqueurs du temps de résidence des eaux en fonction de la lithologie, du degré d'altération des formations et de l'occupation du sol. L'observation de plus fortes contaminations des eaux souterraines comparativement aux eaux de surface du réseau hydrographique principal montrent le besoin d'étendre systématiquement le suivi qualité aux eaux souterraines.

Sommaire

1 Introduction	13
1.1 CONTEXTE.....	13
1.1.1 Mise en place en 2012 de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles sur la Chlordécone (OPA-C)	13
1.1.2 Enjeux liés à la contamination des eaux par la chlordécone	13
1.2 ACTION CHLOR-EAU-SOL.....	14
1.2.1 Objectif global de l'action.....	14
1.2.2 Objectif spécifique de l'action dans le cadre de la mise en place d'OPA-C.....	14
1.2.3 Objectifs scientifiques du volet EAU et démarche adoptée	15
2 Présentation des bassins pilotes antillais	17
2.1 DEUX BASSINS COMPLÉMENTAIRES, REPRÉSENTATIFS DES HYDROSYSTÈMES CONTAMINÉS PAR LA CHLORDÉCONE.....	17
2.2 OPA-GUA : HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES.....	18
2.3 OPA-MAR : BASSIN DU GALION	21
3 Caractérisation géologique	23
3.1 MÉTHODE	23
3.1.1 Prospection géologique de terrain	23
3.1.2 Prospection par réalisation de forages carottés	23
3.2 HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES (GUADELOUPE)	23
3.2.1 Description des formations géologiques	23
3.2.2 Implantation des forages	29
3.3 BASSIN DU GALION (MARTINIQUE)	31
3.3.1 Description des formations géologiques	31
3.3.2 Implantation des forages	34
3.4 SYNTHÈSE DE LA GÉOLOGIE DES DEUX BASSINS	35
4 Approche hydrodynamique	37
4.1 ESSAIS DE POMPAGE LONGUE DURÉE	37
4.1.1 Description de la méthode des dérivées	37
4.1.2 Données disponibles	39

4.1.3	Modèles mathématiques utilisés pour interpréter les essais	40
4.2	DIAGNOSTICS ET MODÉLISATIONS DES ESSAIS	44
4.2.1	Forage FG (Guadeloupe) :	44
4.2.2	Forage Saint Denis 1 (Guadeloupe) :	48
4.3	LES AUTRES ESSAIS	51
4.3.1	Forage Fromager (Guadeloupe) :	53
4.3.2	Forage Bassignac, BF1 (Martinique) :	55
4.3.3	Forage Malgré Tout, MTF1 (Martinique) :	57
4.3.4	Forage MVF1 (Martinique) :	59
4.4	SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDRODYNAMIQUE.....	61
5	Approche hydrogéochimique.....	63
5.1	OUTILS GÉOCHIMIQUES EMPLOYÉS	63
5.1.1	Analyses chimiques et isotopiques	63
5.1.2	Analyse des Gaz CFC et SF ₆ pour la datation de l'âge apparent des eaux.....	65
5.1.3	Données disponibles	71
5.2	FACIÈS HYDROCHIMIQUES DES EAUX.....	72
5.2.1	Faciès hydrochimiques de l'hydrosystème Pérou-Pères.....	72
5.2.2	Faciès hydrochimiques du bassin du Galion.....	74
5.3	ISOTOPE DU STRONTIUM	78
5.3.1	Guide d'interprétation	78
5.3.2	Interprétation à partir des grands pôles hydrologiques	78
5.3.3	Influences du type de réservoir : lithologie et sols.....	80
5.3.4	Caractérisation des écoulements souterrains et des échanges nappe/rivière	82
5.4	ISOTOPES STABLES DE L'EAU	85
5.4.1	Guide d'interprétation	85
5.4.2	Effet saisonnier.....	86
5.4.3	Altitude de recharge	87
5.5	DATATION DES EAUX SOUTERRAINES (CFC-SF ₆)	90
5.5.1	Estimation des âges apparents des eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères.....	90
5.5.2	Estimation des âges apparents du bassin du Galion	93
5.6	SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE	98
6	Contamination des eaux par la chlordécone.....	101

6.1	MÉTHODE	101
6.1.1	Analyses chlordécone	101
6.1.2	Stratégie de prélèvements.....	101
6.2	VARIABILITÉ SPATIALE DE LA CONTAMINATION DES EAUX	101
6.2.1	Contamination des eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères.....	101
6.2.2	Contamination des eaux du bassin du Galion.....	102
6.3	UNE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES GLOBALEMENT TRÈS ÉLEVÉE.....	104
6.3.1	Impact agricole sur les eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères.....	104
6.3.2	Impact agricole sur les eaux du bassin du Galion.....	105
6.4	LA CHLORDECONE 5B-HYDRO	106
6.5	SYNTHÈSE SUR LES NIVEAUX DE CONTAMINATION DES EAUX PAR LA CHLORDÉCONE.....	107
7	Schémas conceptuels hydrogéologiques : implication sur la compréhension du devenir de la chlordécone dans les eaux.....	109
7.1	FONCTIONNEMENT DE L'HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES.....	109
7.2	FONCTIONNEMENT DU BASSIN DU GALION	110
8	Conclusion.....	113
9	Bibliographie	117

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Contexte hydrologique, pédologique et géologique des deux sites pilotes de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles sur la Chlordécone (OPA-C) localisés sur les cartes de contamination des sols de Martinique et Guadeloupe (Desprats et al., 2013).....	17
Illustration 2 :	OPA-GUA : hydrosystème Pérou-Père, localisation des stations	19
Illustration 3 :	OPA-MAR - Localisation du bassin versant du Galion	22
Illustration 4 :	Hydrosystème Pérou-Père sur fond de carte géologique au 1/50 000 de la Basse-Terre.....	24
Illustration 5 :	Photos de carottes réalisées lors des travaux de forages (Saint-Denis) sur la partie intermédiaire du bassin versant : A) dépôts pyroclatiques peu altérés, B) coulées de débris avec blocs de laves dans une matrice argileuse, C) laves andésitiques saines fracturées ; la longueur des carottes est de 1 m.....	25
Illustration 6 :	laves massives en plaquettes de la rivière Pérou (à gauche) et formation rougeâtre localement observée en base de coulée (à droite).	26

Illustration 7 : i) Coulée de débris, lit de la rivière Pérou (à gauche), et ii) zoom sur un dépôt de coulée de débris contenant des débris végétaux, rivière des Pères (à droite).	26
Illustration 8 : Dépôts pyroclastiques : i) Nuées ardentes de Féfé en rive gauche du Bras Duflot (à gauche), ii) nuées ardentes des Petites Mamelles en rive droite de la Rivière des Pères (à droite).	27
Illustration 9 : Dôme andésitique des Petites Mamelles, flanc nord.	27
Illustration 10 : formations superficielles observées sur l'hydrosystème Pérou-Père : i) alluvions de la rivière Pérou (en haut à gauche), ii) colluvions de bas de pente reposant sur une coulée de débris (en haut à droite), et iii) profil d'altération superficiel sur dépôts cendreaux récents (en bas).	28
Illustration 11 : Carte géologique du secteur de Capesterre-Belle-Eau (modifié d'après Dumon et al. 2009)	29
Illustration 12 : Localisation des 3 forages implantés sur le bassin versant observatoire de Guadeloupe	30
Illustration 13 : Coupe géologique de l'interfluve des rivières Pérou et des Pères.	31
Illustration 14 : Carottes prélevées sur le sondage BF1 à Bassignac.....	32
Illustration 15 : Carte géologique au 1/50 000 du bassin du Galion (BRGM)	32
Illustration 16 : Laves altérées observées sur le bassin versant du Galion (allotérites à gauche et isaltérites à droite)	33
Illustration 17 : Carte de localisation des stations de surveillance de l'observatoire OPA-MAR (pluviomètres, stations hydrologiques et forages implantés)	34
Illustration 18 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.....	37
Illustration 19 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. tD : temps adimensionnel, sD (courbe pleine) et sD' (courbe tirée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel)	38
Illustration 20 : inventaire des essais par pompage interprétés	39
Illustration 21 : Modèles à effet de drainance d'un aquitard supérieur, anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales, captage partiel de l'aquifère. Modifié des solutions de Hantush (1964) et Hunt et Scoot (2007). Dans la solution de Hantush $T_0 \rightarrow \infty$ ou $S_y \rightarrow \infty$	41
Illustration 22 : Paramètres des modèles à effet de drainance (modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007). * Les paramètres de l'aquitard ne sont valables que pour la solution de Hunt et Scott (2007).....	41
Illustration 23 : Courbes types de la solution modifiée de Hantush : influence du facteur de drainance du semi-perméable ($Br_{1/2}$). sD (courbe pleine) et sD' (courbe tirée): rabattement et dérivée sans dimension ; tD : temps sans dimension	42
Illustration 24 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence du facteur de drainance du semi-perméable ($Br_{1/2}$)	43
Illustration 25 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de l'emmagasinement de l'aquitard (S_y)	43
Illustration 26 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de la transmissivité de l'aquitard (T_0)	44
Illustration 27 : diagnostic et modélisation de l'essais réalisé sur le forage FG (Guadeloupe),2005. s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé. Modèle : Hunt et Scott modifié.....	45

Illustration 28 : tests sur FG en interférence avec FF (Féfé) du 26 au 27/10/2005. Modèle : modifié de Hunt et Scott, 2007 Représentation log-log	46
Illustration 29 : tests sur FG en interférence avec FF (Féfé) du 26 au 27/10/2005. Modèle : modifié de Hunt et Scott, 2007 Représentation arithmétique. Graphe du bas : zoom sur Féfé. s: rabattement ; s' : dérivée du rabattement	47
Illustration 30 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai sur FG. Modèle utilisé : modifié de Hunt et Scott (2007)	48
Illustration 31 : Schéma d'interprétation de l'essai de pompage réalisé sur FG.	48
Illustration 32 : diagnostic de l'essai au forage Saint Denis et modélisation de l'essai (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié. s-NORM : rabattement normalisé; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé ; RECOV : remontée des paliers sur Primevère	49
Illustration 33 : modélisation de l'essai au forage Saint Denis (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement	50
Illustration 34 : paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai sur Saint Denis. Modèle : Hunt et Scott modifié.....	51
Illustration 35 : modélisation de l'essai au forage Fromager (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. S : rabattement ; s' : dérivée du rabattement	54
Illustration 36 : modélisation de l'essai au forage Bassignac (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s: rabattement ; s' : dérivée du rabattement	56
Illustration 37 : modélisation de l'essai au forage Malgré Tout (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement	58
Illustration 38 : Zoom sur les rabattements pendant la période de pompage. Malgré Tout , 2014	59
Illustration 39 : modélisation de l'essai au forage MVF1 (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement	60
Illustration 40 : Processus d'échanges isotopiques susceptibles d'affecter la signature isotopique (18O, 2H) de l'eau (d'après Clark et Fritz 1997).....	64
Illustration 41 : Chroniques des concentrations des CFC et SF6 dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov).....	67
Illustration 42. Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les résultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)	69
Illustration 43 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF6	70
Illustration 44 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF6.	70
Illustration 45 : Localisation des prélèvements sur l'hydrosystème Pérou-Pères dans le cadre des projets OPA-C et CHLOR-EAU-SOL ; le libellé des sites fait référence au Tableau récapitulatif en Annexe 3	71
Illustration 46 : Localisation des prélèvements sur le bassin du Galion dans le cadre des projets OPA-C et CHLOR-EAU-SOL ; le libellé des sites fait référence au Tableau récapitulatif en Annexe 4.	72
Illustration 47 : Faciès chimiques des eaux de érou-Pères en fonction du type d'eau, période 2006-2014....	73

Illustration 48 : Faciès chimiques des eaux de Pérou-Pères pour les eaux de surface (en haut à gauche), les eaux de sources (en haut à droite), et les eaux de piézomètres (notés P1 à P15) et forages (notés F) (en bas).....	74
Illustration 49 : Faciès chimiques des eaux du Galion en fonction du type d'eau, période 2012-2013	75
Illustration 50 : Faciès chimiques des eaux du Galion pour les eaux de surface (en haut à gauche), les eaux de sources (en haut à droite), et les eaux de forages (notés F) (en bas).....	76
Illustration 51 : Diagramme Ca/Na vs. Sr/Na pour les eaux du Galion ; identification des apports anthropiques	77
Illustration 52 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. 1/Sr pour les eaux de Pérou-Pères ; identification des grands pôles hydrologiques	79
Illustration 53 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. Na/Sr pour les eaux du Galion ; identification des grands pôles hydrologiques.....	80
Illustration 54 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. 1/Sr pour les eaux Pérou-Pères ; influences de la lithologie et des sols.....	81
Illustration 55 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. 1/Sr pour les eaux du Galion ; influences de la lithologie et des sols.....	82
Illustration 56 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. 1/Sr ; écoulements souterrains et échanges nappe-rivière le long des rivières Pérou et des Pères.....	82
Illustration 57 : Diagramme 87Sr/86Sr vs. Na/Sr ; écoulements souterrains et échanges nappe-rivière le long de la rivière du Galion	84
Illustration 58 : Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$; variations saisonnières de la signature isotopique entre les basses eaux de 2013-2014 et les hautes eaux de 2012 de l'hydrosystème Pérou-Pères.....	87
Illustration 59 : Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$; altitudes moyennes de recharge des eaux de la campagne 2013-2014	88
Illustration 60. Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014. Les paramètres physicochimiques in situ sont également reportés. Note : les valeurs en rouge témoignent d'une pollution des eaux prélevées par les CFC11 et 12	91
Illustration 61. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2013 sur l'hydrosystème Pérou-Pères (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire	92
Illustration 62. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire	93
Illustration 63. Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014.....	94
Illustration 64. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2013 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire.....	95
Illustration 65. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire.....	97
Illustration 66 : Carte de la contamination à la chlordécone des sols et des eaux sur l'hydrosystème Pérou (données sols CIRAD)	102

Illustration 67 : Carte de contamination des eaux souterraines par la CLD sur fond de carte de risque de contamination des sols (données sols CIRAD)	103
Illustration 68 : Diagramme CLD vs. NO ₃ ; contamination des eaux de Pérou-Pères.....	104
Illustration 69 : Diagramme CLD vs. NO ₃ ; contamination des eaux du Galion.....	105
Illustration 70 : Diagramme CLD 5b-hydro vs. CLD en échelle linéaire (à gauche) et en log-log (à droite) ; avec les eaux de Pérou-Pères en rouge et du Galion en bleu	106
Illustration 71 : Diagramme CLD vs. âge apparent (à gauche) et CLD 5b-hydro vs. âge apparent (à droite) des eaux souterraines de Pérou-Pères en rouge et du Galion en bleu.....	107
Illustration 72 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD de l'hydrosystème Pérou-Pères ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en µg/l et 5b = CLD 5b-hydro en µg/l.....	110
Illustration 73 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Bassignac sur le Galion ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en µg/l et 5b = CLD 5b-hydro en µg/l.....	111
Illustration 74 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Malgré Tout sur le Galion; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en µg/l et 5b = CLD 5b-hydro en µg/l.....	111
Illustration 75 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Mont-Vert sur le sous-bassin de La Digue (Galion) ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en µg/l et 5b = CLD 5b-hydro en µg/l.....	112

Liste des annexes

Annexe 1 Coupes géologiques et techniques des forages implantés sur OPA-GUA.....	121
Annexe 2 Coupes géologiques et techniques des forages implantés sur OPA-MAR.....	127
Annexe 3 Tableau récapitulatif des analyses chimiques, isotopiques et de CFC et SF ₆ sur OPA-GUA	133
Annexe 4 Tableau récapitulatif des analyses chimiques, isotopiques et de CFC et SF ₆ sur OPA-MAR.....	139

1 Introduction

1.1 CONTEXTE

1.1.1 Mise en place en 2012 de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles sur la Chlordécone (OPA-C)

Le devenir de la Chlordécone (CLD) dans les sols, les rivières et les eaux souterraines aux Antilles est une préoccupation majeure. Ce pesticide de la famille des organochlorés a été utilisé aux Antilles jusqu'en 1993 afin de prévenir les attaques de charançons dans les bananeraies. Caractérisé par une forte rémanence, ce produit est fréquemment retrouvé à de fortes concentrations dans les sols des anciennes zones bananières, dans certains fruits et légumes issus de ces mêmes zones (Cabidoche et al., 2009 ; Cabidoche and Lesueur-Jannoyer, 2011, 2012), ainsi qu'en aval, dans l'eau, les sédiments et la faune aquatique (Gourcy et al., 2009 ; Lesueur-Jannoyer et al., 2012). Cependant, il est encore aujourd'hui difficile de comprendre pourquoi cette molécule, qui est très fortement retenue dans les premiers horizons des sols, se diffuse aussi largement dans les aquifères et les cours d'eau.

Cette problématique est à l'origine de la mise en place de l'Observatoire de la Pollution Agricole aux Antilles pour la Chlordécone (OPA-C). Son but est d'identifier l'ensemble des processus impliqués dans le transfert de la CLD vers les eaux superficielles et souterraines en contexte volcanique tropical et également de disposer des moyens d'interpréter les niveaux de contamination et leur évolution au cours du temps. De plus, le niveau de connaissance doit être suffisamment fin pour que les relations mises en évidence puissent s'appliquer à d'autres polluants, ouvrant ainsi la voie à une caractérisation plus complète des impacts des pesticides sur l'environnement.

L'Observatoire OPA-C comprend deux sites en cours d'instrumentation: l'hydrosystème Pérou-Pères en Guadeloupe et le bassin du Galion en Martinique. À eux deux, ces sites sont représentatifs de l'ensemble de la diversité climatique, pédologique, géologique et hydrologique du paysage agricole aux Antilles. Ces deux sites présentent aussi des enjeux démographiques et des usages de l'eau diversifiés (irrigation, aquaculture, AEP). L'Observatoire OPA-C est piloté par un consortium BRGM-CIRAD-INRA-IRD.

1.1.2 Enjeux liés à la contamination des eaux par la chlordécone

Les connaissances actuelles sur les propriétés du milieu volcanique en termes de transfert hydrique et de contaminant sont insuffisantes pour permettre une instrumentation hydrologique opérationnelle des bassins antillais, capable de suivre les niveaux de contamination de la qualité des eaux.

Pour réduire le risque d'exposition à la chlordécone (et aux autres molécules utilisées actuellement) des usages de l'eau (AEP, eau agricole) et accompagner les gestionnaires, il est fondamental de connaître les facteurs contrôlant la contamination des eaux. En effet, le suivi ponctuel des eaux souterraines et superficielles continentales des bassins contaminés montre une forte variabilité spatiale et temporelle des teneurs en CLD. Or, l'origine de cette variabilité est méconnue, ce qui rend difficile la mise en place d'outils de gestion du risque d'exposition (réseaux de suivi), ainsi que la formulation de recommandations à apporter pour l'exploitation de la ressource en eau.

De ce constat, est né le projet CHLOR-EAU-SOL porté par le BRGM et le CIRAD, en partenariat avec l'ONEMA et les ODE Martinique et Guadeloupe. Ce projet vise à caractériser les déterminants de la variabilité de la contamination des eaux par la CLD aux Antilles, en lien avec la nature et le fonctionnement des sols et des hydrosystèmes. Le projet s'appuie sur l'Observatoire OPA-C, en cours d'instrumentation.

1.2 ACTION CHLOR-EAU-SOL

1.2.1 Objectif global de l'action

Dans le cadre du Plan National d'Action Chlordécone II (PNAC II) et dans le cadre, plus large, de la mise en œuvre d'un réseau de suivi pesticides impulsé par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), il apparaît nécessaire de caractériser les niveaux de contamination par la CLD des masses d'eau aux Antilles, ainsi que l'évolution de cette contamination à court et moyen terme.

Les sites pilotes de l'OPA-C rendent compte de la diversité des paysages des zones contaminées aux Antilles. Se pose la question de savoir si la variabilité des teneurs en CLD mesurée ponctuellement dans les eaux est :

- une conséquence de la variabilité spatiale de la contamination des sols ?
- ou une conséquence de la forte hétérogénéité des hydrosystèmes antillais et des processus de transfert au sein des aquifères ?

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de déterminer le niveau de contamination des sols et des eaux en relation avec la variabilité des caractéristiques agronomiques et des processus hydrogéologiques. Pour ce faire, un programme de travail comprenant deux volets (SOL et EAU), portés respectivement par le CIRAD et le BRGM, a été conçu. Ils comprennent, respectivement, une analyse agronomique ciblée sur la caractérisation de la contamination des sols et une analyse hydro(géo)logique ciblée sur la caractérisation de la contamination des eaux.

1.2.2 Objectif spécifique de l'action dans le cadre de la mise en place d'OPA-C

Si la caractérisation du niveau de contamination des sols sur le bassin du Pérou en Guadeloupe a déjà débuté (travaux de l'ANR CHLORDEXCO – CIRAD) et qu'une campagne de prélèvements des eaux de surface et souterraines a été réalisée en 2012 dans le cadre d'OPA-C, la caractérisation SOL & EAU doit être étendue à l'ensemble de l'hydrosystème Pérou-Pères et du bassin du Galion en Martinique, selon les tâches spécifiques suivantes :

- Tâche 1 : caractérisation de la contamination des sols des deux sites pilotes ;
- Tâche 2 : caractérisation de la contamination des nappes et des eaux superficielles continentales des sites pilotes ;
- Tâche 3 : propositions de localisation et de priorisation des sites d'instrumentation en lien avec les caractérisations ci-dessus ;
- Tâche 4 : bancarisation des données « eau » récoltées dans la base chlordécone-EAU des Offices (accès web) ou dans une banque nationale (ADES) et des données « sols » dans le SIG-sol chlordécone géré par la DAAF

Le projet CHLOR-EAU-SOL constitue donc un point préparatoire à la mise en place de l'instrumentation des forages sur les sites pilotes de Guadeloupe et de Martinique de

l'Observatoire OPA-C. Le présent rapport présente l'ensemble des résultats du projet CHLOR-EAU-SOL, en se focalisant sur le volet EAU.

1.2.3 Objectifs scientifiques du volet EAU et démarche adoptée

Le volet EAU du projet CHLOR-EAU-SOL vise à mieux comprendre la dispersion des polluants dans les aquifères et les rivières à l'échelle du bassin versant, en s'appuyant sur les deux sites pilotes d'OPA-C.

Pour cela, il est tout d'abord nécessaire :

- de mieux comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes complexes volcaniques tropicaux ;
- d'identifier les facteurs expliquant la forte variabilité des concentrations de CLD en leur sein.

Le volet EAU comprend quatre axes :

Axe 1 : Déterminer la structure des hydrosystèmes volcaniques antillais. L'objectif est de définir la géométrie des hydrosystèmes, c'est-à-dire les limites des unités géologiques dans lesquelles circulent les eaux souterraines.

Une approche naturaliste de reconnaissance géologique et hydrogéologique sera mise en œuvre. Il s'agit de décrire les formations géologiques en présence. Une attention particulière sera portée à l'état d'altération de ces formations. La carte géologique de Guadeloupe (De Reynal de Saint-Michel, 1966) étant obsolète, les prospections de terrain seront mises à profit pour l'actualiser. La carte géologique de Martinique (Westercamp et al., 1989) étant précise, les prospections terrain porteront essentiellement sur la caractérisation des formations superficielles.

Axe 2 : Déterminer les propriétés hydrodynamique des aquifères. L'objectif est d'identifier les propriétés hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement) et géométriques des aquifères hétérogènes dans les différents compartiments. Cette tâche va permettre de caractériser les propriétés de transfert des eaux souterraines, en fonction de la nature géologique et du contexte géomorphologique.

L'approche mise en œuvre portera sur l'interprétation des tests hydrauliques qui seront effectués sur les forages mis en place en cours de projet sur les sites pilotes d'OPA-C. Des méthodes récentes et adaptées au milieu fracturé, tels que les modèles analytiques récemment développés au BRGM prenant en compte la compartimentation verticale ou/et horizontale seront utilisées.

Axe 3 : Caractériser les transferts au sein des aquifères à l'aide d'une approche hydrogéochimique. L'objectif est de mieux caractériser, pour l'ensemble des eaux échantillonnées, le type de réservoir dans lequel elles ont transité (lithologie de l'aquifère), leur origine (altitude moyenne de recharge), ainsi que leur temps de résidence au sein de l'aquifère.

L'approche mise en œuvre utilise les marqueurs isotopiques du Strontium (Rad et al., 2007) et des stables de l'eau, ainsi que des outils de datation par les CFC et SF₆ (Gourcy et al., 2009) sur les eaux souterraines et de surface prélevées en basses eaux.

Axe 4 : Mieux comprendre le devenir de la CLD dans les hydrosystèmes. L'objectif est de caractériser le niveau de contamination à la CLD des nappes dans les différents hydrosystèmes et de le mettre en relation avec l'origine des eaux et leur temps de résidence au sein des aquifères. Cette tâche va permettre de mieux comprendre le transfert de contaminant dans les aquifères volcaniques tropicaux en se basant sur le fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème concerné.

Cette dernière tâche aboutira à une synthèse des résultats et portera sur la mise en évidence des déterminants de la dispersion de la chlordécone dans les hydrosystèmes, pour pouvoir généraliser et comprendre la variabilité des niveaux de contamination par les pesticides, sur les autres bassins cultivés antillais.

2 Présentation des bassins pilotes antillais

2.1 DEUX BASSINS COMPLÉMENTAIRES, REPRÉSENTATIFS DES HYDROSYSTÈMES CONTAMINÉS PAR LA CHLORDÉCONE

Les deux bassins pilotes de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles sur la Chlordécone (OPA-C) rendent compte de la diversité des situations climatiques, pédologiques, hydrologiques et géologiques dans lesquelles on observe une contamination de l'environnement par la CLD. Les deux sites pilotes sont (Illustration 1) :

- OPA-GUA : l'hydrosystème Pérou-Pères en Guadeloupe

- OPA-MAR : le bassin versant du Galion en Martinique

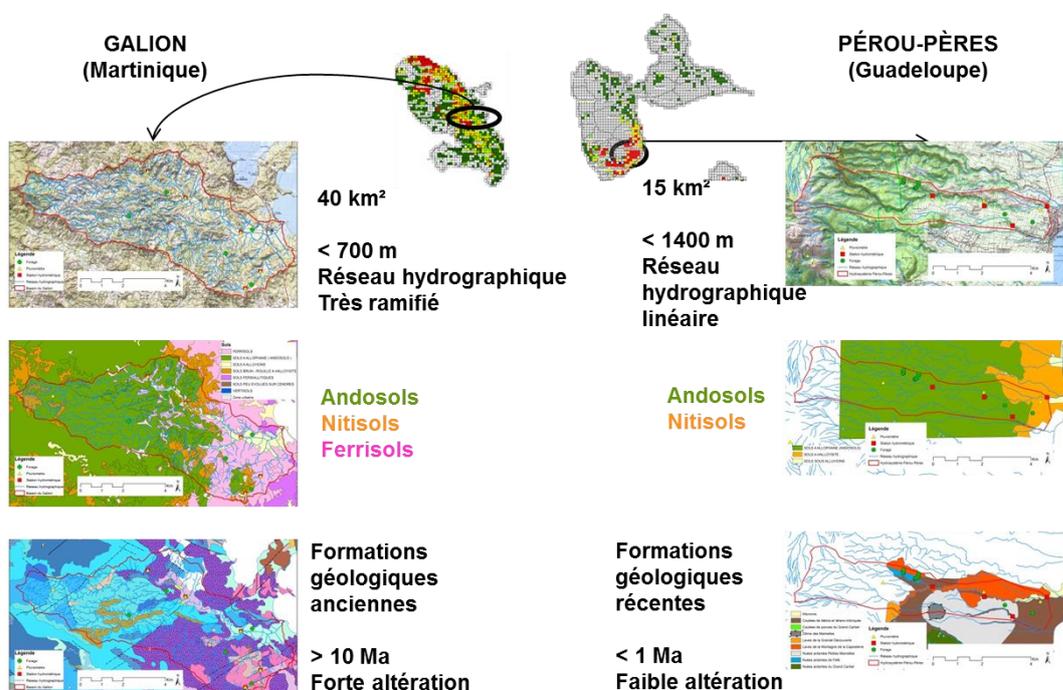


Illustration 1 : Contexte hydrologique, pédologique et géologique des deux sites pilotes de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles sur la Chlordécone (OPA-C) localisés sur les cartes de contamination des sols de Martinique et Guadeloupe (Desprats et al., 2013)

La chlordécone (CLD) a été appliquée au cours de deux périodes, à savoir entre 1972 et 1978 puis de 1982 à 1993 sur les parcelles cultivées en banane. Cet historique ainsi que la fréquence des traitements et les opérations de travail du sol sont identifiées comme des variables contrôlant la variabilité des teneurs en pesticides organochlorés dans les sols (Cabidoche et al., 2009).

Du point de vue climatique, les Antilles se caractérisent par un climat tropical à deux saisons (une saison sèche de décembre à mai, une saison humide de juin à novembre lors de la saison cyclonique) et connaissent un fort gradient pluviométrique altitudinal. Les intensités de pluies sont fortes (plusieurs dizaines de mm/h) et les épisodes majeurs se produisent lors du passage des

dépansions tropicales en saison cyclonique. À cette variation pluviométrique, croissante avec l'altitude, est associée une augmentation de l'infiltration et donc de la recharge des nappes et de l'intensité du lessivage des sols.

Au plan pédologique, les sols antillais sont très variés sur des distances très limitées, avec une logique de distribution liée à l'âge des dépôts volcaniques et à l'intensité du lessivage. Cette variabilité concerne aussi bien la nature des minéraux secondaires, la micro-organisation correspondante, que le stock organique et la garniture cationique. Elle affecte la susceptibilité de la CLD au lessivage interne (percolation) et de surface (ruissellement) ainsi qu'au transport particulaire. Les principaux types de sols à considérer, ayant fait l'objet de contaminations, sont les andosol, les ferralic nitisol, les nitisol et les sols à smectites. Les études déjà réalisées, notamment dans le cadre de l'ANR CHLORDEXCO, montrent qu'ils présentent des propriétés de rétention, de lessivage et de susceptibilité à l'érosion, significativement différentes.

Sur le plan hydrogéologique, les aquifères volcaniques se développent dans des formations géologiques hétérogènes aux propriétés hydrauliques variables, latéralement et en profondeur. Cette variabilité est issue d'une part du mode de dépôt des formations volcaniques (empilement de produits variés, de remplissage de paléo-vallées), et d'autre part de l'état d'altération de ces formations (diminution de la perméabilité en grand avec l'augmentation de l'âge des formations). Elle définit des fonctionnements hydrogéologiques distincts suivant les types de formation : i) des transferts en milieu fissuré au sein des laves et hyaloclastites et des coulées de débris, ii) des transferts chenalisés et interstitiels pour les formations pyroclastiques, iii) des transferts lents pour les aquitards (avalanches de débris argilisés) et les imperméables locaux comme les bases de coulées argilisées dans les fonds de vallées et certains paléosols interstratifiés.

Les objectifs à terme du suivi des flux hydriques et de pesticide au sein de l'OPA-C répondent aux nécessités suivantes :

- i) tenir compte de la variabilité des mécanismes de transfert déjà identifiés (percolation, ruissellement, érosion, écoulements souterrains) ;
- ii) pouvoir proposer des modèles plausibles de fonctionnement hydrologique et hydrogéologique associés ;
- iii) pouvoir observer à terme l'impact de la contamination sur les biotes, dans les écosystèmes dulçaquicoles et côtiers ;
- iv) évaluer le moment venu l'impact de procédés de remédiation.

La mise en place des stations pluviométriques et hydrométriques a été réalisée en 2013 (Bricquet, 2013). Celle des forages a été finalisée en 2014, suite aux premiers résultats obtenus dans le cadre du projet CHLOR-EAU-SOL.

2.2 OPA-GUA : HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES

Le site pilote guadeloupéen correspond à l'hydrosystème Pérou-Pères. Il comprend les deux rivières du Pérou et des Pères, qui encadrent un aquifère d'interfluve. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- **pratiques agricoles** : Pérou regroupe à la fois des exploitations industrielles et de petites exploitations familiales, avec des zones de contamination plus ou moins anciennes ;
- **sols** : le bassin couvre les deux familles de sols les plus représentatifs de la sole bananière : andosols et nitisols ;
- **hydrologie** : le bassin est caractéristique des bassins versants du cône volcanique récent (actif) des îles antillaises avec une zone amont en forêt primaire (donc non contaminée)

- dont les écoulements sont susceptibles de diluer les concentrations de pesticide issues des zones cultivées de la zone intermédiaire et aval ;
- **hydrogéologie** : ce site permet de prospecter le transport souterrain des polluants sur des formations géologiques récentes (1,5 à 0,6 Ma) peu altérées comprenant les 3 grands types de lithologies présents aux Antilles : laves massives ; formations pyroclastiques, coulées de débris ;
 - **données existantes** : une caractérisation avancée du bassin existe : chroniques hydrologiques - pluie, débit, piézométrie - d'une année sur la rivière Pérou (ANR CHLORDEXCO) et de plus de cinq ans sur le sous-bassin de Féfé (thèse de Charlier (2007)).

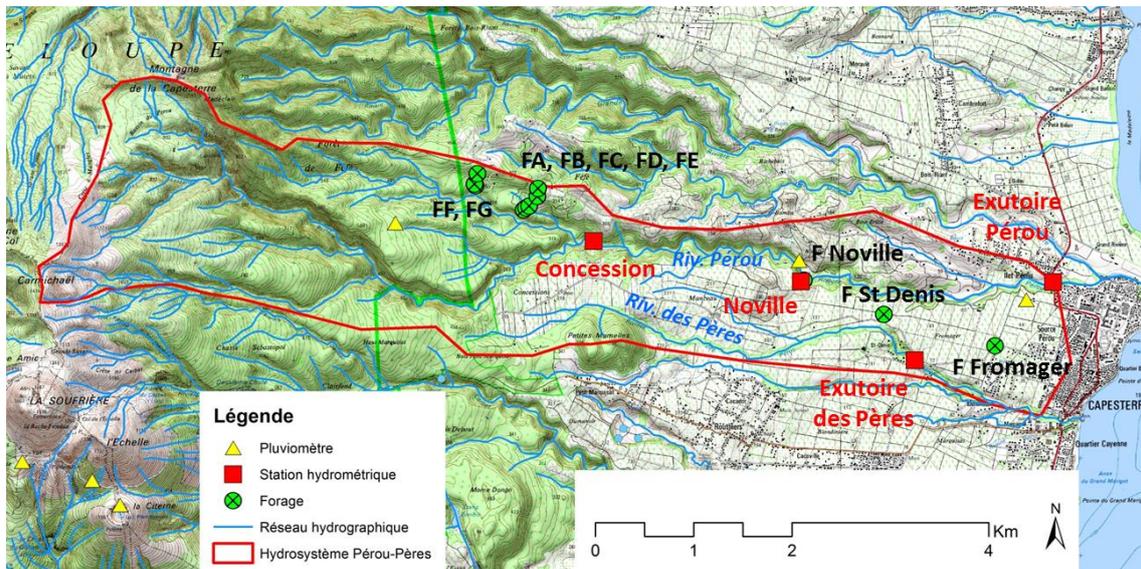


Illustration 2 : OPA-GUA : hydrosystème Pérou-Père, localisation des stations

L'hydrosystème Pérou-Pères est situé sur la commune de Capesterre-Belle-Eau (Illustration 2) dans le sud de la Basse-Terre, en côte au vent. Son bassin s'étire sur une superficie d'environ 25 km² d'est en ouest sur le flanc oriental du massif volcanique de la Soufrière (Dumon et al., 2009) et présente de fortes pentes de 20 à 50 % sur la partie amont du bassin notamment. Il inclut la rivière Pérou jusqu'à son exutoire (Pont de la RN, cote 15m) et la rivière des Pères jusqu'à sa confluence avec la rivière St-Denis (cote 75m). La zone d'étude proprement dite concerne l'aquifère d'interfluve entre les deux cours d'eau, dans la partie basse de l'hydrosystème.

La pluviométrie annuelle sur ce bassin augmente de 2 000 à plus de 10 000 mm de la côte aux crêtes du bassin, situées à 1 400 m d'altitude.

S'agissant de l'occupation des sols, 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 (Trouillefou, 2007).

D'après la carte pédologique au 1/50 000 de la Basse-Terre (Colmet-Daage, 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). Les zones de sédimentation sont essentiellement situées à son estuaire.

Du point de vue géologique, l'âge des formations correspond à 1.5 à 0.6 Ma pour les coulées de laves massives et pyroclastites (Dumon et al., 2009). Les laves possèdent une perméabilité de fissure (primaire lors du refroidissement, ou secondaire d'origine tectonique) qui leur confère de bonnes propriétés hydrauliques (Charlier et al., 2011). Les formations pyroclastiques (matériaux à granulométrie hétérogène) présentent une perméabilité d'interstice qui peut augmenter dans la zone axiale de la coulée. Sur le sud Basse-Terre, la mise en place récente de ces coulées fait que leur faible niveau d'altération ne modifie pas la perméabilité du milieu, n'impactant pas les transferts souterrains.

Enfin le niveau de contamination à la CLD a été suivi durant une année sur la rivière Pérou (débit moyen annuel de l'ordre de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et varie de 0,2 à plus de $2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ à l'exutoire. Les concentrations sur la rivière des Pères sont plus élevées ($3 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) et dépassent $10 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ au niveau de certaines sources.

Une première conceptualisation des transferts de contaminants a été entreprise à petite échelle sur le sous-bassin de Féfé (< 1 ha), au sein de la zone cultivée amont du bassin du Pérou. Ce sous-bassin a été particulièrement étudié du point de vue de son fonctionnement hydrologique (Charlier, 2007; Charlier et al., 2008), hydrogéologique (Charlier et al., 2011) et du transfert de pesticides (Charlier et al., 2009). Tout récemment, la rivière Pérou a servi de base expérimentale au projet CHLORDEXCO de 2009 à 2010 pour étudier l'état de contamination des sols, le fonctionnement hydrologique du bassin et la contamination des animaux aquatiques. L'ensemble est à l'origine d'une base de données importante concernant la caractérisation: du milieu physique (sols, occupation du sol, pentes...); du milieu humain (types et tailles d'exploitations); du milieu biologique (campagnes de pêches); des flux (pluies, débits en différentes localisations) et des contaminations (concentration en chlordécone dans les sols et les eaux par décade du 01/10/2009 au 31/10/2010 - données additionnelles d'un autre nématocide, le cadusafos).

2.3 OPA-MAR : BASSIN DU GALION

En Martinique, le site pilote est le bassin versant du Galion. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- **pratiques agricoles/occupation des sols** : des territoires partagés avec l'habitat résidentiel, induisant une érosion accrue du fait de l'imperméabilisation des surfaces (toitures, routes...);
- **sol** : un contexte pédologique comprenant quatre types de sols : andosols, nitisols, déjà présents en Guadeloupe mais également des sols d'intergrade ferralsols/vertisols à kaolinite et montmorillonite. Ces derniers sont plus sujets à l'érosion et moins filtrants que les andosols (très présents sur le bassin guadeloupéen) ;
- **hydrologie** : ce bassin versant est un des rares de Martinique à ne disposer que d'un seul exutoire, ce qui en facilite le suivi et l'établissement de bilans. D'une superficie d'environ 40 km², son réseau hydrographique est ramifié ;
- **géologie** : des formations géologiques anciennes donnant lieu à de grands profils d'altération sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ;
- **interface terre-mer** : une interconnexion entre le milieu terrestre (nappe et rivière) et le milieu marin (baies) présentant l'écotone mangrove-herbiers-coraux.

Il existe un enjeu « eau potable » sur le bassin : des recherches d'eau souterraine sont en cours pour le compte de deux syndicats d'eau, à la fois sur l'amont et l'aval du bassin versant. De plus, un contrat de rivière existe sur le Galion (Contrat de rivière du Galion, ODE, 2007). Les principaux objectifs de ce contrat de rivière sont : (1) une gestion quantitative de la ressource en eau, (2) l'amélioration de la qualité écologique et chimique des cours d'eau avec un nécessaire lien Terre/Mer et (3) la reconquête des milieux aquatiques et leur valorisation patrimoniale.

Le bassin versant du Galion couvre une superficie de l'ordre de 40 km² et comprend environ 245 km de cours d'eau et ravines. Il s'étend sur 4 communes : La Trinité, Le Gros Morne, Sainte-Marie et Le Robert (Illustration 3).

En lien avec la topographie, la pluviométrie sur le bassin versant est très variable : les moyennes annuelles varient entre 2 000 mm par an à l'aval et 5 000 mm à l'amont.

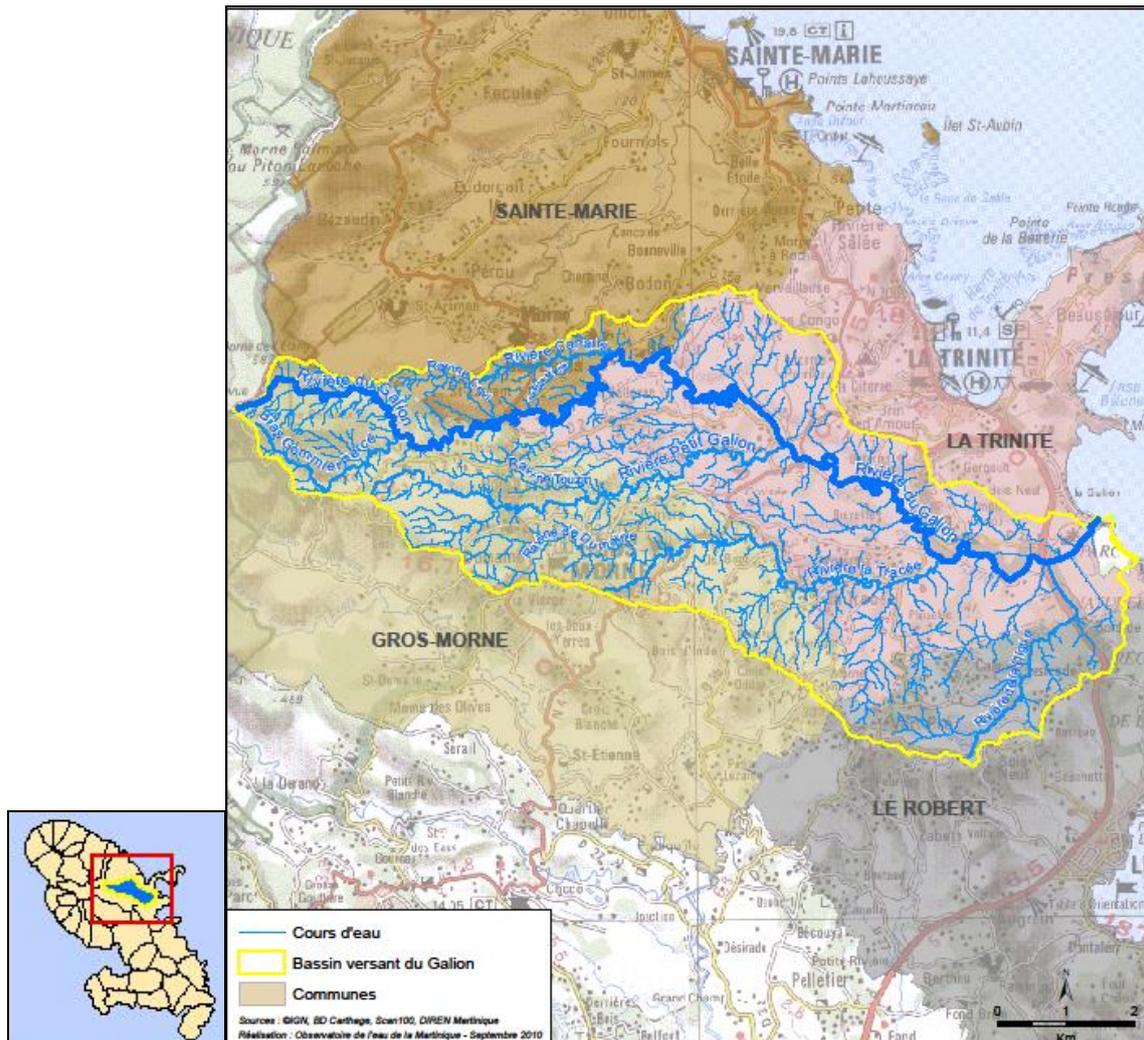


Illustration 3 : OPA-MAR - Localisation du bassin versant du Galion

Parmi ses principaux cours d'eau, on peut citer : la rivière du Galion (23 km), la rivière Petit-Galion (9 km), la rivière la Tracée (8 km), la ravine de Dumaine (5 km), la rivière de la Digue (4 km), Bras Gommier Percé (3,5 km), la ravine Touzin (3 km) et la rivière Canaris (2,5 km).

Les premiers cours d'eau prennent leur source dans les mornes bordant les pitons du Carbet où le relief est très escarpé. Cette zone amont est peu habitée, ce sont les milieux naturels de forêts ombrophiles qui prédominent.

Plus en aval, à partir de la confluence du Bras Gommier et du Bras Verrier, l'apparition de zones cultivées et d'habitat regroupé en lieu-dit est le signe d'un adoucissement du relief. Les surfaces cultivées y sont de plus en plus importantes et diversifiées jusqu'au littoral, frange sur laquelle la culture de canne à sucre prédomine.

Sur sa partie aval, le bassin se resserre et laisse place à la plaine agricole du Galion où l'on trouve à proximité de l'exutoire, l'usine sucrière et la centrale de cogénération du Galion.

3 Caractérisation géologique

3.1 MÉTHODE

3.1.1 Prospection géologique de terrain

Les prospections géologiques ont pour but de décrire les formations géologiques en présence sur le terrain. Une attention particulière est portée à l'état d'altération, à la fissuration / fracturation et au type de perméabilité des roches (perméabilité de matrice et/ou de fissures).

La carte géologique de Guadeloupe (De Reynal de Saint-Michel, 1966) étant obsolète, les prospections de terrain ont permis son actualisation dans la zone d'étude, sur la base des travaux de Dumon et al. (2009).

La carte géologique de Martinique (Westercamp et al., 1989) étant précise, les prospections terrain ont essentiellement porté sur la caractérisation des formations superficielles.

3.1.2 Prospection par réalisation de forages carottés

Des forages carottés ont été réalisés dans le cadre du projet de mise en place de l'OPA-C, mais le choix de leur localisation a été réalisé suite aux reconnaissances terrain et à la première campagne hydrogéochimique réalisée dans le cadre de ce projet CHLO-EAU-SOL.

La technique du carottage continu a été retenue pour réaliser les piézomètres. Cette méthode, non destructive, permet de décrire les terrains traversés de façon précise (lithologie, état d'altération, fissuration, etc.). En milieu volcanique, le recours au sondage carotté est particulièrement précieux au regard de l'agencement complexe des formations géologiques (superposition de coulées plus ou moins altérées, avec intercalations de paléosols ou de niveaux cendreaux, etc.). Par la suite, l'ouvrage peut être équipé de manière optimale avec la mise en place ciblée des tubages et des crépines, pour individualiser le ou les horizons aquifères d'intérêt.

3.2 HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES (GUADELOUPE)

3.2.1 Description des formations géologiques

L'hydrosystème Pérou-Père est localisé sur l'île de la Basse-Terre, associée à l'arc insulaire interne récent des Petites Antilles, siège d'un volcanisme actif du Miocène (-23 Ma) à l'actuel. L'illustration 4 indique les limites de l'hydrosystème sur fond de carte géologique au 1/50 000 (Reynald de Saint-Michel, 1966). Selon cette carte, les formations dominantes sur ce secteur sont, des plus anciennes au plus récentes :

- complexe volcanique antémiocène (I - vert foncé) ;
- brèches andésitiques (P_{ab} – rose foncé, amont et $P_{ab/c}$ rosé orangé, aval) ;
- lapillis et ponces dacitiques (P_{pl} rose clair, amont nord).

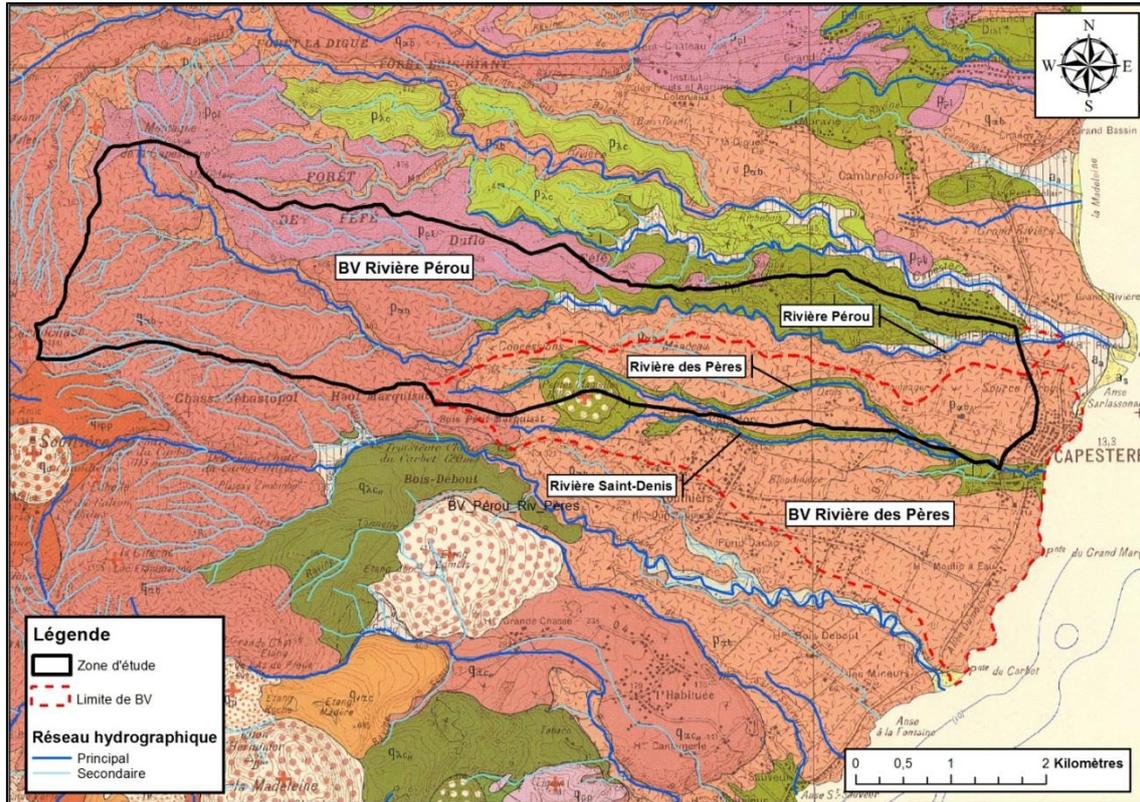


Illustration 4 : Hydrosystème Pèrou-Père sur fond de carte géologique au 1/50 000 de la Basse-Terre.

La carte géologique de la Basse-Terre (Reynald de Saint-Michel, 1966) étant obsolète, la réalisation de prospections nous a permis de mieux préciser la nature et l'extension des formations géologiques existantes à l'échelle de l'hydrosystème. Elles ont été mises en œuvre en juin 2012 dans le cadre du projet OPA-C et complétées en avril 2013 et février 2014.

Les observations de terrain valident globalement le schéma géologique proposé en 2009 pour le secteur ouest de Capesterre-Belle-Eau (Dumon et al., 2009).

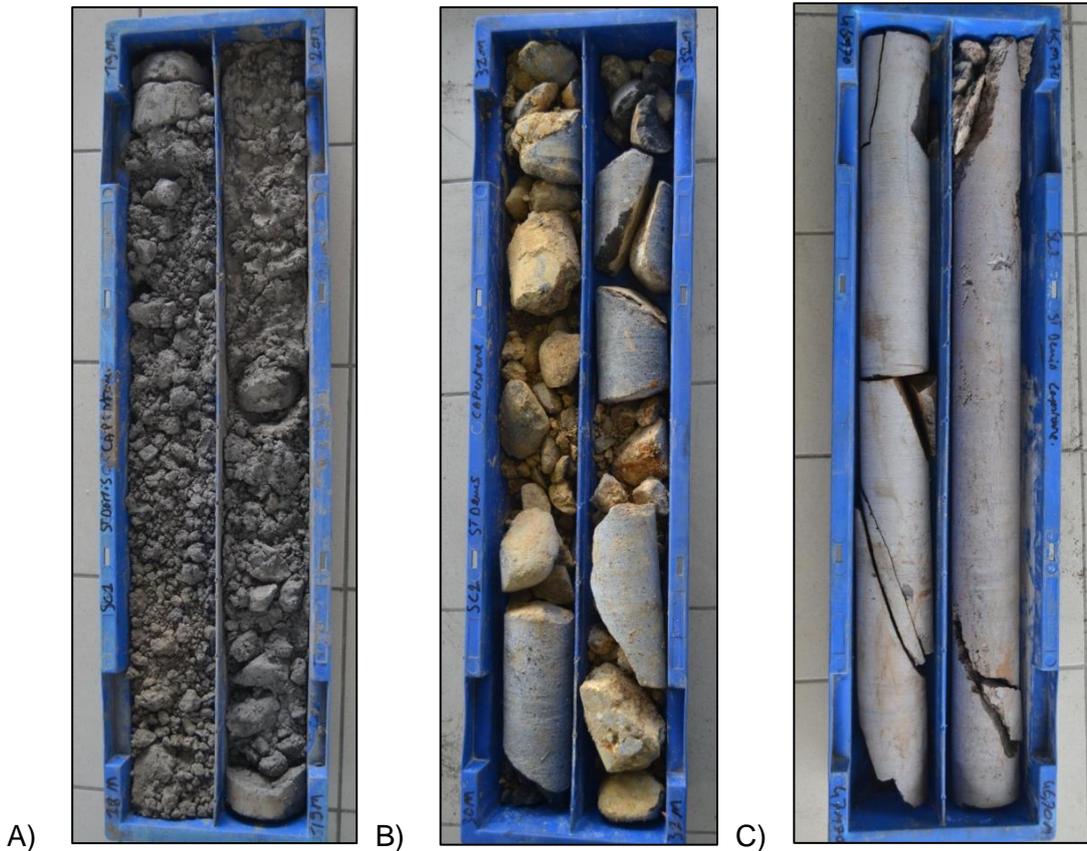


Illustration 5 : Photos de carottes réalisées lors des travaux de forages (Saint-Denis) sur la partie intermédiaire du bassin versant : A) dépôts pyroclatiques peu altérés, B) coulées de débris avec blocs de laves dans une matrice argileuse, C) laves andésitiques saines fracturées ; la longueur des carottes est de 1 m.

D'un point de vue géologique, 4 grands types de formations sont observées :

- **Les laves andésitiques massives de la Montagne de Capesterre** (chaîne Axiale), (cf. Illustration 6) : de couleur sombre, elles sont principalement localisées au droit du lit de la rivière Pérou et présentent un important degré de fracturation : 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 (Dumon et *al.*, 2009). Ces laves massives facturées forment le soubassement du secteur Pérou-Pères. Elles ont été recoupées sur le forage carotté de Saint-Denis, dans la partie intermédiaire de l'hydrosystème, à une profondeur de 43 m (Illustration 5). Localement, à la base des coulées, un horizon rougeâtre et argilisé est observé. Ce type de formation correspond en toute vraisemblance à une coulée de lave bréchifiée (oxydation à chaud lors de la mise en place des coulées successives). L'hypothèse d'une zone d'altération hydrothermale n'est pas écartée bien que des changements de teintes assez nets sont généralement relevés à l'échelle de ce type de profil (passage du gris/blanc au rouge par exemple).



Illustration 6 : laves massives en plaquettes de la rivière Pérou (à gauche) et formation rougeâtre localement observée en base de coulée (à droite).

- **Les coulées de débris** (cf. Illustration 7) : conceptuellement, ces formations constituent le remplissage d'une/de paléovallée(s) et sont globalement mises en place depuis la rivière Pérou, jusqu'en rive droite de la rivière Saint-Denis. Les reconnaissances sur le terrain s'étant concentrées sur le secteur d'étude, la délimitation, au sud, de cette formation n'est pas définie. Les coulées de débris sont généralement riches en blocs anguleux issus du démantèlement brutal de massifs volcaniques et peuvent contenir des débris de végétaux (troncs par exemple). Elles ont été observées de manière quasi-continue dans le lit de la rivière des Pères ainsi qu'à l'aval de la rivière Pérou (discordance avec des alluvions sus-jacents). Dans la partie haute du bassin versant, ces dépôts ont été observés de manière ponctuelle en rive droite et surtout en amont de l'ensemble volcanique des Petites Mamelles (Dumon et *al.*, 2009). Localement, ces coulées sont en contact direct avec les dépôts pyroclastiques de Féfé et recouvrent les formations laviques (Charlier, 2007). Enfin, et compte tenu d'un contact direct avec les laves massives de la Grande Découverte, au niveau de la Deuxième Chute du Carbet, Boudon et *al.* (1988) confirment une extension de ces dépôts vers le sud.



Illustration 7 : i) Coulée de débris, lit de la rivière Pérou (à gauche), et ii) zoom sur un dépôt de coulée de débris contenant des débris végétaux, rivière des Pères (à droite).

- **Les dépôts pyroclastiques et nuées ardentes** (cf. Illustration 8) : des dépôts pyroclastiques sont identifiés localement en rive gauche du Bras Duflot au sous bassin de Féfé, en amont de l'hydrosystème et surtout dans la partie intermédiaire et aval du bassin. Selon Dumon et *al.* (2009), les dépôts de Féfé sont de deux types. Le premier est du type « Block-and-Ash Flow » (BAF). Les BAF sont caractéristiques des événements de destruction de dômes ou de dômes-coulées encore

relativement chauds et se présentent, sur les affleurements visités, sous la forme de grands dépôts verticaux constitués de blocs très anguleux, de taille centimétrique à métrique et de teinte rosée dans une matrice cendreuse très peu indurée, homogène et de même teinte. Le second type correspond à des dépôts de nuées ardentes constituées de cendres grises, riches en petits blocs anguleux et pouvant dépasser plusieurs mètres d'épaisseur. L'origine des dépôts de Féfé reste incertaine mais leur position stratigraphique haute (au-dessus des laves de la Montagne de Capesterre et des coulées de débris), leur faible degré d'altération et leur localisation en amont de bassin laissent présager une mise en place récente associée à l'activité de la Grande Découverte. Les dépôts pyroclastiques observés dans la partie intermédiaire du bassin ont une origine différente. Ils sont associés à l'activité volcanique des Petites Mamelles (dôme andésitique caractéristique dans le paysage, Illustration 9) et affleurent dans le lit de la Rivière des Pères et celui de Saint-Denis sur des épaisseurs de plus de 20 m. Ils forment des ensembles relativement épais reposant sur les dépôts de coulées de débris. L'extension spatiale de ces dépôts est probablement limitée.

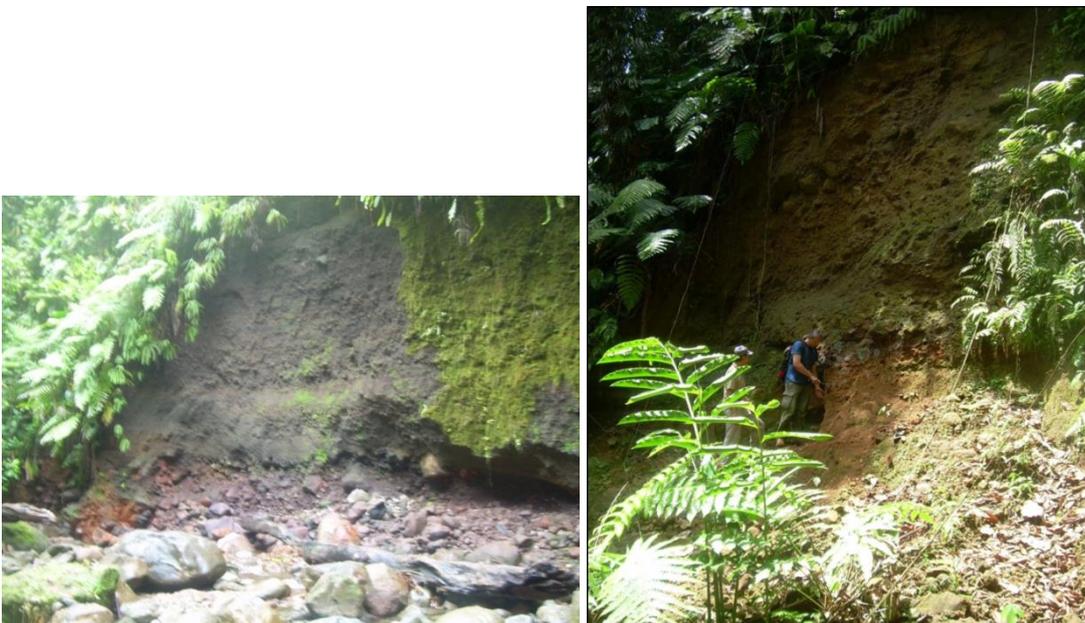


Illustration 8 : Dépôts pyroclastiques : i) Nuées ardentes de Féfé en rive gauche du Bras Duflot (à gauche), ii) nuées ardentes des Petites Mamelles en rive droite de la Rivière des Pères (à droite).



Illustration 9 : Dôme andésitique des Petites Mamelles, flanc nord.

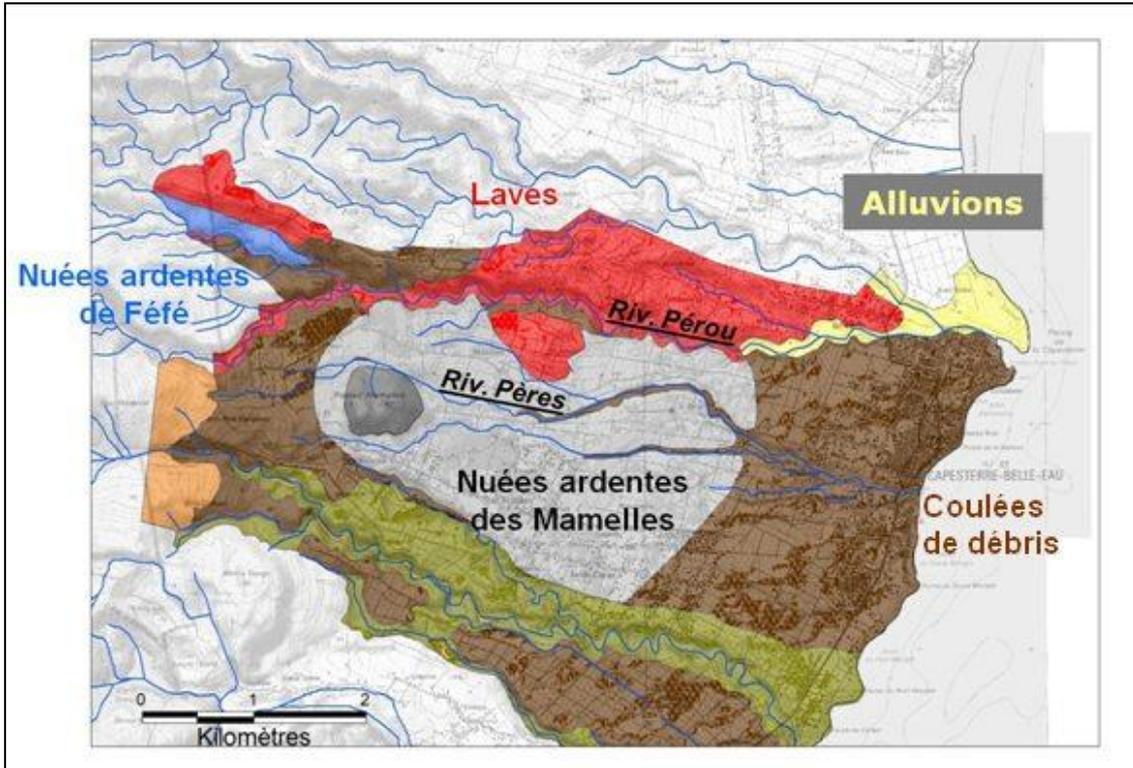
- **Les formations superficielles** (cf. Illustration 10) : des alluvions sont présentes en bordure ou dans le lit des cours d'eau, sous la forme de blocs de natures et de tailles variées, particulièrement en aval de la rivière Pérou. Des colluvions de bas de pente (éboulis), constituées de blocs

hétérogènes et relativement émoussés, emballés dans un matériau fin et altéré, sont également observées dans le lit de la rivière Pérou en amont de Concession. Enfin, des formations d'altération superficielle sont fréquemment visibles, à l'échelle de la zone d'étude et sont caractérisées par une matrice argileuse, voire argilo-sableuse, de teinte rougeâtre à jaunâtre et dans laquelle des blocs peuvent être présents. Dans la plupart des cas, ces formations sont des paléo-andosols superposés qui se sont développés sur les dépôts cendreux les plus récents (< 10 000 ans).



Illustration 10 : formations superficielles observées sur l'hydrosystème Pérou-Père : i) alluvions de la rivière Pérou (en haut à gauche), ii) colluvions de bas de pente reposant sur une coulée de débris (en haut à droite), et iii) profil d'altération superficiel sur dépôts cendreux récents (en bas).

Sur la base des données géologiques existantes et des reconnaissances réalisées sur le terrain pour les besoins du projet, la carte géologique réalisée en 2009 sur le secteur de Capesterre-Belle-Eau, a pu être actualisée. Le fond de carte mis à jour, accompagné de sa légende, est présenté en Illustration 11.



Formations Géologiques	
	Alluvions récents
	Laves de la Montagne de Capestère (Chaîne Axiale, 0,6 < âge < 1 Ma)
	Dépôts pyroclastiques des Petites Mamelles (âge < 0,5 Ma)
	Coulées de lave massive de la Grande Découverte (âge env. 0,14 Ma)
	Dépôts de coulées de débris (âge < 0,5 Ma)
	Dôme des Mamelles (andésites massives ou hyaloclastite soudée; âge < 0,5 Ma)
	Dépôts pyroclastiques de Fédé (Grande Découverte? âge env. 0,14 Ma)
	Coulées de ponce des dépôts pyroclastiques du Grand Carbet (âge > 40 000 ans)
	Dépôts pyroclastiques du Grand Carbet (âge > 40 000 ans)

Illustration 11 : Carte géologique du secteur de Capestère-Belle-Eau (modifié d'après Dumon et al. 2009)

3.2.2 Implantation des forages

Par recoupement entre les données issues des prospections hydro/géologiques réalisées en 2012 et 2013 et les résultats des analyses hydrogéochimiques de la campagne de terrain d'avril 2013 (présentées Chapitre 4), trois implantations de forages ont été retenues (Illustration 12) :

Forage Saint Denis 1 : situé dans la partie intermédiaire de la zone d'étude, à une altitude approximative de 116 m NGG, le forage est implanté sur une parcelle agricole utilisée pour la culture de bananes et de cannes à sucre. L'ouvrage, d'une profondeur total de 80 m, recoupe successivement les formations de types coulées pyroclastiques (2,50 à 30 m), avalanches de débris (30 à 43 m) et les laves andésitiques fracturées (à partir de 43 m). Ce forage a été équipé pour permettre le suivi des transferts en profondeur dans les laves, au niveau de l'interfluve entre les rivières Pérou et des Pères.

Forage Saint-Denis 2 est implanté à quelques mètres du forage Saint-Denis 1 (en doublon), à 118 m NGG. D'une profondeur de 30 m, traversant les mêmes formations sur les premiers mètres, l'équipement de l'ouvrage 2 a été réalisé de manière à suivre le compartiment aquifère superficiel des nuées ardentes. Le couplage Saint-Denis 1 / Saint-Denis 2, est un dispositif spécifique de suivi en « flûte de pan ».

Forage Fromager : il est implanté à l'aval de l'hydrosystème Pérou-Père, à une altitude d'environ 57 m NGG, au droit d'une parcelle partiellement cultivée en bananes et exploitée pour le maraichage. D'une profondeur de 50 m, il recoupe alternativement des nuées ardentes, des coulées de débris et des dépôts pyroclastiques plus ou moins altérés. À la base du forage, une formation argileuse rougeâtre a été mise en évidence mais sa nature précise n'a pu être définie.

Les logs géologiques et techniques des 3 forages ont été réalisés avec l'appui du logiciel Gesfor développé par le BRGM. Les coupes sont présentées en Annexe 1.

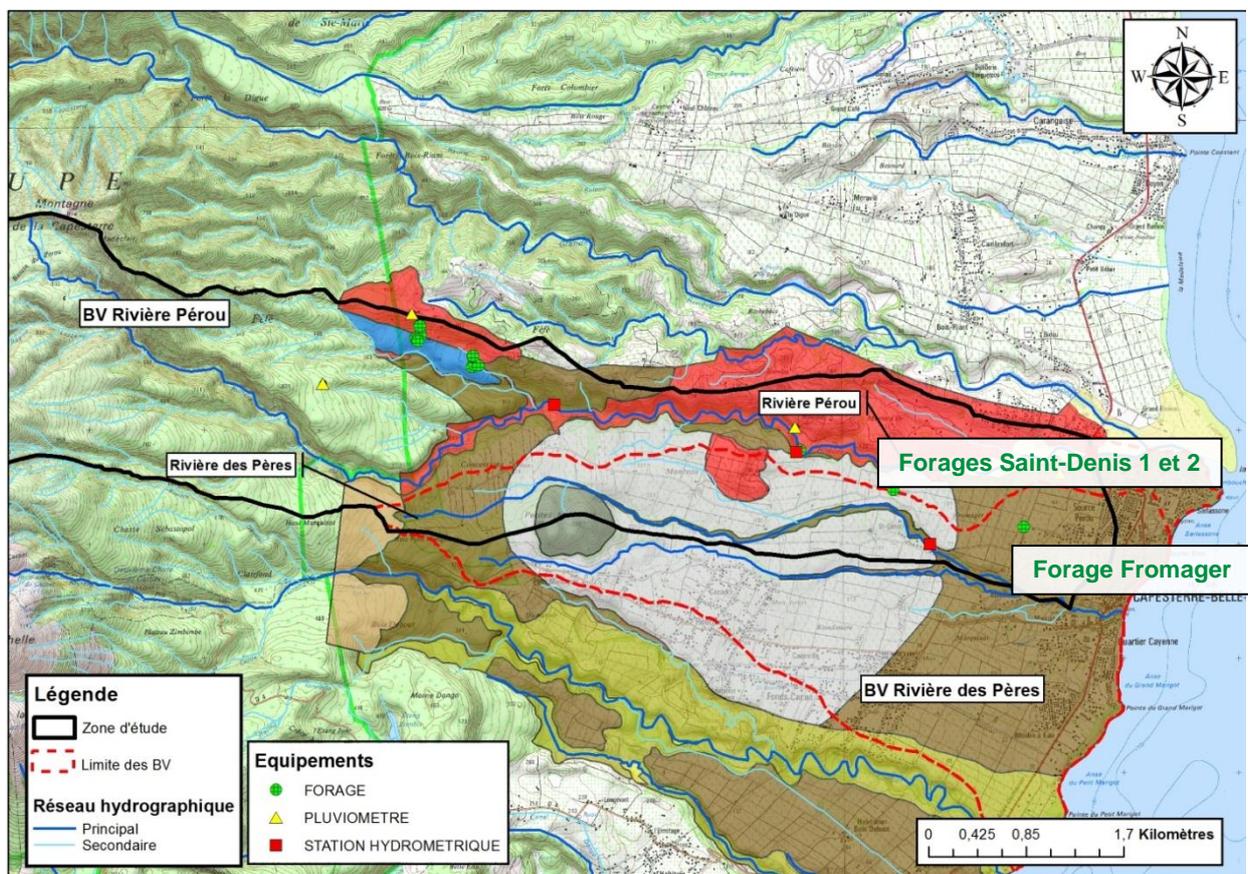


Illustration 12 : Localisation des 3 forages implantés sur le bassin versant observatoire de Guadeloupe

En complément, la coupe géologique de l'interfluve entre les rivières Pérou et des Pères présentée en Illustration 13 a été établie à partir des logs de forage ainsi qu'à l'aide des données géophysiques aéroportées (projet GUDEM) qui apportent des informations sur la géométrie des coulées en profondeur. La coupe met en évidence une structure en paléo-vallées emboîtées de laves andésitiques sous couverture de coulées de débris et de nuées ardentes.

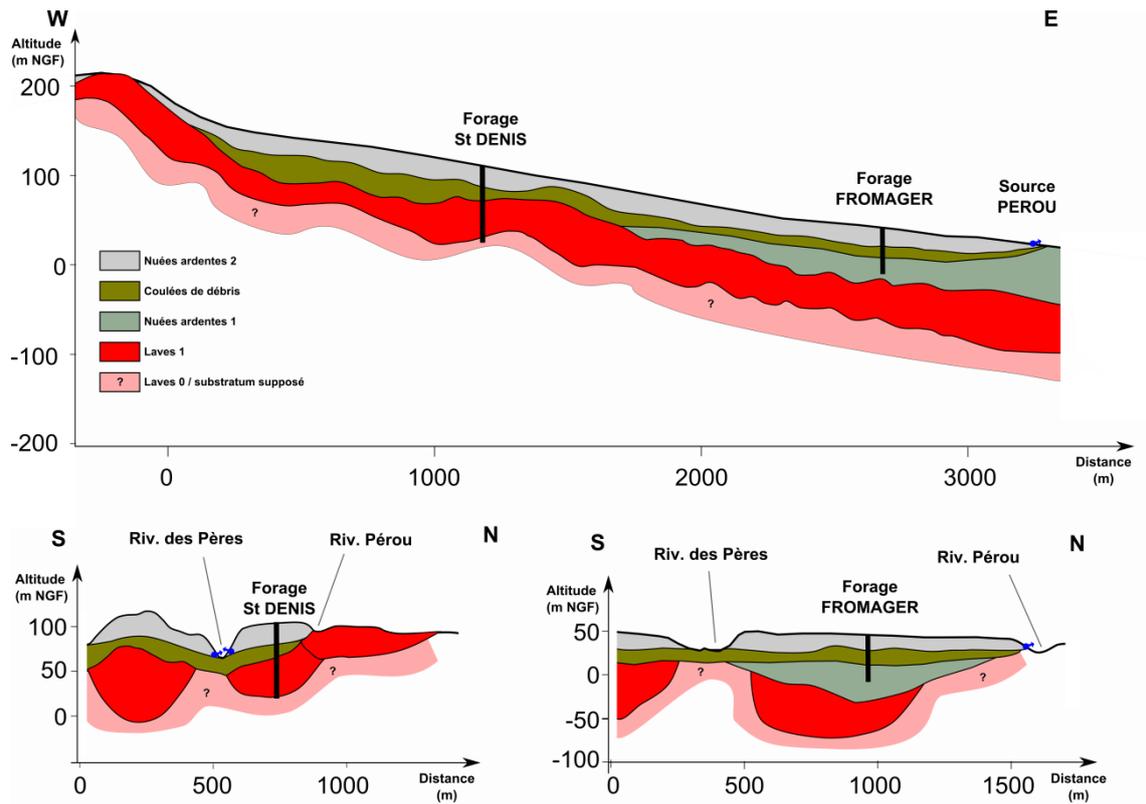


Illustration 13 : Coupe géologique de l'interfluve des rivières Pérou et des Pères.

3.3 BASSIN DU GALION (MARTINIQUE)

3.3.1 Description des formations géologiques

D'un point de vue géologique, le bassin du Galion est concerné par deux épisodes majeurs d'activité volcanique. On retrouve, par ordre chronologique :

- la chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault (entre 17 et 10 millions d'années) qui constitue la première grande structure volcanique de la Martinique actuelle ;
- le volcan bouclier du Morne Jacob, plus vaste édifice volcanique de l'île, qui débute avec la mise en place de hyaloclastites et se termine par des coulées de laves massives (entre 5 et 2 millions d'années). Ces dernières arment le sommet des mornes à l'amont du bassin versant (Illustration 15).

Les **coulées de basalte porphyrique de Vert-Pré** (14 à 14.8 Ma), provenant de la première phase effusive généralisée de la chaîne volcanique du Vauclin-Pitault, constituent le substratum du bassin du Galion et affleurent sur sa moitié aval (Illustration 15). Ces basaltes sont profondément altérés (plusieurs dizaines de mètres) et ne sont que très rarement observés sains à l'affleurement. Seuls les carottages permettent de mettre en évidence le log complet, comme sur l'ouvrage BF1 à Bassignac (Illustration 14).

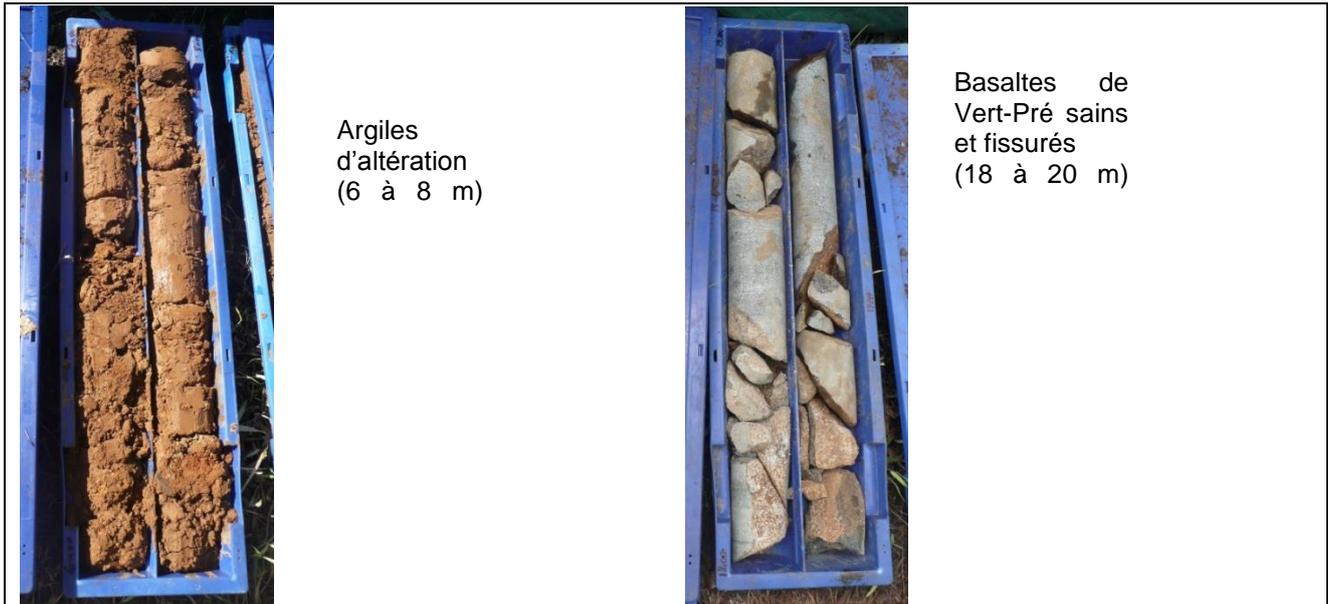


Illustration 14 : Carottes prélevées sur le sondage BF1 à Bassignac

Postérieurement et en grande partie sur les coulées de basalte de Vert-Pré, se mettent localement en place des **hyaloclastites et coulées andésitiques** (11.5 à 14 Ma). Dans le bassin du Galion, on observe ces formations au sein du sous-bassin versant de la Digue, au sud-est, où les andésites sont notamment exploitée en carrière (Cf. formations notées Hm2b et alpham2b sur la carte géologique de l'illustration 15). Ces andésites sont également altérées en surface comme en témoigne le forage MVF1, implanté sur l'exploitation Mont-Vert et qui recoupe 15 m d'argiles d'altération (les andésites saines n'ont pas été atteintes sur ce forage, Cf. Annexe 1).

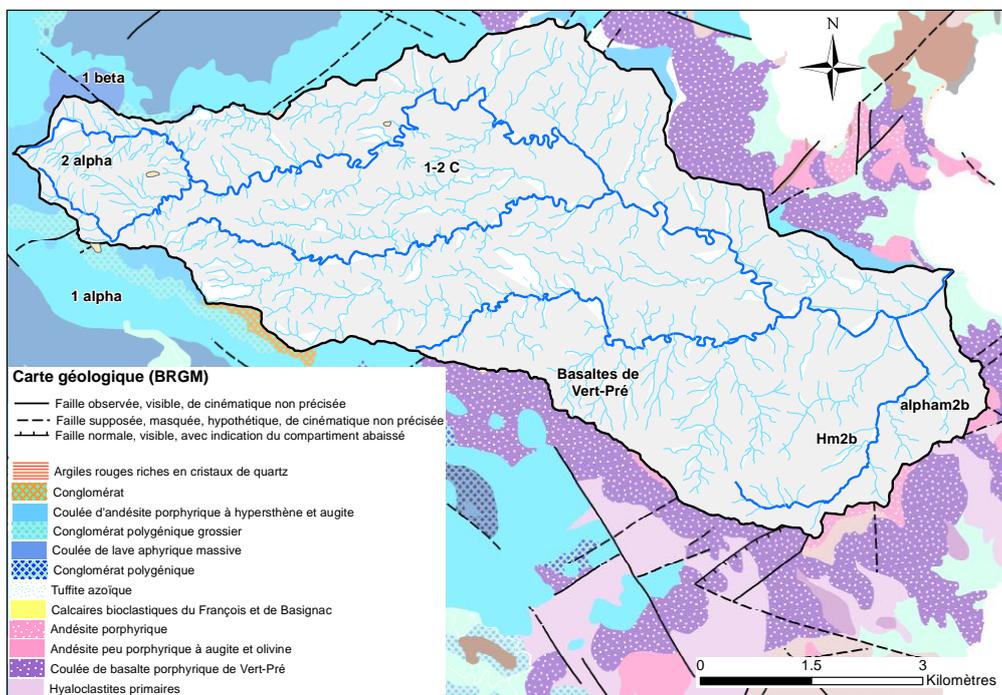


Illustration 15 : Carte géologique au 1/50 000 du bassin du Galion (BRGM)

Sur la moitié amont du bassin, affleurent des formations associées au volcan bouclier du Morne Jacob (centres d'émission à l'ouest du bassin). On retrouve tout d'abord des **coulées de lave basaltique et andésitique** (formations notées 1 α et 1 β , 4 à 5.5 Ma) qui se sont épanchées jusqu'à la presqu'île de la Caravelle *via* des paléovallées orientées Ouest-Est.

À la fin de la première phase d'activité du volcan, des **conglomérats polygéniques grossiers** (notés ¹⁻²C) se développent (3 Ma), ils sont issus du démantèlement des coulées précédentes. Ils affleurent largement sur la moitié amont du bassin où leur importante accumulation marque probablement une paléodépression au pied du volcan (Westercamp et al., 1989).

Après une période de repos, l'activité volcanique de l'édifice reprend et des coulées de lave vont s'épancher sur les formations précédemment évoquées : c'est le cas des **andésites 2 α** qui arment le morne Bellevue et le morne des Roseaux (limites amont du bassin) mais que l'on retrouve également à l'aval du bassin.

Une nouvelle fois, aucun affleurement sain n'a pu être observé, les laves apparaissent fortement altérées, avec dans la majorité des cas une argilisation quasi-complète de la lave et une perte de la structure de la roche mère (Cf. allotérites, Illustration 16).

Lorsque le degré d'altération est moins fort, la structure de la roche est conservée (Cf. isaltérites, Illustration 16).



Illustration 16 : Laves altérées observées sur le bassin versant du Galion (allotérites à gauche et isaltérites à droite)

D'un point de vue hydrogéologique, les différentes coulées de lave présentent un potentiel aquifère de par leur fissuration et d'éventuels horizons localement perméables associés aux inter-coulées. Malgré une plus faible perméabilité, l'épaisseur importante des altérites (>10m) leur confère un rôle capacitif intéressant, notamment susceptible de soutenir la nappe contenue dans les laves fissurées sous-jacente par drainance.

3.3.2 Implantation des forages

Après une première analyse des résultats d'analyse de la campagne de terrain d'avril 2013, trois implantations de forages ont été retenues (Illustration 17) :

- **le forage MVF1** qui est situé à proximité des hangars de l'exploitation agricole de Mont-Vert sur le sous-bassin de la Digue. L'ouvrage, d'une profondeur de 15 mètres, capte les argiles d'altération d'une coulée de lave andésitique. Ce forage est localisé à proximité de la ravine de La Digue instrumentée dans le cadre du projet OPA-C au cœur de la zone la plus fortement contaminée du sous-bassin ;
- **le forage BF1**, qui est situé au lieu-dit Bassignac. Le site de forage a notamment été sélectionné en raison de la présence de deux sources fortement contaminées en pied de versant et possédant des faciès physico-chimiques différents. L'ouvrage capte une coulée de basaltes de Vert-Pré sains et fissurés sous une couverture altérée ;
- **le forage MTF1**, qui est situé sur l'exploitation Malgré Tout. Comme précédemment, ce forage a été implanté en surplomb d'une source contaminée. La carte géologique indique à l'affleurement les basaltes de Vert-Pré mais ceux-ci n'ont *a priori* pas été atteints. En effet, le forage recoupe une formation bréchique altérée et fissurée qui pourrait correspondre aux hyalocastites Hm2b épanchées sur les basaltes de Vert-Pré.

Les coupes géologiques et techniques sont reportées en Annexe 2.

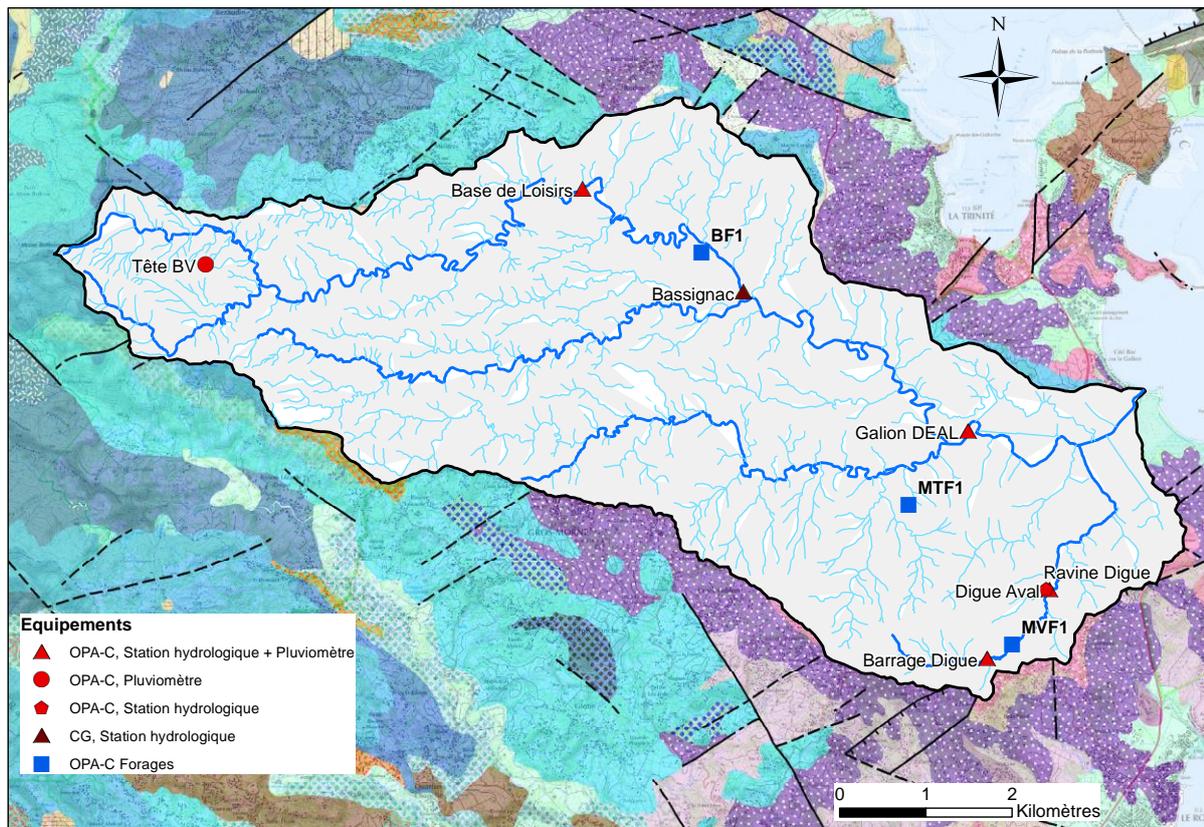


Illustration 17 : Carte de localisation des stations de surveillance de l'observatoire OPA-MAR (pluviomètres, stations hydrologiques et forages implantés)

3.4 SYNTHÈSE DE LA GÉOLOGIE DES DEUX BASSINS

Les reconnaissances géologiques des deux sites pilotes de Pérou-Pères et du Galion montrent globalement une forte diversité de lithologies. On rencontre ainsi l'ensemble des formations laviques (andésites, basaltiques, hyaloclastites), pyroclastiques (nuées ardentes) et de coulées de débris ou de conglomérats argilisés, issus du démantèlement des coulées précédentes.

L'analyse des carottages permet de préciser l'empilement complexe des coulées, qui peuvent être individualisées sur quelques mètres d'épaisseur. Les coulées de lave montrent par exemple une bréchification possible à leur base (semelle de coulée), une large fissuration de l'horizon sain (débits en plaquettes) et une altération de la partie supérieure qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (argilisation complète de la coulée).

Les formations récentes (quelques centaines de milliers d'années) observées sur Pérou-Pères sont globalement peu altérées. Elles présentent cependant de nombreuses intercalations d'imperméables locaux (niveaux cendreaux plus ou moins argilisés, paléosols) favorisant une compartimentation en lien avec les différentes phases de dépôts.

Les formations anciennes (quelques millions d'années) observées sur le Galion sont systématiquement associées à des formations superficielles argilisées de forte puissance (> 10m), qui masquent dans le paysage les horizons sains observés en forage. Cette argilisation à large échelle est une des raisons de la forte ramification du réseau hydrographique du Galion (Illustration 3).

4 Approche hydrodynamique

4.1 ESSAIS DE POMPAGE LONGUE DURÉE

4.1.1 Description de la méthode des dérivées

L'interprétation des essais de pompage dans les formations fracturées, volcaniques ou dans les formations sédimentaires hétérogènes est souvent complexe. Cela est essentiellement une conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des relations fracture-matrice - ou entre les coulées, de la connexion de ces réseaux avec des aquifères de surface, de l'empilement et de la géométrie de séries à perméabilités différentes, lorsqu'il s'agit de formations volcaniques ou sédimentaires, etc... Afin de déterminer les différentes composantes d'écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation.

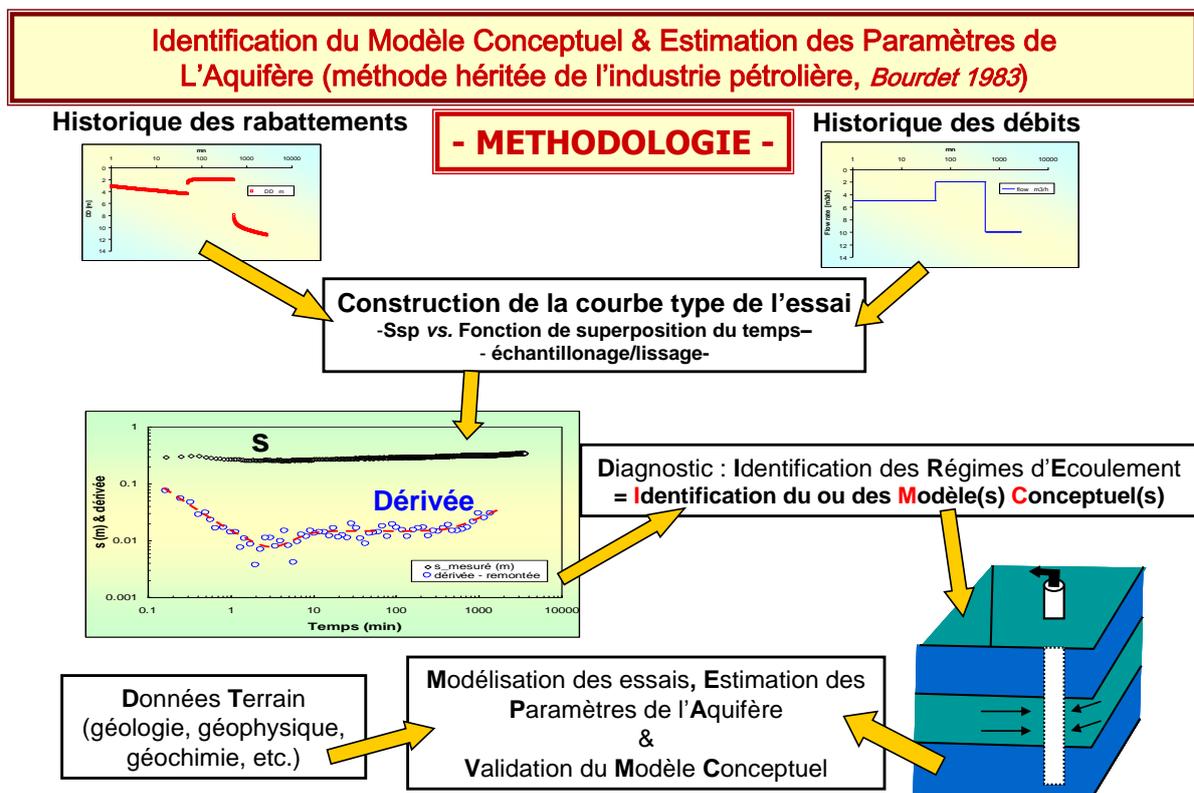


Illustration 18 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma ci-dessus (Illustration 18). Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($\partial s / \partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux), qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement, sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane and Wurster, 1993 ; etc.). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de faire correspondre à chaque type et/ou géométrie d'aquifère, mais aussi à chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple), un certain régime ou

une succession de plusieurs régimes d'écoulement, qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck et al., 1992, Schlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009). Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle), l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de $\frac{1}{2}$, 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1, un captage partiel de l'aquifère par une pente de $-\frac{1}{2}$, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc...

L'illustration 19 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère situé dans un aquifère rectangulaire où, au fur et à mesure, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

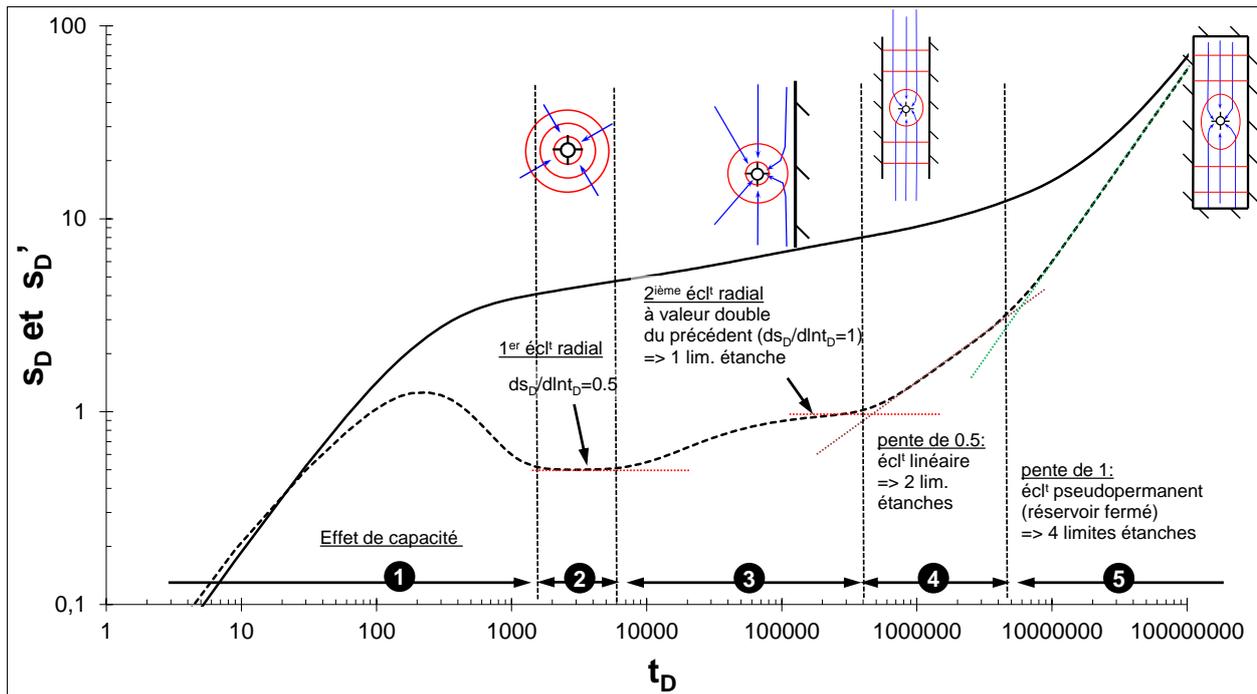


Illustration 19 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel)

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles, ni de l'interprétation.

De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai, c'est-à-dire pour un débit unitaire, qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin,...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres

aquifères (effet de drainance par exemple) et éventuellement à mettre en évidence des écoulements fractionnaires, comme par exemple ceux qui sont dus à la forte perméabilité d'un drain karstique. Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé, en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

À partir de la courbe des dérivées, lorsqu'un écoulement radial cylindrique est identifié, il est aussi possible d'estimer les paramètres hydrodynamiques de la formation captée, en particulier la transmissivité et la perméabilité.

4.1.2 Données disponibles

L'ensemble des essais a été réalisé en 2014 dans le cadre de ce projet, mis à part celui sur FG qui est une ré-interprétation de l'essai réalisé en 2005 sur les forages FG et FF (Charlier, 2007).

Localisation	Lieu-dit	Forage	Type	Prof. (m)	Géologie de l'horizon capté	Prof. Crépine (m)	Niv. piézo (m)	période du test	durée du test (h)	débit moy. (m3/h)
Pérou-Pères Guadeloupe	St Denis	St Denis	puits	80.0	Laves fracturées	42.5-80.0	51	21-23/05/2014	24.0	4.7
	Fromager	Fromager	puits	50.0	Coulées pyroclastiques	34.0-50.0	19.5	27-31/03/2014	24.0	9.1
	Féfé	FG 1157ZZ0046/FG	puits	30.0	Nuées ardentes	6.0-30.0	9.5	26-27/10/2005	24.0	1.4
	Féfé	FF 1157ZZ0045/FF	Piézo de FG	23.0	Nuées ardentes	9.0-23.0	5.34	-	-	-
Galion Martinique	Bassignac	BF1 1175ZZ0190/BF1	puits	44.8	Lave fracturée	11.9-29.7	19.5	01/04/2014	5.0	0.7-1.0
	Malgré Tout	MTF1 1175ZZ0192/M TF1	puits	45.0	Brèches / passée de cendres	23.7-39.0	17.5	27/03/2014	6.5	1.6
	Mont Vert	MVF1 1175ZZ0191/M VF1	puits	16.0	Argiles d'altération	2.25-14.25	5	08/04/2014	5.5	1.1

Illustration 20 : inventaire des essais par pompage interprétés

L'ensemble des essais disponibles (cf. Illustration 20), soit 7 essais sur 8 forages dans les coulées volcaniques de Guadeloupe et de Martinique, dont un en interférence (FG), ont été diagnostiqués suivant la méthode précédemment décrite, puis modélisés.

L'ensemble des courbes de dérivées de ces essais (non présentées en détail ici), présente des formes très similaires quel que soit le type de coulée dans lequel a été réalisé le test, conduisant quasi-systématiquement au même type de diagnostic : aquifère limité dans l'espace par 2 à 4 limites étanches et mise en évidence des effets de drainance d'un aquitard. Suivant la longueur des essais, toutes les limites ne sont pas forcément perçues par le test.

La section suivante présente les modèles mathématiques qui ont été utilisés pour interpréter les essais. Ces modèles sont bien adaptés aux configurations mises en évidence lors des diagnostics.

4.1.3 Modèles mathématiques utilisés pour interpréter les essais

Les modèles mathématiques choisis pour modéliser les essais réalisés dans le cadre de la présente étude, sont des modèles génériques pouvant prendre en compte un certain nombre de paramètres, notamment l'effet de limites étanches : jusqu'à quatre limites orthogonales permettant de modéliser les rabattements au sein d'un aquifère fermé. Deux formulations des effets de drainance ont aussi été utilisés, l'un issu de la solution de Hantush (1964), considérant que la variation de niveau dans l'aquitard supérieur est négligeable durant l'essai et le second, issu de la solution de Hunt et Scott (2007), où le niveau de l'aquitard, défini par une transmissivité T_0 et un emmagasinement S_y , diminue durant le pompage. Notons, que cette seconde solution est identique à la précédente pour $T_0 \rightarrow \infty$ ou $S_y \rightarrow \infty$; dans ce cas le niveau dans l'aquitard n'évolue pas durant l'essai.

Les travaux de Hantush (1964) et Hunt et Scott (2007) ont été étendus par le BRGM, pour le premier aux notions d'anisotropie 3-D et de limites étanches et pour le second aux notions d'anisotropie 3-D, de captage partiel et de limites étanches. Les modèles résultants présentent les caractéristiques suivantes :

- l'aquifère testé est un multicouche surmonté d'un aquitard, séparé du premier par un semi-perméable (intervenant dans l'effet de drainance). Suivant le modèle choisi le niveau dans l'aquitard peut varier ou non ;
- une anisotropie de perméabilité (ou transmissivité) en 3-D peut être prise en compte. L'anisotropie verticale est définie par le ratio T_h/T_v (T_h : transmissivité horizontale et T_v , verticale) et l'anisotropie dans le plan horizontal (x,y) par le ratio T_{yy}/T_{xx} (T_{yy} : selon l'axe des y et T_{xx} selon l'axe des x). Cette option nécessite plusieurs piézomètres d'observation pendant les essais ;
- possibilité de gérer un captage partiel de l'aquifère par le forage ou le piézomètre ;
- possibilité d'avoir jusqu'à quatre limites étanches orthogonales : deux parallèles à l'axe des x et deux perpendiculaires ;
- possibilité de positionnement quelconque du puits et du piézomètre dans l'aquifère ;
- prise en compte des effets liés au puits (capacité de puits, skin, pertes de charges quadratiques).

Les Illustration 21 et Illustration 22 présentent les modèles et leurs paramètres.

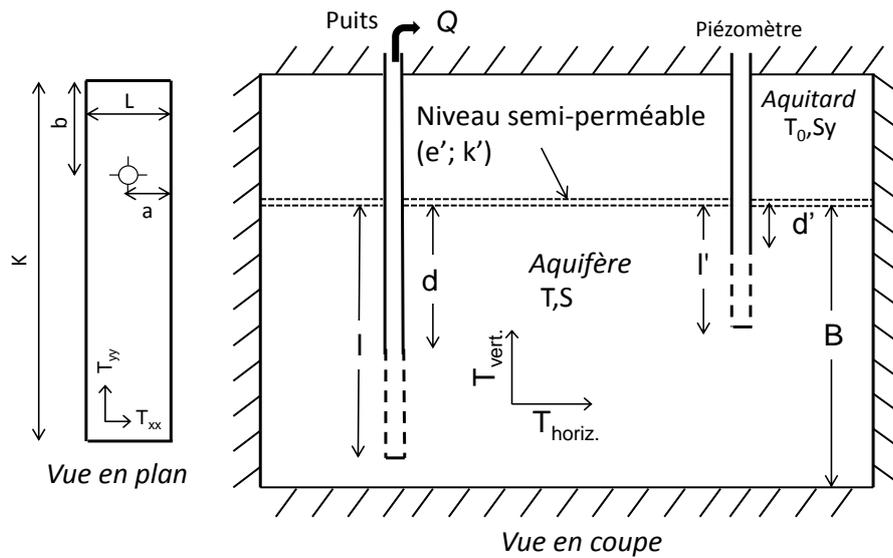


Illustration 21 : Modèles à effet de drainage d'un aquitard supérieur, anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales, captage partiel de l'aquifère. Modifié des solutions de Hantush (1964) et Hunt et Scott (2007). Dans la solution de Hantush $T_0 \rightarrow \infty$ ou $S_y \rightarrow \infty$

Paramètres des modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007	
distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard*	T ₀ (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquitard*	S _y (-)
Longueur du puits	l (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)
Longueur du piézomètre	l' (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	T _{yy} /T _{xx} (-)
Dist. à la 1 ^{ère} limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Dist. à la 2 ^{ième} limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Dist. à la 3 ^{ième} limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Dist. à la 4 ^{ième} limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)
Capacité du puits	Rc (m)

Illustration 22 : Paramètres des modèles à effet de drainage (modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007). * Les paramètres de l'aquitard ne sont valables que pour la solution de Hunt et Scott (2007)

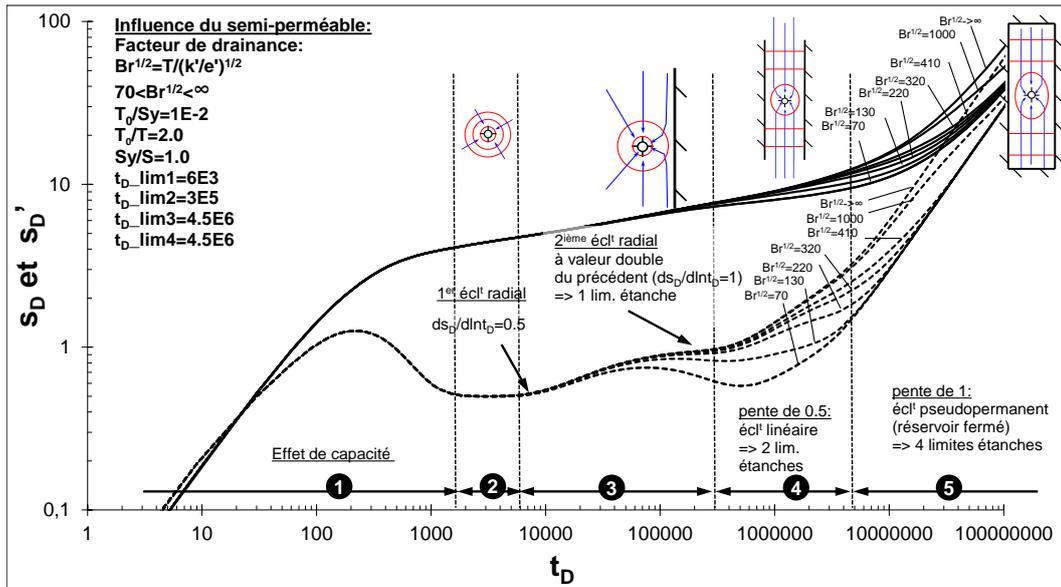


Illustration 24 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence du facteur de drainage du semi-perméable ($Br^{1/2}$)

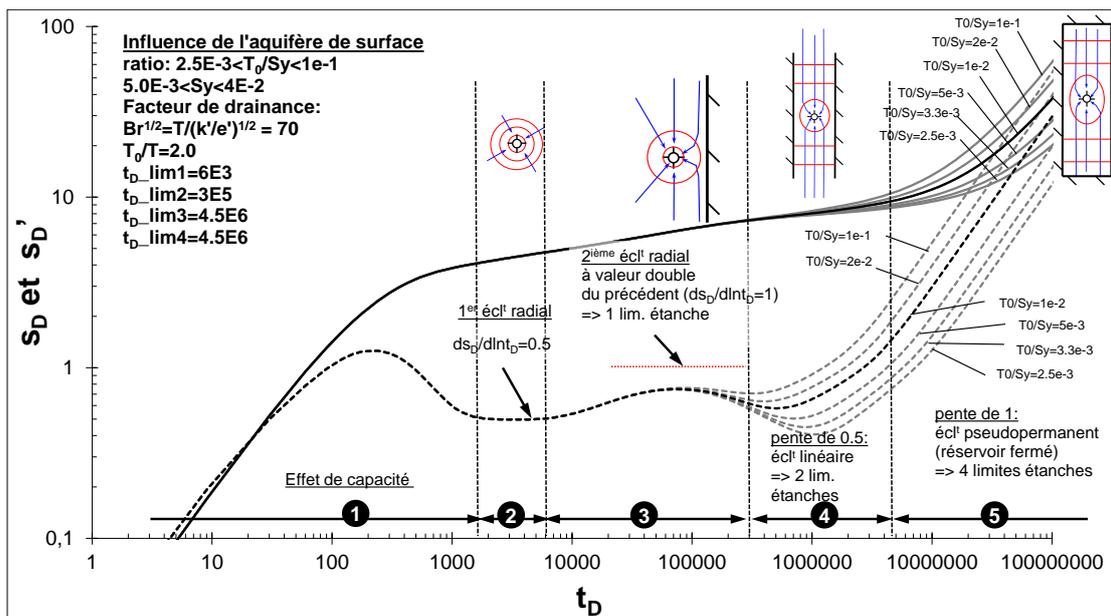


Illustration 25 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de l'emmagasinement de l'aquifère (Sy)

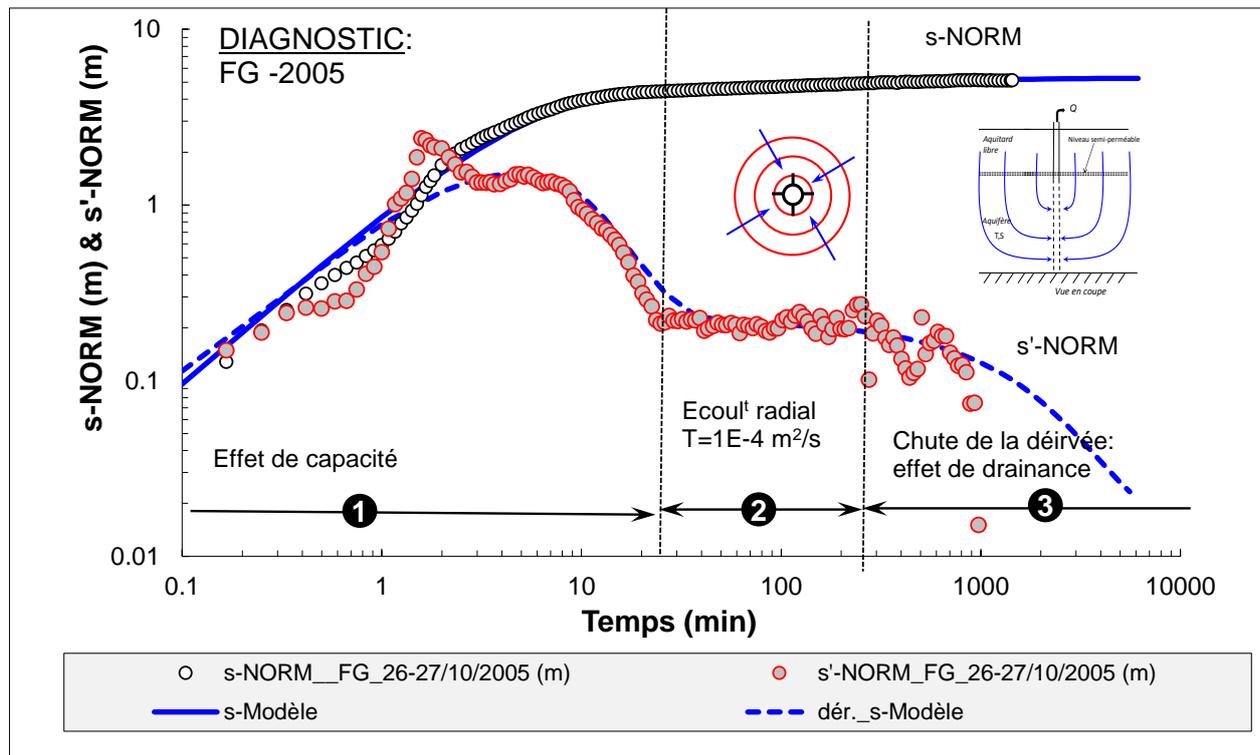


Illustration 27 : diagnostic et modélisation de l'essai réalisé sur le forage FG (Guadeloupe), 2005. s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé. Modèle : Hunt et Scott modifié

Les figures ci-dessous (Illustration 28 et Illustration 29) présentent les résultats de la modélisation de l'essai en interférence avec le piézomètre Fédé et l'illustration 30 reprend les paramètres hydrodynamiques déduits.

Cet essai montre que FG est situé dans des formations de nuées ardentes d'une transmissivité de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et d'emmagasinement de 10^{-4} (-). Cependant, le piézomètre FF n'a pu être interprété que comme si ce dernier était implanté dans l'aquitard supérieur, ce qui tend à montrer que les deux ouvrages – même s'ils sont implantés dans des formations géologiques voisines - sont situés dans deux compartiments aux caractéristiques différentes, avec un chevauchement de l'unité de FF sur celle de FG (Illustration 31). Un tel schéma peut aussi expliquer la présence d'un semi-perméable entre les deux unités (cf. k' et e'), un paléosol ou une zone indurée et la drainage d'un compartiment vers l'autre. L'analyse suggère aussi que le compartiment FF est plus transmissif (T_0 : $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) et plus capacitif, voire que ce compartiment est libre (S_y : 5×10^{-4} à 10^{-3}) alors que le compartiment de FG affiche un emmagasinement de type captif. La pluie, responsable de la diminution du rabattement observé sur FF en fin d'essai ne semble pas avoir impacté de manière significative celui mesuré au puits de pompage FG.

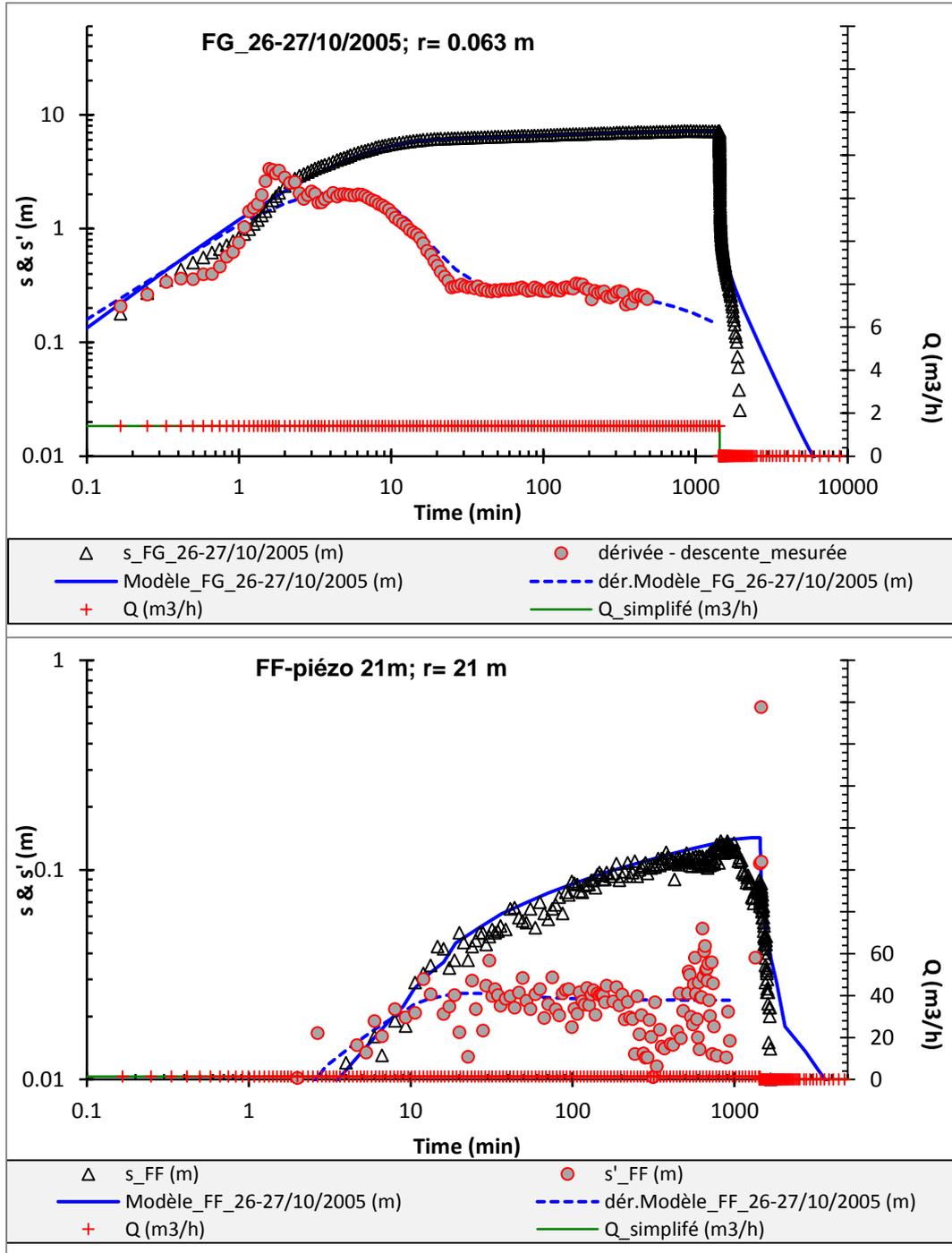


Illustration 28 : tests sur FG en interférence avec FF (Féfé) du 26 au 27/10/2005. Modèle : modifié de Hunt et Scott, 2007 Représentation log-log

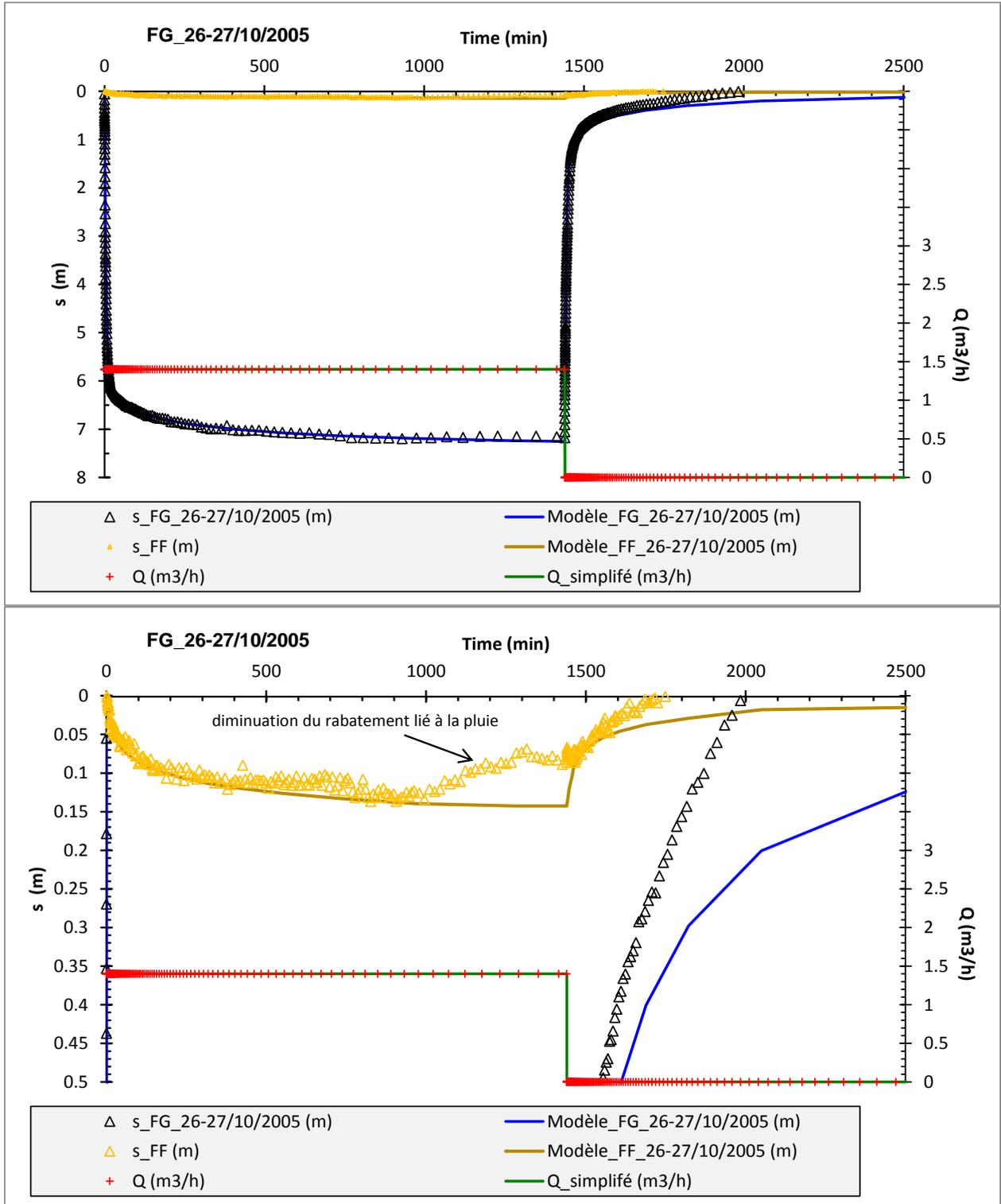


Illustration 29 : tests sur FG en interférence avec FF (Féfé) du 26 au 27/10/2005. Modèle : modifié de Hunt et Scott, 2007 Représentation arithmétique. Graphe du bas : zoom sur Féfé. s: rabattement ; s': dérivée du rabattement

FG_26-27/10/2005	FG	FF-piézo 21m
r (m)	0.063	21
T (m ² /s)	1.00E-04	1.00E-04
S (-)	1.00E-04	1.00E-04
k' (m/s)	9.50E-10	2.00E-07
e' (m)	1.0	1.00E+00
T0 (m ² /s)	1.50E-03	1.20E-03
Sy (-)	1.00E-03	5.0E-04
Well skin (-)	3.2	-
C (m-5s ²)	0	-
Rc (m)	0.074	-

Illustration 30 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai sur FG.
Modèle utilisé : modifié de Hunt et Scott (2007)

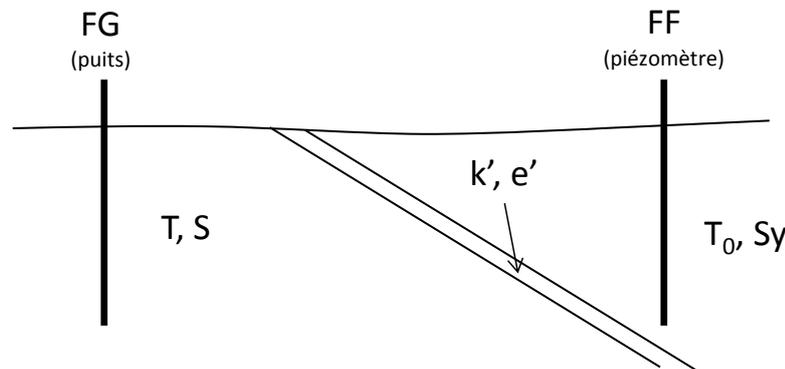


Illustration 31 : Schéma d'interprétation de l'essai de pompage réalisé sur FG.

4.2.2 Forage Saint Denis 1 (Guadeloupe) :

Le forage Saint Denis a été réalisé en février 2014. Il a une profondeur de 80 m et capte des venues au niveau des interfaces entre coulées et des fractures dans des laves andésitiques (crépines : 42,5 à 80,0 m). La coupe géologique du forage est constituée de 30 m de coulées pyroclastiques, suivis de 13 m de dépôts bréchiqes (coulée d'avalanche), de 29 m de laves fracturées et de 8 m de brèches argilisées. L'essai sur cet ouvrage a été réalisé du 21 au 23 mai 2014 (débit : 4,7 m³/h). L'illustration 32 présente le diagnostic de l'essai, basé sur les dérivées de la descente et de la remontée du niveau (RECOV), il montre :

1. du début de l'essai à environ 4 minutes, la courbe de dérivée décrit une « bosse » typique de l'effet de capacité lié au puits ;
2. de 4 à 15 minutes, la dérivée décrit un plateau caractéristique d'un écoulement radial, à partir duquel la transmissivité de l'aquifère est estimée aux alentours de $2-3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$;
3. de 15 à vers 1 000 minutes, la dérivée suit une pente de 0,5-0,6 caractéristique de l'atteinte de deux ou trois limites étanches (deux parallèles et une orthogonale) ;

4. de 1 000 minutes à la fin de l'essai, la dérivée suit une pente de 1 caractéristique de l'atteinte d'une quatrième limite étanche, puis d'une légère diminution de la dérivée traduisant un probable effet de drainance (effet d'un aquitard).

D'après ce diagnostic, le forage de Saint Denis est situé dans un aquifère clos de transmissivité voisine de 10^{-3} m²/s. Ces limites correspondent vraisemblablement aux limites de la coulée interceptée par le puits, ou du moins aux limites d'un ensemble de coulées suffisamment perméables et connectées entre-elles. Par ailleurs, cet aquifère est empreint des effets d'une drainance, probablement liés au faciès perméable des coulées pyroclastiques.

L'illustration 33 présente la modélisation des rabattements avec le modèle modifié de Hunt et Scott. Les paramètres du modèle sont présentés dans l'illustration 34. La surface de l'aquifère forme un rectangle allongé de 600-650 m de large et de 1 500 à 1 600 m de long. Le forage apparaît situé dans la partie centrale de l'aquifère, mais beaucoup plus proche de la 3^{ème} limite que de la 4^{ème} (Illustration 33). Cependant, l'estimation des distances aux limites en mètres est liée à la valeur de l'emmagasinement, valeur imprécise lorsqu'estimée au puits de pompage à cause des effets liés au puits. Il est donc possible que ces distances soient sur- ou sous-estimées.

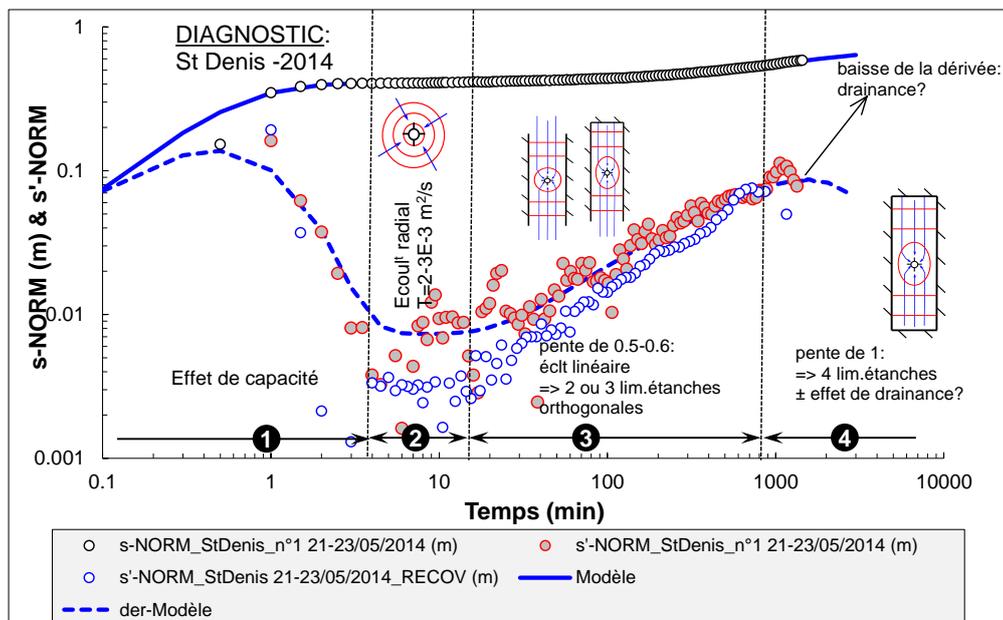


Illustration 32 : diagnostic de l'essai au forage Saint Denis et modélisation de l'essai (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié. *s*-NORM : rabattement normalisé; *s'*-NORM : dérivée du rabattement normalisé ; RECOV : remontée des paliers sur Primevère

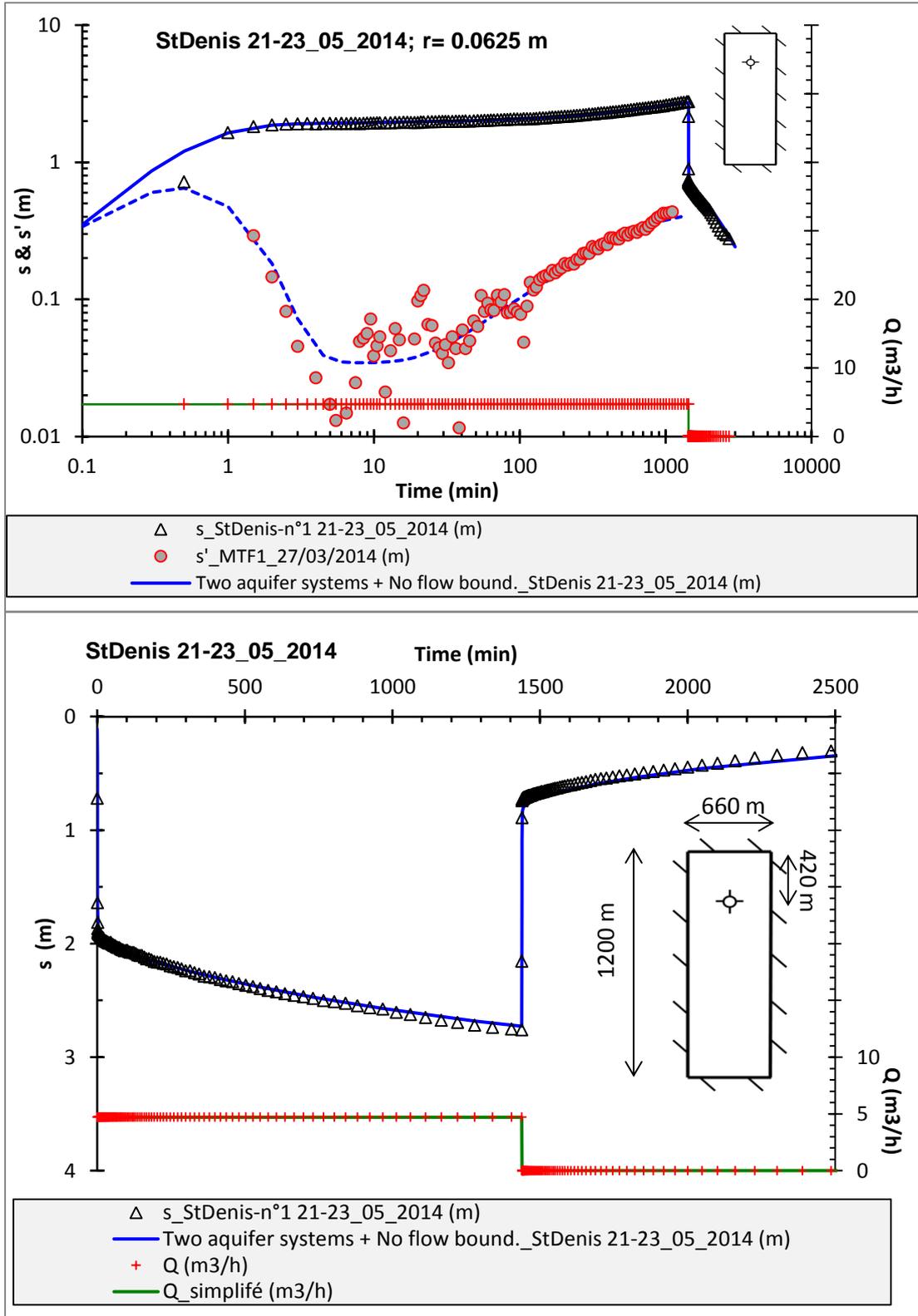


Illustration 33 : modélisation de l'essai au forage Saint Denis (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié.
 Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ;
 s' : dérivée du rabattement

StDenis 21-23_05_2014	
r (m)	0.0625
T (m ² /s)	3.00E-03
S* (-)	1.00E-04
k' (m/s)	1.10E-09
e' (m)	1.0
T ₀ (m ² /s)	0.0
Sy (-)	5.00E-03
Dist.lim. 1 (min)	15.0
Dist.lim. 2 (min)	15.0
Dist.lim. 3 (min)	25.0
Dist.lim. 4 (min)	200.0
Dist.lim.* 1 (m)	328.6
Dist.lim.* 2 (m)	328.6
Dist.lim.* 3 (m)	424.3
Dist.lim.* 4 (m)	1200.0
Skin (-)	20.0
C (m ⁻⁵ s ²)	0
Rc (m)	0.08

*Illustration 34 : paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai sur Saint Denis.
Modèle : Hunt et Scott modifié.*

** pour S au puits de pompage : celui-ci ne reflète pas forcément la réalité (sur- ou sous-estimation en raison des effets de puits). Il en est de même pour les estimations des limites en mètres déduites au puits de pompage.*

4.3 LES AUTRES ESSAIS

Cette partie présente les résultats issus des quatre autres essais par pompage. Le Tableau 1 présente l'ensemble des paramètres hydrodynamiques déduits des essais.

CHLOR-EAU-SOL - Contamination par la chlordécone des eaux des bassins pilotes antillais

Forage et date des essais	r (m)	T (m2/s)	S* (-)	kh/kz (-)	k' (m/s)	e' (m)	T0 (m2/s)	Sy (-)	B (m)	l (m)	d (m)	Dist.lim. 1 (min)	Dist.lim. 2 (min)	Dist.lim. 3 (min)	Dist.lim. 4 (min)	Dist.lim. 1 (m)	Dist.lim. 2 (m)	Dist.lim. 3 (m)	Dist.lim. 4 (m)	Sk (-)	C (m-5s2)	Rc (m)
StDenis 21-23_05_2014	0.0625	3.0E-03	1.0E-04	-	1.1E-09	1.0	1.5E-05	5.0E-03	-	-	-	15.0	15.0	25.0	200.0	328.6	328.6	424.3	1200.0	20.0	0.0	0.1
Fromager 27-31/03/2014	0.063	1.0E-03	6.0E-04	-	2.8E-08	1.0	1.5E-03	1.0E-03	-	-	-	12.0	-	-	-	69.3	-	-	-	-3.8	244000.0	0.0
FG_26-27/10/2005	0.063	1.0E-04	1.0E-04	-	9.5E-10	1.0	1.5E-03	1.0E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	0.0	0.1
FF-piézo 21m	21	1.0E-04	1.0E-04	-	2.0E-07	1.0	1.2E-03	5.0E-04	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BF1_01/04/2014	0.11	3.0E-04	5.0E-03	-	7.0E-07	1.0	-	-	12.0	6.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.7	600000.0	0.15
MTF1_27/03/2014 (m)	0.09	7.0E-04	1.0E-05	-	2.2E-11	1.0	-	-	40.0	15.0	0.0	60.0	60.0	60.0	60.0	1004.0	1004.0	1004.0	1004.0	18.0	0	0.04
MVF1_08/04/2014	0.045	4.0E-04	9.0E-05	10.0	-	-	-	-	50.0	10.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	0	0.032

Tableau 1: synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais. En gras : puits de pompage, en italique : piézomètre d'observation

Modèles utilisés : modifié de Hunt et Scott (2007), là où il y a des valeurs de T_0 et Sy et modèle modifié de Hantush (1964) là où il n'y en a pas.

* pour les S au puits de pompage : celles-ci sont des estimations qui ne reflètent pas forcément la réalité (sur- ou sous-estimation en raison des effets de puits). Il en est de même pour les estimations des limites en mètres déduites au puits de pompage.

4.3.1 Forage Fromager (Guadeloupe) :

Le forage Fromager a été réalisé en mars-avril 2014. Il a une profondeur de 50 m et capte des venues d'eau entre 34 et 46 m au sein d'une coulée de débris pyroclastiques. L'ouvrage est crépiné à partir de 34 mètres. La coupe géologique du forage est constituée de 20 m de coulées pyroclastiques perméables mais occultées par la cimentation de l'ouvrage, suivis de 14 m d'un même faciès très altéré et donc peu perméable, de 12,5 m de coulées pyroclastiques perméables, puis de faciès altérés et argilisés. Les coupes géologique et technique figurent en Annexe 1.

L'essai sur cet ouvrage a été réalisé du 27 au 31 mars 2014 (débit : 9,1 m³/h). L'illustration 35 présente les résultats de la modélisation avec le modèle modifié de Hunt et Scott. Pour modéliser cet essai, le diagnostic a montré la présence d'une limite étanche proche du forage au bout de 12 minutes de pompage (soit une distance de 70 m si tant est que la valeur de S soit correcte) et l'effet de drainance d'un aquitard sus-jacent, probablement lié aux vingt premiers mètres de coulées pyroclastiques, visiblement plus perméables que le niveau capté ; ce niveau serait a priori libre (aquifère libre ; T_0 : $1,5 \times 10^{-3}$ m²/s, S_y : 10^{-3}). Les caractéristiques du niveau capté sont T : $1,0 \times 10^{-3}$ m²/s, S : 6×10^{-4} (-). La valeur de S est hypothétique puisqu'estimée au puits de pompage.

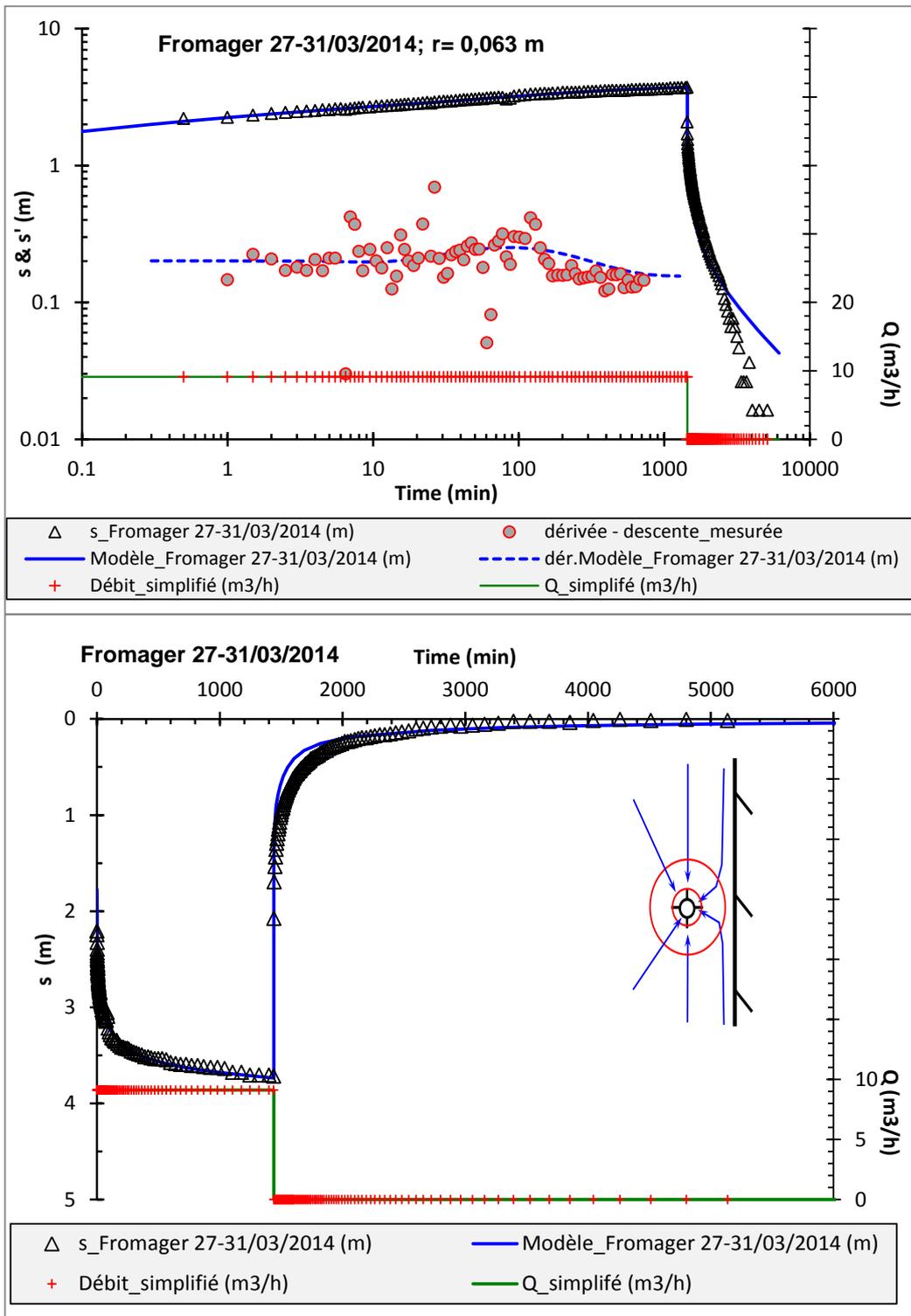


Illustration 35 : modélisation de l'essai au forage Fromager (2014). Modèle : Hunt et Scott modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. S : rabattement ; s' : dérivée du rabattement

4.3.2 Forage Bassignac, BF1 (Martinique) :

Le forage Bassignac a été réalisé en 2014. Il a une profondeur de 50 m et capte des venues d'eau entre 19,5 et 27,5 m au sein d'une coulée de lave fracturée. L'ouvrage est crépiné de 11,9 à 26,7 m, seulement le niveau d'eau au moment de l'essai était situé à 19,5 m de profondeur. La coupe géologique du forage est constituée de 10,5 m d'argiles d'altération, puis jusqu'à 14,5 m de blocs de lave dans une matrice sableuse, de lave fracturée jusqu'à 27,5 m, et d'argiles d'altération jusqu'à la fin de l'ouvrage. Les coupes géologique et technique figurent en Annexe 2.

L'essai sur cet ouvrage a été réalisé le 01 avril 2014 pendant 290 minutes (débit: 0,65 à 1,05 m³/h). L'illustration 36 présente les résultats de la modélisation avec le modèle modifié de Hantush. Pour modéliser cet essai, le diagnostic a montré que l'ouvrage ne captait la formation que partiellement (environ 6 m sur 12 m d'épaisseur), montrant vraisemblablement que l'aquifère s'étendrait au-delà de 50 m de profondeur. Il a aussi montré un effet de drainance provenant d'un aquitard supérieur ($k' : 7,0 \times 10^{-7}$ m/s, pour une épaisseur d'un mètre). Il convient de noter qu'en théorie et au vu du contexte géologique de cet ouvrage, l'aquitard pourrait aussi être une formation sous-jacente. Les caractéristiques du niveau capté sont $T : 3,0 \times 10^{-4}$ m²/s, $S : 5 \times 10^{-3}$ (-). La valeur de S est cependant hypothétique puisqu'estimée au puits de pompage.

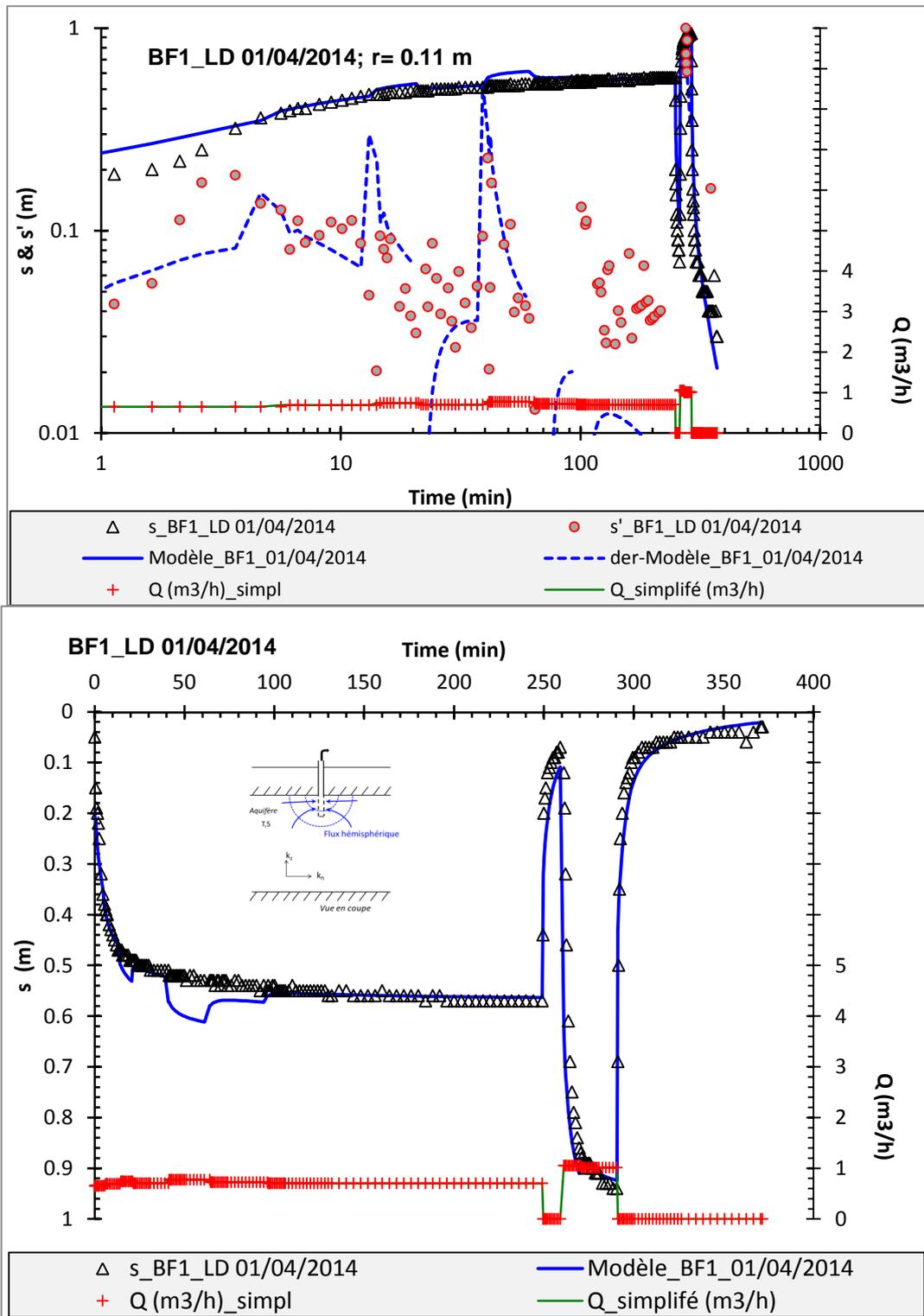


Illustration 36 : modélisation de l'essai au forage Bassignac (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement

4.3.3 Forage Malgré Tout, MTF1 (Martinique) :

Le forage Malgré Tout a été réalisé en 2014. Il a une profondeur de 45 m et capte des venues d'eau comprises entre 24,7 et 39,0 m au sein de brèches et d'intercalations cendreuses (28,2 à 30,5 m). L'ouvrage est crépiné de 24,7 à 39,0 m. La coupe géologique du forage est constituée de 21 m d'argiles d'altération, puis jusqu'à la fin du forage, de niveaux de brèches.

L'essai sur cet ouvrage a été réalisé le 27 mars 2014 pendant 390 minutes (débit aux environs de 1,6 m³/h). L'illustration 37 et l'illustration 38 présentent les résultats de la modélisation avec le modèle modifié de Hantush.

Pour modéliser cet essai, le diagnostic a montré que l'ouvrage ne captait que partiellement l'aquifère, *a priori* 15 m (correspondant à la hauteur saturée) sur une hauteur estimée à 40 mètres et qu'il était situé dans un aquifère très limité dans l'espace, *a priori* de forme carrée. Ses limites sont atteintes au bout de 60 minutes de pompage, ce qui donne une surface, si le coefficient d'emmagasinement est correct ($S : 7 \times 10^{-5}$; estimation au puits de pompage) de l'ordre de 4 km². Cette géométrie, tant par sa forme que par sa taille, est cohérente avec la morphologie du morne où est implanté l'ouvrage. Un léger effet de drainage a aussi été nécessaire pour reproduire l'essai ($k' : 2,2 \times 10^{-11}$ m/s, pour une épaisseur d'un mètre); il provient vraisemblablement de la formation sus-jacente (argile d'altération). La transmissivité de l'horizon capté est de $7,0 \times 10^{-4}$ m²/s.

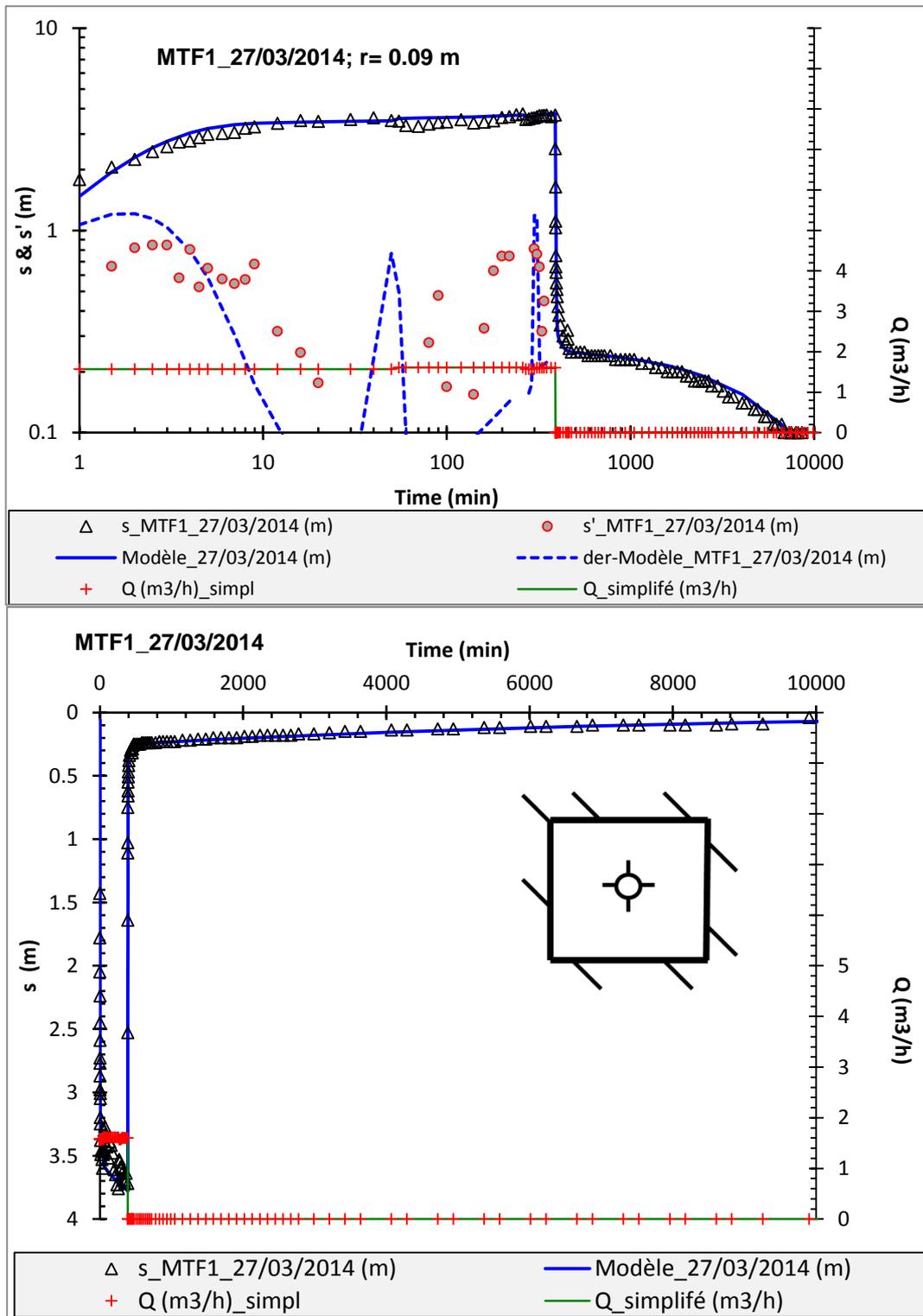


Illustration 37 : modélisation de l'essai au forage Malgré Tout (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement

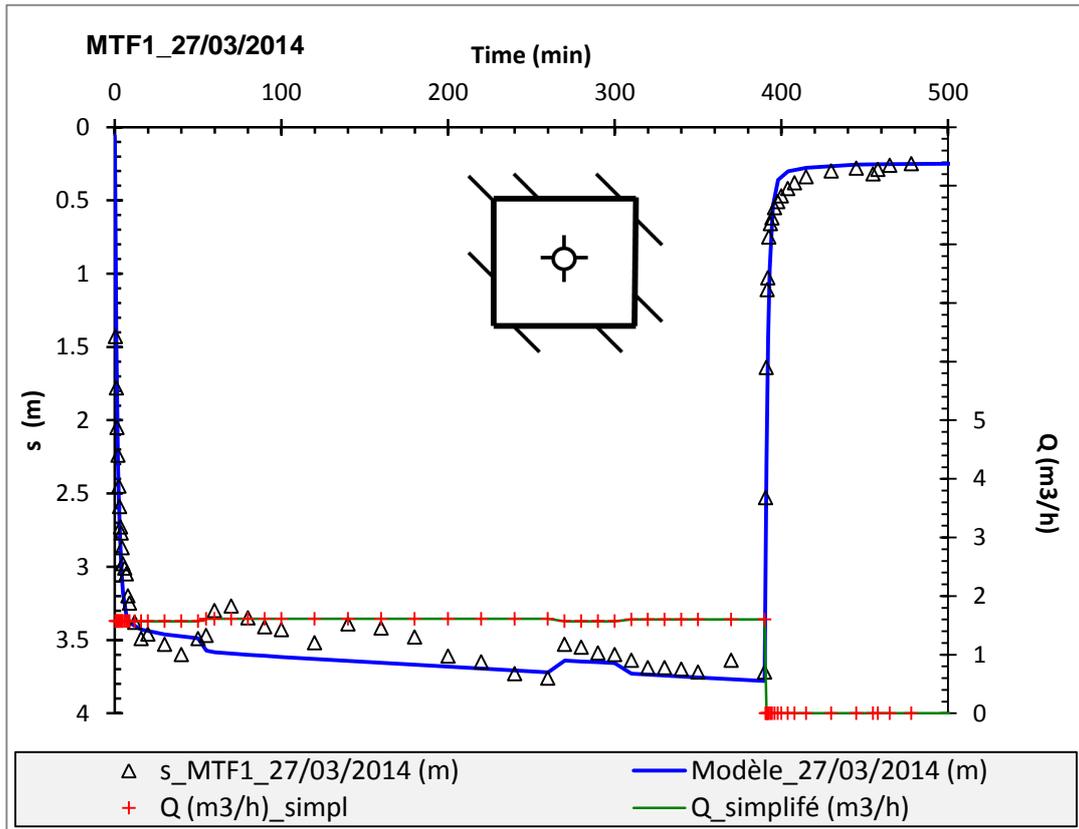


Illustration 38 : Zoom sur les rabattements pendant la période de pompage. Malgré Tout , 2014

4.3.4 Forage MVF1 (Martinique) :

Le forage MVF1 a été réalisé en 2014. Il a une profondeur de 16 m et capte des venues d'eau situées entre 2,25 et 14,25 m de profondeur au sein d'argiles d'altération. L'ouvrage est crépiné sur toute cette hauteur. La coupe géologique du forage est constituée de 3,0 m de sol végétal puis d'argiles d'altération.

L'essai sur cet ouvrage a été réalisé le 08 avril 2014 pendant 330 minutes (débit : 1,07 m³/h). L'illustration 39 présente les résultats de la modélisation avec le modèle modifié de Hantush. Pour modéliser cet essai, le diagnostic a montré que l'ouvrage ne captait que partiellement l'aquifère, *a priori* sur une dizaine de mètres, correspondant à la hauteur saturée, sur une épaisseur globale évaluée à 50 m, correspondant vraisemblablement à l'extension en profondeur des matériaux argileux. Par ailleurs, une anisotropie de transmissivité a été nécessaire pour modéliser cet essai, $T_h/T_v=10$, suggérant qu'au sein de l'aquifère existe des niveaux de moindre perméabilité que celle captée par l'ouvrage ($T : 4,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$). La valeur de S est estimée à 9×10^{-5} (-) ; cependant elle est hypothétique puisqu'estimée au puits de pompage.

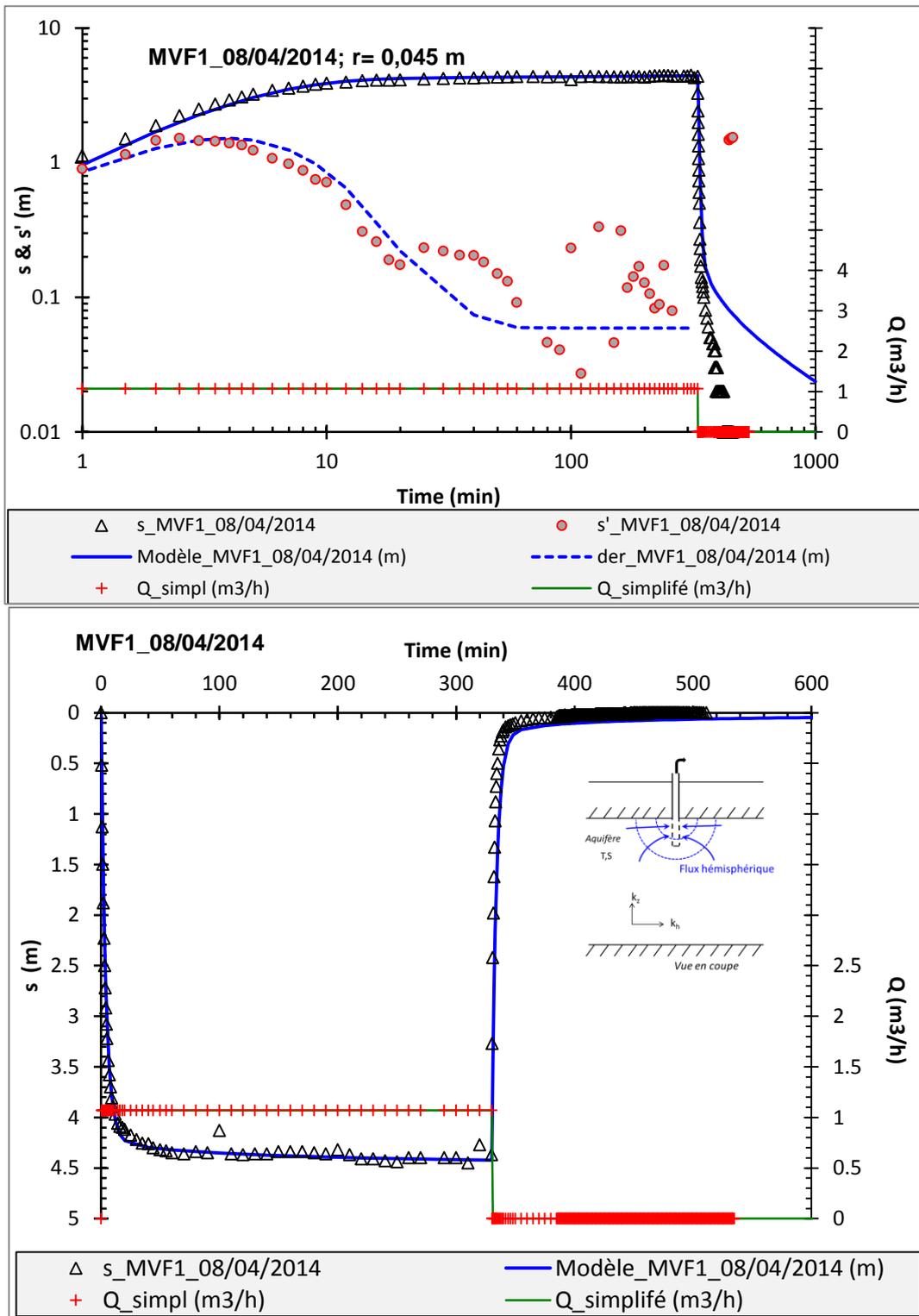


Illustration 39 : modélisation de l'essai au forage MVF1 (2014). Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation log-log, graphe du bas : représentation arithmétique. s : rabattement ; s' : dérivée du rabattement

4.4 SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDRODYNAMIQUE

Les essais réalisés montrent, comme attendu, une différenciation en termes de propriétés hydrodynamiques suivant que l'on capte des faciès altérés, des coulées pyroclastiques ou des laves fracturées. Ainsi, les formations « saines » de type coulées de lave fracturée, voire présentant des niveaux inter-coulées productifs, ont des transmissivités variant de 10^{-4} à plus de 10^{-3} m²/s (3×10^{-3} m²/s pour Saint Denis), alors que les faciès altérés et coulées pyroclastiques ont des transmissivités de l'ordre de 10^{-4} m²/s.

L'analyse des tests a quasi systématiquement mis en évidence des effets de drainance en provenance de niveaux aquifères sus- ou sous-jacents et très souvent des effets de compartimentation (limites étanches). Ce type de réponse est cohérent avec le mode de dépôt de coulées volcaniques empilées et emboîtées au sein de paléo-vallées. Leurs caractéristiques hydrodynamiques varient en lien avec le type de lithologie, le degré d'altération ou encore la géométrie des coulées.

5 Approche hydrogéochimique

5.1 OUTILS GÉOCHIMIQUES EMPLOYÉS

L'utilisation conjointe des marqueurs isotopiques du Strontium et des stables de l'eau, ainsi que des outils de datation par les CFC et SF₆ va permettre de définir pour l'ensemble des eaux échantillonnées, le type de réservoir dans lequel elle a transité (lithologie de l'aquifère), l'origine (altitude moyenne de recharge), ainsi que le temps de résidence au sein de l'aquifère.

5.1.1 Analyses chimiques et isotopiques

a) Principe des outils isotopiques

La composition chimique d'une eau est en partie déterminée par son environnement naturel (composition des eaux de recharge, activité biologique et interaction au sein de la zone saturée, échanges au sein de l'aquifère), mais elle reflète également l'impact des activités anthropiques. La chimie des eaux donne une indication quant à l'ampleur du phénomène et peut apporter des éléments de compréhension des mécanismes géochimiques mis en jeu. Dans cette étude, les analyses des éléments majeurs ont été couplées aux analyses isotopiques (stables de l'eau et strontium).

b) Les isotopes stables de l'eau

Le rapport des isotopes stables de la molécule d'eau ($[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]$ et $[^2\text{H}/\text{H}]$) est exprimé en unité delta de déviation (δ), en parts pour mille, par rapport à un standard de référence :

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

où R est le rapport isotopique de l'isotope lourd sur l'isotope léger (i.e. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ pour l'oxygène ou $^2\text{H}/\text{H}$ pour l'hydrogène). Le standard de référence est le V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) pris à 0 ‰.

Les variations des compositions isotopiques de l'eau dans le cycle hydrologique résultent soit de fractionnements isotopiques qui interviennent lors des changements de phase (évaporation, condensation), soit de mélanges d'eaux de compositions isotopiques différentes. L'évaporation entraîne toujours la formation de vapeur appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide d'origine (fractionnement isotopique). À l'inverse, lors de la condensation, la phase condensée (pluie par exemple) est toujours enrichie en isotopes lourds au détriment de la phase vapeur résiduelle (nuage).

À l'échelle mondiale, les teneurs en deutérium des pluies sont reliées aux teneurs en oxygène 18 par la relation couramment appelée droite mondiale des eaux météoriques (Craig, 1961) suivante :

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

La détermination des teneurs en oxygène 18 et deutérium permet la comparaison par rapport à la fonction d'entrée, c'est à dire par rapport à la droite locale des eaux météoriques. Ces investigations permettent ainsi de préciser si les eaux de l'aquifère ont été modifiées par échange

ou mélange avec des eaux extérieures au système. Le traçage obtenu à partir de l'oxygène 18 et du deutérium peut donc contribuer à caractériser les transferts d'eau au sein des aquifères.

Sous certaines conditions (temps de résidence élevé, faible rapport Eau/Roche, température élevée du réservoir, échange avec le CO₂), les interactions Eau-Roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau (Cf. Illustration 40).

En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées. L'histoire hydroclimatique d'un aquifère peut être reconstituée par l'abondance des isotopes lourds (¹⁸O, ²H) dont les signatures correspondent à des environnements et des épisodes hydroclimatiques spécifiques, ou des altitudes de recharge différentes. La localisation de la zone d'alimentation doit être néanmoins abordée avec circonspection si l'on estime avoir affaire à des eaux très vieilles. Il est possible en effet que des eaux minérales infiltrées lors d'une période plus froide que l'actuelle, comme la dernière période glaciaire, enregistrent un appauvrissement de leurs teneurs en isotopes lourds dû à la baisse générale des températures, l'effet paléoclimatique se surajoutant au seul effet de l'altitude.

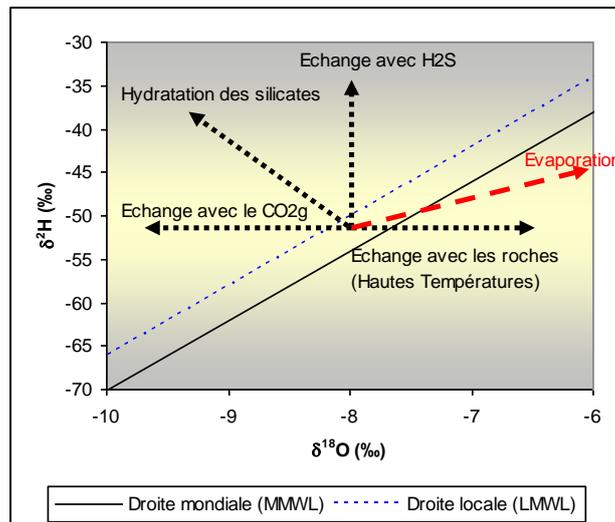


Illustration 40 : Processus d'échanges isotopiques susceptibles d'affecter la signature isotopique (¹⁸O, ²H) de l'eau (d'après Clark et Fritz 1997)

c) L'isotope du strontium

Le Strontium (Sr) est un élément chimique de type alcalino-terreux dont les propriétés physico-chimiques sont proches de celles du calcium (Ca). Cette similarité permet au Sr de se substituer au Ca dans les réseaux cristallins.

L'élément strontium peut être utilisé comme traceur dans les études environnementales puisqu'il est naturellement présent dans le milieu. Le Sr possède 4 isotopes (éléments de même numéro atomique qui présentent des propriétés identiques mais qui diffèrent les uns des autres par la masse atomique). Ces 4 isotopes : ⁸⁸Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁶Sr et ⁸⁴Sr sont stables. Seul le strontium 87 (⁸⁷Sr) est radiogénique, c'est à dire qu'il est issu de la désintégration radioactive d'un isotope père, en l'occurrence le rubidium 87 (⁸⁷Rb) par désintégration β⁻. Les effets de variations du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr liés à la décroissance radioactive du nucléide père (⁸⁷Rb) en nucléides fils (⁸⁷Sr) ne sont

pas significatifs, compte tenu de la courte échelle de temps à laquelle ces processus sont étudiés dans les études environnementales, par rapport à la période de demi-vie du rubidium ($49,9 \cdot 10^9$ ans).

L'abondance des isotopes ^{88}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr reste constante au cours du temps alors que l'abondance de l'isotope ^{87}Sr va augmenter dans le temps suite à la production via la désintégration du ^{87}Rb . En Sciences de la Terre et dans les études environnementales, on utilise ainsi le rapport de l'isotope radiogénique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que l'on exprime en fonction de teneurs en strontium ou de l'inverse de la teneur en Sr ou encore d'un élément X normé au Sr ($1/\text{Sr}$, X/Sr), ce type de représentation permettant de matérialiser des mélanges à deux composants par des droites.

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'une eau est directement lié à celui du minéral ou de l'assemblage minéralogique avec lequel l'eau a interagi. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement faibles, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus élevées (plus radiogéniques).

Dans le contexte de cette étude, ces isotopes permettront de distinguer les eaux ayant transité dans des réservoirs constitués d'une lithologie variée (laves, coulées pyroclastiques, conglomérats, etc.). Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donne donc des informations sur (1) l'origine et potentiellement les proportions de mélange des différents types d'eau, ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des interactions eau-roche notamment liées à l'altération ou la dissolution.

d) Échantillonnage et mesure

L'ensemble des analyses chimiques et isotopiques a été réalisé dans les laboratoires du service Métrologie Monitoring Analyse du BRGM à Orléans. Les anions ont été analysés par chromatographie ionique, les cations et les traces par ICP-MS. Les incertitudes des résultats concernant les majeurs et les traces sont respectivement de 5% et 10%. Les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) ont été mesurés par spectrométrie de masse en phase gazeuse. La composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) est exprimée en différence relative en part pour mille (‰) par rapport au standard international V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). L'incertitude des résultats concernant les isotopes de l'eau est de 0.8‰ pour le deutérium et de 0.1‰ pour l'oxygène.

Les analyses isotopiques du strontium ont été faites par spectrométrie de masse à source solide (TIMS spectrométrie de masse à thermo-ionisation) après séparation sur résine. La justesse et la reproductibilité des mesures des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont obtenues par l'analyse répétée du standard international NBS 987. Les rapports isotopiques des échantillons sont normalisés à la valeur certifiée du standard NBS 987 (0.710240).

5.1.2 Analyse des Gaz CFC et SF_6 pour la datation de l'âge apparent des eaux

a) Principe de la méthode de datation

La méthode utilisée pour la datation des eaux se base sur la mesure des gaz dissous contenu dans l'eau à l'état de trace : les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (trichlorodifluorométhane) et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) ainsi que le SF_6 (hexafluorure de soufre). Les gaz CFC ont été produits industriellement à partir des années 1930, avec une large utilisation dans les années 1950 à 1960 avant d'être interdits en 1987 (accords du protocole de

Montréal) car les CFC sont en effet des gaz destructeurs de la couche d'ozone. Les CFC étaient utilisés dans les fluides réfrigérants et les solvants tandis que le SF₆ est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. La production industrielle du SF₆ a débuté en 1953. Le SF₆ est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport plus important.

L'analyse des gaz dissous (CFCs et SF₆) dans les eaux souterraines permet donc de dater des eaux relativement jeunes. L'intérêt de l'utilisation de ces composés repose principalement sur leur origine et leurs propriétés physico-chimiques (IAEA, 2006, Vittecoq et al., 2007, Gourcy et al., 2009) :

- Un temps de résidence atmosphérique élevé¹ ;
- Une homogénéité des concentrations atmosphériques ;
- Aucune production naturelle, sauf pour le SF₆ dans des cas particuliers ;
- Une bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau.

La datation des eaux par les CFC (Plummer et Friedman, 1999) et SF₆ (Busenberg & Plummer, 2000) a été rendue possible par la connaissance (1) de leurs concentrations atmosphériques depuis 1930 (Bauer et al., 2001) et (2) par leurs solubilités dans l'eau (Warner & Weiss, 1985 ; Bu & Warner 1995 ; Bullister et al., 2002).

Les traceurs gazeux présents dans l'atmosphère traversent la zone non saturée des hydrosystèmes selon un transport diffusif, avant d'entrer dans l'eau souterraine sous forme de gaz dissous. La concentration d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry, qui définit la solubilité des gaz². L'application de la loi de Henry nécessite des estimations de l'altitude de recharge et de la température de recharge pour calculer les âges apparents, à partir des concentrations des gaz dissous (CFC et SF₆) mesurées dans les eaux.

De nombreuses études ont montré que les concentrations en gaz dissous (gaz nobles surtout) dans les eaux souterraines se situent presque toujours au-dessus de l'équilibre de solubilité attendue avec l'atmosphère. La composition du gaz en excès par rapport à l'équilibre de solubilité prouve son origine atmosphérique, d'où l'expression courante « excès d'air » (Heaton et Vogel, 1981).

¹ Les temps de vie dans l'atmosphère des CFC-11, CFC-12 et CFC-113 sont respectivement estimés à 45 ± 7,87 ans, 87 ± 17 ans et 100 ± 32 ans (Volk et al., 1997)

² Les concentrations d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry qui définit la solubilité des gaz : $C_i = K_{Hi} p_i$. La pression partielle du gaz considéré (p_i) est fonction de la fraction molaire du gaz dans l'air (x_i), de la pression atmosphérique (P) et de la pression partielle de vapeur d'eau (Warner et Weiss, 1985) : $p_i = x_i (P - p_{H_2O})$. Les constantes d'Henry K_{Hi} sont fonction de la température et de la salinité des eaux. Les paramètres pour les calculs des K_H pour le CFC-11 et CFC-12 sont ceux de Warner et Weiss (1985) et Bullister *et al.* (2002) pour le K_H du SF₆.

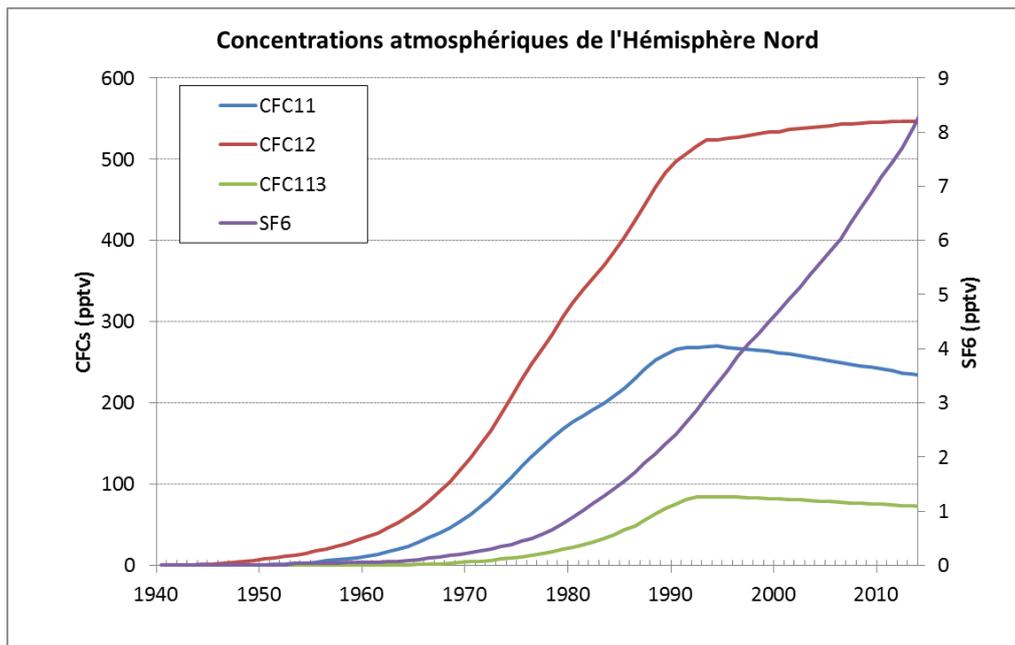


Illustration 41 : Chroniques des concentrations des CFC et SF₆ dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov)

L'excès d'air est expliqué par la présence de petites bulles d'air piégées dans la zone quasi-saturée (frange capillaire) située au-dessus de la nappe phréatique (Faybishenko, 1995). Des modèles complexes prenant en compte ce phénomène ont été développés (Aeschbach-Hertig et al. 2000). Ces modèles permettent de montrer que la pression hydrostatique a une influence prépondérante sur l'importance de l'excès d'air. Puisque la pression hydrostatique est liée aux fluctuations de la nappe phréatique, une relation entre l'excès d'air et la recharge ou l'intensité des précipitations peut être établie (Aeschbach-Hertig et al. 2002, Beyerle et al. 2003, Kulongoski et al. 2004). La procédure de correction de l'excès d'air est surtout importante pour le SF₆. L'effet est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Buser et Plummer, 2000)

La datation des eaux à l'aide des gaz CFC et SF₆ se base sur la comparaison des concentrations en gaz dissous dans les eaux souterraines et les chroniques de concentration des gaz dans l'atmosphère³ (Illustration 41). La méthode de datation des eaux est conditionnée par plusieurs hypothèses :

- (1) la température et l'altitude de recharge sont connues (ou peuvent être estimées)⁴ ;

³ Dans cette étude, les chroniques d'entrées pour les CFC et le SF₆ sont celles produites par John Bullister (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov).

⁴ La température de recharge est un paramètre important pour le calcul des âges apparents. La température de recharge peut être estimée à partir des données climatologiques. Elle est souvent considérée comme égale à la température moyenne de l'air au niveau de la zone de recharge. On considère parfois la température moyenne des eaux de l'aquifère. La méthode de datation avec les CFC et SF₆ est relativement peu sensible à l'altitude de recharge. Toutefois, une augmentation de l'altitude moyenne de recharge peut entraîner une diminution de la température de l'eau de recharge. Pour les sites où la recharge peut se produire à des altitudes nettement supérieures à l'altitude de la nappe phréatique et, par conséquent, à des températures inférieures de recharge, une analyse de sensibilité est généralement effectuée.

(2) la pression partielle des gaz dans la zone d'infiltration (zone non saturée) est identique à celle des couches de la troposphère et l'eau de recharge est en équilibre avec l'atmosphère de la zone d'infiltration⁵ ;

(3) la concentration des gaz dissous dans l'eau n'est pas altérée par des processus biologiques, géochimiques ou hydrologiques⁶ ;

(4) l'aquifère ou la zone d'infiltration n'est pas contaminé par des sources anthropiques (pollutions urbaines, agricoles, industrielles)⁷ ;

(5) la méthode de prélèvement ne doit pas permettre de contact entre l'échantillon d'eau et l'atmosphère⁸.

⁵ L'épaisseur de la zone non saturée où se produit le transfert massique de l'eau vers l'aquifère peut fausser les estimations de l'âge de l'eau des aquifères (Busenberg et al, 1993 ; Cook et Salomon, 1995). En effet, l'air contenu dans la zone non saturée échange en permanence avec l'eau porale ce qui peut retarder la mise à zéro du compteur de datation lorsque l'eau arrive dans l'aquifère. Pour une ZNS de 10 m, l'âge de l'eau souterraine peut être surestimé de 1 à 2 ans (Cook et Salomon, 1995). L'erreur d'estimation des âges en fonction de l'épaisseur de la ZNS dépend également du type et de la teneur en eau du sol et également des modalités de transfert (présence ou absence d'une double porosité).

⁶ Dans les climats arides où la zone d'infiltration (zone non saturée) peut s'assécher entre les épisodes de recharge, Russel et Thompson (1983) ont montré que les CFCs pouvaient s'adsorber sur la matière organique des sols secs, l'adsorption du CFC11 étant privilégiée par rapport au CFC12 en raison de plus faibles teneurs en fluor. L'effet de sorption est minimal pour le CFC-113 et nul pour le SF₆. Au moment de la recharge, l'humidité du sol favorise le relargage des CFCs adsorbés dans l'air du sol ce qui conduit à enrichir les concentrations au-delà des concentrations d'équilibre air-eau. Puisque le CFC11 est plus fortement adsorbé sur la matière organique des sols secs, les concentrations en CFC11 de l'eau recharge sont plus fortes que les concentrations en CFC12. Dans les zones arides, ce mécanisme de sorption-désorption sur la matière organique peut conduire à tort, à des âges apparents plus jeunes, notamment pour le CFC11.

La dégradation microbienne affecte les concentrations en CFC en milieu anoxique (CFC11 affecté d'un facteur 10 par rapport au CFC-12 et CFC-113, Cook et al 1995 et Oster et al. 1996). La séquence de dégradation des CFC est la suivante : CFC-11>CFC-113>CFC-12. **Le SF₆ n'est pas affecté par ce phénomène.**

⁷ La contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz en raison d'une source de pollution (production) du ou des gaz (proximité d'un milieu urbain, de sites de rejets des eaux usées ou de décharges officielles ou sauvages, vieux réfrigérateurs ou climatiseurs, récipient en plastique, propulseur aérosols, voiture...). Certains effluents d'eaux usées peuvent présenter des concentrations en CFC d'un ordre de grandeur supérieur aux concentrations attendues par l'équilibre air-eau.

⁸ Toutes les précautions sont prises pour éviter ces contaminations toutefois les conditions de terrain ne permettent pas toujours de se prémunir de ce risque

Modèle conceptuel de transfert utilisé pour interpréter les résultats

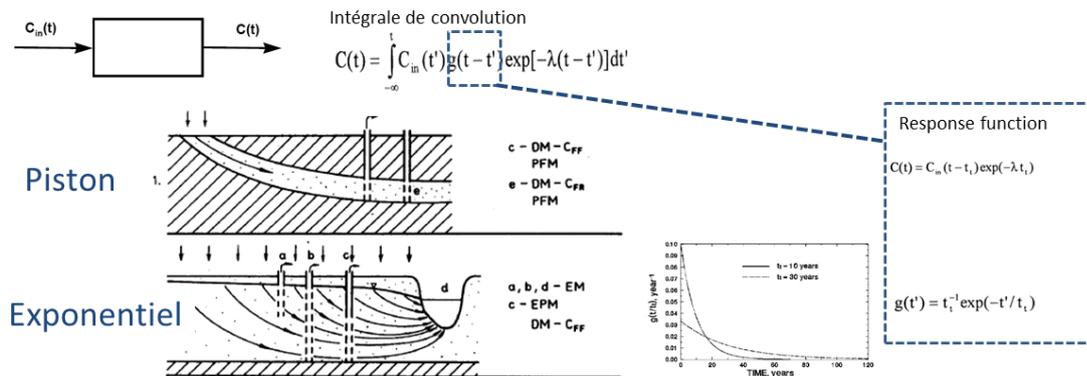


Illustration 42. Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les résultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)

En l'absence de pollution locale, la comparaison des teneurs des différents gaz dissous par rapport aux teneurs connues dans l'atmosphère permet d'estimer un temps moyen de séjour de l'eau dans les aquifères. La mesure des concentrations en gaz dissous ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. **L'âge « CFC » d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires.** La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines, il est essentiel d'obtenir au préalable un modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).

Les estimations des âges de l'eau reposent donc sur l'utilisation d'un modèle conceptuel de transfert (Illustration 42, Maloszewski et Zuber, 1982) :

- **Le modèle piston (P)** suppose le déplacement du fluide sans modification de la teneur (modèle convectif). C'est le modèle le plus simple qui permet d'attribuer un âge apparent sans définir de distribution des temps de séjour. Seules des dates de recharge postérieures aux années 50 pourront être proposées par l'utilisation des gaz dissous.
- **Le modèle exponentiel (EM)** attribue une forme exponentielle décroissante à la distribution des temps de séjour de l'eau. Ce modèle ne nécessite qu'un paramètre: le temps moyen de séjour. Ce modèle correspond à la distribution des temps de séjour obtenue par un bilan de masse pour un réacteur discontinu à mélange parfait. Dans le cas d'un aquifère, ce modèle s'interprète comme la résultante sur une verticale de multiple lignes d'écoulements ayant une distribution exponentielle des âges. À l'échelle de l'aquifère, il peut donc s'interpréter comme le résultat d'une dispersion d'origine hydrodynamique.

Un troisième type de modèle est également classiquement utilisé pour décrire les résultats. Il s'agit du **modèle de mélange binaire** : l'eau étudiée est constituée d'un mélange de deux eaux d'âges différents. Un des pôles du mélange peut être ancien (anté ou post-traceur), l'autre pôle de mélange étant actuel.

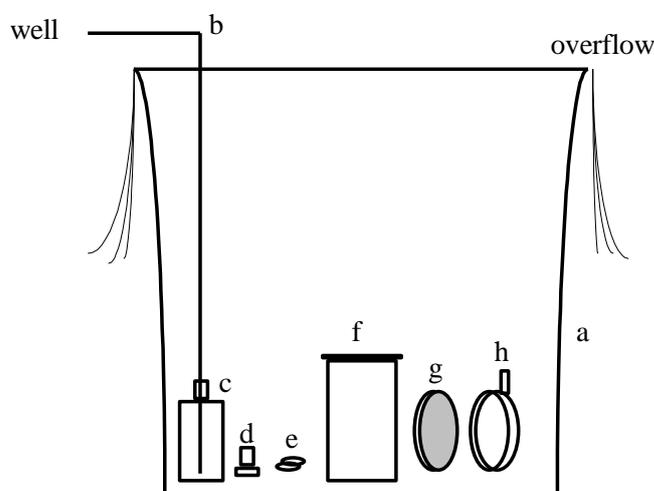
Compte tenu de l'importante variabilité géologique et hydrodynamique des aquifères, les trois modèles décrits ci-dessus peuvent être envisagés pour décrire un même système. Le choix du modèle pour chaque point de mesure se fait de manière itérative dans le but de vérifier son adéquation avec les quatre traceurs (dans le cas où aucune dégradation ou contamination n'est observée).

b) Échantillonnage et mesure

Les prélèvements pour mesure de CFC dissous dans l'eau suivent le protocole développé par Oster *et al.* (1996). Pour la présente étude, les prélèvements ont été réalisés par le BRGM lors des campagnes de prélèvement effectuées en avril 2013 et avril / mai 2014.



Illustration 43 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF₆



Source : IAEA, 2006

Illustration 44 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF₆.

a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique.

Le prélèvement se fait dans un flacon en verre de 500 ml, lui-même placé dans un récipient métallique (Illustration 43) qui sera également rempli d'eau prélevée en évitant les mélanges avec l'air ambiant. La fermeture de la bouteille en verre et du récipient métallique se fait impérativement sous l'eau (Illustration 44).

Les analyses des gaz dissous (CFC) ne font pas l'objet de normes ISO, inexistantes pour ces éléments, mais suivent un contrôle continu au sein du laboratoire (utilisation de standards internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes.

Les CFC sont mesurés à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse, équipée d'un capteur à détecteur d'électron. L'incertitude analytique est de $\pm 5\%$.

Les analyses des CFC et SF₆ ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

5.1.3 Données disponibles

La stratégie de prélèvements des eaux a été conçue pour obtenir une photographie la plus complète possible de l'hydrogéochimie des eaux superficielles et souterraines, en lien avec la géologie et la localisation des zones de cultures.

La campagne de juin 2012 du projet OPA-C a principalement été consacrée à l'échantillonnage d'eaux de surface, tout comme celle de mars 2013, tandis que le maximum de sources et tous les forages existants ont été prélevés en avril 2013 et en carême 2014, dans le cadre du projet CHLOR-EAU-SOL. En complément d'un inventaire le plus exhaustif possible des sources, des profils de conductivité électrique et de température au fil de l'eau ont été réalisés sur certains cours d'eau pour identifier les arrivées d'eau souterraine potentielles et aider à positionner les points d'échantillonnage des eaux de surface.

La localisation des sites de prélèvements en cours d'eau, forages et piézomètres, et au niveau des sources est présentée sur l'illustration 45 pour l'hydrosystème Pérou-Pères en Guadeloupe et sur l'illustration 46 pour le bassin du Galion en Martinique. Les résultats des analyses sont synthétisés dans les tableaux récapitulatifs des Annexes 3 et 4.

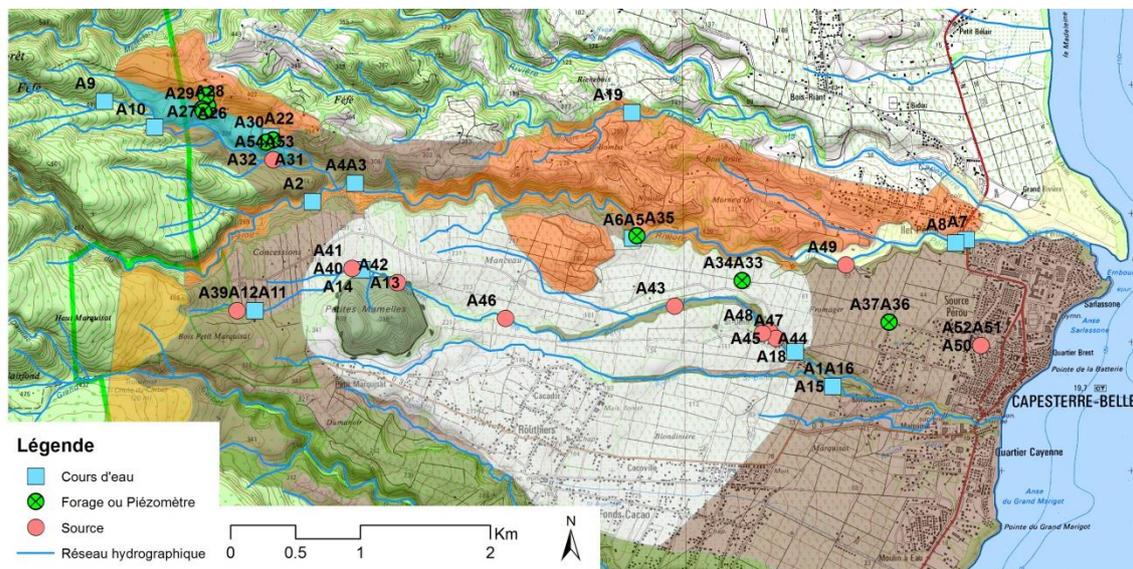


Illustration 45 : Localisation des prélèvements sur l'hydrosystème Pérou-Pères dans le cadre des projets OPA-C et CHLOR-EAU-SOL ; le libellé des sites fait référence au Tableau récapitulatif en Annexe 3

Outre les informations relatives aux analyses réalisées dans le cadre des projets OPA-C et CHLOR-EAU-SOL, cette étude s'appuie sur les travaux antérieurs réalisés au niveau du sous-

bassin de Féné (Charlier et al., 2011) sur l'hydrosystème Pérou-Pères et des forages Borelli et Trinité Galion dans le cadre du suivi DCE (données ADES, réseau DCE). Des données de pluie sur la Soufrière de Guadeloupe (Rad et al., 2007) ont été utilisées, comme celles de l'eau de mer à la Martinique (Sanjuan et al., 2003).

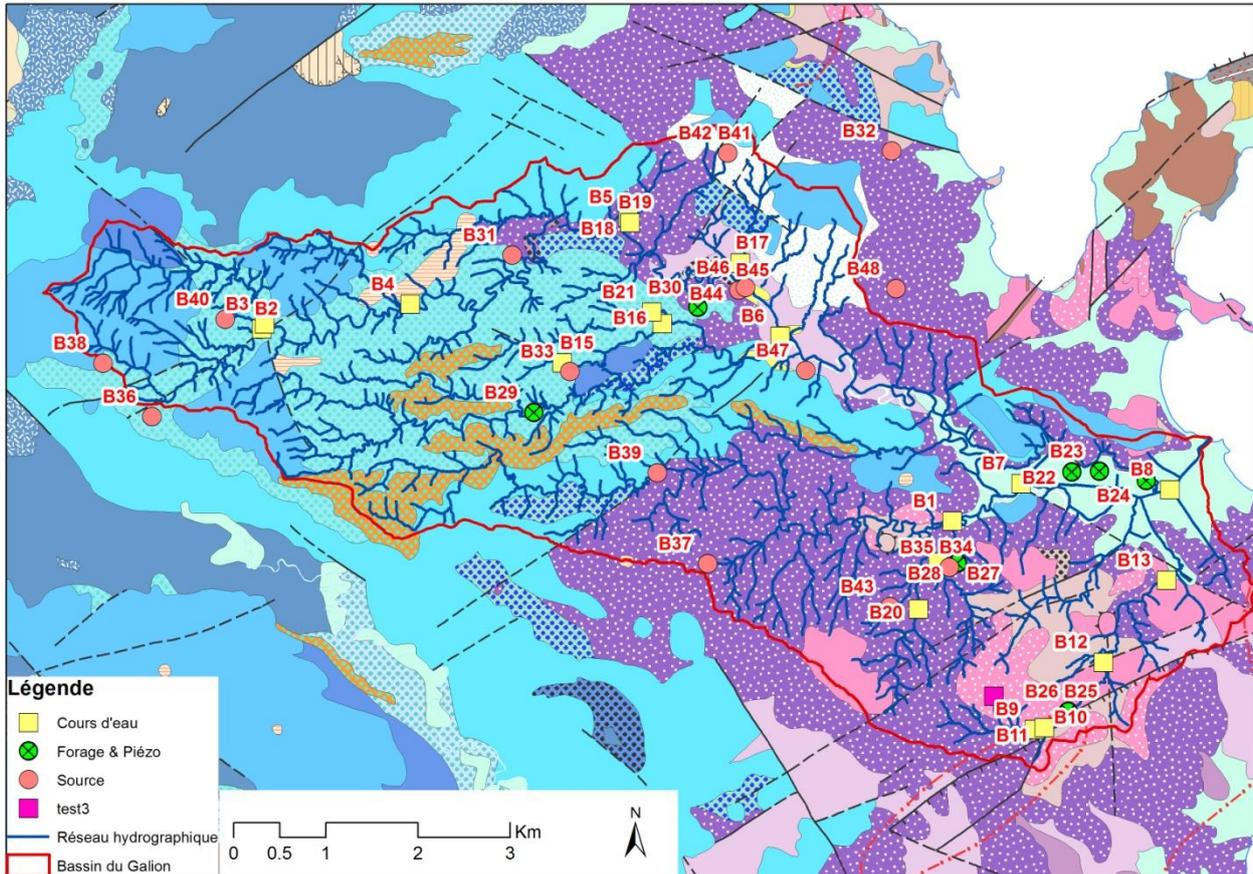


Illustration 46 : Localisation des prélèvements sur le bassin du Galion dans le cadre des projets OPA-C et CHLOR-EAU-SOL ; le libellé des sites fait référence au Tableau récapitulatif en Annexe 4

5.2 FACIÈS HYDROCHIMIQUES DES EAUX

Le diagramme de Piper permet la représentation des principaux ions majeurs (cations et anions distinctement) des différents échantillons d'eau. Leurs positions respectives dans le diagramme renseignent sur leurs faciès hydrochimiques. Le diagramme de Piper est utilisé ici dans une approche descriptive et comparative à l'échelle du bassin.

5.2.1 Faciès hydrochimiques de l'hydrosystème Pérou-Pères

L'illustration 47 présente, pour l'ensemble des échantillons d'eau analysés entre 2006 et 2014 à l'échelle de l'hydrosystème, les faciès chimiques relatifs en fonction du type d'eau (origine météorique, superficielle, souterraine).

Globalement, les eaux sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique, en cohérence avec les observations relatives dans la bibliographie (Bézègues-Courtade et Bés-de-Berc, 2007 ; Dumon, 2010). Certains sites montrent un enrichissement en calcium associé à un enrichissement en nitrates et en chlorures, en lien avec les pratiques agricoles: amendements calciques, fertilisation (Charlier et al., 2011).

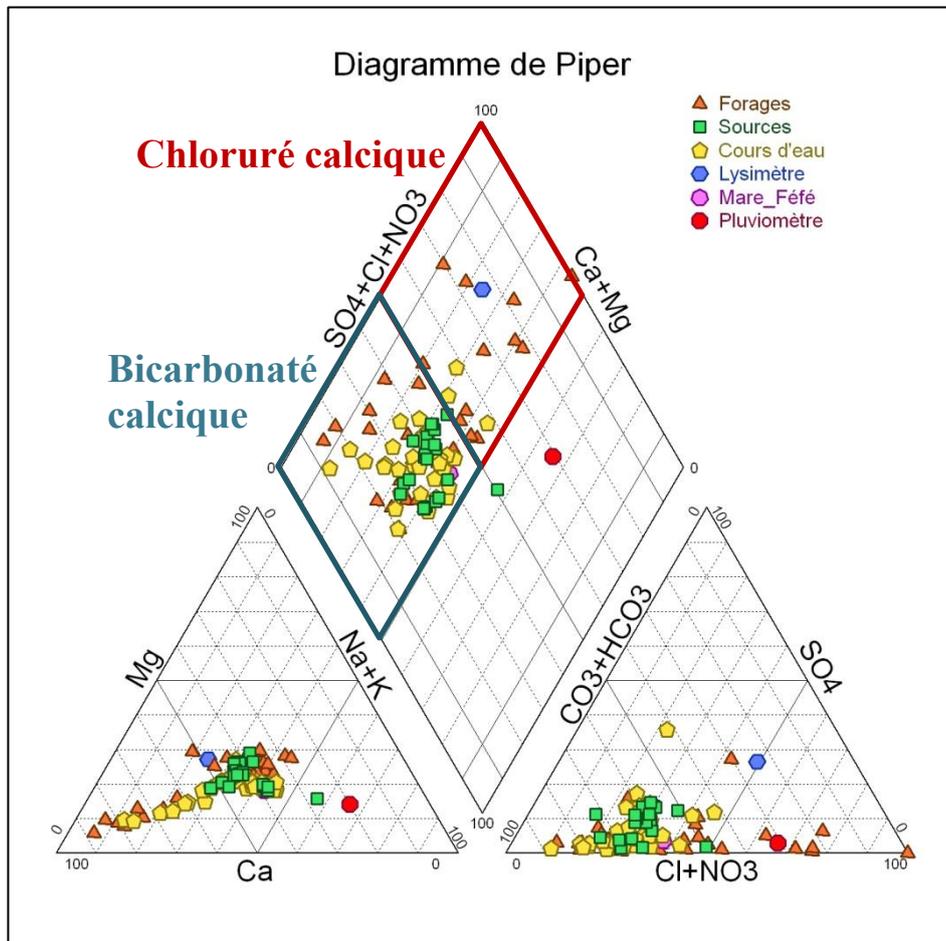


Illustration 47 : Faciès chimiques des eaux de érou-Pères en fonction du type d'eau, période 2006-2014

Pour identifier les masses d'eau caractérisées par un impact anthropique, des diagrammes de Piper nominatifs sont fournis ci-après (Illustration 48). Ces représentations montrent que la signature chimique des eaux de surface des principaux cours d'eau (rivières Pérou, des Pères, Maillard, St denis) est en lien avec celle des eaux de source. Les eaux du sous-bassin de Féfé (ravine et piézomètres superficiels < 5m) en amont de l'hydrosystème apparaissent les plus impactées par les cultures. En revanche, les eaux prélevées en forages et caractérisant les aquifères plus profonds ont des faciès chimiques plus hétérogènes.

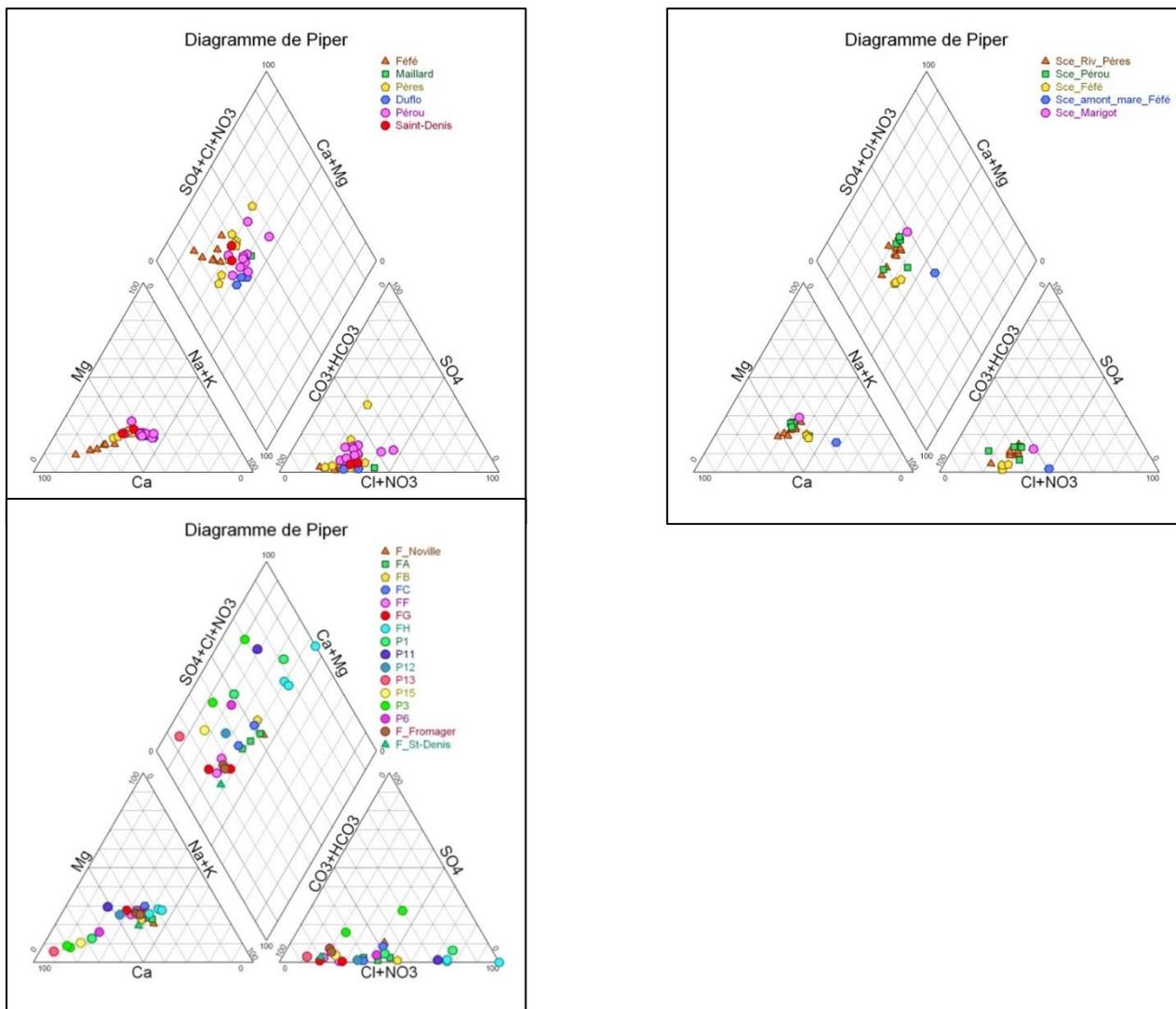


Illustration 48 : Faciès chimiques des eaux de Pérou-Pères pour les eaux de surface (en haut à gauche), les eaux de sources (en haut à droite), et les eaux de piézomètres (notés P1 à P15) et forages (notés F) (en bas)

5.2.2 Faciès hydrochimiques du bassin du Galion

a) Diagramme de Piper

L'illustration 49 présente sur un diagramme de Piper, l'ensemble des échantillons d'eau analysés entre 2004 et 2013 à l'échelle du Bassin du Galion. Globalement, les eaux sont caractérisées par un même faciès bicarbonaté calcique à chloruré calcique.

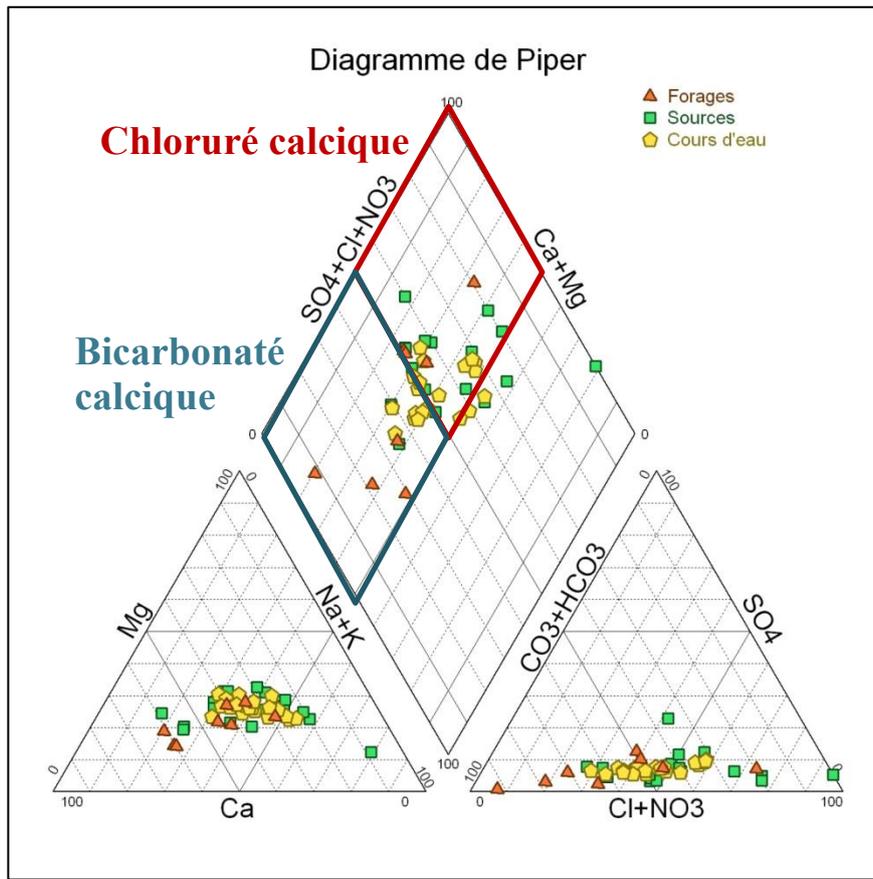


Illustration 49 : Faciès chimiques des eaux du Galion en fonction du type d'eau, période 2012-2013

Il apparaît ici que les eaux de rivières et les eaux de source ont des faciès similaires ce qui témoigne d'une relative connectivité entre les nappes et les cours d'eau en étiage – pendant la période de prélèvement des cours d'eau. Pour certains forages et sources, un enrichissement en calcium est observé et sera discuté dans la section suivante.

La relation entre les faciès hydrochimiques pour chaque type d'eau (eaux de surface et eaux souterraines) a été précisée par la réalisation de diagrammes de Piper nominatifs (Illustration 50). La chimie des eaux de surface apparaît bien homogène à l'échelle du bassin, à l'inverse de celles des eaux souterraines prélevées en forage, qui montrent une variabilité assez prononcée. Les eaux de sources constituent, chimiquement, un intermédiaire entre les eaux de surface et les eaux de forages. Cette différence est liée à des temps d'interaction différents et/ou à une lithologie différente.

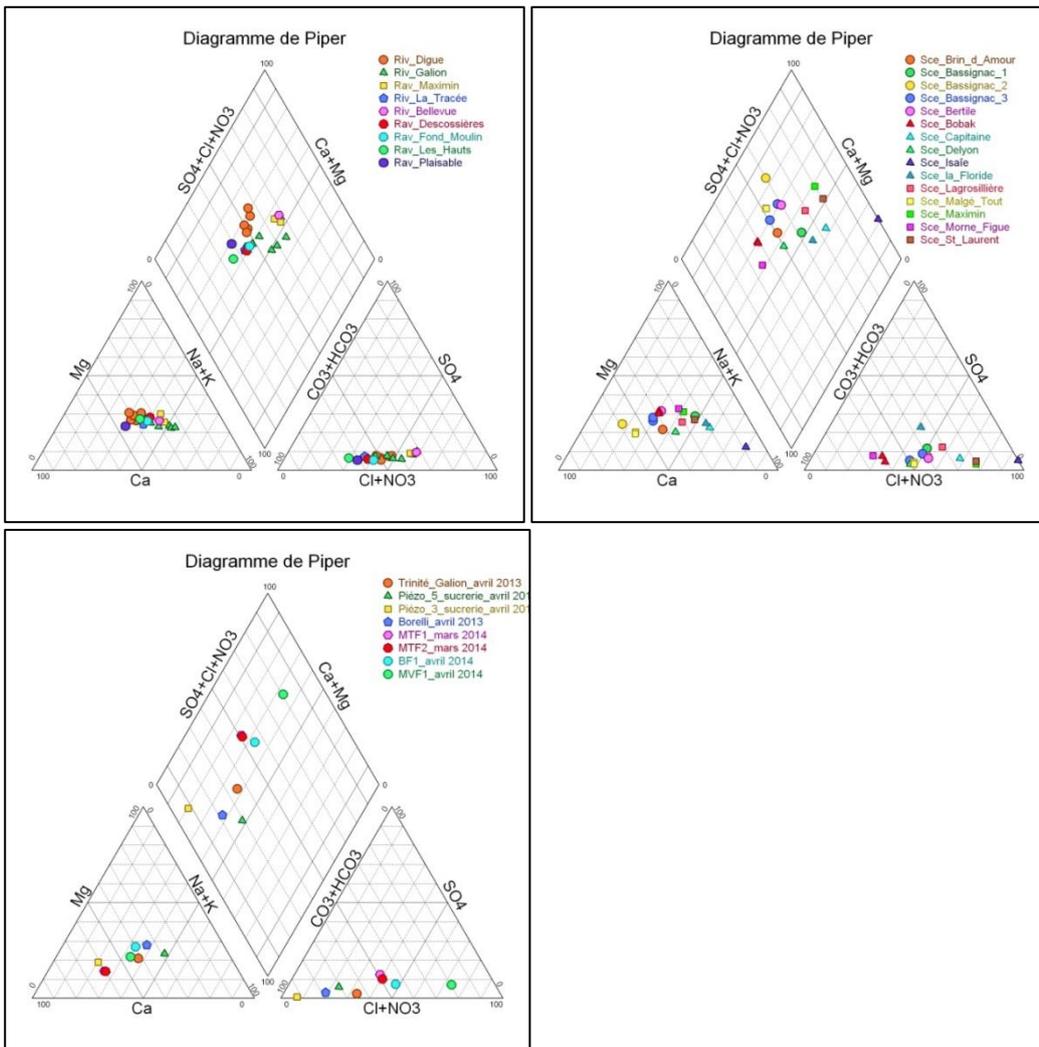


Illustration 50 : Faciès chimiques des eaux du Galion pour les eaux de surface (en haut à gauche), les eaux de sources (en haut à droite), et les eaux de forages (notés F) (en bas)

b) Diagramme Ca/Na vs. Sr/Na

L'illustration 51 présente les eaux du Galion sur un diagramme Ca/Na vs. Sr/Na qui est une normalisation des données Ca vs. Sr par Na, un marqueur du temps de séjour en contexte volcanique. Sur ce graphique, l'enrichissement en Ca/Na et en Sr/Na se traduit alors pour l'ensemble des points par une augmentation des apports calciques, d'origine agricole. Uniquement dans le cas de la source Bassignac 2, cette augmentation peut également être liée à l'influence d'une lithologie localement carbonatée du réservoir.

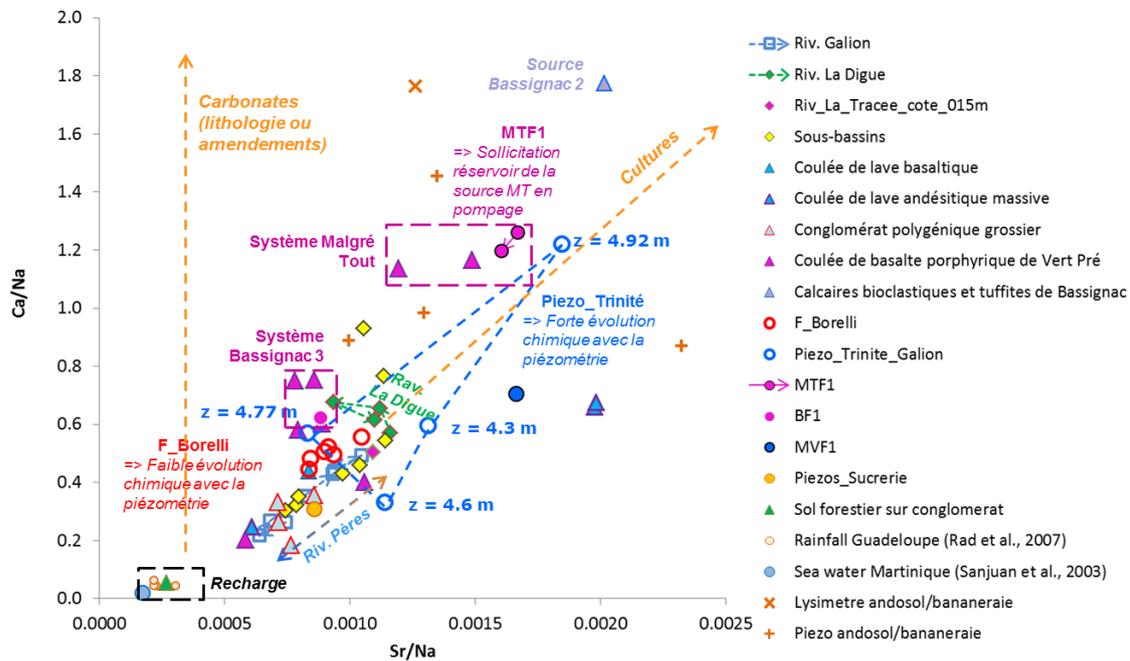


Illustration 51 : Diagramme Ca/Na vs. Sr/Na pour les eaux du Galion ; identification des apports anthropiques

L'interprétation du graphique est synthétisée ci-dessous :

Eaux souterraines :

- La **source Bassignac 2** apparaît comme le point d'eau le plus enrichi en Sr et Ca, ce qui est cohérent avec l'origine carbonatée des formations qu'elle draine, mais qui confirme également une forte influence anthropique (teneur en NO₃ = 35 mg/l et en CLD = 12.7 µg/l). Elle semble bien plus contaminée que la **source Bassignac 3** qui la surplombe et dont le réservoir est recoupé par le **forage BF1** qui présente les mêmes caractéristiques chimiques ;
- Le **piézomètre Trinité-Galion** présente une forte évolution de sa composition chimique en lien avec ses fluctuations piézométriques. Ceci montre que l'aquifère andésitique sous couverture à l'aval du bassin serait fortement influencé par les épisodes de recharge ;
- Ce comportement contraste avec le **Forage Borelli** qui conserve une composition chimique très stable tout au long de l'année, indiquant que cet aquifère situé dans les conglomérats est tamponné.
- **MTF1** capte des brèches fissurées surmontées de plus de 20 m d'altérites drainées par la **source Malgré Tout** en contre-bas du forage. L'évolution de la chimie lors du pompage de l'aquifère inférieur indique que des eaux du réservoir supérieur sont sollicitées. Cela montre une stratification des eaux en deux aquifères entre lesquels des phénomènes de drainance peuvent exister.

Eaux de surface

- **Rivière du Galion** : Les eaux du Galion montrent globalement un enrichissement en Ca et Sr de l'amont vers l'aval, ce qui traduit une augmentation de l'influence des activités anthropiques lors de la traversée des zones cultivées ;
- **Ravine de la Digue** : Les eaux du sous-bassin de la Digue apparaissent plus impactées que celles du Galion. On observe un chimisme assez différent de celui du forage MVF1, n'indiquant pas de lien évident entre les eaux souterraines de ce secteur et le réseau de surface.

5.3 ISOTOPE DU STRONTIUM

5.3.1 Guide d'interprétation

L'isotope du strontium (Sr) permet de préciser les modalités d'interaction de l'eau souterraine avec son environnement. La composition isotopique du Sr des roches volcaniques andésitiques de Guadeloupe et Martinique couvre une large gamme de valeur entre 0,70380 et 0.71000 (Davidson, 1986 ; White and Dupré, 1986) illustrant la variabilité de la signature isotopique de la roche mère en fonction des centres éruptifs, avec par exemple des valeurs de 0.70380 à 0.70420 pour la Montagne Pelée et de 0.70500 à 0.70540 pour le Morne Jacob (Davidson, 1986) en Martinique. Les eaux circulant dans ces formations acquièrent une signature proche de cette valeur si leur temps de résidence est suffisamment long et non influencé par des eaux de surface ou de l'eau de mer. Ainsi, dans la littérature, la composition isotopique du Sr des eaux souterraines circulant au sein des formations volcaniques antillaises se situe globalement entre 0.70400 et 0,70500 (Sanjuan et al., 2003 ; Rad et al., 2007 ; Brenot et al., 2008).

Cependant, plusieurs autres types d'apports peuvent considérablement modifier la signature de l'eau. Il existe un pôle atmosphérique avec une signature des pluies autour de 0,70910 sur les sommets de la Soufrière de Guadeloupe (Rad et al., 2007) – valeur similaire à celle de l'eau de mer en Martinique à 0,709188 (Sanjuan et al., 2003). Le pôle des eaux hydrothermales a une signature similaire autour de 0.709290 (Rad et al., 2007). En contexte insulaire, le pôle lithologique des sédiments carbonatés a une signature isotopique élevée comme en témoigne la gamme de valeur autour de 0.70900 pour les eaux d'aquifères carbonatés à la Barbade (Banner et al., 1994). Dans le contexte agricole antillais, les matériaux carbonatés, qui proviennent des formations récifales en place au sud de la Martinique et en Grande Terre de Guadeloupe, sont utilisés pour remblayer les chemins d'exploitation, ou amender les sols volcaniques. Enfin, le pôle des apports anthropiques comme les engrais de synthèse dont la signature isotopique peut être très variable et élevée (de 0.7089 jusqu'à 0.740, Banner et al., 1994), peut fortement modifier la signature isotopique de l'eau de recharge lorsqu'elle s'infiltré dans les sols cultivés.

5.3.2 Interprétation à partir des grands pôles hydrologiques

Concernant, l'hydrosystème Pérou-Pères, l'illustration 52 replace dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ l'ensemble des données de rivière, de nappe et des eaux de subsurface avec les pôles hydrologiques de la littérature (eau de pluie, eau de mer, eau hydrothermale). Les eaux de rivières et de forages ont une signature isotopique comprise entre 0.7038 et 0.7055 dans la gamme des valeurs de la signature isotopique des roches volcaniques martiniquaises (Davidson, 1986). Ces eaux de rivière et souterraines montrent un fort enrichissement en Sr comparé aux valeurs d'eau de pluie peu minéralisées. Les eaux de subsurface ont été échantillonnées dans la formation la plus répandue de la partie cultivée du bassin : les andosols sous bananeraies dans des piézomètres superficiels < 5 m à Fédé et dans un lysimètre à la station de Neufchâteau. Ce

signal géochimique caractérise l'eau d'infiltration et représente donc un pôle géochimique de recharge de la zone agricole du bassin. Les points de ces eaux de subsurface ont une signature isotopique très enrichie avec des valeurs de rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ supérieures à 0.7055 et témoignent de l'influence des apports anthropiques (amendements calciques et remblai calcaires, pesticides, etc.) sur les signatures isotopiques des eaux de rivière et des forages. La localisation des points prélevés en rivière au niveau des points de nappe confirme la prédominance des apports de nappe au débit dans le réseau principal (rivières Pérou et des Pères) en étiage. La contribution des eaux du sol et des nappes perchées développées dans les paléosols (eaux de subsurface) vers le réseau hydrographique principal reste localisée aux petits sous-bassins superficiels comme la ravine Féfé échantillonnée. Ce diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ va donc servir de base pour caractériser les différentes unités hydrogéologiques et les échanges nappe/ rivière sur le bassin Pérou-Pères.

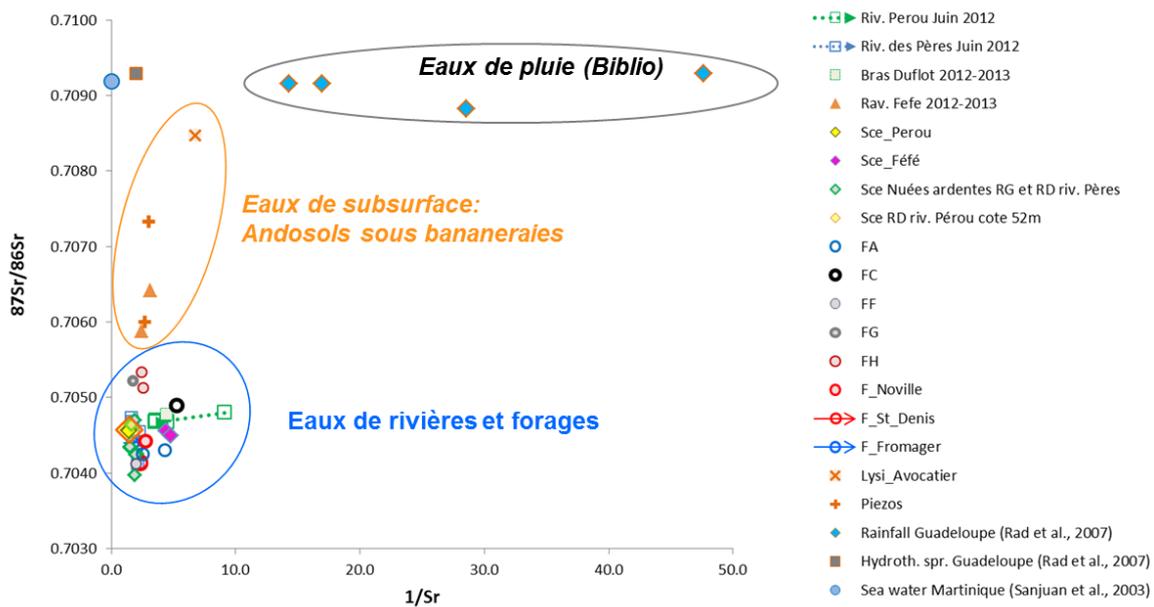


Illustration 52 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les eaux de Pérou-Pères ; identification des grands pôles hydrogéologiques

Concernant le Galion, le même type d'analyse peut être réalisé à partir de l'illustration 53 qui remplace dans un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Na/Sr l'ensemble des données hydrogéochimiques. L'eau de subsurface échantillonnée en forêt, dans la partie amont de la zone cultivée du bassin du Galion, présente des teneurs bien plus faibles en Sr (comme en ratio Na/Sr). Cela montre que sur cette partie non cultivée, les formations superficielles influencent peu la signature isotopique de l'eau de recharge, et que ce pôle est surtout influencé par un temps d'interaction eau/roche très court (empreinte de la pluie). Ceci contraste avec les eaux de subsurface échantillonnées en Guadeloupe sur andosols sous bananeraies qui montrent une signature isotopique plus enrichie (valeurs entre 0.706 et 0.708) et des teneurs fortes en Sr du fait des apports anthropiques (amendements calciques, pesticides, etc.). Un des piézomètres prélevé à l'usine sucrière du Galion est caractéristique d'eaux carbonatées-calciques ($\text{Ca} = 85$ et $\text{HCO}_3 = 404$ mg/l) qui permet d'identifier le pôle « eaux carbonatées » autour de 0.7085.

La localisation des points prélevés sur la rivière du Galion et la ravine de la Digue au niveau des points de nappe confirme la prédominance des apports souterrains au débit dans le réseau principal en étiage. Ce diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Na/Sr va donc servir de base pour caractériser les différentes unités hydrogéologiques et les échanges nappe/ri vière sur le bassin du Galion.

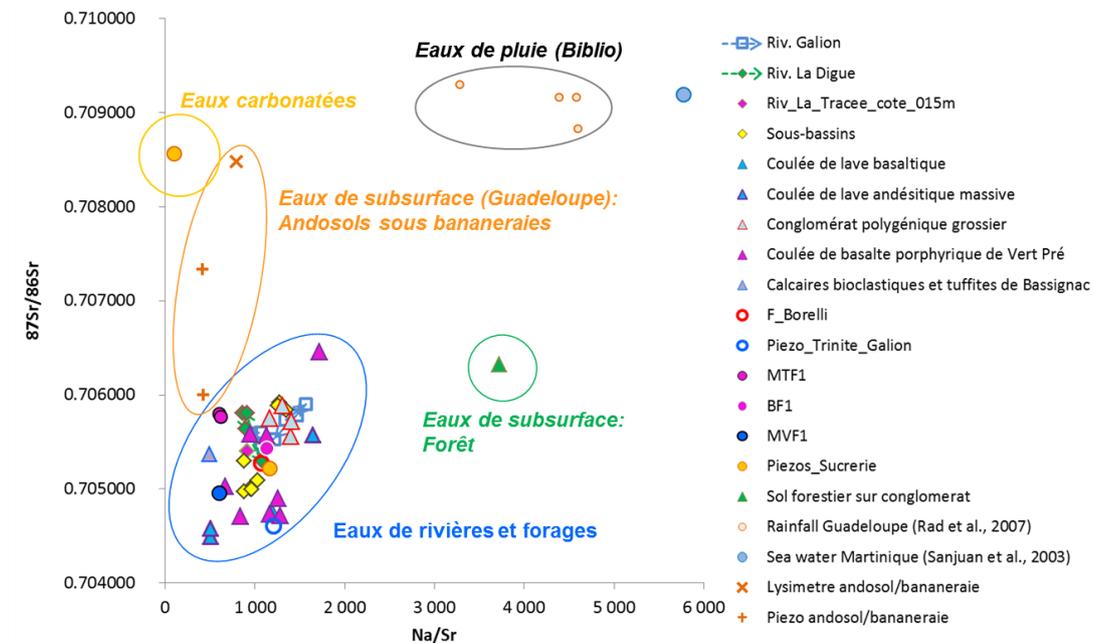


Illustration 53 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Na/Sr pour les eaux du Galion ; identification des grands pôles hydrogéologiques

5.3.3 Influences du type de réservoir : lithologie et sols

Pour identifier l'influence de la nature du réservoir sur la signature géochimique des eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères, les différents pôles lithologiques sont reportés sur le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ de l'illustration 54. La difficulté est d'identifier les sources et forages peu impactés par les cultures ou les formations superficielles, étant donné que seule la tête de bassin de la rivière Pérou montre une absence de contamination à la CLD :

- Le **pôle des formations d'altitude** qui constitue la tête de bassin, en amont de la zone cultivée, est défini par la rivière Pérou en amont de la prise d'eau et par le Bras Duflot à la limite du Parc Naturel et des bananeraies ;
- Le **pôle Lave** est constitué des deux forages F_Noville et F_St_Denis. La différence de signature isotopique entre les deux forages permet de différencier les laves de la rive gauche de Pérou à Noville, de celles en profondeur à St_Denis au niveau de l'interfluve ;
- Le **pôle Nuées Ardentes** est constitué de l'ensemble des sources au contact Nuées Ardentes / Coulées de débris et des forages FA, FF de Féfé. La large gamme de valeurs isotopiques peut s'expliquer par une différence de matériaux de la roche-mère comme par la forte influence des formations superficielles (andosols/bananeraies) sur leur impluvium.

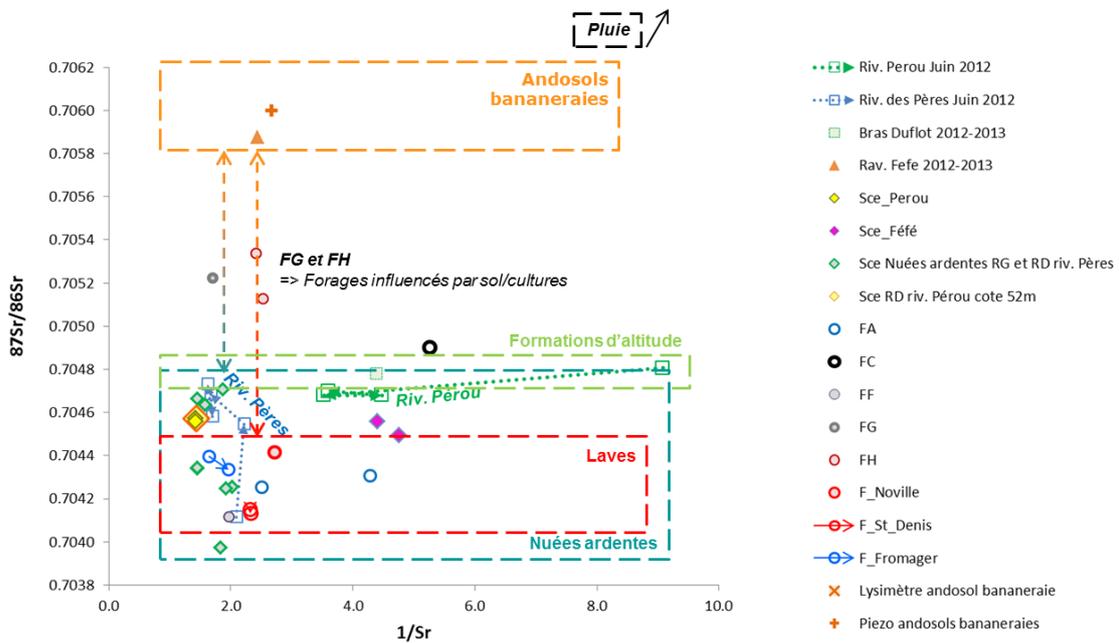


Illustration 54 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les eaux Pérou-Pères ; influences de la lithologie et des sols

En reportant également le **pôle Andosols/Bananeraies**, on peut nettement caractériser l'influence des formations superficielles cultivées sur la signature géochimique des forages FG et FH, ce qui est cohérent avec les analyses hydrochimiques réalisées sur le sous-bassin de Féfé (Charlier et al., 2011).

Concernant le Galion, la même interprétation est réalisée à partir de l'illustration 55 :

- Le **pôle Andésites** est constitué des sources qui drainent les coulées de lave andésitique comme la source Bobak, ainsi que les forages Trinité-Galion (qui captent ces formations sous couverture) et MVF1 (qui en draine la zone d'altération) ;
- Le **Pôle Basaltes de Vert Pré** est constitué de l'ensemble des sources localisées sur cette formation sur la partie intermédiaire et aval du bassin, ainsi que le forage BF1 ;
- Le **pôle Conglomérats** est constitué des sources localisées sur la partie amont du bassin.

Si le pôle conglomérat est bien identifié, il s'avère difficile de différencier les pôles des laves andésitiques et des laves basaltiques. La grande diversité de leurs signatures isotopiques est conforme à celles données par Davidson (1986) sur les roches de ces mêmes formations. Cela n'empêche pas également une forte influence des formations superficielles des zones cultivées qui enrichissent la signature isotopique du strontium. En conséquence, un pôle Lave de l'aval du bassin - regroupant les lithologies andésitiques et basaltiques - peut être caractérisé pour différencier les eaux de l'amont principalement au sein de formations conglomératiques et les eaux aval au sein de formations laviques.

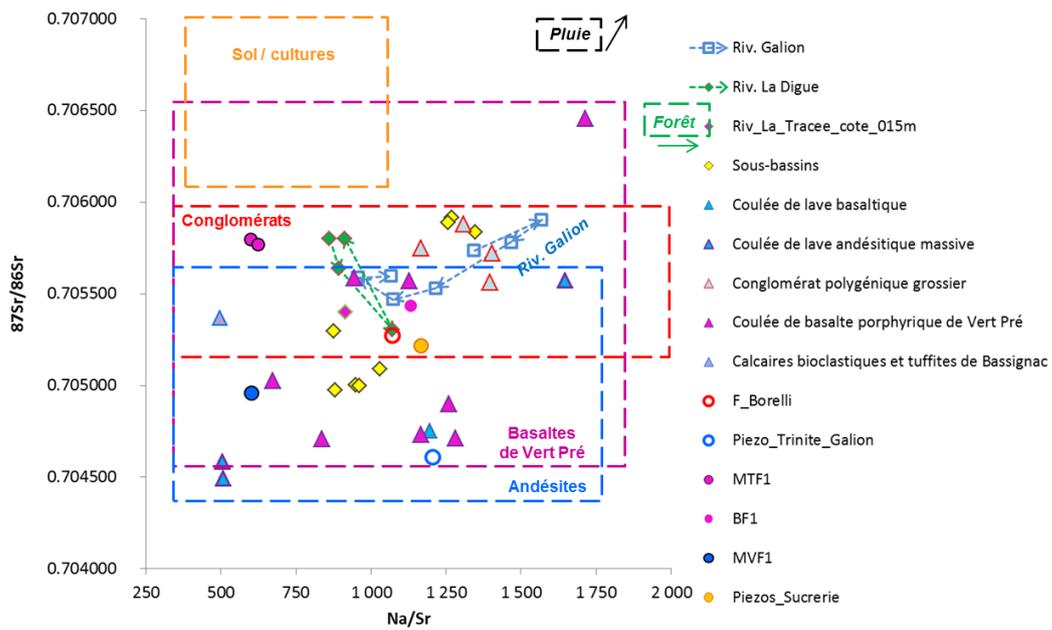


Illustration 55 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les eaux du Galion ; influences de la lithologie et des sols

5.3.4 Caractérisation des écoulements souterrains et des échanges nappe/rivière

a) Hydrosystème Pérou-Pères

À partir des différents pôles identifiés précédemment, il est possible de caractériser les échanges entre eux par les phénomènes de mélange. Ceci nous permet de caractériser certains écoulements, ainsi que les relations nappe/rivière.

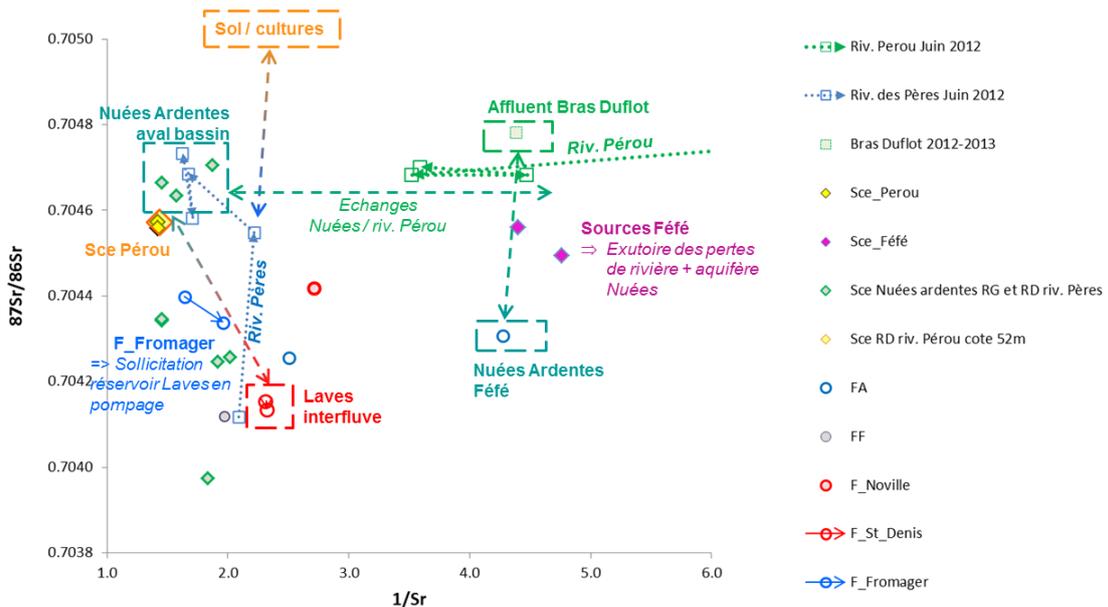


Illustration 56 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$; écoulements souterrains et échanges nappe-rivière le long des rivières Pérou et des Pères

Aquifère d'interfluve entre les rivières Pérou et des Pères :

- Les forages et sources situées entre les deux rivières permettent de caractériser la géochimie de l'aquifère d'interfluve caractérisé par une superposition des laves et des nuées ardentes (log du forage St Denis), ainsi que par des intercalations plus argileuses (log du forage Fromager). On observe un alignement du forage St Denis, du forage Fromager et de la source Pérou entre les deux pôles « Laves interfluve » et « Nuées aval » qui montre un phénomène de mélange amont-aval au sein de cet aquifère ;
- Le forage Fromager, foré dans le compartiment supérieur des nuées ardentes, est logiquement plus influencé par ce pôle. Cependant, l'évolution de la signature géochimique en cours de pompage vers le pôle « Lave » montre que ce forage mobilise des eaux du compartiment inférieur, moins radiogéniques et donc moins influencées par les apports anthropiques.
- La source Pérou a une signature très proche du pôle Nuées ardentes aval, ce qui montre que son réservoir principal est situé dans le compartiment supérieur.

Rivière Pérou :

- Les faibles teneurs en Sr de la tête de bassins de la rivière Pérou montrent un temps de résidence très court des eaux de ruissellement dans cette partie du bassin. Cela peut s'expliquer par une prédominance d'écoulement de surface et de subsurface sur les versants les plus arrosés et les plus pentus.
- Le strontium permet également de caractériser les échanges surface/souterrain sur le Bras Dufлот (affluent rive gauche de la rivière Pérou) au niveau du sous-bassin de Féfé, drainé en surface par la ravine Féfé et en profondeur par les sources Féfé localisées en terminaison de la coulée pyroclastique (Charlier et al., 2011). Les sources Féfé se situent au milieu de la droite de mélange entre les deux pôles « Nuées ardentes du forage FA » et du « Bras Dufлот en amont de la zone de pertes ». Cela valide le schéma de fonctionnement des sources et montre qu'elles drainent globalement pour 50% l'aquifère des nuées ardentes et pour 50% les pertes du Bras Dufлот situées 700 m plus en amont.
- Sur la partie intermédiaire du cours d'eau, en aval de l'affluent Bras Dufлот, la rivière est enrichie en Sr par le pôle Nuées. Cela s'observe localement au niveau de l'unique source en rive droite (cote 52 m) qui draine l'aquifère des nuées. Mais le fait que la rivière Pérou soit globalement moins enrichie en Sr que la rivière des Pères (qui n'a pas de tête de bassin en altitude) montre que la rivière Pérou garde cette empreinte d'altitude jusqu'à son exutoire, probablement du fait de la faiblesse des apports latéraux entre Concession et l'exutoire.

Rivière des Pères :

- Contrairement à la rivière Pérou, le profil en long de la rivière des Pères marque une augmentation du signal radiogénique en Sr de 0.7041 à 0.747, probablement à cause d'une augmentation de l'influence du pôle sol/cultures caractérisé par une signature isotopique élevée (> 0.7050).
- La zone d'émergence de la rivière des Pères a une signature très proche du pôle Laves du forage de St-Denis, mais la forte variabilité de la signature isotopique en fonction de la lithologie (Illustration 54) nous impose d'être prudents sur la nature du réservoir.
- La partie intermédiaire et aval du cours d'eau est très influencée par le Pôle « Nuées ardentes aval bassin » qui est un pôle lithologique fortement influencé par le pôle

sol/cultures. La bonne superposition du cours d'eau avec les différentes sources localisées dans le lit de la rivière au contact Nuées ardentes/coulées de débris, montre que ces sources, qui drainent l'aquifère des nuées, contrôlent l'essentiel de la signature géochimique des eaux de surface.

b) Bassin du Galion

L'interprétation des écoulements souterrains et des échanges nappe-rivière sur le Galion est réalisée à partir de l'illustration 57.

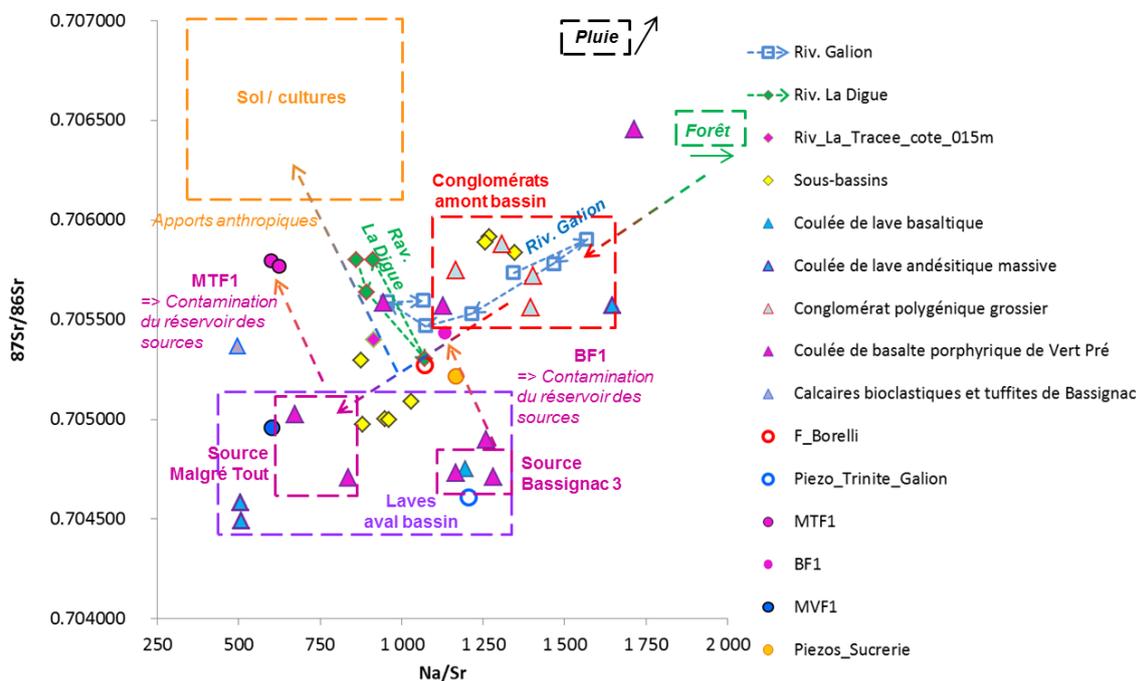


Illustration 57 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Na/Sr ; écoulements souterrains et échanges nappe-rivière le long de la rivière du Galion

Eaux souterraines :

- À l'aide des isotopes du Sr, il est possible de différencier les eaux du **forage BF1** de celles de la **source Bassignac 3** qui drainent la même coulée de lave. Si la chimie est très similaire (Illustration 51), son signal radiogénique très enrichi montre une plus forte contamination anthropique cohérente avec de plus fortes teneurs en CLD au forage (11.2 contre 5.4 $\mu\text{g}/\text{l}$).
- Concernant le système **Malgré Tout**, la signature isotopique du Sr confirme une stratification des eaux par une différenciation des deux aquifères inférieur (forage MTF1) et supérieur (source Malgré Tout). L'enrichissement du signal radiogénique de MTF1 indique une plus forte influence des cultures sur le compartiment inférieur. Ceci implique alors une contamination de ce réservoir inférieur non par le haut au niveau de l'impluvium localisé de la source Malgré Tout, mais par des apports latéraux

amonts au niveau d'un impluvium plus grand drainant des sols plus fortement contaminés.

Rivière du Galion :

- Le profil en long amont-aval de la rivière du Galion marque globalement une minéralisation de l'eau (associée à une diminution du rapport Na/Sr) et une diminution du signal radiogénique. L'alignement des eaux sur une droite passant par les 3 pôles Forêt->conglomérats amont bassin->Laves aval bassin, donne les différentes empreintes des pôles lithologiques sur la géochimie des eaux.
- Dans le détail, l'aval de la rivière du Galion reste fortement radiogénique comparé aux signatures des sources et forages circulant au sein d'aquifères laviques. Ce phénomène est à rattacher à deux causes : i) de faibles apports latéraux sur la partie intermédiaire et aval comparé aux apports amont (empreinte « amont » conservée jusqu'à l'exutoire), et ii) une influence du pôle sol/cultures qui devient très marquée sur la partie intermédiaire et aval du bassin.

Ravine de la Digue :

- Les eaux de la ravine de la Digue sont alignées entre le pôle Sol/cultures et le pôle Laves aval bassin. Ceci est cohérent avec ses caractéristiques environnementales : la Digue est située sur les laves de Vert Pré et les formations andésitiques et est caractérisée par une très forte pression anthropique (Plet, 2012). Sur sa partie amont, la signature fortement radiogénique est influencée par le pôle Laves moins enrichi. Le phénomène inverse se produit sur la partie aval.
- Cependant, la chimie entre les eaux de surface de la Digue et les eaux souterraines du forage MVF1 situé à quelques mètres ne montre pas de lien évident. Cela indique soit un masque de la signature souterraine de l'eau de surface par les activités anthropiques, soit de faibles apports d'eau souterraine à la rivière dans cette partie du sous-bassin.

5.4 ISOTOPES STABLES DE L'EAU

Les isotopes stables de l'eau ont été analysés lors de la campagne 2012 sur quelques points d'eaux de surface et souterraine des deux bassins de Pérou-Pères et du Galion. Concernant le Galion, les résultats ont montré que l'incertitude sur la mesure était trop élevée pour permettre une différenciation des origines des eaux. Aucune analyse de ce type n'a donc été réalisée en 2013 et 2014 sur ce bassin. Seuls les résultats des campagnes 2012, 2013 et 2014 sur Pérou-Pères sont donc présentés dans cette section.

5.4.1 Guide d'interprétation

Les isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) peuvent être utilisés pour identifier les origines du signal d'entrée qui alimente les aquifères, en particulier estimer les altitudes d'alimentation et déterminer les relations entre les circulations souterraines et les eaux de surface.

La référence caribéenne sur les variabilités temporelle et altitudinale de la signature des eaux de pluie est l'étude de Scholl et al. (2009) sur la côte Est de Porto-Rico. L'effet saisonnier se traduit par de plus faibles valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans les pluies (environ -3 ‰) en saison humide, de plus fortes valeurs (environ -1.5 ‰) en saison sèche, i.e. en carême, ainsi que par un fort

appauvrissement (environ -6.5 ‰) lors du passage de dépressions tropicales. Si l'on tient compte des flux précipités bien plus importants en saison humide et lors du passage de dépressions tropicales, le signal moyen annuel des eaux infiltrées est donc tiré vers de faibles valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (entre -3 et -6.5 ‰). Le gradient altitudinal moyen établi sur la côte Est de Porto Rico par Scholl et al. (2009) est de -0.12‰ pour $\delta^{18}\text{O}$, et de -0.6‰ pour $\delta^2\text{H}$.

Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux de Benauges (1981 ; cité par Brenot et al., 2008) qui décrit pour la Guadeloupe de fortes variations saisonnières des signatures isotopiques H et O des pluies, signatures plus appauvries en période d'hivernage (période pluvieuse de septembre à novembre) et plus enrichies en carême (janvier à mars). De plus, le gradient d'altitude établi pour $\delta^{18}\text{O}$ est très cohérent avec une valeur de -0.13‰ (Benauges, 1981 ; cité par Chery, 1994). Il semble donc possible d'interpréter les résultats des isotopes stables en termes d'altitude de recharge pour le bassin Pérou-Pères, qui possède un fort dénivelé de 0 à 1400 m NGG.

5.4.2 Effet saisonnier

Les trois campagnes de prélèvements ont été réalisées après un carême humide en 2012 et en période de carême sec en 2013 et 2014. La campagne de juin 2012 est donc un étiage de moyennes/hauts eaux, alors que celles d'avril 2013 et février-mars 2014 sont des périodes d'étiage de basses eaux. L'ensemble des analyses est reportée sur l'illustration 58. Globalement, à part la source Pérou qui montre un excès en deutérium plus faible, les eaux de la campagne de 2012 s'alignent sur la droite mondiale des pluies ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$).

Par contre, les eaux des campagnes de 2013 et 2014 sont plus appauvries et se situent entre la droite mondiale et la droite locale de Guadeloupe établie par Benauges (1981). Elles s'alignent sur une droite locale avec un excès en deutérium ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 13.5$). Globalement, ces résultats indiquent une origine météorique pour les eaux souterraines et de rivières, les eaux n'apparaissent pas affectées par les phénomènes d'évaporation, ni par les échanges géothermiques. Seule la source Pérou présente un écart significatif aux droites météoriques locales sur les deux périodes de basses et hauts eaux, par le biais d'un fort enrichissement en $\delta^{18}\text{O}$. Pour ce site, l'écart à la droite des pluies pourrait témoigner de l'existence d'un mélange avec des eaux qui ont subi une évaporation. Une contribution d'eau d'origine profonde ayant subi des interactions avec l'oxygène des silicates (enrichissement en ^{18}O) pourrait également expliquer cet écart à la droite des pluies. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de conclure sur l'origine de la signature isotopique de la source Pérou.

La disparité des deux campagnes 2012 et 2013-2014 montre un effet saisonnier des périodes de recharge. Les eaux prélevées en basses eaux lors des campagnes 2013-2014 sont issues de recharge de saisons humides (proche du signal moyen annuel), alors que les eaux prélevées en 2012 après un carême humide apparaissent fortement influencées par les pluies de saison sèche des mois précédents. En conclusion, il convient donc d'analyser plus spécifiquement les campagnes 2013-2014 pour étudier les processus de recharge. En effet, c'est durant cette période que le signal de recharge est le plus proche d'un signal moyen annuel.

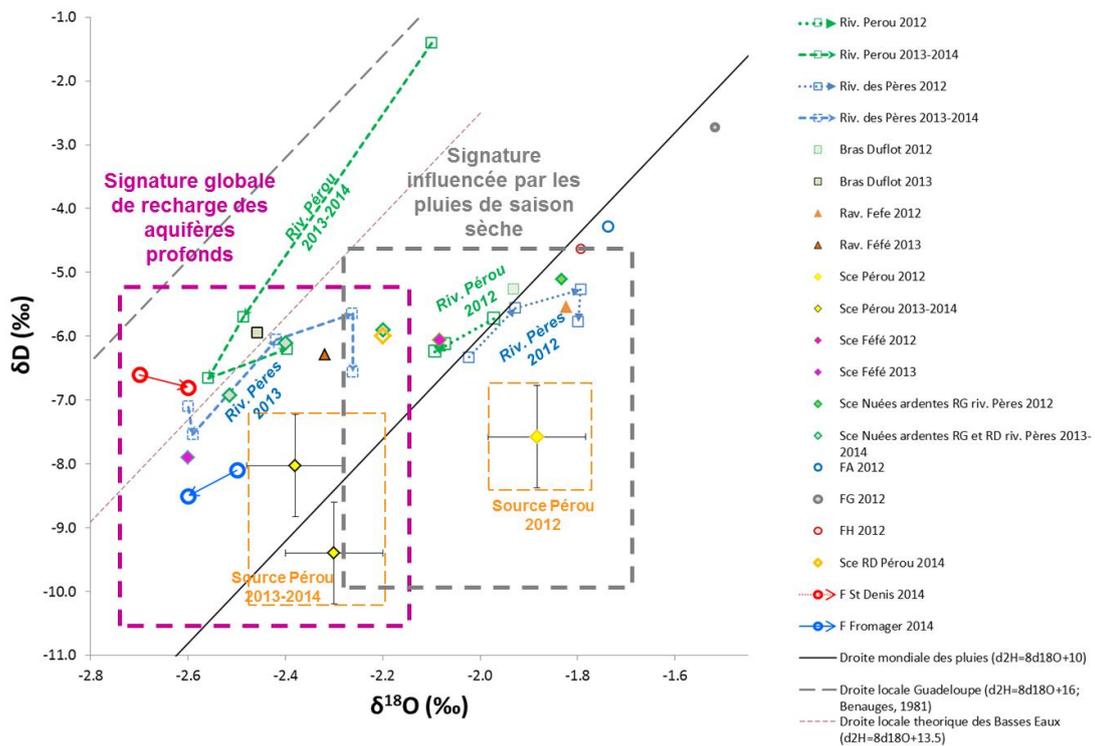


Illustration 58 : Diagramme δ^2H vs. $\delta^{18}O$; variations saisonnières de la signature isotopique entre les basses eaux de 2013-2014 et les hautes eaux de 2012 de l'hydrosystème Pérou-Pères

5.4.3 Altitude de recharge

La variabilité de la signature isotopique des stables de l'eau peut également trouver son origine dans la variabilité des altitudes moyennes de recharge. Le gradient de variation des compositions isotopiques ^{18}O des eaux de pluie en fonction de l'altitude a été établi à Porto-Rico (Scholl et al., 2009) et en Guadeloupe Benauges (1981) autour de -0.12 et -0.13‰. Le gradient d'altitude en saison sèche pour le bassin Pérou-Pères a été établi par essai-erreur en calant un gradient altitudinal de -0.13‰ pour que les différentes altitudes moyennes de recharge soient supérieures ou égales à celles des points de prélèvement. Le principal point de contrôle s'est avéré être le sous-bassin de Fefé qui draine principalement des formations superficielles, dont l'impluvium est compris entre 320 et 400 m NGG (Charlier et al., 2008). Cela a permis d'encadrer de manière relativement fiable l'ordonnée à l'origine de la relation suivante :

Gradient altitudinal Pérou-Pères théorique $\delta^{18}O = -0.0013 * Z \text{ (m NGG)} - 1.86$

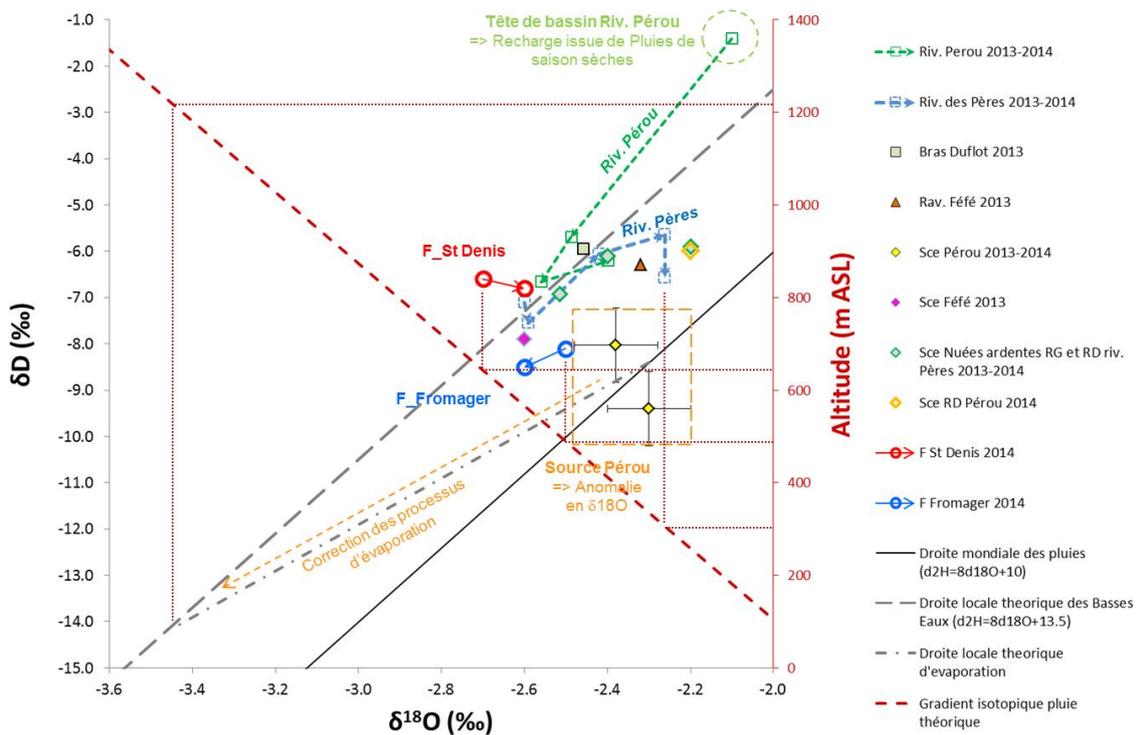


Illustration 59 : Diagramme δ^2H vs. $\delta^{18}O$; altitudes moyennes de recharge des eaux de la campagne 2013-2014

L'estimation des altitudes moyennes de recharge est rendue délicate du fait de l'incertitude de la mesure (incertitude reportée sur la source Pérou uniquement sur l'illustration 59). De fait, l'erreur sur l'altitude moyenne calculée peut être comprise entre 100 et 250 m environ avec l'augmentation de l'altitude.

Aquifère d'interfluve :

- **Le forage Saint Denis** a une altitude moyenne de recharge estimée à 600 m NGG environ (incertitude de +/- 150m). Au cours du pompage de 24 h, la signature des eaux semble avoir très légèrement évolué vers des valeurs plus enrichies en isotopes lourds, ce qui pourrait s'expliquer par la mobilisation d'une eau issue d'un autre réservoir, du type des eaux superficielles des nuées ardentes. Toutefois compte tenu des incertitudes, les résultats apparaissent comparables ce qui ne permet pas de conclure de manière certaine ;
- **Le forage Fromager** a une altitude moyenne de recharge estimée à 500 m NGG (incertitude de +/- 150m). Au cours du pompage de 24 h, une évolution contraire à celle observée au forage Saint-Denis semble se dessiner. La signature des eaux pompées semble avoir très légèrement évolué vers des valeurs plus appauvries en isotopes lourds, ce qui pourrait s'expliquer par la mobilisation d'une eau issue d'un autre réservoir, appauvrie en isotopes, donc infiltrée à une altitude de recharge plus élevée. Compte tenu des incertitudes, on ne peut conclure de manière certaine, mais cette évolution est cohérente avec celle observée avec l'isotope du Sr, qui montre une sollicitation du réservoir proche des laves ;
- **La source Pérou** possède des eaux fortement enrichies en ^{18}O comparé aux droites météoriques mondiales ou locales. Trois hypothèses permettent d'expliquer cette anomalie. La première hypothèse est celle d'un échange géothermique qui induit un

enrichissement en 18O sans modifier la teneur en 2H. L'origine de l'eau météorique serait donc beaucoup plus appauvrie en 18O, vers des valeurs proches de -2.75‰ pour un alignement sur la droite locale. La conséquence est alors une origine de la recharge à une altitude comprise entre 600 et 800 m NGG. La seconde hypothèse est un phénomène d'évaporation local sur les crêtes du volcan, qui induirait un enrichissement en 18O et 2H selon une droite d'évaporation dont la pente est proche de 5. Ce type de phénomène a déjà été observé en contexte insulaire tropical dans les cirques de la Réunion (Grunberger, 1989). La correction apportée sur la signature de la recharge donne des valeurs de 18O proches de -3.45‰, ce qui induit une altitude de recharge proche de 1200 m NGG (+/- 300 m - la crête du volcan culmine autour de 1300 et 1400 m NGG sur la limite ouest du bassin). La troisième hypothèse est une recharge locale avec des eaux qui ont subi de l'évaporation comme des eaux de *return flow* issues de l'irrigation d'une eau captée en altitude (Prise d'eau de la rivière Pérou à Concession). La première hypothèse n'est pas confirmée par l'analyse des autres éléments chimiques (silice notamment) car aucune anomalie liée à des échanges géothermiques n'est détectée. La troisième hypothèse nécessiterait des investigations sur les pratiques des exploitations de l'aval du bassin. Cependant, elle ne peut être valide qu'à petite échelle, étant donné que l'irrigation sur la côte au vent de la Basse Terre ne concerne que certaines parcelles proches du littoral. La seconde hypothèse qui indique une alimentation depuis les plus hautes altitudes est donc à privilégier à ce stade des connaissances. Dans tous les cas, il apparaît que la source Pérou est le lieu de convergence de plusieurs types d'eau, dont la recharge est en partie locale et, pourquoi pas, en partie profonde ;

- Les **sources des Nuées Ardentes** échantillonnées dans le lit des rivières de Pères et Pérou, au contact nuées sur coulées de débris, montrent que leur altitude moyenne de recharge est d'environ 200 m plus haut en altitude que leur exutoire. Par exemple, la source aval située à la cote 52 m dans le lit de la rivière Pérou a une altitude moyenne de recharge de 250 m environ (+/- 100 m).

Rivière Pérou :

- La tête de bassin de la rivière Pérou a une signature très enrichie en isotopes (-2.1‰). Comme ses eaux proviennent forcément d'un impluvium d'altitude supérieure à 300 m NGG (altitude de prélèvement), cela suggère que ses eaux de rivière sont issues de pluies de saison sèches – dont la signature isotopique est plus riche. Au niveau des processus, cela implique que l'aquifère drainé par la tête de bassin de la rivière Pérou est un aquifère sans stockage, qui tamponne la signature de la recharge à l'échelle de l'année. Une prédominance d'écoulements de subsurface est donc à envisager sur la zone d'altitude ;
- La partie intermédiaire et aval du bassin de la rivière ne présente pas d'évolution notable de sa composition isotopique, qui donne une altitude moyenne de recharge proche de 500 m NGG, y compris à l'exutoire. Cette altitude est celle du Bras Duflot, principal affluent de la rivière Pérou. Aucun apport souterrain conséquent ne semble donc contribuer à l'alimentation de la rivière en aval de sa confluence avec le Bras Duflot, sur l'ensemble de la zone cultivée.

Rivière des Pères :

- L'altitude moyenne de recharge de la zone d'émergence de la rivière des Pères se situe autour de 550 m NGG, ce qui correspond à la zone d'interfluve entre la rivière Pérou et la rivière Dauriac (affluent rive gauche de la rivière du Grand Carbet) ;

- Le profil amont-aval de la rivière des Pères montre un enrichissement isotopique qui marque des apports latéraux progressifs. La bonne superposition des sources latérales échantillonnées dans le lit de la rivière, au contact nuées sur coulées de débris, montrent que ces apports proviennent de l'aquifère des nuées ardentes, dont l'altitude moyenne de recharge reste supérieure à 250-300 m NGG, vers la limite entre le Parc Naturel et la zone cultivée, même pour les sources aval situées à 75 m NGG.

5.5 DATATION DES EAUX SOUTERRAINES (CFC-SF₆)

5.5.1 Estimation des âges apparents des eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères

Au préalable à l'interprétation, il est nécessaire de convertir les données brutes (exprimées en pmol/l) en pptv (partie par trillion volumique), dans le but d'estimer la concentration en gaz dans l'air au moment de la recharge de l'aquifère. Le calcul est réalisé à l'aide des coefficients de solubilités donnés par le guide de l'IAEA (2006). Pour conduire ce calcul, il faut également connaître les paramètres susceptibles d'influencer la diffusion des gaz dans l'eau au moment de la recharge : altitude et la température moyenne de la recharge.

En pratique, pour interpréter les résultats, les données de chacun des traceurs sont comparées deux par deux (SF₆ vs CFC-11 par exemple) sur des graphes représentant les courbes d'évolutions théoriques calculées par modèle de transfert « piston », le modèle exponentiel et le modèle de mélange entre les eaux d'infiltrations actuelles et les eaux anciennes (infiltrées avant 1940). La confrontation des résultats obtenus par les différents gaz permet en outre d'apprécier le phénomène de contamination et/ou dégradation des CFC. Ce type de représentation permet également de tester l'effet de l'existence d'un excès d'air, notamment pour le SF₆ qui est sensible à l'excès d'air en raison de sa faible solubilité.

Comme indiqué précédemment, pour dater les eaux, il faut poser quelques hypothèses de travail. La première concerne la température moyenne de recharge qui peut varier d'un ou deux degré Celsius par rapport à la température moyenne annuelle de l'air dans la zone de recharge de l'aquifère. On suppose donc ici que la recharge se produit sur de courtes périodes (<< année) ou lors d'épisodes ponctuels de recharge. La sensibilité du paramètre « température » à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ conduit à des modifications de l'âge apparent de l'ordre de 2-3 ans. Par ailleurs, du fait de l'absence de quantification de l'excès d'air à l'aide du rapport Ne/Ar, des tests de sensibilité ont été effectués en considérant des valeurs d'excès d'air compris entre 0 et 10 cm³/L (valeurs possibles d'après les informations de la littérature). Dans cette étude, ce paramètre a été ajusté afin d'obtenir la meilleure adéquation possible des âges apparents estimés avec chacun des traceurs.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'âge apparent des eaux sont rassemblés dans le tableau suivant (Illustration 60). Les représentations graphiques des résultats des eaux prélevées en 2013 et 2014 sont présentées sur deux planches graphiques distinctes (Illustration 61).

Les eaux de la **source Pérou** (P519, Illustration 61) présentent des teneurs en CFC-11 et CFC-12 bien supérieures aux valeurs maximales mesurées dans l'atmosphère, ce qui témoigne d'une pollution des eaux vis-à-vis de ces CFC. Les gaz SF₆ et CFC13 semblent indiquer que les eaux sont récentes (infiltrées en 2012), la position du point laisse toutefois suggérer l'existence d'un mélange avec des eaux anciennes (dépourvues de CFC-113 et de SF₆), la part du pôle ancien étant faible (de l'ordre de 10%). Ces estimations de l'âge apparent de la source Pérou sont données à titre indicatif, les résultats n'étant pas bien contraints compte tenu de l'incertitude qui pèse sur la valeur de l'excès d'air (affecte la concentration du SF₆). Un excès d'air de 3 cm³/L

amène à interpréter les résultats de la manière suivante : mélange avec des eaux anciennes (dépourvu de CFC-113 et de SF₆) et un pôle d'eau récente infiltrée en 2005, la part du pôle ancien étant faible (de l'ordre de 18%). **Dans ce contexte incertain, il apparaît impossible de conclure pour la source Pérou.**

Id	nom	date	alt de recharge (m)	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
P183	Sce_RD_Riv_Peris	23/04/2013	150	24	0	7.4	521.0	232.5	70.8
P265	FA	23/04/2013	600	21	0	7.7	536.3	221.6	72.7
P313	Sce_Fefe	23/04/2013	600	20	0	7.4	542.1	235.9	74.4
P429	FF	22/04/2013	600	23	0.5	7.2	156.2	8.1	3.5
P436	FH	22/04/2013	150	23	1	6.5	531.5	223.9	76.7
P519	Sce_Perou	23/04/2013	600	23.5	0.5	7.4	1286.8	4502.1	69.1
P92	F_Noville	24/04/2013	1000	18	5	3.4	443.3	210.8	65.3
P583	Source RGauche Riv des Péres cote 156	19/02/2014	150	24	0.5	7.2	517.0	232.0	77.0
P264	Forage Fromager 1h après debut pompage	27/03/2014	600	22.5	0.8	3.0	225.9	114.8	36.0
P439	Forage Fromager 24h après debut pompage	28/03/2014	600	22.5	3	1.7	153.6	76.5	19.2
P829	Source RDroite Riv Pérou Fromager cote 52	04/04/2014	150	24	0.5	7.3	491.3	226.6	74.9
P373	Forage St Denis 1h après debut pompage	21/05/2014	600	20	0	2.9	244.5	132.3	30.0
P795	Forage St Denis 24h après debut pompage	22/05/2014	600	22.5	0	4.1	316.1	169.5	41.2

Illustration 60. Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014. Les paramètres physicochimiques in situ sont également reportés. Note : les valeurs en rouge témoignent d'une pollution des eaux prélevées par les CFC11 et 12

Les eaux du **forage Noville** (P92, Illustration 61) apparaissent bien expliquées par le modèle exponentiel, les différents SFC et le SF₆ donnant des résultats comparables. Le temps de résidence moyen est estimé à 15 ans ± 2 ans. La température de recharge des eaux prélevées au sein des basaltes recoupés par le forage est estimée à 18°C, ce qui indique une aire de recharge située en altitude (1000 m ?).

Les eaux du **piézomètre FF** (P429, Illustration 61) présentent des teneurs très faibles en CFC-11, CFC-12 et CFC-13 et des teneurs élevées en SF₆, ce dernier point témoignant d'une infiltration récente (2010 ou 2011). Le diagramme CFC11 vs CFC12 permet d'illustrer l'existence du phénomène de dégradation des CFC en condition anoxique pour ce point.

Les eaux du **piézomètre FH** (P436, Illustration 61) apparaissent également affectées par le phénomène de dégradation des CFC, l'effet apparaît néanmoins de faible importance puisque seul le CFC11 apparait impacté. Les eaux sont récentes, l'âge apparent indique que la recharge s'est produite en 2006 ou 2007. L'eau est trop récente pour que l'on puisse distinguer le type de transfert hydrodynamique (modèle piston ou modèle exponentiel).

Les eaux de la **source FéFé** (P313, Illustration 61), **de la source Rive Droite rivière des Pères** (P183) **et le Piézomètre FA** (P265) sont récentes, infiltrées en 2012 ou 2013.

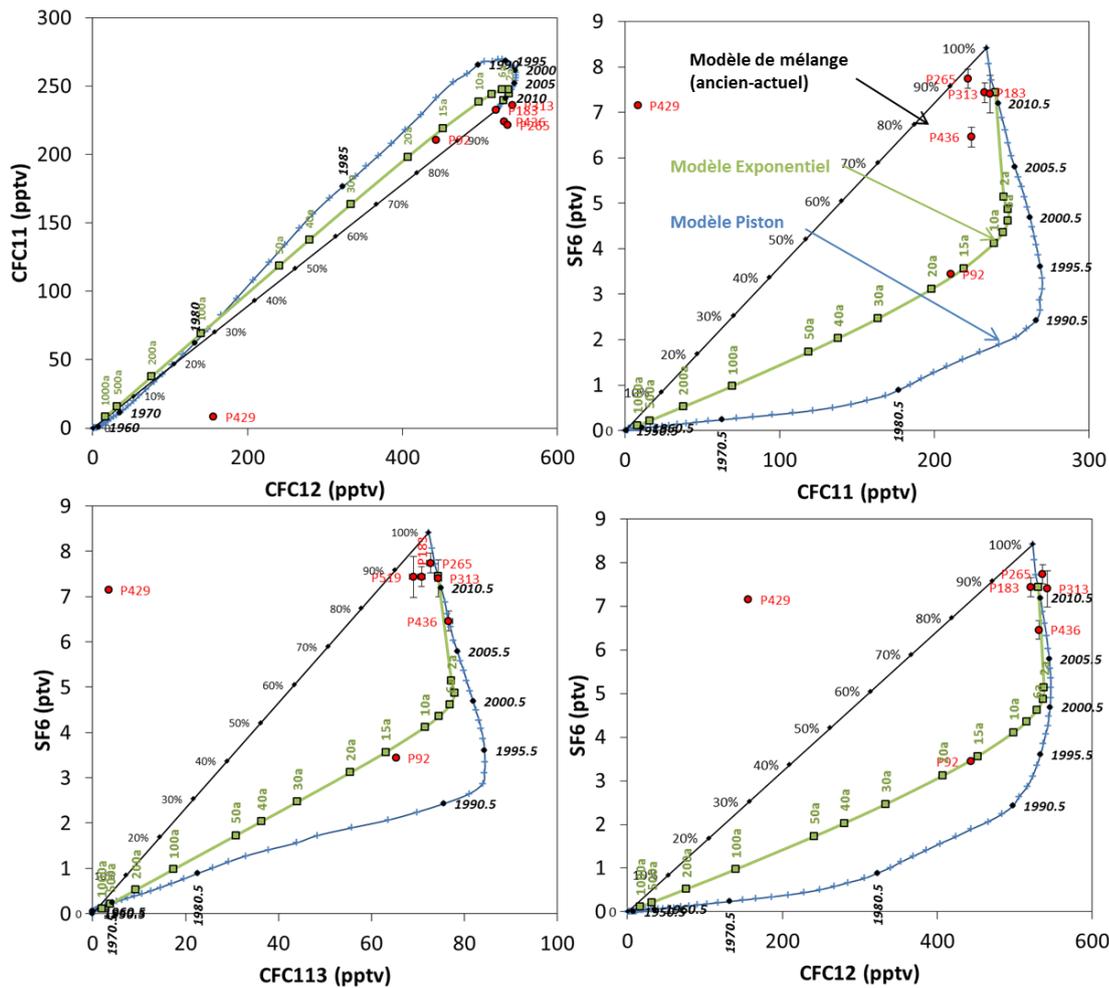


Illustration 61. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2013 sur l'hydrosystème Pérou-Pères (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

Les eaux prélevées dans la **source en rive gauche de la rivière des Pères** (P583, Illustration 62) et dans la source située en **rive droite de la rivière Pérou** (P829, Illustration 62) présentent des teneurs en gaz CFC et SF₆ comparables aux valeurs récentes mesurées dans l'atmosphère. Les résultats suggèrent une infiltration autour de 2011 (l'incertitude étant évaluée à 1 ou 2 ans).

Pour les eaux du **forage Fromager** prélevées au cours de l'essai de pompage en début (à T0+1h, p264, Illustration 62) et fin de pompage (à T0+24h, p439, Illustration 62), on montre que les teneurs en gaz dissous sont faibles ce qui indique la présence d'eau ancienne. Une constatation comparable est faite pour les eaux du forage St-Denis prélevées en début (à T0+1h, p373, Illustration 62) et fin de pompage (à T0+24h, p795, Illustration 62). Pour le forage Fromager, on observe une diminution des teneurs en gaz dissous au cours du pompage ce qui indique que le pompage a sollicité des eaux plus anciennes au cours de l'essai de 24 h. Pour le **forage St-Denis**, c'est le phénomène inverse qui est observé, les teneurs en gaz dissous augmentent au cours du pompage ce qui dénote la participation d'eau plus récente. Les diagrammes de l'illustration 62 indiquent que les résultats des eaux pompées par les forages ne peuvent pas être expliqués à l'aide d'un modèle exponentiel ou d'un modèle piston. À l'inverse, **les résultats des eaux des forages Fromager et Saint Denis** apparaissent bien expliqués par

le modèle de mélange à deux composantes, le pole récent étant compris entre 2008 et 2012 et le pole ancien autour de 1965.

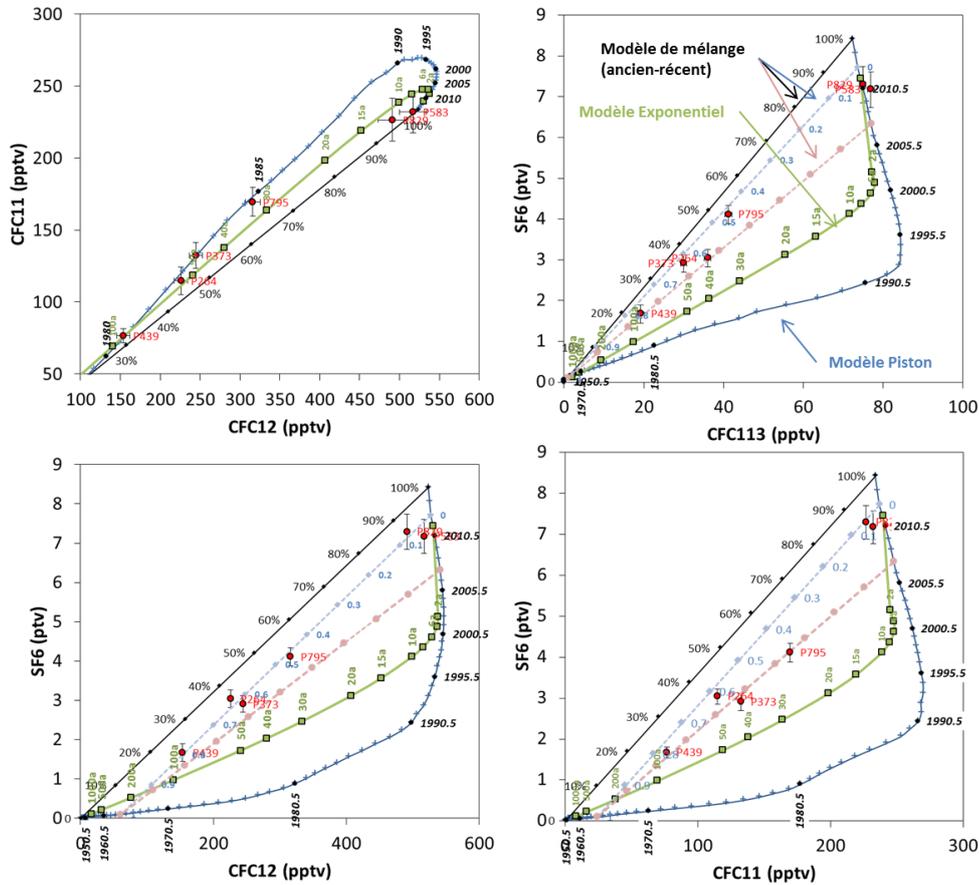


Illustration 62. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

Pour le **forage Fromager**, les eaux pompées en début de pompage (T0+1h, p264) apparaissent constituées d'environ 65% d'eau ancienne (infiltrée en 1965), en fin de pompage (T0+24h, p439) la part de l'eau ancienne a augmenté pour atteindre 80% environ.

Pour le **forage Saint Denis**, les eaux pompées en début de pompage (T0+1h, p373) apparaissent également constituées d'environ 65% d'eau ancienne (infiltrée en 1965). En fin de pompage (T0+24h, p795) la part de l'eau ancienne a diminuée pour atteindre 45%.

5.5.2 Estimation des âges apparents du bassin du Galion

L'approche méthodologique adoptée pour interpréter les résultats est similaire à celle mise en œuvre précédemment pour l'hydrosystème Pérou-Pères. Les paramètres utilisés pour le calcul de l'âge apparent des eaux sont rassemblés dans le tableau suivant (Illustration 63). Les représentations graphiques des résultats des eaux prélevées en 2013 et 2014 sont présentées sur deux planches graphiques distinctes (Illustration 64 et Illustration 65).

Id	nom	date	alt de recharge (m)	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
P273	Piézo Trinité-Galion	15/04/13	150	25.5	1	2.7	361.7	143.8	42.7
P403	Source Malgré Tout	16/04/13	140	25	4.5	3.6	436.8	217.7	69.2
P402	Piézo 5 - Sucrierie	17/04/13	10	25	0	5.8	46.5	7.0	7.0
P649	Piézo 3 - Sucrierie	17/04/13	10	25	0	5.4	79.4	8.1	7.1
P482	Source Bobak	17/04/13	500	19.5	2	4.4	545.1	236.5	56.4
P263	Source Bassignac	18/04/13	150	25	5	3.9	483.4	225.7	67.7
P839	Source Bassignac 2	18/04/13	170	25	0.5	7.7	525.3	339.2	77.1
P247	Source Bassignac 3	18/04/13	170	24.5	0.5	7.7	520.2	241.0	76.0
B195	Source Saint-Laurent	18/04/13	250	21	0.5	7.0	528.6	5498.1	65.4
B182	Forage La Borelli	19/04/13	470	23	0	0.5	59.8	26.0	7.2
D803	Source Capitaine	19/04/13	450	23.5	3	4.7	547.3	264.2	74.0
D801	Source Isaïe	19/04/13	580	19.5	0.5	6.7	531.8	229.1	77.3
P413	Source Lagrosillière	19/04/13	480	19	1.5	6.0	543.8	3022.5	65.2

Id	nom	date	alt de recharge (m)	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
	MTF1-A (t=1h)	27/03/14	140	21	1	6.4	547.3	253.4	63.1
	MTF1-B (t=5h)	27/03/14	140	21	1	6.0	516.9	253.4	63.1
	BF1-A (t=1h)	01/04/14	180	26	7	3.0	370.0	153.6	53.3
	Sce Bassignac 3	01/04/14	170	24	1	2.9	377.2	174.1	53.3
	MVF1-B (t=5h)	08/04/14	100	24.5	1.5	6.8	515.6	234.5	73.8

Illustration 63. Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau prélevée en 2013 et 2014

Les eaux du **piézomètre Trinité-Galion** (P273, Illustration 64) présentent de faibles teneurs en CFC et SF₆, on observe un léger appauvrissement en CFC11 qui pourrait être lié à une dégradation bactérienne en milieu anoxique (les eaux présentent de faibles teneurs en O₂ dissous = 2.4 mg/l, Annexe 4). Dans les diagrammes binaires, les eaux se positionnent sur la courbe théorique du modèle exponentiel, le temps de résidence moyen est estimé à 25 ans, l'incertitude étant de l'ordre de 5 ans en moyenne en considérant les résultats du SF₆, CFC12 et CFC113.

Les eaux de la **source Malgré Tout** (P403, Illustration 64) présentent également de faibles teneurs en CFC et SF₆. Dans les diagrammes binaires, les eaux se positionnent sur la courbe théorique du modèle exponentiel, le temps de résidence moyen est estimé à 15 ans, l'incertitude étant de l'ordre de 3-4 ans en moyenne en considérant les différents résultats du SF₆, CFC12, CFC 11 et CFC113.

Les eaux des **piézomètres 3** (P649) et **5** (P402) **de la sucrierie**, situés à proximité des hangars de la sucrierie, présentent de très faibles teneurs en CFC mais des teneurs importantes en SF₆. Ceci apparaît contradictoire, sauf si l'on considère l'existence d'un processus de dégradation bactérienne en milieu anoxique qui affecterait seulement les concentrations en CFC dissous dans l'eau. Les très faibles valeurs en oxygène dissous (<0.6 mg/l) permettent de renforcer cette hypothèse. Dans ce contexte, la datation des eaux de ces ouvrages ne peut pas être abordée de manière précise. En absence d'excès d'air, les teneurs en SF₆ suggèrent une infiltration entre 2004 et 2005. Ces estimations de l'âge apparent de l'eau des piézomètres 3 et 5 sont données à

titre indicatif, les résultats n'étant pas bien contraints compte tenu de l'incertitude qui peut peser sur la valeur de l'excès d'air.

Les résultats des eaux de la **source Bobak** (P482, Illustration 64) sont difficiles à interpréter. Dans le diagramme binaire SF₆ vs CFC12, les eaux se positionnent sur la courbe du modèle piston. Toutefois, pour obtenir ce résultat, il faut considérer une température de recharge de 20°C, ce qui suggérerait que l'impluvium de recharge est situé autour de 500 m d'altitude. Les eaux semblent présenter un appauvrissement en CFC11 et CFC113 par rapport au CFC12, le point P482 n'apparaissant plus situé sur la courbe théorique du modèle piston dans les diagrammes SF₆ vs CFC11 et SF₆ vs CFC113. Sur la base des résultats du SF₆ et de CFC12, les eaux de recharge se seraient infiltrées entre 1998 et 2000.

Les eaux de la **source Bassignac** (P263, Illustration 64) présentent de faibles teneurs en CFC et SF₆. Dans les diagrammes binaires, les eaux se positionnent sur la courbe théorique du modèle exponentiel, le temps de résidence moyen est estimé à 12 ans, l'incertitude étant de l'ordre de 3 ans en moyenne, en considérant les différents résultats du SF₆, CFC12, CFC11 et CFC113.

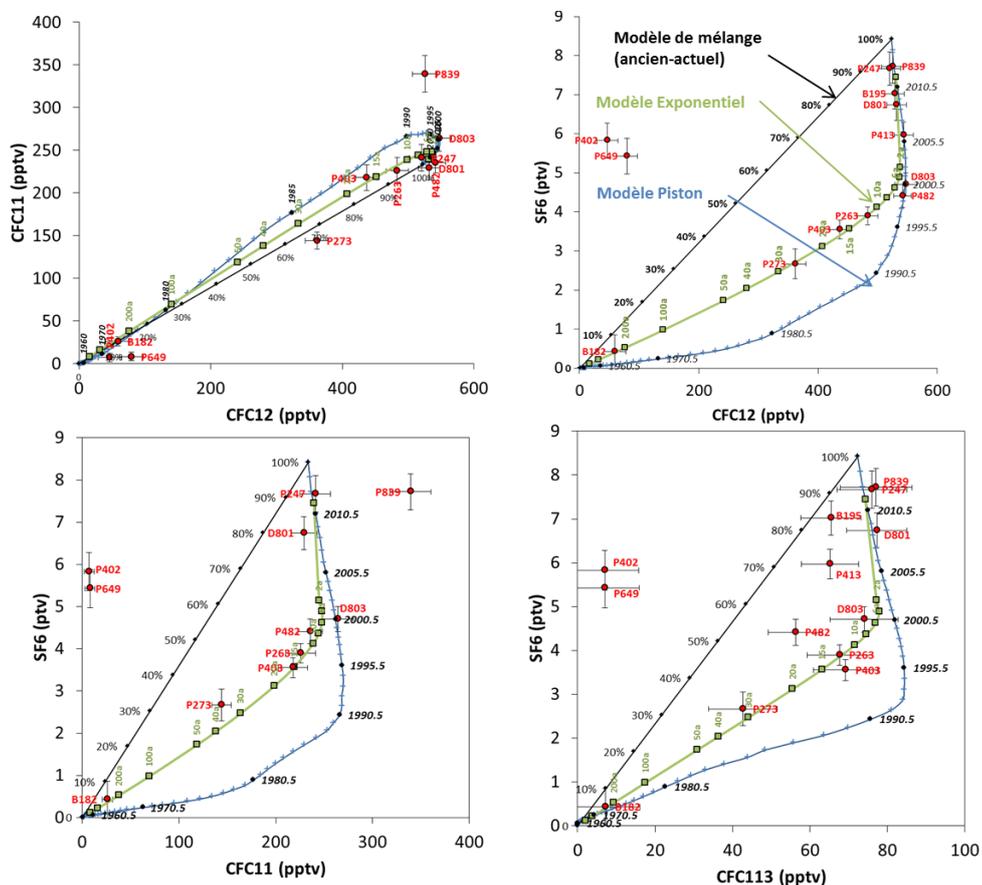


Illustration 64. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2013 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

Les eaux de la **source Bassignac 2** (P839, Illustration 64) présentent des teneurs en CFC-11 bien supérieures aux valeurs maximales mesurées dans l'atmosphère, ce qui témoigne d'une pollution des eaux vis-à-vis de ce CFC. Les gaz SF₆, CFC12 et CFC13 semblent indiquer que les

eaux sont récentes (infiltrée en 2012). Le caractère non pérenne de cette source confirme cette hypothèse.

Les eaux de la **source Bassignac 3** (P247, Illustration 64) lors de la campagne de 2013 présentent des teneurs en gaz CFC et SF₆ comparables aux valeurs récentes mesurées dans l'atmosphère. Les résultats suggèrent une infiltration autour de 2012 (l'incertitude étant évaluée à 1 an).

Les eaux de la **source Saint-Laurent** (P195, Illustration 64) présentent des teneurs en CFC11 très supérieures aux valeurs maximales mesurées dans l'atmosphère, ce qui témoigne d'une pollution des eaux vis-à-vis de ce CFC. Les eaux semblent présenter un appauvrissement en CFC113 par rapport au CFC12. Les gaz SF₆ et CFC12 suggèrent une infiltration autour de 2010 (l'incertitude étant évaluée à 1 an).

Les eaux du **forage Borelli** (P182, Illustration 64) présentent de très faibles teneurs en CFC et SF₆. Dans les diagrammes binaires, les eaux semblent se positionner sur la courbe théorique du modèle exponentiel, le temps de résidence moyen est très important (>200 ans), avec une incertitude importante également, de l'ordre de 50 ans en moyenne en considérant les différents résultats du SF₆, CFC12, CFC 11 et CFC113. Les résultats peuvent également s'interpréter à l'aide du modèle de mélange, en considérant un pôle ancien (anté-1930) et un pôle récent (eau infiltrée en 2000 ± 5 ans), la contribution de la part récente étant estimée à 10 % environ. Les points se positionnent également à proximité de la courbe théorique du modèle piston, ce qui suggérerait une infiltration autour des années 1960. Dans ce contexte, compte tenu des très faibles valeurs mesurées, nous sommes dans l'impossibilité de conclure sur la nature du modèle de transfert et sur l'âge apparent des eaux du forage Borelli, même si l'hypothèse d'une eau ancienne (ante 1970) apparaît la plus probable.

Les eaux de la **source Capitaine** (P803, Illustration 64) présentent des teneurs en CFC et SF₆ comparables aux valeurs mesurées dans l'atmosphère au début des années 2000. Dans les diagrammes binaires, les eaux se positionnent sur la courbe théorique du modèle piston (SF₆ vs CFC12 ; SF₆ vs CFC11). Les teneurs en CFC113 apparaissent très légèrement appauvries par rapport aux concentrations en CFC12 et CFC11. Sur la base des résultats du SF₆, du CFC12 et du CFC11, les eaux de recharge se seraient infiltrées autour de 2000 (l'incertitude étant évaluée à 1 an).

Les eaux de la **source Isaïe** (P801, Illustration 64) présentent des teneurs en gaz CFC et SF₆ comparables aux valeurs récentes mesurées dans l'atmosphère. Les résultats suggèrent une infiltration autour de 2009 (l'incertitude étant évaluée à 2 ans).

Les eaux de la Lagrosillière (P413, Illustration 64) présentent des teneurs en CFC11 très supérieures aux valeurs maximales mesurées dans l'atmosphère, ce qui témoigne d'une pollution des eaux vis-à-vis de ce CFC. Les eaux semblent présenter un appauvrissement en CFC113 par rapport au CFC12. Les gaz SF₆ et CFC12 suggèrent une infiltration autour de 2006, l'incertitude étant évaluée à 1 an à l'aide de ces 2 gaz.

Les eaux de la **source Bassignac 3** prélevées en 2014 (basses eaux) ainsi que les eaux du **forage Bassignac** [BF1-A(t=1h)] prélevées au bout d'une heure de pompage présentent des concentrations comparables. Dans les diagrammes binaires (Illustration 65), les eaux se positionnent sur la courbe théorique du modèle exponentiel, **le temps de résidence moyen apparent des eaux est évalué à 22 ans, l'incertitude étant de l'ordre de 6 ans** en moyenne en considérant les résultats du SF₆, CFC12, CFC11 et CFC113.

Pour la **source Bassignac 3**, le temps de résidence moyen des eaux apparaît supérieur à celui estimé en 2013 (22 ans contre 1 an en 2013), ce qui permet d'illustrer le rôle du contexte hydrologique et l'effet de mélange avec des eaux récentes lors des périodes de hautes eaux. En effet, en 2013, le prélèvement réalisé à la source Bassignac 3 a été effectuée suite à des précipitations exceptionnelles les jours précédents (cumul de l'ordre de 300 mm).

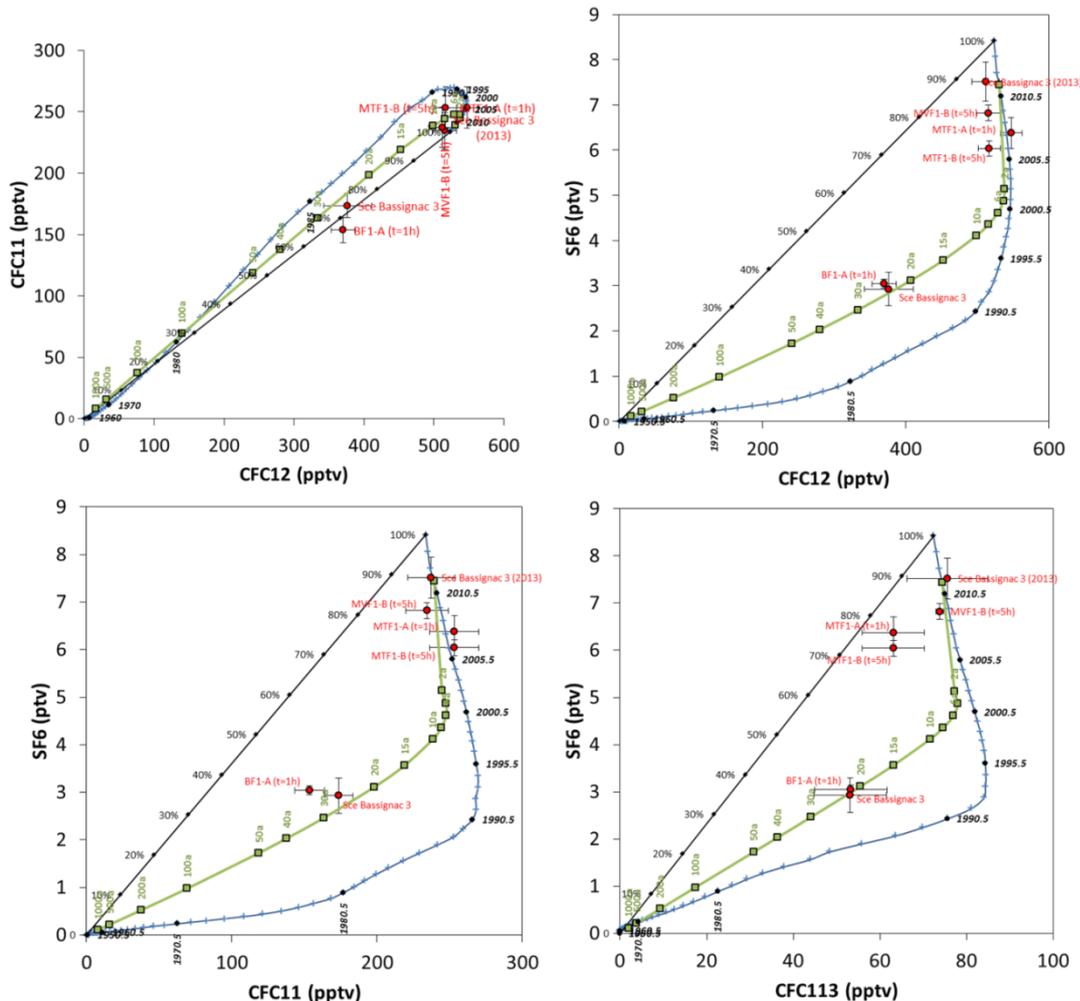


Illustration 65. Comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en 2014 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

Les eaux du forage situé à proximité de la **source Malgré Tout** [MTF1-A(t=1h) et MFT1-B(t=5h)] présentent des teneurs en CFC12, CFC11 et SF₆ comparables aux valeurs mesurées dans l'atmosphère entre 2005 et 2010. Les teneurs en CFC113 apparaissent très légèrement appauvries par rapport aux concentrations en CFC12 et CFC11. Sur la base des résultats du SF₆, du CFC12 et du CFC11, les eaux prélevées dans le forage se seraient infiltrées autour de 2008 (l'incertitude étant évaluée à 2 ans). Au cours du pompage, on distingue une très légère évolution des concentrations en gaz dissous, la tendance allant vers une augmentation de l'âge apparent de l'eau pompée. Les eaux pompées apparaissent nettement plus récentes que celles prélevées à la source Malgré Tout en avril 2013, le temps de résidence moyen de l'eau de la source estimé à l'aide du modèle exponentiel étant de 15 ans ±4 ans.

Les eaux du **forage MVF1-B(t=5h)** situé sur le bassin versant expérimental de la Digue présentent des teneurs en CFC12, CFC11 et SF₆ comparables aux valeurs mesurées dans l'atmosphère en 2009. Sur la base des résultats du SF₆, du CFC12, du CFC11 et du CFC113, les eaux prélevées dans le forage se seraient infiltrées autour de 2009 (l'incertitude étant évaluée à 1 an). Ce temps de résidence, moins important que pour les forages précédents, est cohérent avec une nappe perchée dans l'horizon altéré d'une coulée de lave.

Enfin, il est intéressant de noter que l'eau des sources drainant les laves (andésites et basaltes) de la moitié aval du bassin, présente des temps de résidence moyens plus importants que ceux des sources drainant les conglomérats ¹⁴C : 12 à 22 ans pour les laves contre 3 à 13 ans pour les conglomérats.

5.6 SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE

L'approche hydrogéochimique couplée à une datation des eaux par les CFC et SF₆ a permis de mieux caractériser la nature des réservoirs aquifères, les temps de résidence des eaux (temps d'interaction eau-roche et âge apparent), et les mélanges entre les masses d'eau et les eaux de surface en étiage. Les grandes différences de comportement entre les deux bassins semblent fortement influencées par la géologie et le niveau d'altération qui contrôlent une partie de la réponse hydrogéochimique.

Concernant les aquifères de formations géologiques récentes sur Pérou-Pères, on observe une cohérence entre la nature des aquifères et leurs signatures hydrogéochimiques :

- Un aquifère superficiel (de 0 à 30 m) au sein des nuées ardentes dont l'impluvium est localisé sur la partie basse du bassin, avec des eaux au temps de résidence court (âges apparents de 1 à 3 ans +/- 1 an), issues d'une zone de recharge moyenne centrée sur la partie amont de la zone cultivée (à environ 300 m NGG) ;
- Un aquifère profond (< 50 m) localisé principalement dans les laves sous-jacentes dont le bassin d'alimentation moyen supposé est situé en amont de la zone cultivée (entre 400 et 800 m NGG environ). Au niveau des forages aval, en profondeur, on observe des mélanges entre des eaux anciennes infiltrées avant 1960 (ante application de la chlordécone) probablement en altitude et des eaux actuelles probablement infiltrées par drainance depuis l'impluvium local ;
- La source Pérou montre une anomalie en isotopes stables de l'eau qui suggère une alimentation depuis les plus hautes crêtes du bassin. Une contamination en CFC nous empêche de conclure sur l'âge des eaux qu'elle draine. Cependant, l'isotope du strontium montre que la source Pérou est un mélange d'eaux de l'aquifère superficiel des nuées ardentes et d'eaux probablement issues de l'aquifère profond, au temps de résidence plus long.

Le réseau de surface est fortement influencé par la géomorphologie des bassins. La rivière Pérou dont l'impluvium se situe principalement sur la partie amont de la zone cultivée ne montre pas d'évidence d'apports latéraux significatifs sur sa partie intermédiaire où elle traverse les laves. La rivière des Pères ne possède pas de tête de bassin en altitude et sa signature géochimique semble totalement contrôlée par le drainage de l'aquifère des nuées ardentes.

Concernant les aquifères de formations géologiques anciennes sur le Galion, le lien entre la nature des aquifères et leurs signatures hydrogéochimiques est moins évident à l'échelle du bassin, ce que l'on pourrait relier aux phénomènes d'altération très importants qui affectent les formations que l'on y rencontre.

L'âge moyen des eaux des sources drainant les conglomérats varie de 3 à 13 ans (+/- 1 an) contre 12 ans (+/- 3) à 22 ans (+/- 6) dans les laves. Cette différence s'explique probablement par des propriétés hydrodynamiques des aquifères différentes, plutôt que par la taille des impluviums, qui restent - pour les différentes lithologies - de petite taille, à l'image des mornes qui modèlent le bassin du Galion. Les deux forages Trinité-Galion et de la Borelli montrent tous deux des eaux anciennes infiltrées respectivement il y a 25 ans (+/-5 ans) et ante 1970.

Le réseau de surface semble fortement influencé par les formations conglomératiques à l'amont et les formations superficielles (altérites des laves de Vert Pré) à l'aval. Ces dernières sont fortement impactées par les apports anthropiques qui masquent le signal « naturel » de la recharge.

6 Contamination des eaux par la chlordécone

6.1 MÉTHODE

6.1.1 Analyses chlordécone

Les analyses chlordécone (CLD) et chlordécone 5b-hydro (CLD 5b-hydro) ont été confiées au Laboratoire Départemental de la Drôme.

L'échantillonnage consiste à prélever 1 litre d'eau brute dans une bouteille en verre ambrée avec bouchon métallique. En dehors de toute filtration, on estime que les concentrations mesurées en CLD sont représentatives du total sous formes soluble, colloïdale et particulaire. La méthode d'analyse s'appuie sur une extraction liquide/liquide, la limite de quantification est de 0.01 µg/l, avec une incertitude donnée à 35 %.

6.1.2 Stratégie de prélèvements

L'objectif était d'obtenir une photographie de la contamination des eaux superficielles et souterraines en lien avec les sites analysés pour la géochimie sur les deux bassins pilotes.

6.2 VARIABILITÉ SPATIALE DE LA CONTAMINATION DES EAUX

6.2.1 Contamination des eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères

Afin de rendre compte de la contamination des eaux de surface et souterraines sur le site pilote guadeloupéen, l'illustration 66 présente une carte de la contamination des eaux sur fond de la carte de contamination des sols issue des données fournies par le CIRAD Guadeloupe.

S'agissant des sols et sur la base des données disponibles, on observe une contamination globalement importante sur l'ensemble de la zone cultivée (jusqu'à plus de 10 mg/kg de CLD). Les zones d'altitude, comme Féfé, semblent moins marquées par la contamination que les parcelles des exploitations localisées sur la partie intermédiaire, au niveau de l'interfluve entre les deux rivières Pérou et des Pères.

Globalement, il est intéressant de noter une plus forte contamination des eaux souterraines (moyenne de plus de 5 µg/L environ) que des eaux de surface (moyenne de 2 µg/L environ). Plus en détail, les principales observations concernant la contamination des eaux par la CLD sont les suivantes :

- absence de CLD dans les eaux superficielles localisées en amont de l'hydrosystème. Pour rappel, les points d'échantillonnage concernés ont été réalisés en amont des sites historiquement cultivés en bananes et susceptibles de contenir des pesticides organochlorés ;
- augmentation progressive des concentrations en chlordécone dans les eaux souterraines depuis l'amont vers l'aval de l'hydrosystème (jusqu'à plus de 10 µg/L en aval). Ceci est cohérent avec une augmentation de la surface contaminée au sein des impluviums ;

- contamination significativement plus prononcée de la rivière des Pères (entre 1 et plus de 5 µg/L) que de la rivière Pérou (entre 0 et 2 µg/L).

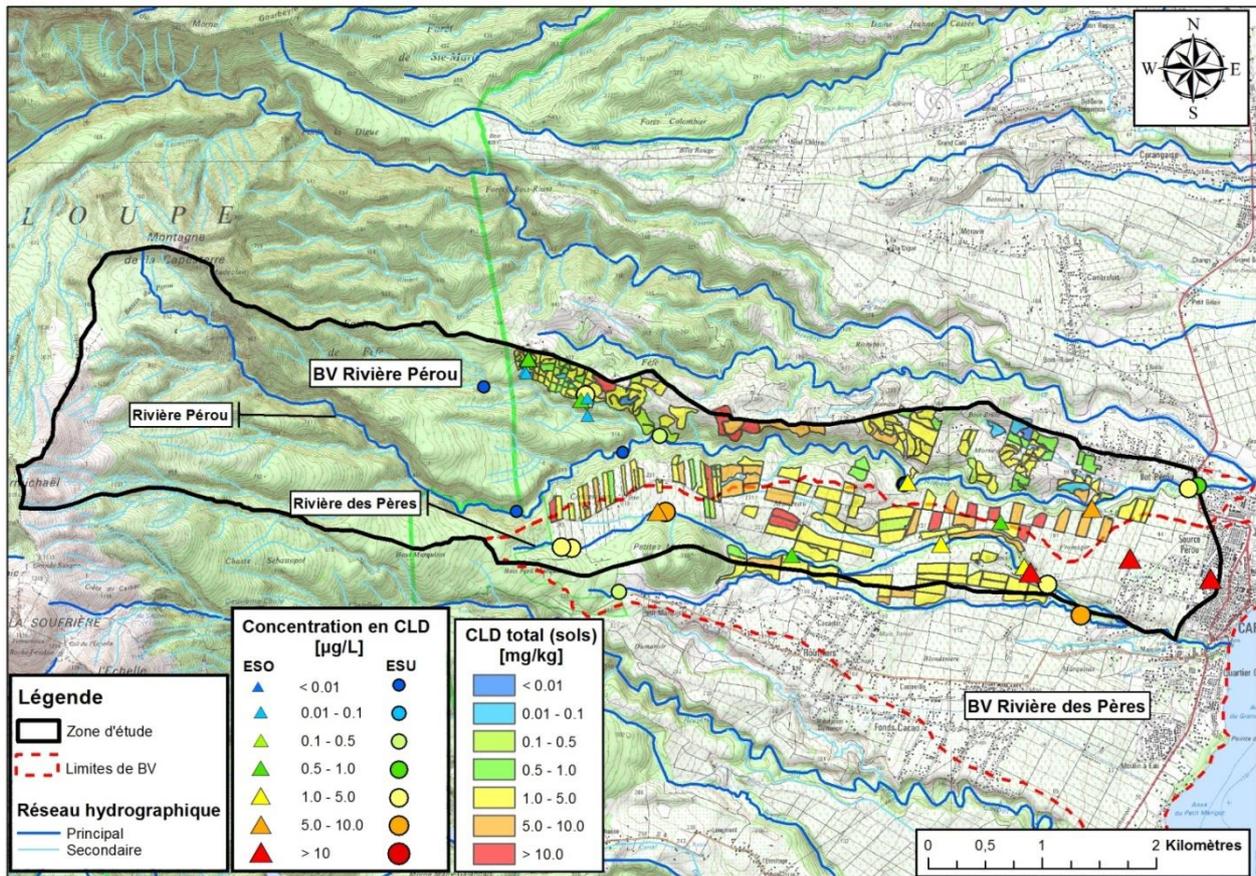


Illustration 66 : Carte de la contamination à la chlordécone des sols et des eaux sur l'hydrosystème Pérou (données sols CIRAD)

La cohérence entre les niveaux de contaminations mesurées sur les sols et les eaux vient appuyer l'hypothèse selon laquelle la part de la recharge localisée en zone cultivée est une part non négligeable des eaux circulant au sein des aquifères du bassin.

6.2.2 Contamination des eaux du bassin du Galion

À l'instar des cours d'eau qui se chargent en CLD lors de la traversée des zones cultivées contaminées, les eaux souterraines les plus polluées sont observées au cœur des zones où la durée d'application de la molécule a été la plus longue (Cf. sols à risque fort et très fort, Illustration 67), sur les parties nord et sud-est du bassin.

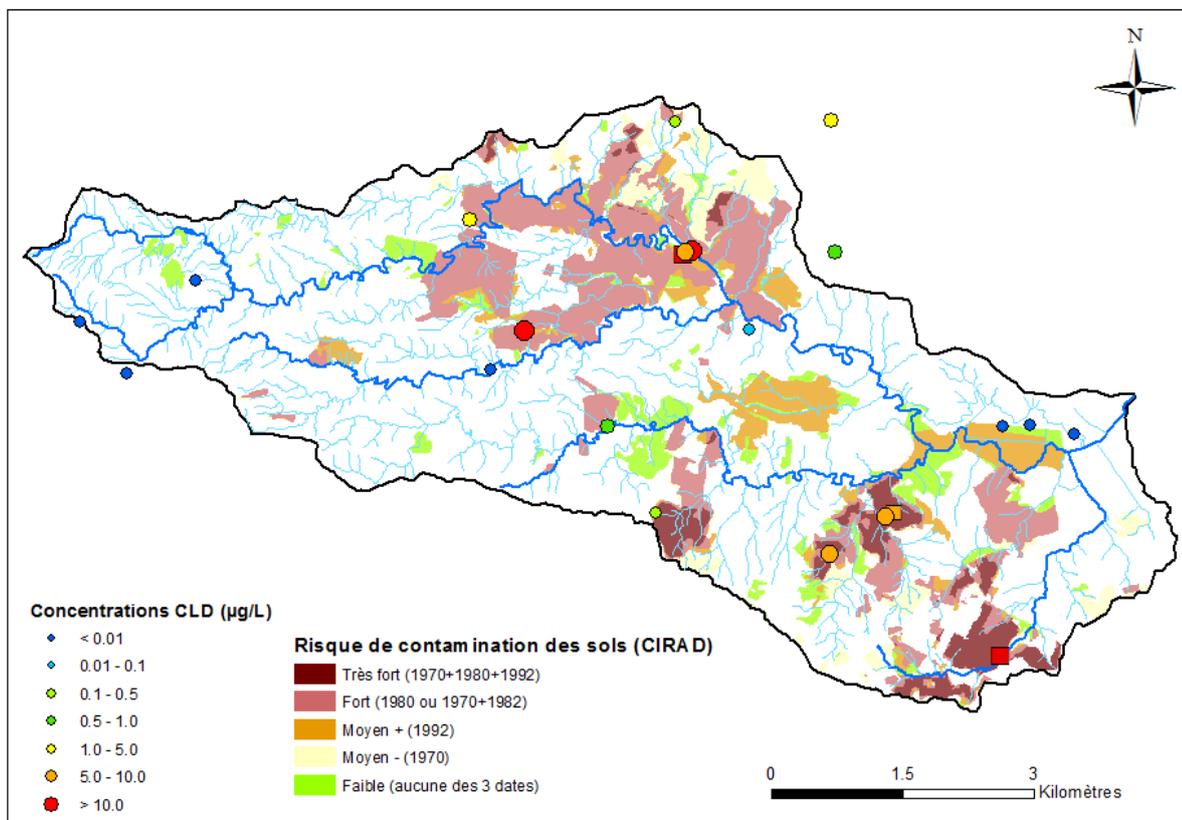


Illustration 67 : Carte de contamination des eaux souterraines par la CLD sur fond de carte de risque de contamination des sols (données sols CIRAD)

Outre les trois sources non contaminées en tête de bassin versant en amont de la zone cultivée en bananes, une absence de contamination est notée aux points suivants :

- la CLD n'a pas été détectée sur les eaux du forage La Borelli, appartenant au réseau patrimonial DCE (suivi semestriel). Ce résultat est à mettre en relation avec le temps de résidence moyen de ces eaux qui est important (infiltration ante 1970, avant l'application de la molécule) ;
- les deux piézomètres de la sucrerie du Galion, à l'extrémité aval du bassin, captent vraisemblablement une nappe confinée dans des dépôts de mangrove très peu perméables et rechargée localement au droit de parcelles non contaminées ;
- le piézomètre de Trinité-Galion, également situé à l'extrémité aval du bassin, capte une coulée de lave sous couverture alluvionnaire de l'ordre de 20 m d'épaisseur. L'âge apparent de l'eau ayant été évalué à 25 ans (post application de la molécule), l'absence de contamination implique que son bassin d'alimentation soit situé dans une zone non contaminée (versant Nord de la basse vallée du Galion, voire au-delà du bassin topographique).

6.3 UNE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES GLOBALEMENT TRÈS ÉLEVÉE

6.3.1 Impact agricole sur les eaux de l'hydrosystème Pérou-Pères

Un diagramme de corrélation CLD vs. NO₃ est présenté ci-après et précise les conclusions tirées de la carte des contaminations des sols et des eaux. À travers ce diagramme, l'idée est de représenter les eaux à partir de deux variables indépendantes (pas forcément issues des mêmes types de pratiques) marquant l'impact agricole sur les eaux. Gourcy et al. (2009) ont montré que contrairement aux teneurs en NO₃ corrélées négativement aux âges apparents des eaux, les teneurs en pesticide semblent suivre un schéma plus complexe.

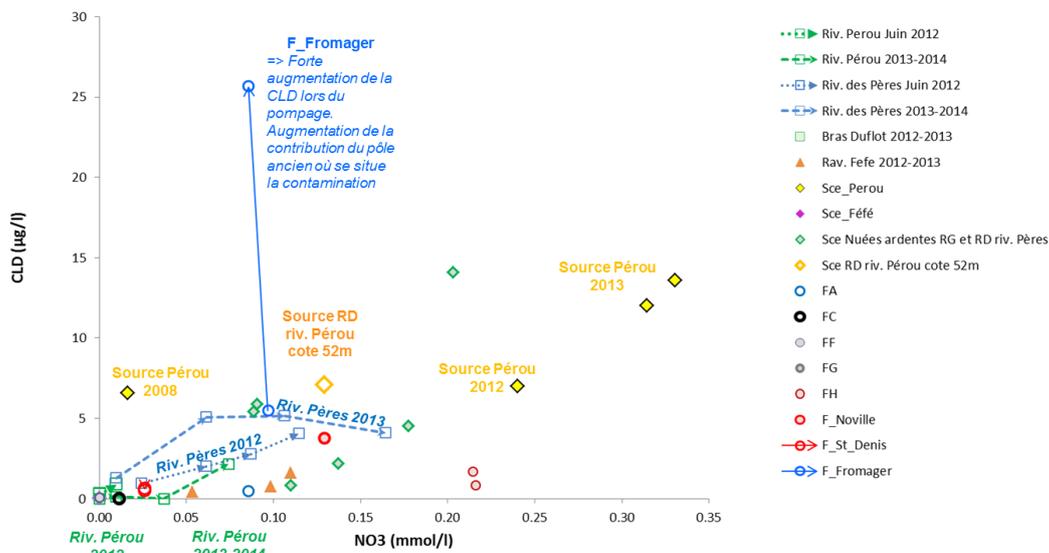


Illustration 68 : Diagramme CLD vs. NO₃ ; contamination des eaux de Pérou-Pères

Concernant l'hydrosystème Pérou-Pères, l'illustration 68 montre que les plus fortes contaminations en CLD (au-dessus de 2 µg/l) apparaissent pour la source Pérou, les sources qui drainent l'aquifère des nuées ardentes (sources RD et RG de rivière des Pères et source RD de rivière Pérou), le forage Noville et le forage Fromager qui montre une contamination à plus de 25 µg/l lors du pompage d'essai, ainsi que la rivière des Pères. Une évolution de cette contamination s'observe avec le temps sur la source Pérou et les deux rivières de Pères et Pérou pour lesquelles plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées. Globalement, une augmentation de la teneur en CLD est observée pour les conditions hydrologiques les plus sèches (étiage de 2013), ce qui est à rattacher à une possible dilution de la contamination du milieu lors des hautes eaux. Ceci confirme également que les eaux issues des aquifères sont bien les sources principales de la contamination des eaux de surface à l'échelle du bassin versant lors des périodes d'étiage.

La différence de contamination entre la rivière des Pères et la rivière Pérou est remarquable et peut être expliquée par leurs contextes géomorphologiques différents :

- L'essentiel du débit de la rivière Pérou en étiage provient de l'amont forestier non contaminé et est produit principalement par du ruissellement de sub-surface (pas d'aquifères d'importance mis en évidence). Ainsi, seules des périodes de très basses eaux, limitant la production de ruissellement favorisent une augmentation progressive

de la contamination sur la partie aval au-dessus de 0.5 µg/l. D'après l'illustration 68, on peut supposer que le contributeur essentiel à la contamination aval de la rivière Pérou en 2013 est l'aquifère des nuées ardentes en rive droite (par ex. source RD riv. Pérou cote 52 m).

- La rivière des Pères, quant à elle, prend naissance à la limite du Parc Naturel et doit la totalité de son débit en étiage au drainage de l'aquifère des nuées ardentes fortement contaminé comme l'indiquent les sources prélevées. La variation saisonnière est donc plus faible, mais elle couvre une gamme de teneurs très élevées (entre 1 et 5 µg/l).

La contamination en NO₃ reste relativement faible (< 20 mg/l). Globalement, les eaux contaminées en NO₃ le sont également en CLD, mais une forte variabilité - notamment temporelle pour la source Pérou et la rivière des Pères - existe du fait de pratiques culturales différentes sur l'application de ces deux molécules et de leurs propriétés de lessivage par les sols.

6.3.2 Impact agricole sur les eaux du bassin du Galion

Concernant le bassin du Galion, le diagramme CLD vs. NO₃ (Illustration 69) montre que la contamination des eaux est la plus forte pour les eaux souterraines (sources ou forages) avec de nombreuses valeurs dépassant 2 µg/l de CLD et jusqu'à 12.6 µg/l ce qui représente près de 130 fois la norme de potabilité de l'eau. Les eaux de surface contaminées se trouvent dans les réseaux hydrographiques de petite taille - à l'échelle du sous-bassin versant. La Digue est le sous-bassin le plus contaminé avec des concentrations comprises entre 2 et 7 µg/l dans l'eau. La contamination à l'échelle du bassin est plus faible du fait de la dilution par les arrivées d'eau de surface ou souterraine non ou peu contaminées.

La contamination en NO₃ est globalement faible mais certains points ont des concentrations atteignant la limite de potabilité (50 mg/l). Pour les plus fortes teneurs, une relation linéaire semble se dessiner entre contamination à la CLD et présence de NO₃.

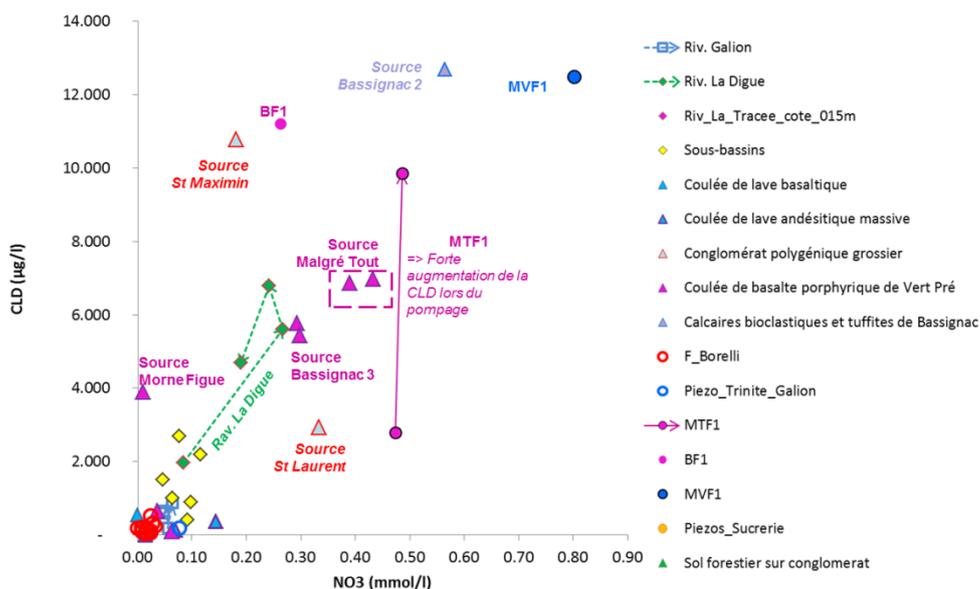


Illustration 69 : Diagramme CLD vs. NO₃ ; contamination des eaux du Galion

6.4 LA CHLORDÉCONE 5B-HYDRO

La chlordécone 5b-hydro (CLD 5b-hydro) est un sous-produit de synthèse de la CLD qui a perdu un chlore. La CLD 5b-hydro est - dans une proportion beaucoup plus faible que la CLD - est une des molécules constitutives des produits organochlorés qui ont été épandus (Kepone[®] et Curlone[®]). La CLD 5b-hydro n'est pas systématiquement détectée lorsqu'est détectée la CLD et ses teneurs sont systématiquement plus faibles. Se pose alors la question de son origine lorsqu'elle est détectée dans les sols et les eaux (voir Devault et al., 2014 pour une première étude sur les sols) : est-elle issue du lessivage de la CLD 5b-hydro épandue ou est-elle un marqueur de la dégradation de la CLD ?

Le diagramme CLD 5b-hydro vs. CLD (Illustration 70) sur l'ensemble des eaux des deux bassins permet de mettre en évidence un seuil de détection à 1 µg/l de CLD, en dessous duquel la CLD 5b-hydro n'est pas détectée ou apparaît avec de très faibles valeurs (< 0.02 µg/l - la limite de détection étant à 0.01 µg/l). Au dessus de ce seuil de CLD = 1 µg/l, un rapport CLD 5b-hydro/CLD de 1.10^{-3} à 2.10^{-1} existe entre les deux molécules dans les eaux. Ce rapport est 10 à 100 fois plus élevé que celui observé sur des sols martiniquais (rapport de 5.10^{-4} à 1.10^{-3} d'après Devault et al., 2014). L'origine superficielle ou souterraine des eaux ne semble pas expliquer la variation du rapport. Mais cela peut tenir au fait que les campagnes de prélèvements ont été effectuées en périodes d'étiage durant lesquels les cours d'eau sont exclusivement alimentés par les nappes.

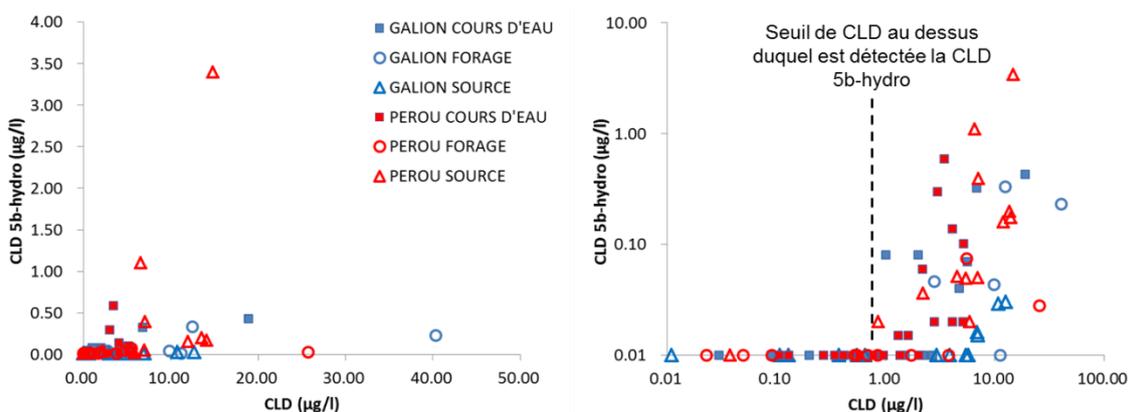


Illustration 70 : Diagramme CLD 5b-hydro vs. CLD en échelle linéaire (à gauche) et en log-log (à droite) ; avec les eaux de Pérou-Pères en rouge et du Galion en bleu

Pour mieux comprendre la variabilité du rapport 5b-hydro / CLD, l'illustration 71 présente leurs concentrations en fonction de l'âge apparent des eaux estimé par datation (voir section 5.5). Aucune tendance particulière n'est observée pour la variabilité de la CLD en fonction de l'âge apparent des eaux, ce qui est cohérent avec les travaux de Gourcy et al. (2009) sur différentes analyses pesticides du réseau DCE martiniquais. Par contre, excepté pour le forage Fromager qui sollicite des eaux plus anciennes, on observe une relation entre la présence de CLD 5b-hydro et la diminution de l'âge apparent des eaux.

Cela signifie que sa présence est liée à une recharge principalement par des eaux récentes, à travers des sols dans lesquels la dégradation de la CLD en CLD 5b-hydro a pu avoir lieu. À l'inverse, les eaux les plus anciennes (à part Fromager) ne présentent peu ou pas de CLD 5b-hydro, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que leur infiltration est antérieure ou contemporaine à

la période d'application des pesticides organochlorés, avant qu'une dégradation significative de la CLD ait pu se produire.

Le fort signal « atypique » de 5b-hydro au forage Fromager (Illustration 71) peut s'expliquer par le fait que ses eaux sont un mélange d'eaux anciennes fortement contaminées en CLD mais moins contaminées (voire pas du tout) en 5b-hydro avec des eaux récentes fortement enrichies en 5b-hydro. Cette hypothèse se base sur les résultats des outils de datation et des outils isotopiques présentés dans le chapitre précédent.

Globalement, ces résultats vont donc dans le sens d'une détection de la 5b-hydro issue probablement de la dégradation de la CLD plutôt que du lessivage des produits épandus. Ils soulèvent également la question de savoir pourquoi l'on n'observe pas de relation entre la CLD et l'âge apparent des eaux alors qu'une tendance existe sur la 5b-hydro qui semble donc être un marqueur de sa dégradation. Ceci pourrait s'expliquer par un stock de CLD mobilisable bien supérieur à sa variation, générant un signal continu dans les eaux d'infiltration alors même que le stock diminue légèrement dans les sols.

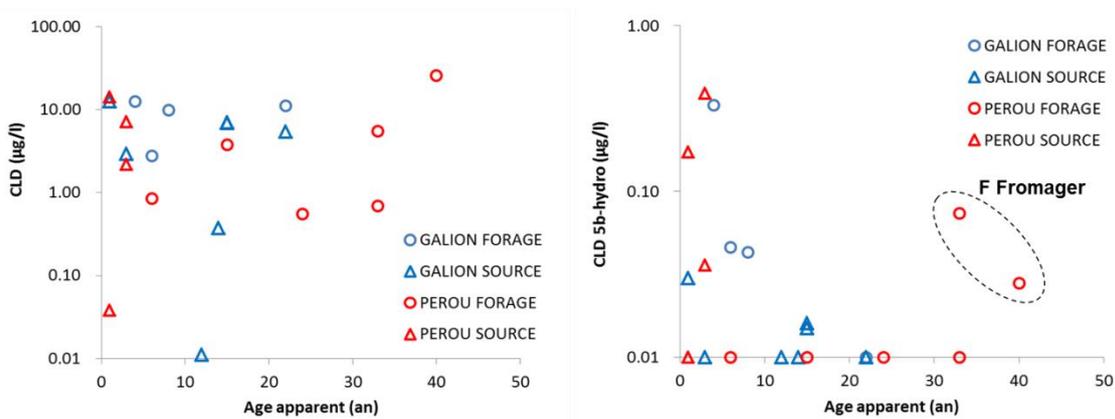


Illustration 71 : Diagramme CLD vs. âge apparent (à gauche) et CLD 5b-hydro vs. âge apparent (à droite) des eaux souterraines de Pérou-Pères en rouge et du Galion en bleu

6.5 SYNTHÈSE SUR LES NIVEAUX DE CONTAMINATION DES EAUX PAR LA CHLORDÉCONE

L'analyse de l'ensemble des eaux prélevées montre globalement pour les deux bassins de plus fortes concentrations dans les eaux souterraines que dans celles de surface – bien que certaines teneurs sur la rivière de Pères ou sur des sous-bassins comme La Digue (Galion) présentent des valeurs supérieures à plusieurs µg/l. Pour certains forages, les concentrations atteignent des valeurs considérables, correspondant à 400 fois la norme de potabilité des eaux (0.1 µg/l par molécule). De plus, l'analyse des échanges surface-souterrain montre une forte contribution des nappes à la contamination du réseau hydrographique en étiage.

La représentation spatiale des concentrations en CLD montre une nette augmentation de la CLD vers l'aval du bassin en lien avec le niveau de contamination des sols. Des teneurs importantes sont tout de même observées sur certains forages en Guadeloupe, alors qu'ils drainent principalement des eaux infiltrées en altitude, en amont des zones contaminées. Ceci est probablement lié aux processus complexes de recharge des aquifères, qui mobilisent également des eaux des formations superficielles par drainance, et font que le niveau de contamination actuel des sols contrôle en partie le niveau de contamination des eaux souterraines.

Un résultat important est que le temps de résidence moyen des eaux au sein des aquifères – défini par l'âge apparent - contrôlerait également le niveau de contamination de la CLD, selon les critères suivants :

- Une absence de contamination des eaux si la recharge a eu lieu avant les premières applications dans les années 1970 (cas du forage de La Borelli) ;
- Une contamination très élevée des eaux > 25 µg/l pour des périodes de recharge entre les années 1970-1990 correspondant aux périodes d'application (cas du forage de Fromager) lorsque la CLD est la plus mobilisable ;
- Une contamination chronique qui peut être localement considérable atteignant des valeurs de plusieurs dizaines de µg/l pour les eaux infiltrées après les années 1990 jusqu'à aujourd'hui. La variation du niveau de concentration en CLD serait plus contrôlée par le niveau de contamination actuel des sols de l'impluvium. Ce sont ces eaux qui présentent les plus fortes teneurs en CLD 5b-hydro.

Une première étude sur la CLD 5b-hydro montre qu'elle est principalement détectée dans les eaux présentant un seuil minimal de 1 µg/l de CLD. Une relation entre une augmentation de ses teneurs avec une diminution de l'âge apparent des eaux au sein des aquifères tend à montrer que la 5b-hydro est un marqueur de la dégradation de la CLD et que le temps de résidence moyen des eaux serait également un des déterminants à sa détection dans les eaux souterraines.

7 Schémas conceptuels hydrogéologiques : implication sur la compréhension du devenir de la chlordécone dans les eaux

Nous proposons dans ce chapitre une synthèse du fonctionnement hydrogéologique des deux bassins Pérou-Pères et du Galion, à partir d'une compilation de l'ensemble des résultats issus des approches géologiques, hydrodynamiques et hydrogéochimiques. L'analyse de la contamination des eaux en lien avec les processus hydrogéologiques mis en évidence permet de mieux comprendre le devenir de la CLD dans l'environnement.

7.1 FONCTIONNEMENT DE L'HYDROSYSTÈME PÉROU-PÈRES

Le fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème Pérou-Pères peut être caractérisé à l'échelle du bassin (Illustration 72) étant donné que le bassin d'alimentation de l'aquifère principal (aquifère d'interfluve entre les deux rivières Pérou et des Pères) est rechargé en grande partie en altitude dans la partie située en amont de la zone cultivée.

Sur la base de la géométrie des coulées de **l'aquifère d'interfluve**, une paléo-vallée profonde de près de 80-100 m permet d'expliquer cet axe de drainage ouest-est dans le sens de la ligne de plus grande pente. Un mélange des eaux anciennes qui rechargent l'aquifère en altitude, avec des eaux récentes qui s'infiltrent dans la partie cultivée (drainance depuis les nuées ardentes), expliquent les fortes teneurs en CLD observées dans les sources et forages de cet aquifère profond. L'estimation de la contribution des eaux récentes n'a pas été possible pour la source Pérou, mais semble représenter près d'1/3 des eaux des **forages St Denis et Fromager**. Lors du pompage, le forage Fromager semble mobiliser des eaux plus anciennes et plus contaminées (jusqu'à 25 µg/l), ce qui pourrait s'expliquer par la sollicitation d'un réservoir d'eau contaminé à des valeurs supérieures à 30 µg/l et dont l'âge correspondrait aux premières applications de la CLD dans les années 1970.

La contamination des eaux de surfaces des deux rivières Pérou et des Pères n'a pas la même origine en étiage. Les eaux de la **rivière des Pères** proviennent principalement de l'aquifère des nuées ardentes, caractérisé par un temps de résidence court (quelques années) et dont la forte contamination est en lien avec le niveau de contamination élevé des sols sur l'impluvium. Les eaux de la **rivière Pérou** proviennent principalement de la tête de bassin en amont de la zone cultivée. Les apports latéraux semblent faibles sur la partie aval, ce qui explique les faibles teneurs en CLD à l'exutoire du bassin en hautes eaux (dilution par l'amont forestier non contaminé), mais de fortes teneurs en basses eaux lorsque les pluies se font rares limitant le pouvoir de dilution depuis la tête de bassin.

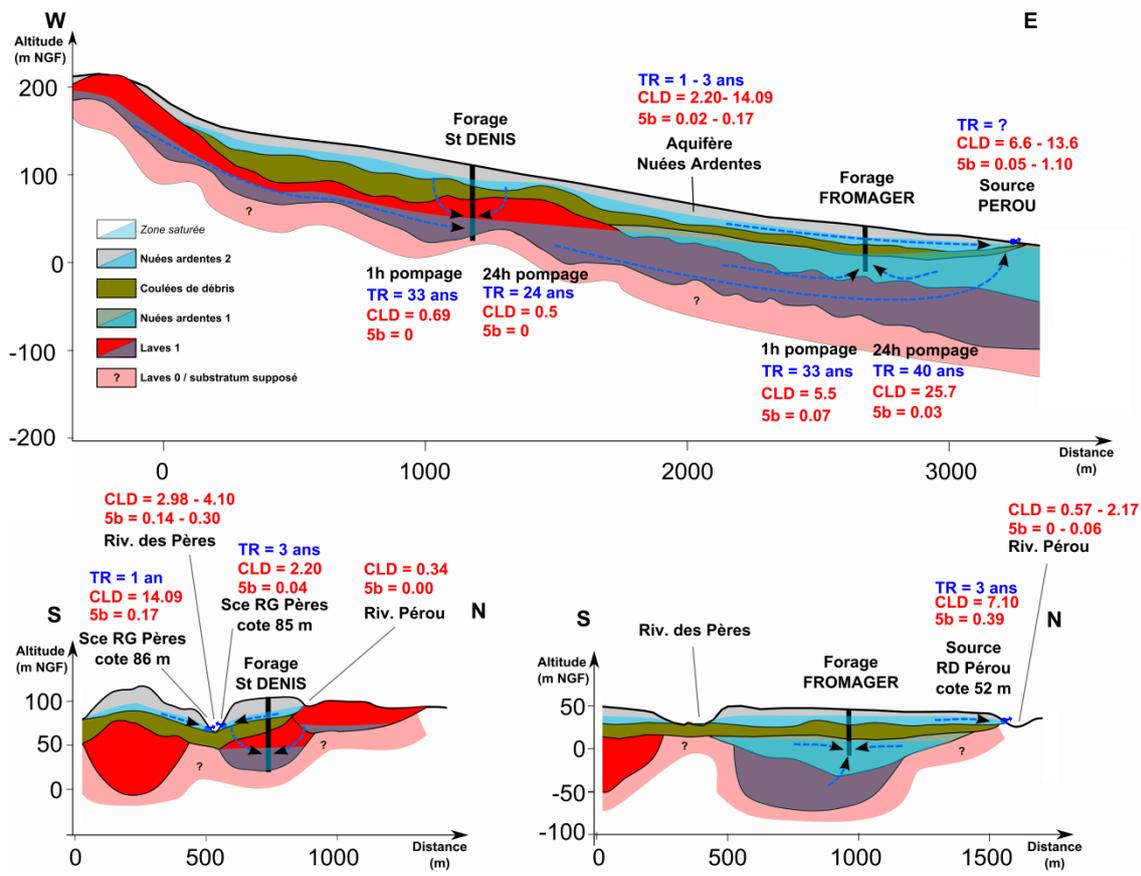


Illustration 72 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD de l'hydrosystème Pérou-Pères ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en µg/l et 5b = CLD 5b-hydro en µg/l

7.2 FONCTIONNEMENT DU BASSIN DU GALION

Contrairement à l'hydrosystème Pérou-Pères, il apparaît difficile de dessiner un schéma de fonctionnement hydrogéologique à l'échelle du bassin du Galion. En effet, de par sa taille de 40 km², des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre la variabilité spatiale des circulations souterraines au sein du bassin. Par ailleurs, le niveau d'altération en grand des formations géologiques semble favoriser les écoulements de subsurface, au sein des niveaux d'altérites. Ces écoulements, parallèles à la topographie, engendrent un découpage des aquifères en plus petites entités que dans le cas guadeloupéen, à l'image des mornes drainés par les sources de bas de versant.

Nous présentons donc dans cette synthèse des schémas de fonctionnement à l'échelle locale des systèmes sollicités par les nouveaux forages implantés dans le cadre du projet OPA-C, en allant de l'amont vers l'aval (cf Illustration 17).

L'hydrosystème de **Bassignac** présente une compartimentation latérale des écoulements en lien avec les principales formations géologiques (Illustration 73). La coulée de lave saine (en gris) observable en forage est drainée par la source Bassignac 3, qui surplombe la source intermittente de Bassignac 2 qui draine une lentille de calcaires bioclastiques (en jaune). Les eaux du forage de Bassignac sont plus contaminées que les eaux de la source située plus bas dans le versant : 11.2 µg/l contre 5.4 µg/l à la même date. La chimie et l'âge apparent de leurs

eaux révèle pourtant qu'elles viendraient du même aquifère. Cette différence met en évidence une stratification latérale de la contamination au sein de l'aquifère (les lignes d'écoulement interceptées par le forage et la source n'étant pas les mêmes). Au cours du pompage, un effet de drainance a par ailleurs été mis en évidence : l'arrivée d'eaux plus contaminées, plus profondes ou au contraire venant des altérites sus-jacentes, n'est donc pas exclue.

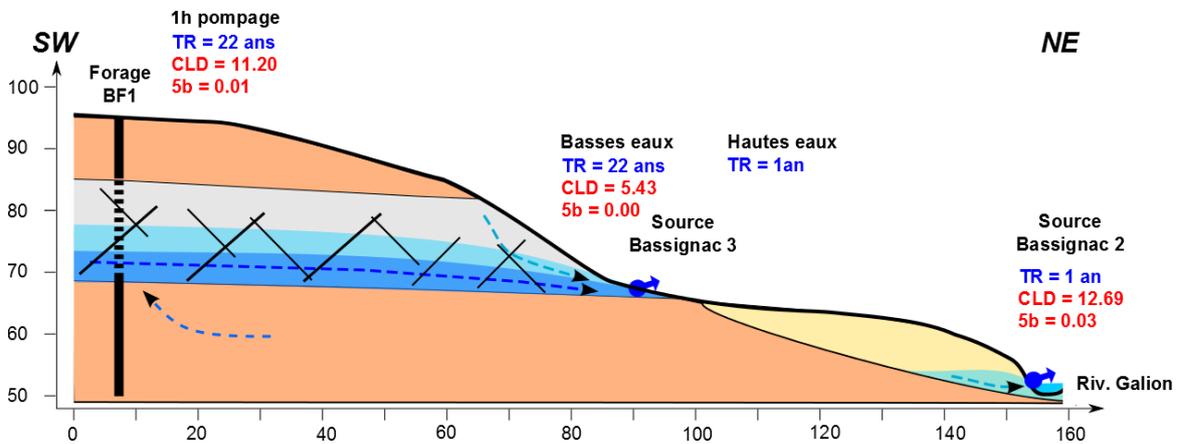


Illustration 73 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Bassignac sur le Galion ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en $\mu\text{g/l}$ et 5b = CLD 5b-hydro en $\mu\text{g/l}$

L'hydrosystème de **Malgré Tout** (Illustration 74) présente à la fois, une compartimentation verticale des écoulements en lien avec l'existence de deux formations d'altérites et les brèches sous-jacentes aux propriétés hydrodynamiques différentes, et à la fois une compartimentation latérale au sein des brèches mises en évidence par l'essai de pompage. La particularité de ce système est que ses eaux présentent un temps de résidence plus court au sein du compartiment inférieur des brèches. Dans le schéma de l'illustration 74, nous avons rattaché la compartimentation latérale à la fracturation interne de la formation bréchique, plutôt qu'à ses limites lithologiques dont l'extension est supposée plus vaste que le compartiment pompé. Ceci est justifié par le fait qu'un temps de résidence de quelques années seulement implique un renouvellement de l'eau et donc un drainage en bas de versant comme l'illustre le schéma. Les phénomènes de drainance observés lors du pompage sont associés à une augmentation forte de la concentration en CLD qui ne peut provenir seule de l'aquifère supérieur. Un bassin d'alimentation de l'aquifère des brèches plus étendu que celui de l'aquifère des altérites et drainant des parcelles fortement contaminées est donc à envisager.

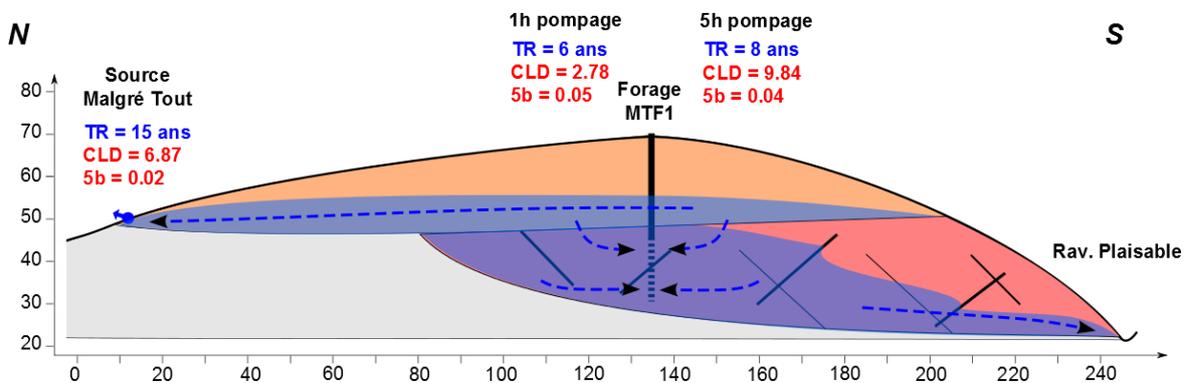


Illustration 74 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Malgré Tout sur le Galion ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en $\mu\text{g/l}$ et 5b = CLD 5b-hydro en $\mu\text{g/l}$

Le forage **Mont Vert** (Illustration 75) présente une relative homogénéité de fonctionnement à l'échelle locale, mais les pompages n'ont peut-être pas permis de solliciter les eaux des horizons sains sous-jacents, ou de la ravine La Digue (pas de limite alimentée observée). Sa contamination phénoménale est à mettre en lien avec les fortes concentrations observées dans les sols du sous-bassin de La Digue. La diminution en CLD lors du pompage peut-être liée à une drainance d'horizons localement peu/pas contaminés.

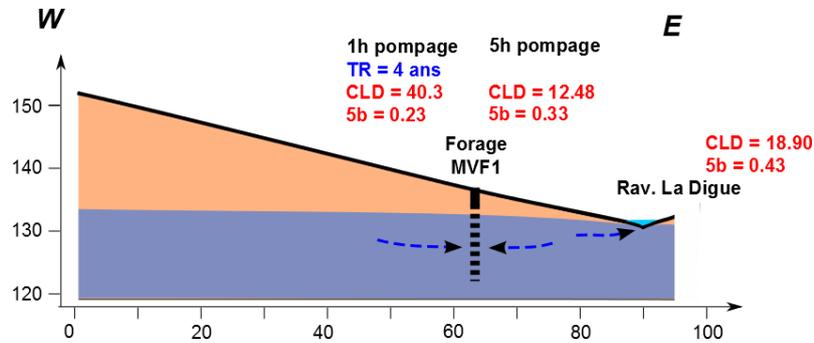


Illustration 75 : Schéma conceptuel hydrogéologique et devenir de la contamination des eaux par la CLD du système Mont-Vert sur le sous-bassin de La Digue (Galion) ; TR = temps de résidence moyen, CLD = chlordécone en $\mu\text{g/l}$ et 5b = CLD 5b-hydro en $\mu\text{g/l}$

8 Conclusion

L'objectif global du projet CHLOR-EAU-SOL visait à mieux comprendre la dispersion des polluants dans les aquifères et les rivières à l'échelle du bassin versant, en se basant sur les sites pilotes de l'Observatoire des Pollutions Agricoles aux Antilles (OPA-C).

L'identification des facteurs expliquant la variabilité des teneurs en CLD dans les eaux a pu être réalisée, après avoir défini le fonctionnement hydrogéologique des deux sites de Pérou-Pères en Guadeloupe et du Galion en Martinique qui présentent des contextes hydrogéologiques contrastés, à eux deux représentatifs des hydrosystèmes cultivés aux Antilles.

La démarche combine une reconnaissance géologique, une approche hydrodynamique, une approche hydrogéochimique et la caractérisation de la contamination des eaux, pour aboutir à un schéma hydrogéologique qui permet de décrire les facteurs pouvant contrôler la présence de la CLD dans les eaux.

Les reconnaissances géologiques ont permis d'actualiser la carte géologique des formations récentes (<1Ma) du secteur Pérou en Guadeloupe et de mieux caractériser les formations superficielles des formations anciennes (2 à 15 Ma) en Martinique. **Les principaux résultats montrent une forte diversité de lithologies à l'échelle du bassin, mais également à l'échelle locale, du fait de l'empilement complexe des coulées volcaniques variées** (laves, coulées pyroclastiques, de débris, etc.). Les formations récentes (quelques centaines de milliers d'années) observées sur Pérou-Pères en Guadeloupe sont globalement peu altérées, mais présentent de nombreuses intercalations d'imperméables locaux (niveaux cendreaux plus ou moins argilisés, paléosols), favorisant une compartimentation des écoulements souterrains en lien avec les différentes phases de dépôts. Les formations superficielles anciennes (quelques millions d'années) du Galion en Martinique sont systématiquement argilisées sur de fortes épaisseurs (> 10m), ce qui masque dans le paysage les horizons sains observés en forage. Des schémas de synthèse géologiques précisant la géométrie des formations ont ainsi pu être produits pour le site guadeloupéen, mais pas pour le site martiniquais, faute d'informations.

L'interprétation d'essais de pompage longue durée a permis de préciser les propriétés hydrodynamiques de certains aquifères. **Les principaux résultats montrent des comportements différents, en lien avec le type de lithologie, le degré d'altération ou encore la géométrie des coulées.** Les formations saines laviques fracturées ont une transmissivité variant de 10^{-4} à plus de 10^{-3} m²/s, alors que les faciès altérés et coulées pyroclastiques ont une transmissivité de l'ordre de 10^{-4} m²/s. L'analyse des tests a quasi systématiquement mis en évidence des effets de drainance en provenance de niveaux aquifères sus-ou sous-jacents et, très souvent, des effets de compartimentation (limites étanches). Ces comportements sont cohérents avec le mode de dépôt de coulées volcaniques empilées et emboîtées au sein de paléo-vallées.

L'approche hydrochimique et isotopique, couplée à une datation des eaux par les CFC et SF₆ a permis de mieux caractériser la nature des réservoirs aquifères, les temps de résidence des eaux (temps d'interaction eau-roche et âge apparent) et les mélanges entre les masses d'eau et les eaux de surface en étiage. Les grandes différences de comportement entre les deux bassins semblent fortement influencées par la géologie (différences de lithologie et de la géométrie des coulées) et le niveau d'altération qui contrôle une partie de la réponse hydrogéochimique.

Concernant les aquifères de formations géologiques récentes sur Pérou-Pères, on observe une stratification des écoulements liée à la lithologie : alternance des dépôts laviques et pyroclastiques, avec intercalation de coulées de débris. Sur la plus grande partie du bassin, cette stratification engendre une individualisation des aquifères, avec des effets de drainance. Sur la partie aval, des zones de mélanges entre les deux aquifères ont été mises en évidence. La datation des eaux montre que les temps de résidence sont courts (quelques années) au sein de l'aquifère superficiel, rechargé principalement sur la partie cultivée du bassin, alors que des eaux anciennes (30-40 ans) sont observées au sein de l'aquifère profond, rechargé en altitude.

Concernant les aquifères de formations géologiques anciennes sur le Galion, le lien entre la nature des aquifères et leurs signatures hydrogéochimiques est moins évident à l'échelle du bassin. Ceci peut s'expliquer par l'altération très importante qui affecte les formations qui le composent. Sur ce bassin, les unités hydrogéologiques sont plus petites que dans le cas du Pérou-Pères. De plus, elles sont fortement compartimentées, verticalement à cause de l'altération ayant affecté le sommet des coulées, et latéralement à cause de la fracturation interne aux formations laviques et bréchiques saines.

Concernant les relations nappe-rivière, une forte contribution des aquifères à l'écoulement des cours d'eau est observée sur l'hydrosystème Pérou-Pères en étiage. Au contraire, sur le bassin du Galion, on observe la prédominance de contributions d'aquifères perchés dans les altérites des formations anciennes.

La caractérisation de la contamination des eaux par la CLD montre globalement de plus fortes concentrations dans les eaux souterraines que dans celles de surface (jusqu'à 400 fois la norme de potabilité des eaux). La représentation spatiale des concentrations en CLD dans les eaux montre une nette augmentation de la CLD vers l'aval du bassin, en lien avec le niveau de contamination des sols au sein des impluviums. L'autre facteur expliquant la variabilité des mesures de CLD dans les eaux souterraines est le temps de résidence moyen des eaux. En découle une absence de contamination des eaux si la recharge a eu lieu avant les premières applications de CLD dans les années 1970, une contamination très élevée des eaux (> 25 µg/l) pour des périodes de recharge entre les années 1970-1990, correspondant aux périodes d'application de la CLD, où elle est la plus facilement mobilisable et une contamination chronique, qui peut être localement considérable (plusieurs dizaines de µg/l) pour les eaux infiltrées après les années 1990, jusqu'à aujourd'hui. Enfin, une première étude sur la CLD 5b-hydro montre qu'elle est principalement détectée dans les eaux fortement contaminées à la CLD (> 1 µg/l). La relation entre l'augmentation de ses teneurs et la diminution de l'âge apparent des eaux au sein des aquifères tend à montrer que la 5b-hydro serait principalement un marqueur de la dégradation de la CLD et que le temps de résidence moyen des eaux serait également un des déterminants à sa détection dans les eaux souterraines.

La compilation de l'ensemble des résultats a permis de définir un premier schéma de fonctionnement hydrogéologique des milieux volcaniques andésitiques qui composent le paysage agricole antillais. L'amélioration de la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu (circulations au sein d'aquifères hétérogènes, temps de résidence des eaux variable, etc.) a permis de définir un premier schéma conceptuel de la contamination des eaux souterraines et des eaux de surface en étiage et de mieux comprendre la dispersion de la CLD dans l'environnement.

Ces résultats sont importants car en se basant sur les deux sites pilotes d'OPA-C - représentatifs de l'ensemble de la diversité des contextes cultivés - ils sont globalement transposables à l'ensemble des bassins agricoles antillais. Les approches pluridisciplinaires

utilisées dans ce projet ont chacune apporté des informations complémentaires permettant d'optimiser la méthode de caractérisation des hydrosystèmes volcaniques antillais. En particulier, l'utilisation ciblée des différents marqueurs du temps de résidence des eaux en fonction de la lithologie, du degré d'altération des formations et de l'occupation du sol, a permis une amélioration significative du niveau de connaissances concernant la question de la contamination des eaux par la CLD.

Enfin, **certaines règles d'optimisation du réseau de suivi qualité des eaux peuvent être définies sur la base des résultats présentés.** Par exemple, dans le cas des formations géologiques récentes (comme le cas de Pérou-Pères), il apparaît qu'un suivi unique des eaux de surface à l'exutoire du bassin peut suffire à estimer la gamme de variabilité du niveau de la contamination à l'échelle du bassin. Un tel suivi n'est par contre pas suffisant dans le cas de bassins situés sur des formations anciennes (comme le Galion), où les unités hydro(géo)logiques sont plus petites et plus compartimentées.

Dans les deux cas, l'observation de plus fortes contaminations des eaux souterraines comparativement aux eaux de surface du réseau hydrographique principal, montrent le besoin d'étendre systématiquement le suivi qualité aux eaux souterraines pour assurer un contrôle optimal sur les processus en jeu. Dans une optique de gestion de la ressource, il faut également noter que l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre dans ce projet est une méthodologie efficace pour identifier les aquifères non contaminés des bassins cultivés (ayant des temps de résidence longs) ; ceux-ci pouvant se substituer aux captages en rivière qui apparaissent plus vulnérables lorsqu'ils sont situés au sein de la partie cultivée.

9 Bibliographie

Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F., Beyerle, U., Kipfer, R., 2000. Paleotemperature reconstruction from noble gases in groundwater taking into account equilibrium with entrapped air. *Nature* 405, 1040–1044

Aeschbach-Hertig W, Beyerle U, Holocher J., Peeters F. (2002). Excess air in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. *Study Of Environmental Change Using Isotope Techniques* ,IAEA, VIENNA, 2002 , IAEA-CSP-13/P, p174-183.

Banner JL; Musgrove M; Capo, RC (1994) Tracing ground-water evolution in a limestone aquifer using Sr isotopes: Effects of multiple sources of dissolved ions and mineral-solution reactions, *Geology*, 22(8):687-690.

Bauer S., Fulda C., Schäfer W. (2001) - A multi-tracer study in a shallow aquifer using age dating tracers ^3H , ^{85}Kr , CFC-113 and SF₆ — Indication for retarded transport of CFC-113, *J. Hydrol.* 248 (2001), pp. 14–34.

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

Beyerle, U., J. Rueedi, M. Leuenberger, W. Aeschbach-Hertig, F. Peeters, R. Kipfer, and A. Dodo (2003), Evidence for periods of wetter and cooler climate in the Sahel between 6 and 40 kyr BP derived from groundwater, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1173, doi:10.1029/2002GL016310, 4.

Bézèlques-Courtades S. et S. Bés-de-Bèrc (2007) – Inventaire des sources thermales de Guadeloupe. RP-55060-FR. 114 p., 25 ill., 5 ann

Boudon, G., Dagain, J., Semet, M.P. et Westercamp, D., 1987. Carte géologique 1:20 000 du massif volcanique de la Soufrière (Département de la Guadeloupe, Petites Antilles). BRGM, Paris.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Pirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE*, 293-302.

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

Briquet JP. 2013. Mise en place de bassins versants instrumentés en Guadeloupe et Martinique. Rapport d'installation des équipements hydrologiques. Fort-de-France : IRD, HSM, 26p + annexes.

Bu X., Warner M.J. (1995). Solubility of chlorofluorocarbon 113 in water and seawater, *Deep-Sea Res.* 42 7, pp. 1151–1161.

Bullister J.L., Wisegarver D.P. & Menzia F.A., (2002) - The solubility of sulphurhexafluoride in water and seawater, *Deep-Sea Res I* 49, pp. 175–187.

Busenberg, E., Plummer, L.N., 2000. Dating young groundwater with sulphurhexafluoride – Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride. *Water Resource Research* 36, 3011–3030

Busenberg E., Weeks E., Plummer L. et Bartholemey R. (1993) - Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) and distribution of chlorofluorocarbons in the unsaturated zone,

snake river plain aquifer, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations 93-4054, 47p

Cabidoche, Y.-M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., Sansoulet, J. 2009. Long term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue contents. *Environmental Pollution*, 157: 1697-1705

Cabidoche YM, Lesueur-Jannoyer M. 2011. Long term pollution of soils in French West Indies: how to manage chlordecone contamination? *Innov Agron*, 16:117–33.

Cabidoche Y.-M., Lesueur-Jannoyer M., 2012. Contamination of Harvested Organs in Root Crops Grown on Chlordecone-Polluted Soils, *Pedosphere* 22(4): 562–571.

Charlier J.-B., 2007. Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2, 246p.

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., P. Cattan, M. Voltz, and R. Moussa, 2009. Transport of a nematicide in surface and ground waters in a tropical volcanic catchment. *Journal of Environmental Quality*, 38:1031–1041.

Charlier J.-B., P. Lachassagne, B. Ladouche, P. Cattan, R. Moussa, and M. Voltz, 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: a multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology*, 398:155–170.

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

Chery L. (2006) – Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthodologie de caractérisation des états de référence français.

Colmet-Daage F. (1969) Carte des sols des Antilles (Guadeloupe - Martinique). ORSTOM, Antilles.

Cook, P.G., Solomon, D.K. (1995) - The transport of atmospheric trace gases to the water table: Implications for groundwater dating with chlorofluorocarbons and Krypton85. *Water Resour. Res.*, Vol. 31, 263-270

Cook, P.G., Solomon, D.K., Plummer, L.N., Busenberg, E., Schiff, S.L. (1995) - Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer, *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 3, 425-434

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

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J., 1992. Testing design and analysis. Oilfield and analysis. 28-45.

Desprats J.F., Pierre Léandre C., Symphor.T. (2013) Suivi et mise à jour 2014 du SIG sur la contamination des sols de Guadeloupe et de Martinique par le chlordécone. Rapport final . BRGM/RP-62871-FR

Devault D., Laplanche C., Pascaline H., Bristeau S., Mouvet C., Macarie H. (2014). Comparaison des rapports massiques 5b-hydro-chlordécone / chlordécone dans la Kepone® technique, la Curlone® et les sols agricoles de Martinique analysés pour la DAAF 972. 44e congrès annuel du Groupe Français des Pesticides (GFP), Lamentin (Martinique) du 26 au 29 mai 2014 (video disponible sur <http://www.manioc.org/fichiers/V14188>).

- 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, 89p.
- Dumon A.**, (2010) – Surveillance de l'état chimique des masses d'eau souterraine de la Guadeloupe au titre de la DCE – Année 2009. BRGM/RP-58184-FR, 43 p., 17 ill., 2 ann.
- Faybishenko, B.A.** (1995). Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. *Water Resources Research* 31: doi: 10.1029/95WR01654. issn: 0043-1397.
- Gourcy L., Baran N., Vittecoq B.** (2009): Improving the knowledge of pesticide and nitrate transfer processes using age-dating tools (CFC, SF6, 3H) in a volcanic island (Martinique, French West Indies). *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 108, Issue 1, p. 107-117
- Hantush, M.S.**, 1964. Hydraulics of wells. In: Chow V.T. (Ed.), *Advances in Hydroscience*, vol. 1. Academic Press New York, N.Y.,
- Heaton, T.H.E., Vogel, J.C.**, 1981. "Excess air" in groundwater. *Journal of Hydrology* 50, 201–216.
- Hunt, B. and Scott D.**, 2007. Flow to well in a two-aquifer system. *J. of Hydrologic Engineering*, 146-155.
- Janniche, G.S. , Lindberg, E., Mouvet, C., Albrechtsen H. J.** (2010). Mineralization of isoproturon, mecoprop and acetochlor in a deep unsaturated limestone and sandy aquifer. *Chemosphere*, 81, 823-831
- Kulongoski, J.T., Hilton, D.R., and E.T. Selaolo**, (2004). Climate variability in the Botswana Kalahari through the Last Glacial Period, *Geophysical Research Letter*, 31: L10204.
- Lesueur Jannoyer M., Cattan P., Monti D., Saison C., Voltz M., Woignier T., Cabidoche Y.-M.** (2011). Chlordécone aux Antilles : évolution des systèmes de culture et leur incidence sur la dispersion de la pollution *Agronomie, Environnement et Société*, Vol 2 (<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>)
- Maloszewski P., Zuber A.**, (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I-models and their applicability, *Journal of Hydrology*, 57, (3-4), pp. 207-231.
- Plet J.** (2012) Comment sélectionner les sites d'un bassin versant à instrumenter pour un suivi des processus de transfert de la chlordécone dans les sols et vers les eaux ? Cas du bassin versant de la rivière du Galion, en Martinique. Rapport de stage M2 ISTOM, CIRAD Martinique, 102p.
- Oster, H., Sonntag, C., Munnich, K.O.**, 1996. Groundwater age dating with chlorofluorocarbons. *Water Resource Research* 32 (10), 2989–3001.
- Plummer L.N. et Friedman L.C.** (1999) - Tracing and dating young ground water, *USGS Fact Sheet*, 134-99
- Rad R., Allègre C.J., Louvat P.** (2007) – Hidden erosion on volcanic islands. *Earth and Planetary Science* 262, 109-124.
- Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias.** 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*. 17: 589–600.
- De Reynal de Saint-Michel, A.**, 1966. Carte géologique à l'échelle 1:50 000 du département de la Guadeloupe - Feuilles de Basse-Terre et des Saintes. Service de la carte géologique de la France, Paris.
- Russell, A.D., Thompson, G.M.**, (1983) Mechanism leading to enrichment of the atmospheric fluorocarbons CCl3F and CCl2F2 in groundwater, *Water Resour. Res.* 19: 57–60

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

Scholl, M. A., J. B. Shanley, J. P. Zegarra, and T. B. Coplen (2009), The stable isotope amount effect: New insights from NEXRAD echo tops, Luquillo Mountains, Puerto Rico, *Water Resour. Res.*, 45, W12407, doi:10.1029/2008WR007515

Shlumberger. 2002. Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Spane F.A. and Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

Trouillefou, C., 2007. Contribution à l'élaboration du diagnostic du bassin versant de la rivière Pérou selon la démarche CORPEN., GREPP, DIREN, CIRAD, Basse Terre.

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

Volk, C.M., et al., (1997) Evaluation of source gas lifetimes from stratospheric observations, *J. Geophys. Res. Atmosphere* 102 D21, 25543–25564

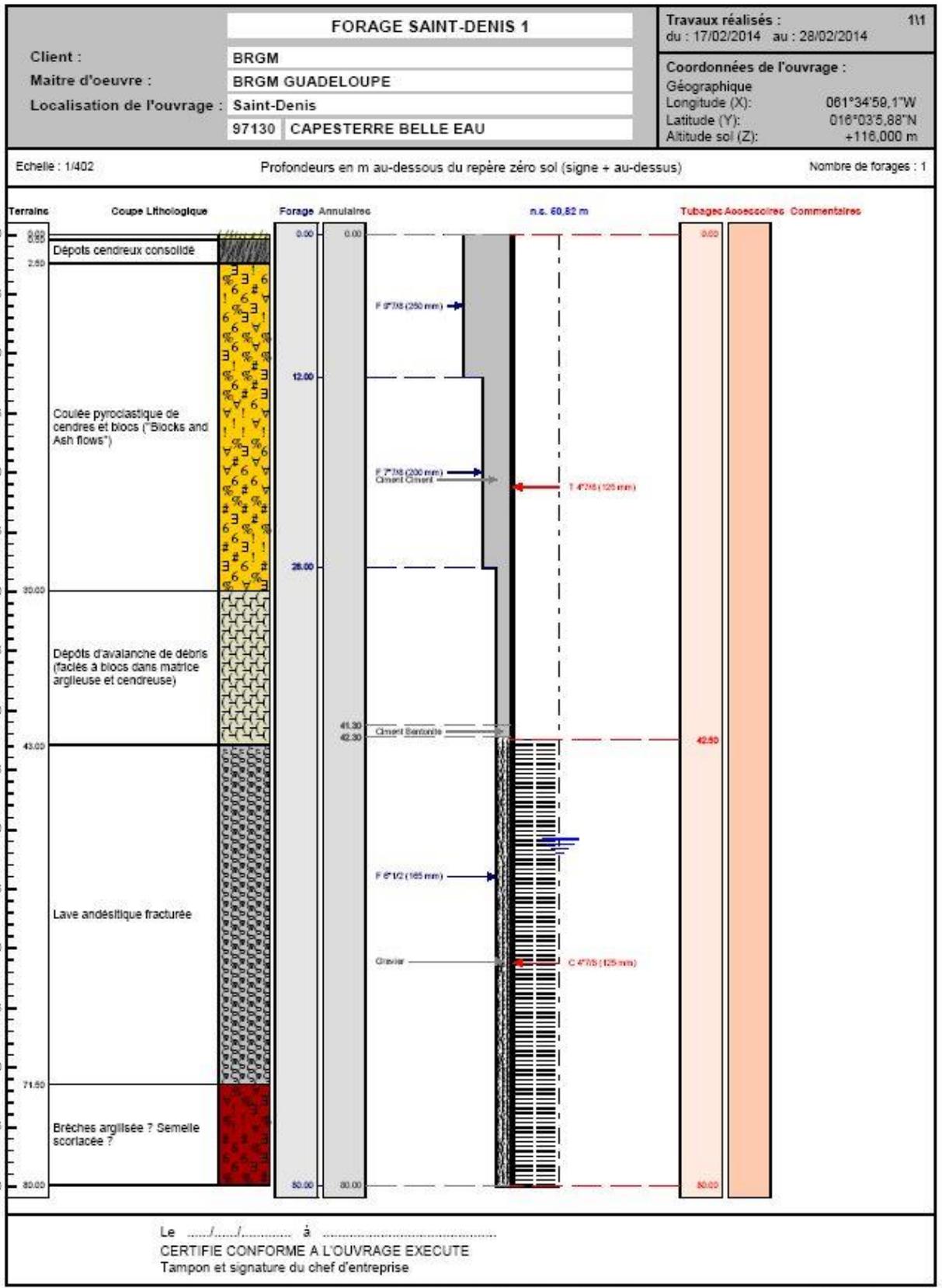
Warner M.J., Weiss R.F. (1985) - Solubilities of chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater: *Deep-Sea Res.* 32 1485–1497.

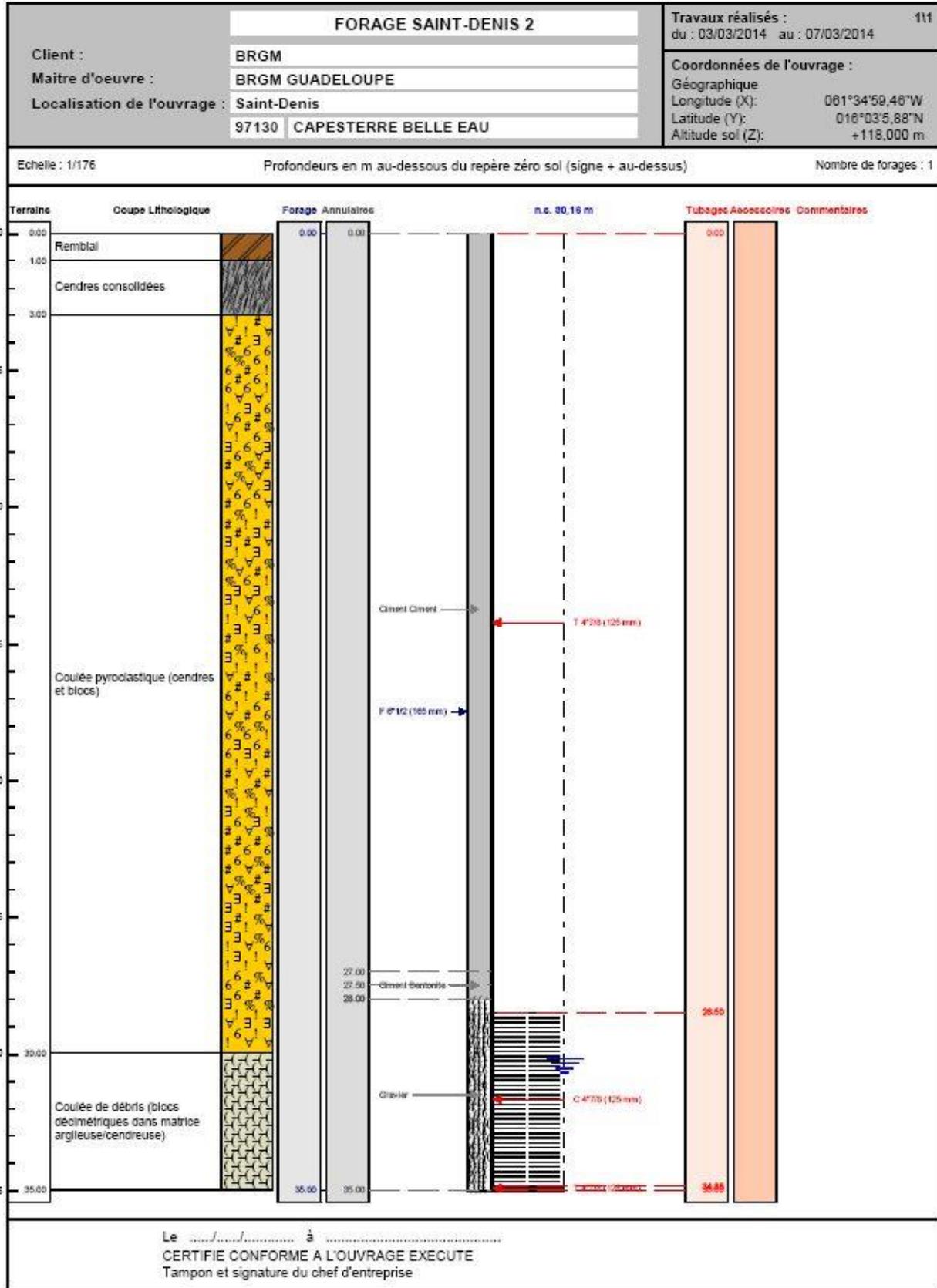
White R.S., Dupré B. (1986) – Sediment subduction and magma genesis in the Lesser Antilles; isotopic and trace element constraints. *Journal of Geophysical Research* 6, 5927-5941.

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

Annexe 1

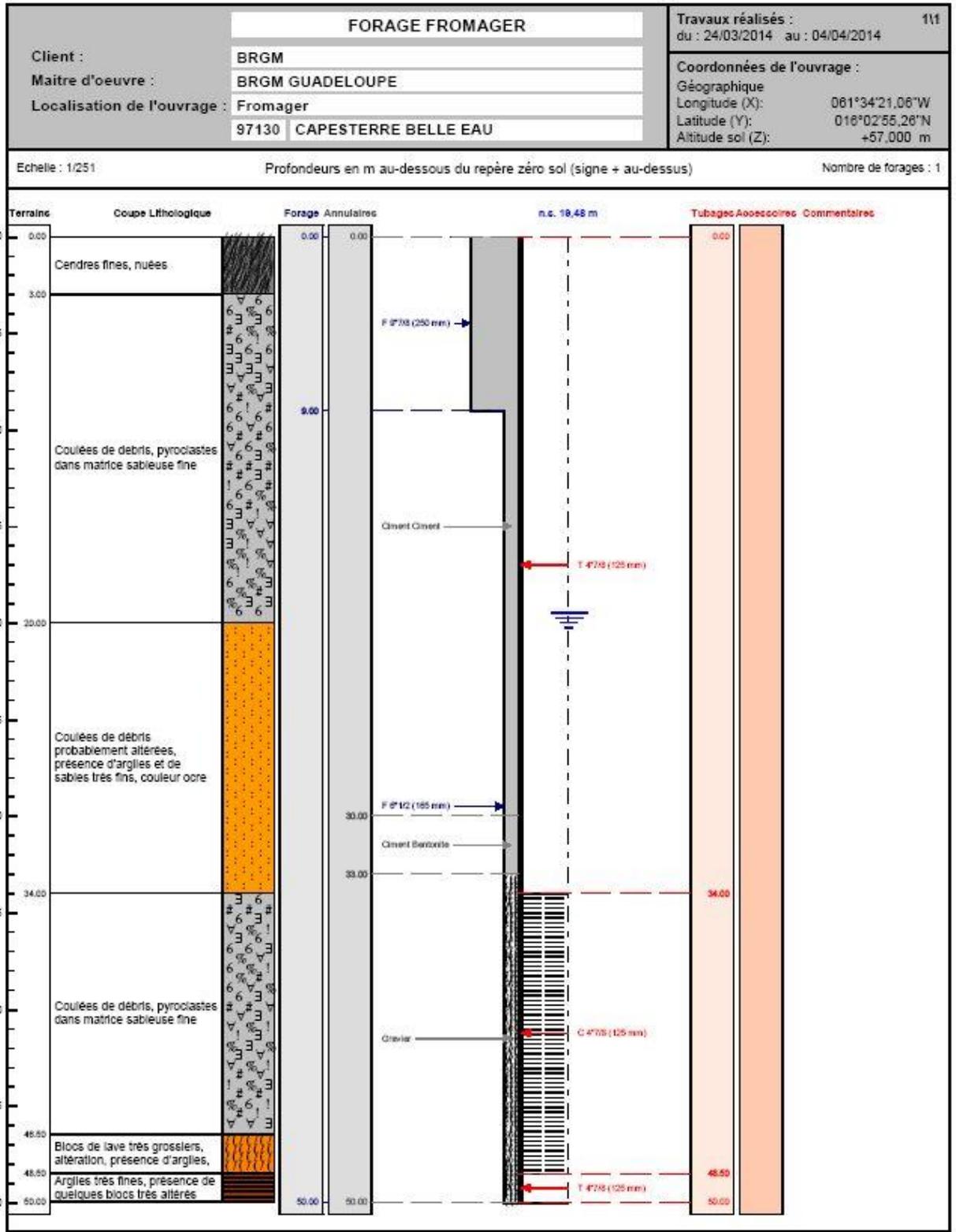
Coupes géologiques et techniques des forages implantés sur OPA-GUA





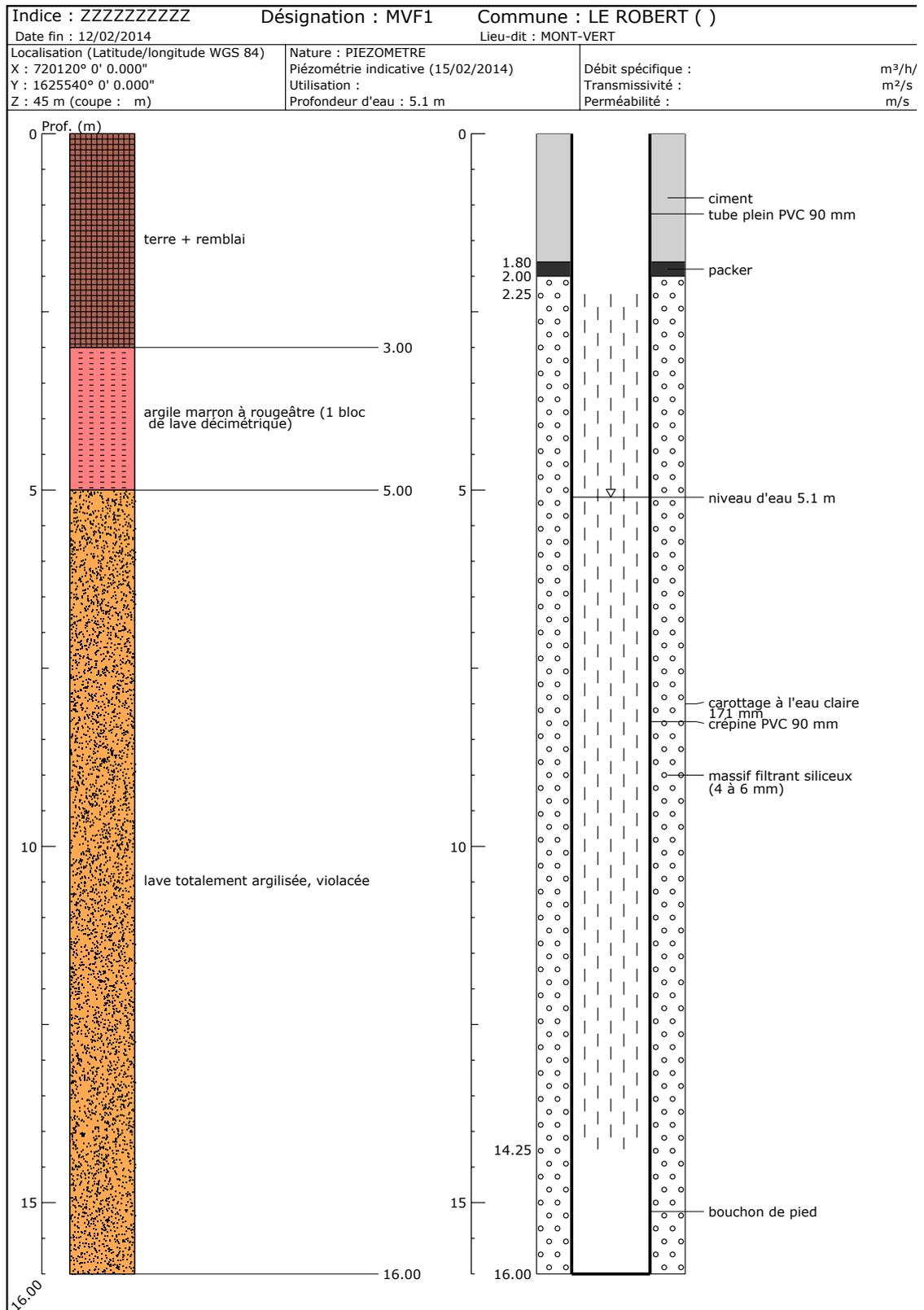
Géographique Long.: 061°34'59,46"W Lat.: 016°03'5,88"N Alt.: +118,000 m

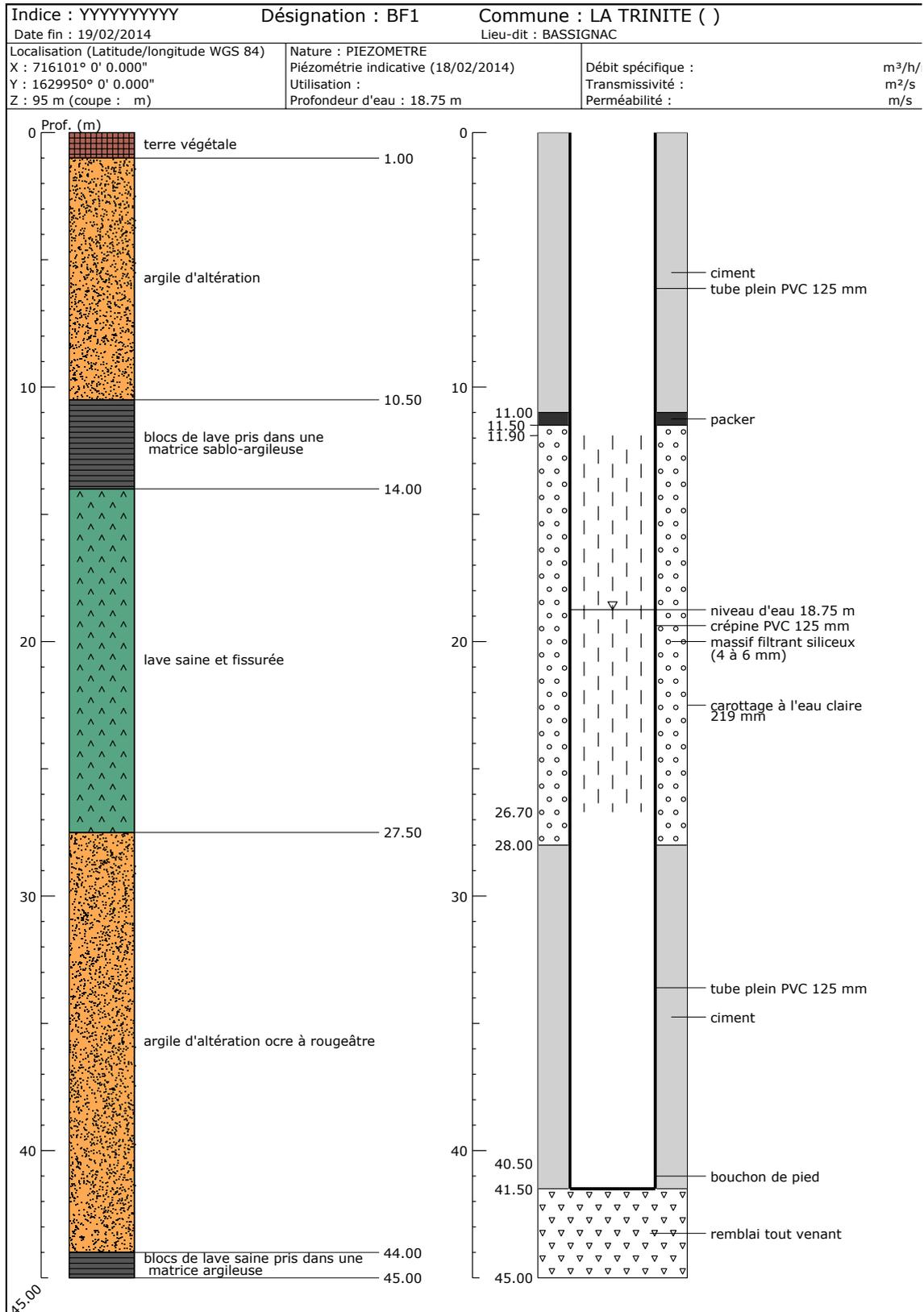
PAGE: 3

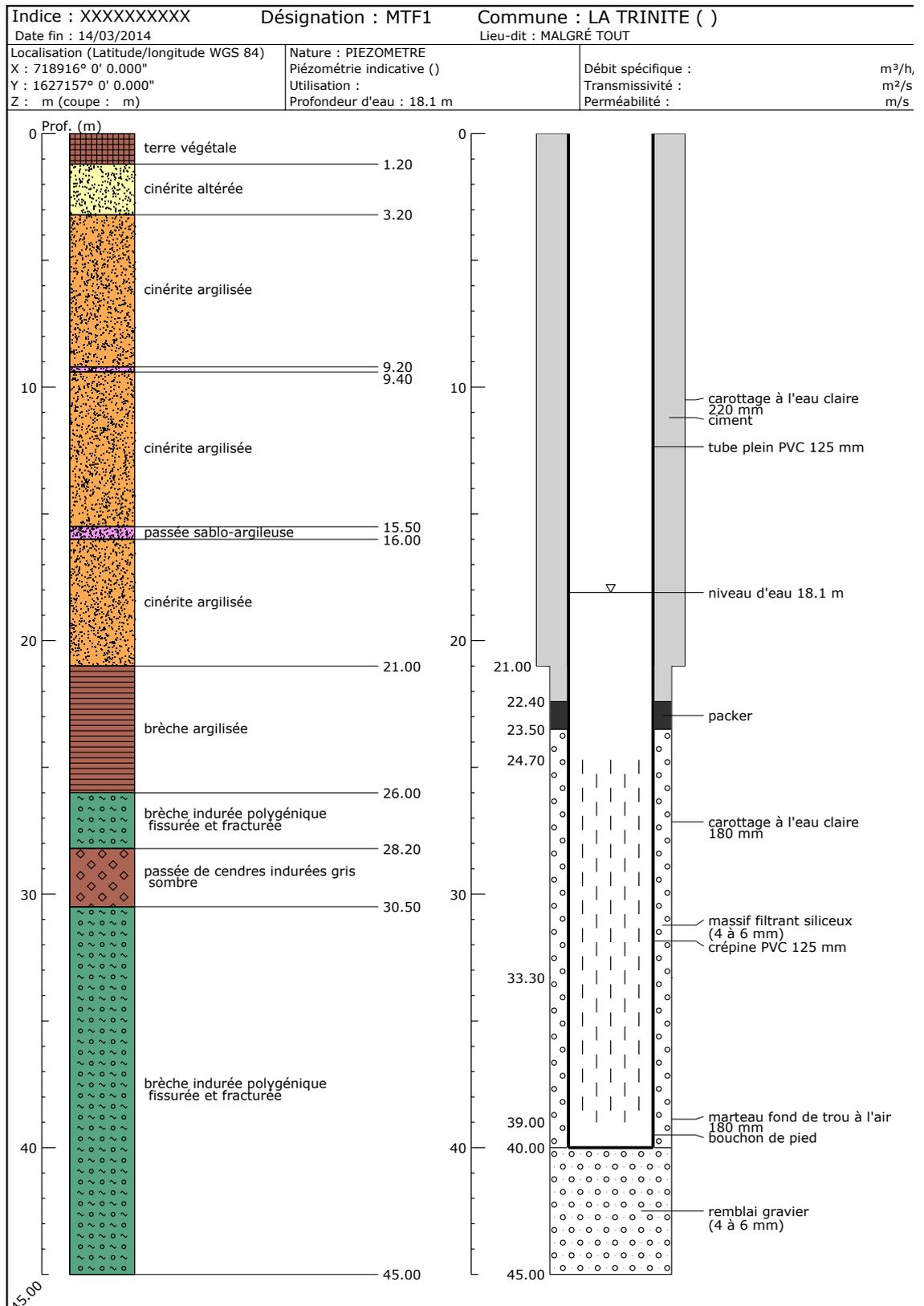


Annexe 2

Coupes géologiques et techniques des forages implantés sur OPA-MAR







Annexe 3

Tableau récapitulatif des analyses chimiques, isotopiques et de CFC et SF₆ sur OPA-GUA

CHLOR-EAU-SOL - Contamination par la chlordécone des eaux des bassins pilotes antillais

ID	NOM	X	Y	Date	CE	T	pH	O2	Eh	Ca	Mg	Na	K	NH4	CO3	HCO3	Cl	NO3	SO4	PO4	NO2	F	B	Fe	SiO2	Sr	CO D	87Sr/86Sr	dD vs SMO W ‰	d18O ‰ vs SMO W	ID flacon CFC/SF6	SF6	±	CFC-12	±	CFC-11	±	CFC-113	±	CLD	CLD 5B-hydro	Reference				
		WGS84	WGS84	AAAA/MM/JJ	µs/cm à 25°C	°C	(-)	mg/l	mV	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l					pmol/l	µg/l	µg/l												
A1	Riv_St_Denis_cote_060m	652276.6	1774351.5	2012/06/05	145	26.6	7.32			18.50	4.70	12.00	2.80		0.00	76.00	13.30	8.30	6.70						62.70																				OPA-C	
A2	Riv_Perou_cote_270m	648266.0	1775787.0	2014/02/20	48.6	20.5	6.6	9.43	198	3.00	0.90	4.20	0.00	0.00	0.00	10.00	6.30	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00		0.00	14.90	9.66	1.20	0.704808	-1.40	-2.10												0.00	0.00	CHLOR-EAU-SOL		
A3	Riv_Perou_cote_225m	648593.0	1775931.0	2012/06/05	61.5	23.7	7.7			6.30	1.90	6.30	0.80		0.00	32.00	6.60	0.00	2.30						33.80	24.90		0.704682	-5.72	-1.97												0.27	0.00	OPA-C		
A4	Riv_Perou_cote_225m	648593.0	1775931.0	2013/03/13						6.40	1.80	6.60	0.90		0.00	32.00	6.50	0.60	5.20						32.60		3.80		-5.69	-2.49											0.13	0.00	OPA-C			
A5	Riv_Perou_cote_107m	650732.0	1775505.0	2012/06/05	71.9	28.1	7.4			5.30	1.70	6.00	0.70		0.00	25.00	6.40	0.00	4.50						30.80	19.60		0.704682	-6.24	-2.09											0.34	0.00	OPA-C			
A6	Riv_Perou_cote_107m	650732.0	1775505.0	2013/03/13						7.00	2.00	7.00	0.90		0.00	34.00	7.70	2.30	5.60						32.20		0.70		-6.65	-2.56											0.00	0.00	OPA-C			
A7	Riv_Perou_cote_015m	653302.0	1775492.0	2012/06/05	68	26.6	7.55			6.60	2.10	7.00	0.90		0.00	29.00	8.10	0.60	5.70						33.80	24.40		0.704701	-6.12	-2.07											0.92	0.01	OPA-C			
A8	Riv_Perou_cote_015m	653222.5	1775467.7	2013/03/13						9.10	2.80	9.00	1.30		0.00	42.00	10.00	4.60	5.60						39.50		0.90		-6.20	-2.40												2.17	0.06	OPA-C		
A9	Riv_Perou_Bras_Duflou_cote_550m	646663.0	1776566.0	2013/03/13						10.00	2.60	9.40	1.00		0.00	56.00	7.50	0.00	0.90						50.00		0.70		-5.94	-2.46												0.00	0.00	OPA-C		
A10	Riv_Perou_Bras_Duflou_cote_383m	647050.0	1776366.0	2012/06/06	46.8	23	6.71			4.00	1.30	5.30	0.00		0.00	22.00	5.80	0.00	1.10						24.70	20.00		0.704783	-5.26	-1.93												0.00	0.00	OPA-C		
A11	Riv_Peres_cote_360m	647822.0	1774941.0	2012/06/05	79.4	24.3	7.6			9.90	2.70	7.80	0.80		0.00	47.00	7.40	1.50	1.70						41.10	39.50		0.704547	-6.33	-2.02													0.95	0.00	OPA-C	
A12	Riv_Peres_cote_360m	647822.0	1774941.0	2013/03/13						9.90	2.80	8.40	0.60		0.00	54.00	7.60	0.60	1.50						42.90		2.00		-7.54	-2.59													1.30	0.02	OPA-C	
A13	Riv_Peres_cote_285m	648645.0	1775259.0	2012/06/05	110.8	24.1	7.3			15.50	3.10	7.90	1.60		0.00	50.00	9.70	3.80	11.60						40.80	52.40		0.704685	-5.55	-1.93													2.01	0.01	OPA-C	
A14	Riv_Peres_cote_285m	648645.0	1775259.0	2013/03/13						15.90	3.50	9.30	1.60		0.00	41.00	10.50	3.80	27.50						48.30		0.90		-6.05	-2.42													5.09	0.02	OPA-C	
A15	Riv_Peres_cote_155m	652276.6	1774351.5	2012/06/05	119.2	27	7.6			14.50	3.80	9.20	2.30		0.00	55.00	10.70	5.40	10.00						51.80	51.30		0.704582	-5.27	-1.79														2.80	0.02	OPA-C
A16	Riv_Peres_cote_155m	652276.6	1774351.5	2013/03/15						15.40	4.30	11.00	2.20		0.00	62.00	11.70	6.60	11.80						60.00		1.00		-5.64	-2.26														5.17	0.10	OPA-C
A17	Riv_Peres_cote_075m	651986.0	1774621.8	2012/06/05	136.4	26.4	7.2			17.10	4.40	10.80	2.90		0.00	66.00	13.90	7.10	9.00						57.40	53.90		0.704732	-5.77	-1.80														4.06	0.02	OPA-C
A18	Riv_Peres_cote_075m	651986.0	1774621.8	2013/03/16						18.30	5.20	12.70	3.00		0.00	74.00	16.90	10.20	8.90						64.10		1.00		-6.56	-2.26														4.10	0.14	OPA-C
A19	Riv_Maillard_cote_130m	650727.0	1776478.0	2012/06/06	87.5	28.6	7.1			8.30	2.40	9.10	1.60		0.00	36.00	11.50	7.50	1.20						35.60																					OPA-C
A20	Rav_Féfé_cote_318m	647945.0	1776293.0	2012/06/06	99.9	27.8	6.39			15.60	2.20	6.30	1.60		0.00	54.00	8.90	6.10	1.90						29.70	35.90		0.705876	-5.55	-1.82														0.77	0.00	OPA-C
A21	Rav_Féfé_cote_318m	647945.0	1776293.0	2013/03/13						13.60	2.20	7.40	1.50		0.00	54.00	9.30	3.30	2.10						33.70		1.00		-6.29	-2.32														0.41	0.00	OPA-C
A22	Rav_Féfé_cote_318m	647945.0	1776293.0	2013/04/22	107.5	24	6.53			14.20	1.60	4.80	1.70		0.00	42.00	8.20	6.80	2.50						17.20	28.10	0.60	0.706419																1.62	0.02	CHLOR-EAU-SOL
A23	P3	647435.0	1776489.0	2013/04/22	160.5	23.6	5.74			25.40	1.70	3.20	1.30		0.00	29.00	9.40	25.20	20.50						6.80	29.40		0.707331																		CHLOR-EAU-SOL
A24	P1	647459.0	1776530.0	2013/04/22	82.1	24.4	5.28			5.60	2.20	3.70	2.80		0.00	8.00	13.80	10.10	2.20						12.40	32.80		0.705999																	CHLOR-EAU-SOL	

CHLOR-EAU-SOL - Contamination par la chlordécone des eaux des bassins pilotes antillais

A5 2	Scé_Perou	653415. 7	1774667. 5	2013/04/23	269	27. 6	6.3			24.4 0	8.9 0	18.4 0	3.5 0		0.00	97.00	19.6 0	19.5 0	17.9 0					91.5 0	61.8 0	0.00	0.704558	-9.40	-2.30	P519	0.001 8	0.000 2	3.6	0.2	45	14	0.2	0.05	12.0 1	0.16	CHLOR-EAU-SOL
A5 3	Scé_Fefe	647963. 0	1776112. 0	2012/06/06	48.9	26	6.4 8			4.70	1.4 0	5.40	0.6 0		0.00	26.00	5.80	0.00	1.10					29.8 0	19.9 0		0.704559	-6.06	-2.08									0.00	0.00	OPA-C	
A5 4	Scé_Fefe	647963. 0	1776112. 0	2013/04/23	58.1	22. 2	6.4 5			4.60	1.3 0	5.50	0.7 0		0.00	22.00	5.60	0.00	1.10					30.4 0	18.4 0	0.60	0.704493	-7.90	-2.60	P313	0.001 8	0.000 2	1.7	0.1	2.7	0.3	0.25	0.05	0.04	0.00	CHLOR-EAU-SOL

Annexe 4

Tableau récapitulatif des analyses chimiques, isotopiques et de CFC et SF₆ sur OPA-MAR

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar

94300 Vincennes
01 45 14 36 00

www.onema.fr

BRGM
DAT/Martinique
Lot. Miramar
Pointe des Nègres
97200 Fort-de-France
05 96 71 17 70
www.brgm.fr