



CHLOR-EAU-SOL – CIRAD

(Convention ONEMA – ODE 972 2013 / Action n°5)

Contamination par la chlordécone dans les eaux
superficielles et les sols des bassins versants pilotes
guadeloupéen et martiniquais

*Contamination des eaux par la chlordécone aux Antilles (Observatoire
OPA-C)*

Rapport de synthèse

Avril 2014

J.Plet, M. Lesueur-Jannoyer, P. Cattan



REMERCIEMENTS

Nous remercions dans un premier temps les Offices de l'eau de Martinique et Guadeloupe ainsi que l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques pour leur soutien financier à ce projet.

Nous remercions également l'ensemble des chercheurs, ingénieurs et techniciens pour les échanges et les discussions qui ont permis la mise en place de ce projet et l'obtention des résultats présentés ci-dessous.

Nous remercions également les services de la DEAL pour l'accès aux données hydrologiques de la station aval de la rivière Galion et les acteurs du bassin.

TABLE DES MATIERES

Table des matières	3
Table des illustrations	5
Table des abréviations.....	6
Remerciements	3
Introduction.....	7
Tâche 1 : caractérisation de la contamination des sols des BV pilotes	8
1. En Martinique, caractérisation de la contamination des sols du BV du Galion	8
2. En Guadeloupe, caractérisation de la contamination des sols du BV « Pérou-Pères ».....	14
Tâche 2 : caractérisation de la contamination des eaux superficielles continentales des BV pilotes.....	18
1. Basses eaux, cas de la Martinique	18
2. Basses eaux, cas de la Guadeloupe	23
3. Période de crue, cas de la Martinique	24
4. Période de crue, cas de la Guadeloupe	27
Tâche 3 : propositions de localisation des sites et des protocoles de suivi	29
1. L'instrumentation des BV.....	29
2. Propositions de protocoles de suivi complémentaires	31
Tâche 4 : bancarisation des données.....	33
Conclusion.....	34
Bibliographie.....	35
Table des annexes	38

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Cartes

Carte 1 : Les risques de contamination des sols du BV du Galion par le CLD, selon l'historique de l'occupation des sols en bananeraie.....	8
Carte 2 : Exemple de carte restituée pour présenter les résultats des teneurs en chlordécone dans les sols d'une exploitation agricole	13
Carte 3 : Résultats de la contamination des cours d'eau par la chlordécone, campagne basses eaux 2012.....	19
Carte 4 : Résultats de la contamination des cours d'eau par la chlordécone, campagne basses eaux 2013.....	21
Carte 5 : Corrélation entre présence de sols contaminés et pollution des cours d'eau	22
Carte 6 : Localisation des stations de mesures OPA-C sur le BV du Galion	30

Graphiques

Graphique 1 : comparaison de deux profils de contamination des sols sur la profondeur 0-90 cm	11
Graphique 2 : Profil de contamination de la rivière Galion, en basses eaux 2013 (Bazizi, 2013).....	20

Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des parcelles analysées sur le BV du galion.....	10
--	----

TABLE DES ABREVIATIONS

BV : Bassin Versant

CLD : chlordécone

COFRAC : Comité Français d'ACcréditation

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DEAL : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

LDA 26 : Laboratoire Départemental d'Analyse de la Drôme

LDA 972 Laboratoire Départemental d'Analyse de la Martinique

MES : Matières En Suspension

ONEMA : Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques

OPA-C : Observatoire des Pollutions aux Antilles, cas de la Chlordécone

SIG : Système d'Information Géographique

SAFER : Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural

ss : sol sec

INTRODUCTION

Pour réduire le risque d'exposition à la chlordécone (CLD) pour les usages de l'eau, il est indispensable de connaître les facteurs influençant les niveaux de contamination et leur évolution. Dans ce but, le projet OPA-C (Observatoire des Pollutions aux Antilles, cas de la chlordécone), piloté par un consortium BRGM-CIRAD-INRA-IRD, a initié la mise en place de deux bassins versants pilotes, un site en Martinique, le bassin versant de la rivière Galion, et un site en Guadeloupe, le bassin versant des rivières « Pérou-Pères ». Pour comprendre la forte variabilité spatiale et temporelle des teneurs en chlordécone mesurée ponctuellement dans les sols et les eaux superficielles et souterraines, ces sites sont complémentaires et représentatifs des usages et de la variabilité des systèmes pédologiques, géologiques et climatiques présents aux Antilles. Dans ces conditions, l'objectif est en partie de comprendre les processus de transfert de la chlordécone entre les sols et les eaux. Pour cela, le projet OPA-C a pris en charge l'instrumentation de ces deux BV pilotes, actuellement en cours de finalisation, selon une première caractérisation de ces territoires. Néanmoins il est nécessaire d'approfondir ces premiers travaux en orientant les études futures, plus fines à mener sur les mécanismes de transfert de la chlordécone et en précisant les dispositifs à installer sur chaque bassin. La convention entre le CIRAD et les Offices De l'Eau (ODE) qui ont notamment pour mission l'étude et le suivi des ressources en eau, consiste à soutenir et mener à bien ces travaux.

Ce projet se décline en quatre objectifs principaux :

- Tâche 1 : caractérisation de la contamination des sols des BV pilotes ;
- Tâche 2 : caractérisation de la contamination des eaux superficielles continentales des BV pilotes ;
- Tâche 3 : propositions de localisation et de priorisation des sites et des protocoles de suivi ;
- Tâche 4 : bancarisation des données.

Dans la suite de ce document, nous reprenons ces différents points en présentant les résultats d'analyse obtenus, les interprétations, les restitutions cartographiques et des propositions de dispositifs et protocoles de suivi complémentaires.

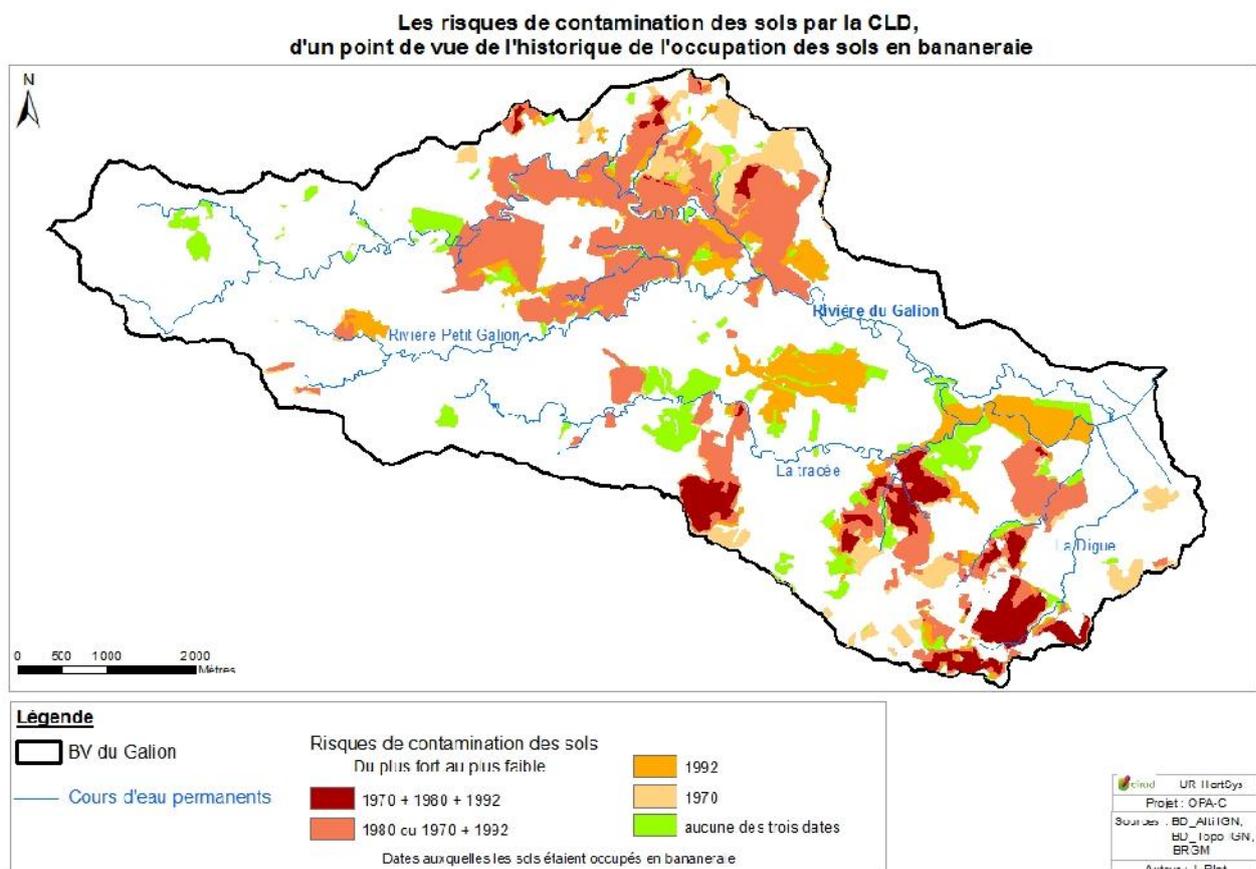
TACHE 1 : CARACTERISATION DE LA CONTAMINATION DES SOLS DES BV PILOTES

Pour connaître les niveaux de contamination par la chlordécone des BV pilotes et comprendre les processus de transfert de cette molécule vers l'eau, il est important dans un premier temps de localiser et caractériser les stocks de polluant présents dans les sols (identification des zones contributrices à la pollution de la rivière, quantification des niveaux de pollution).

1. En Martinique, caractérisation de la contamination des sols du BV du Galion

a. Rappel sur les risques de contamination des sols du BV du Galion

Tout d'abord une carte des risques de contamination des sols du BV du Galion a été établie (Carte 1, Plet, 2012). Cette carte permet une première approche globale de la localisation de la contamination ainsi que de la hiérarchisation du niveau de risque de pollution au sein d'une même exploitation agricole ayant cultivé de la banane de 1972 à 1993, période d'utilisation de la chlordécone.



Carte 1 : Les risques de contamination des sols du BV du Galion par le CLD, selon l'historique de l'occupation des sols en bananeraie

Nous constatons d'après cette carte, que les stocks de contamination sont principalement localisés dans les sols des parties médiane et aval du BV tandis que l'amont semble moins concerné par cette pollution.

Cependant, cette carte des risques ne se base que sur des hypothèses et probabilités et n'apporte aucune information quantitative.

b. Parcelles prélevées et analyses de sols : protocole

Il est donc indispensable de réaliser des prélèvements et des analyses de sol pour valider cette carte et affiner les connaissances sur le niveau de contamination des sols du BV.

Un plan d'échantillonnage des parcelles à analyser a donc été réalisé. Ce plan a été construit selon le niveau de risque de contamination présent sur la parcelle, ses caractéristiques pédologiques et son occupation du sol d'après la méthode Plet, 2012.

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur les parcelles des exploitations agricoles présentes sur les sous bassins versants sur lesquels un intérêt particulier pour la mise en place d'un dispositif de suivi est soulevé (voir annexe 1). Nous élargirons dans un second temps à toutes les zones qui révèlent un fort risque de contamination ou pouvant contribuer à une forte contamination des cours d'eau même en dehors des sous BV d'intérêt.

Sur les parcelles sélectionnées, le protocole de prélèvement de sol a été effectué selon la méthode Achard R *et al.*, 2003. A savoir, des aliquotes de 20 points par hectare répartis de manière homogène selon un quadrillage d'environ 20 m², ont été prélevés à la tarière. Chaque aliquote est séché à l'air puis broyé et tamisé à 2 mm. Ces prélèvements sont réalisés sur les profondeurs 0-30 cm puis 30-60 cm. Et sur chaque exploitation, une parcelle est prélevée sur les horizons 0-10 cm, 10-30 cm 30-60 cm et 60-90 cm afin d'évaluer l'évolution du front de polluant dans le profil de sol et l'impact du travail du sol.

Les analyses dans chaque échantillon des teneurs en chlordécone et en chlordécone 5B-hydro (co-produit de la chlordécone) sont réalisées par le Laboratoire Départemental d'Analyse de la Martinique (LDA 972). Le LDA 972 est accrédité par le COFRAC (Comité Français d'Accréditation), son incertitude d'analyse est de 30 % et son seuil de quantification de 0,01 mg de CLD par kg de sol sec. Les analyses pour la matière organique, le pH, le phosphore, l'azote et le carbone sont effectuées au laboratoire SAS Laboratoire.

Chaque parcelle et chaque point de prélèvement est géo-référencé et intégré à une couche SIG.

Des enquêtes sont réalisées auprès des exploitations agricoles prélevées afin d'obtenir des informations qualitatives sur leurs stratégies d'exploitation, leurs orientations et évolutions passées et actuelles, leurs perspectives d'évolution, leurs

pratiques culturales, l'historique d'occupation des sols en bananeraie et l'utilisation de la chlordécone. Ces informations permettent d'évaluer l'intensification de l'exploitation et sa spécialisation (monoculture, diversification, pratiques phytosanitaires et travail du sol).

c. Parcelles prélevées et analyses de sols : résultats et restitutions

Prélèvements:

Au total, 5 exploitations agricoles ont été étudiées :

- 2 sur le sous BV de la Digue également identifié « G »,
- 1 sur le sous BV « P »,
- 2 sur le sous BV « R ».

(cf. ANNEXE 1 pour localiser les sous BV concernés sur le BV du Galion)

Le nombre de prélèvements a été déterminé pour chaque sous BV considéré et exploitation présente en fonction de la variabilité du niveau de risque de pollution, du type de sol, de la position sur la bassin et des cultures pour chaque parcelle.

Plus particulièrement, sur chaque exploitation, le nombre de parcelles analysées est :

- Sur l'exploitation A du sous BV de la Digue : 5 parcelles
 - o Risque élevé/ risque modéré/ risque faible pour ferrisol; risque élevé pour intergrade andosol-nitisol
- Sur l'exploitation B du sous BV de la Digue : 6 parcelles ont été prélevées dont une sur un profil de 0-90 cm,
 - o Risque élevé/modéré/faible sur 2 types de sol
- Sur l'exploitation C du sous BV « P » : 3 parcelles ont été analysées sur un profil 0-30 cm
 - o Même niveau de risque, même type de sol (andosol intergrade), située en amont, milieu et aval du sous bassin
- Sur l'exploitation D du sous BV « R » : 2 parcelles ont été analysées dont une sur un profil de 0-90 cm,
 - o Deux niveaux de risque pour un même type de sol (intergrade)
- Sur l'exploitation E du sous BV « R » : 1 parcelle a été analysée
 - o Niveau de risque faible sur parcelle de canne à sucre sur la profondeur 0-60 cm.

Sous BV	Exploitation	Parcelles analysées	Profondeur 0-60 cm	Profondeur 0-90 cm
La digue « G »	Exploitation A	5	4	1
	Exploitation B	6	5	1
Total	2	11	9	2
« P »	Exploitation C	3	3	0
Total	1	3	3	0
« R »	Exploitation D	2	1	1
	Exploitation E	1	1	0
Total	2	3	2	1
TOTAL	5	17	14	3

Tableau 1 : Récapitulatif des parcelles analysées sur le BV du galion

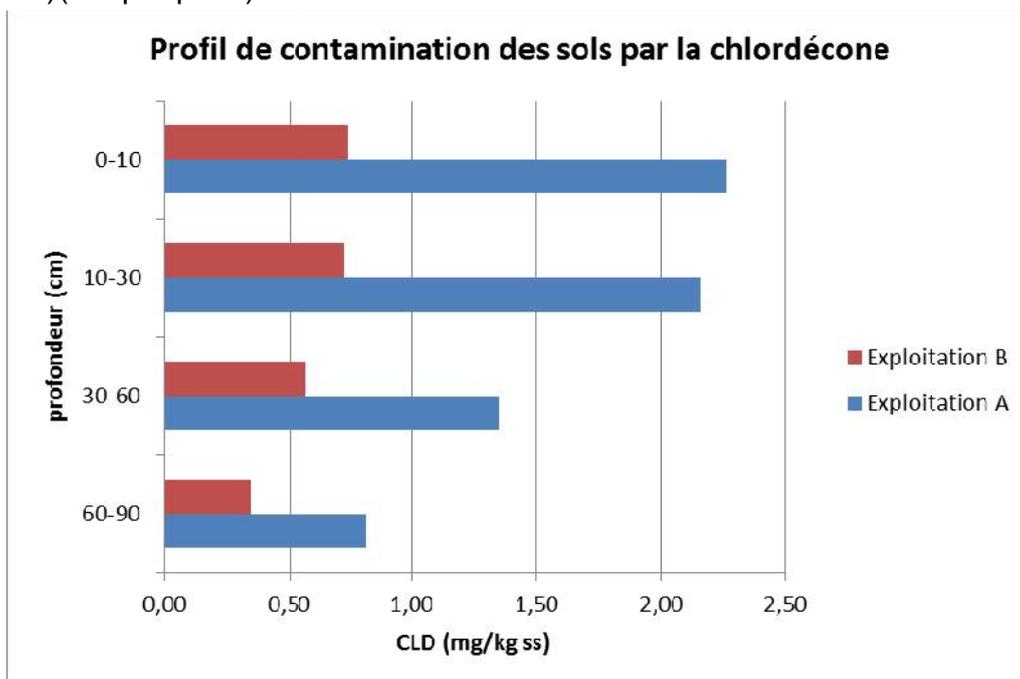
Résultats d'analyse chlordécone:

Sur les 17 parcelles analysées, 2 présentent une concentration moyenne en chlordécone sur la profondeur 0-60 cm inférieure à 0,01 mg de chlordécone / kg de sol sec et correspondent bien aux niveaux de risque faible. Pour 8 parcelles, cette concentration est comprise entre 0,1 et 1 mg de chlordécone / kg de sol sec (ss). 7 ont une concentration supérieure à 1 mg de chlordécone / kg de sol sec et correspondent bien aux niveaux de risque élevés.

La pollution par la chlordécone est présente sur les parcelles ciblées et correspond au niveau de risque identifié cartographiquement. Un stock de polluant significatif existe sur les zones enquêtées du BV du Galion. Ces résultats valident globalement la première approche établie par la carte des risques de contamination des sols qu'il est alors pertinent d'utiliser pour renseigner un plan d'échantillonnage complémentaire.

Nous constatons qu'il peut exister une forte variabilité entre les exploitations agricoles à priori liée à des différences de stratégies et de pratiques agricoles renseignées lors des enquêtes. Alors que cette variabilité est plus faible au sein d'une même exploitation (cas du sous bassin P).

Par ailleurs, sur les 3 profils de sol analysés sur la profondeur 0-90 cm, la concentration moyenne de pollution par la chlordécone est supérieure à 0,1 mg de CLD/kg de sol sec sur chaque horizon 0-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. La pollution est donc présente pour les horizons profonds du profil de sol, à des niveaux non négligeables. Selon les pratiques du travail du sol, la contamination de ces différents horizons est répartie de manière homogène (labours profonds et remaniement du sol intense) ou bien évolue selon un gradient plus marqué entre horizons de surface et horizon profond (>60cm) (travaux du sol moins fréquents)(Graphique 1).



Graphique 1 : Comparaison de deux profils de contamination des sols sur la profondeur 0-90 cm

Résultats d'analyse de sol:

Le pH est compris entre 5 et 6, et varie peu d'un horizon à l'autre, ce qui est une fourchette classique pour ces types de sol (nitisol, andosol, et intergrade andoso/nitisol).

Les taux de matières organiques varient de 1 à 4% avec des valeurs plus élevées pour les horizons de surface (1.8 à 4,2%) et plus faibles pour les horizons plus profonds (1.2 à 3.2% pour 30-60cm). Pour l'horizon 60-90cm, les valeurs sont proches de 1%.

Le rapport C/N est faible et compris entre 7.5 et 10.5, ce qui indique que la minéralisation de la matière organique n'est pas complète et que l'azote est disponible pour la croissance des cultures.

Bassin versant	Exploitation	Type de sol	Profondeur, cm	pH	% MO	C/N
G (La Digue)	A		0-30	4.78-5.08	2.5-2.9	8.74-9.24
			30-60	4.76-5.25	1.6-1.9	8.10-8.96
	B		0-30			
			30-60			
P	C	andosol	0-30	5.43-5.75	3.1-4.2	8.43-10.41
			30-60	5.48-5.81	2.6-3.2	8.80-9.99
R	D		0-30	5.26-5.57	1.8-2.3	8.91-10.07
			30-60	5.57-5.51	1.2-1.6	7.56-8.49
	E		0-30	5.71	3.0	9.93
			30-60	5.86	1.5	9.36

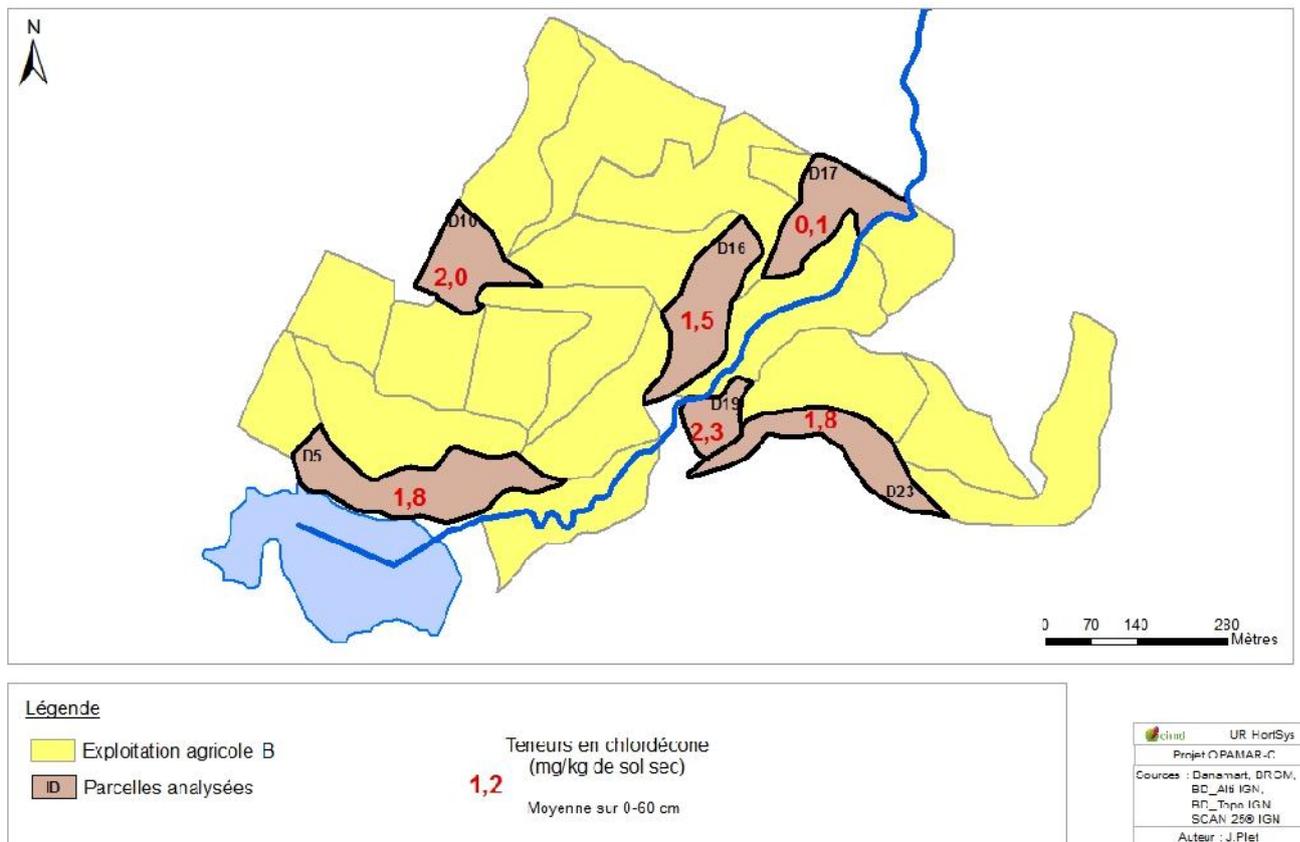
Restitution des résultats auprès des acteurs:

L'ensemble des résultats des teneurs en chlordécone et chlordécone 5B-hydro par échantillon et parcelle géoréférencée a été envoyé à la SAFER Martinique en novembre 2013.

A l'échelle de l'exploitation, ces résultats ont été cartographiés en présentant la moyenne de la concentration de chlordécone sur la profondeur 0-60 cm, représentant l'évaluation du stock global de polluant dans le profil de sol. Chaque exploitation et parcelle analysée a été relocalisée à l'échelle du sous BV et du BV.

Des comptes rendus contenant ces cartographies et les rapports d'analyse du LDA 972 ainsi qu'une présentation du projet global et une ouverture sur la contamination des eaux à l'échelle du BV et des fiches techniques, ont été remis à chaque exploitant dont les parcelles ont été prélevées.

Dans un souci de respect de l'anonymat de ces exploitants agricoles, nous ne présenterons ici qu'un exemple de cartographie à l'échelle de l'exploitation (Carte 2).



Carte 2 : Exemple de carte restituée pour présenter les résultats des teneurs en chlordécone dans les sols d'une exploitation agricole

d. Propositions des tâches futures à réaliser

Des contraintes climatiques ont retardé les prélèvements programmés sur le sous BV « D ». Trois parcelles seront à analyser courant 2014 pour compléter les niveaux de risque (fort et moyen) et les types de sol.

Des analyses complémentaires devront être réalisées en milieu de bassin pour le bassin du Galion afin de finaliser la cartographie de la pollution.

2. En Guadeloupe, caractérisation de la contamination des sols du BV « Pérou-Pères »

Contexte

En Guadeloupe, le site observatoire correspond au système de la rivière Pérou qui se situe dans le croissant bananier du sud de la Basse-Terre. Le bassin hydrogéologique s'étire sur une superficie d'environ 25 km² d'est en ouest sur le flanc oriental du massif volcanique de la Soufrière, et présente de fortes pentes de 20 à 50 %. Il inclut le cours d'eau principal de la rivière Pérou dont la contribution intéresse principalement le compartiment superficiel (sol et premiers mètres). De plus, la zone d'étude du bassin versant (le bassin topographique proprement dit) a été étendue à son bassin hydrogéologique supposé, c'est à dire au Sud jusqu'au cours d'eau de la rivière des Pères qui draine les formations profondes. Ceci est justifié d'une part car l'étude des contributions des nappes profondes à la rivière Pérou est rendue plus difficile en raison des dilutions par les eaux de l'amont, mais surtout du fait d'écoulements souterrains inter-bassins versants. Cette extension permet de prospecter le transport des polluants dans les 3 grands types de formations volcaniques présents aux Antilles : laves sur Pérou ; formations pyroclastiques sur Pérou et rivière des Pères ; débris et lahars jusqu'au littoral

Du point de vue des occupations du sol, 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).

Enfin le niveau de contamination a été suivi durant une année et varie de 0,2 à 2 µg l⁻¹ de CLD à l'exutoire de la rivière Pérou, mais atteint des valeurs supérieures à 10 µg l⁻¹ au niveau des sources.

Cet hydrosystème est étudié depuis le début des années 2000, sous différents aspects : étude du milieu humain ou physique donnant lieu à diverses publications et rapports : par exemple (Amoravain, 2000; Bonin and Cattan, 2006; Bonin and Cattan, 2009; Dulcire and Cattan, 2002; Dumon et al., 2009; Govindin, 2001; Jouve, 2010; Julien, 2000; Stephan, 2006; Tixier, 2000; Trouillefou, 2007). Une première conceptualisation du processus de pollution a été entreprise à petite échelle sur le bassin de Féfé (< 1 ha) qui est un sous-bassin du Pérou. Il a été particulièrement étudié du point de vue fonctionnement hydrologique et transfert de pesticides (Charlier, 2007; Charlier et al., 2008; Charlier et al., 2009a; Charlier et al., 2009b; Charlier et al., 2011; Charlier et al., 2009c; Charlier et al., 2006; Charlier et al., 2007). Tout récemment, la rivière Pérou a servi de base expérimentale au projet CHLORDEXCO de 2009 à 2011 pour étudier l'état de contamination des sols, le

fonctionnement hydrologique du bassin, 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 agricole (types et tailles d'exploitations); du milieu biologique (campagnes de pêches); des flux (pluies, débits en différentes localisations); des contaminations (concentration en CLD dans les sols et les eaux par décade du 01/10/2009 au 31/10/2010; données additionnelles d'un autre nématicide, le cadusafos).

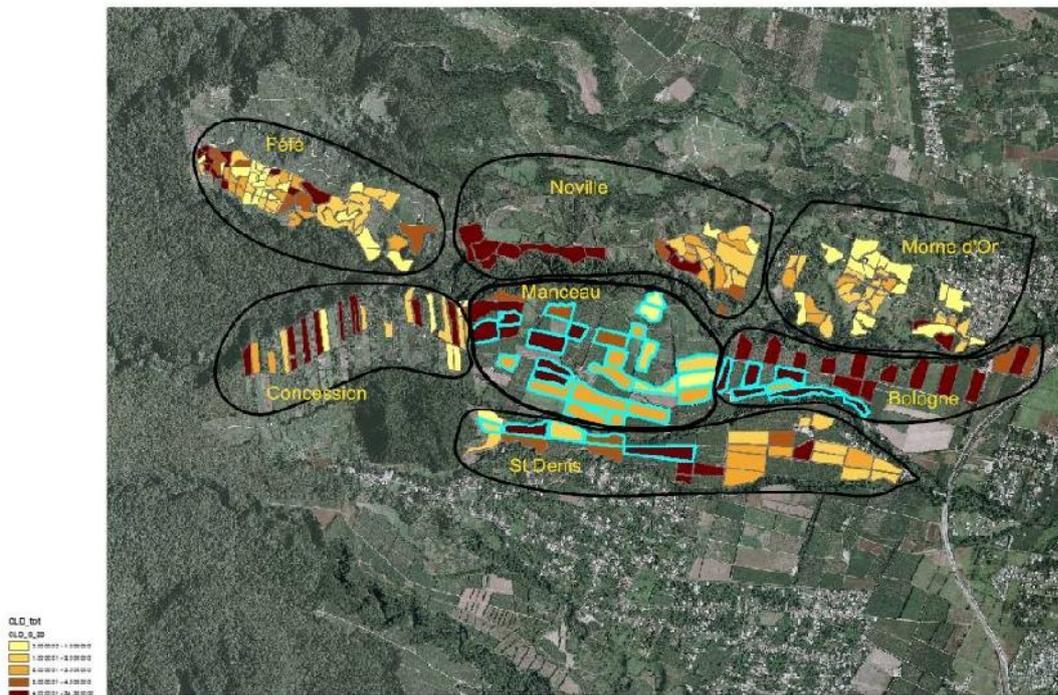
L'existence de nombreuses données sur la zone ont fait que les activités proposées dans le présent projet ont eu pour objet principal de compléter la carte de contamination des sols, notamment sur la zone d'extension à la rivière des Pères.

Résultats

Une trentaine de prélèvements supplémentaires a été réalisée sur le bassin de la rivière des Pères et sur le bassin Pérou (cf. Carte 1; nouveaux prélèvements entourés en bleu). Les prélèvements ont été réalisés sur l'horizon 0-30 cm. Les analyses ont été réalisées au Laboratoire Départemental de la Drôme, sur un échantillon moyen par parcelle. Le plan d'échantillonnage est basé sur une densité de 20 prélèvements par hectare distribués régulièrement sur la parcelle. Ces prélèvements supplémentaires nous permettent de compléter notre interprétation de la contamination du milieu qui porte sur l'ensemble des prélèvements.

On constate en premier lieu l'ensemble de la surface agricole est contaminée (aucune des parcelles analysées n'est indemne). Le niveau moyen des concentrations en CLD est élevé (en moyenne de 3.35 mg.kg^{-1}). Ceci indique que toutes les parcelles ont été cultivées au moins une fois en banane au cours de la période CLD. Ceci témoigne également de la systématisation du traitement à la CLD sur la zone, y compris dans les zones des hauts de bassin, soit qu'elles représentent les anciens champs des travailleurs de la canne cultivés de manière traditionnelle (jardins créoles en majorité dans la zone de Concession), soit qu'elles concernent des zones de défriche relativement récentes (vers 1985 ; zone de Féfé).

Teneurs en CLD sur le bassin de la rivière Pérou



Carte 3 : Concentrations en CLD dans les sols (0-30 cm) des bassins versants Pérou et Rivière des Pères

Le second constat porte sur la variabilité de la contamination selon les zones du bassin. Différents facteurs expliquent les différences.

- Les sols tout d'abord. Ils sont majoritairement de type andique (andosol à allophane), à forte teneur en matière organique, et ont la capacité de retenir fortement la molécule de CLD. Ce n'est pas le cas pour les nitisols que l'on retrouve dans la zone de Morné d'Or, moins riches en matière organique et non allophaniques. Les résultats sont en conformité avec ce comportement et les nitisols de Morné d'Or apparaissent en moyenne moins contaminés (tableau 2) que les andosols des autres zones.
- Les zones de petite agriculture de Fédé et concession présentent des teneurs moyennes à fortes avec une très forte variabilité (CV de plus de 100%) qui s'explique par la grande variété de stratégie des exploitants et de leur capacité à traiter.
- La variabilité diminue dès que l'on passe dans les zones où dominent les grandes exploitations entrepreneuriales de milieu de bassin. Les teneurs y sont également fortes mais avec une variabilité plus faible de l'ordre de 85% indiquant une plus grande convergence des stratégies d'épandage.
- Cette variabilité diminue encore, autour de 50%, à l'échelle des 2 grandes exploitations de bas de bassin, c'est-à-dire proche de la précision de la mesure de CLD (30%). La stratégie de traitement des exploitants est reflétée par la valeur moyenne de la contamination : A a traité avec plus de parcimonie (teneur moyenne en CLD de 2.86 mg/kg de sol) que B (teneur moyenne en

CLD de 7.28 mg/kg), la stratégie dans ce dernier cas pouvant témoigner d'une maximisation des facteurs de production sur un mode industriel.

Tableau 2 : teneurs en CLD moyenne, minimum et maximum par zone de l'hydrosystème rivière Pérou / rivière des Pères. Les coefficients de variation (CV) et taille de l'échantillon (nb parc.) sont indiqués par zone

lieu	Nb parc.	moyenne	CV	minimum	Maximum
Morne d'Or	38	1.36	83%	0.03	5.5
Noville	26	3.49	83%	0.59	11.1
Féfé	62	2.54	105%	0.05	14.2
Bologne	20	7.28	45%	2.06	13.2
St Denis	32	2.86	53%	0.98	7.4
Manceau	31	4.72	88%	0.18	16.2
Concession	28	3.87	133%	0.13	24.2

TACHE 2 : CARACTERISATION DE LA CONTAMINATION DES EAUX SUPERFICIELLES CONTINENTALES DES BV PILOTES

Pour comprendre les processus de transfert de la chlordécone des sols vers les eaux de surface, il est également indispensable de caractériser la contamination des eaux superficielles continentales des BV pilotes et son évolution.

1. Basses eaux, cas de la Martinique

Des campagnes de prélèvements ponctuels des eaux des rivières du BV du Galion ont été réalisées en 2012 et en 2013 afin d'un part de renseigner quantitativement la pollution de ces cours d'eau à un moment donné, et d'autre part de comparer ces deux campagnes et effectuer un premier constat quant à la variabilité temporelle de la pollution en basses eaux.

Sur chaque point de prélèvement, 1L d'eau brute, le plus possible au centre du lit de la rivière, est prélevé dans une bouteille en verre. Ces échantillons sont analysés au laboratoire du CIRAD Martinique dont l'incertitude est de 30 % et le seuil de quantification de 2 ng de CLD/L.

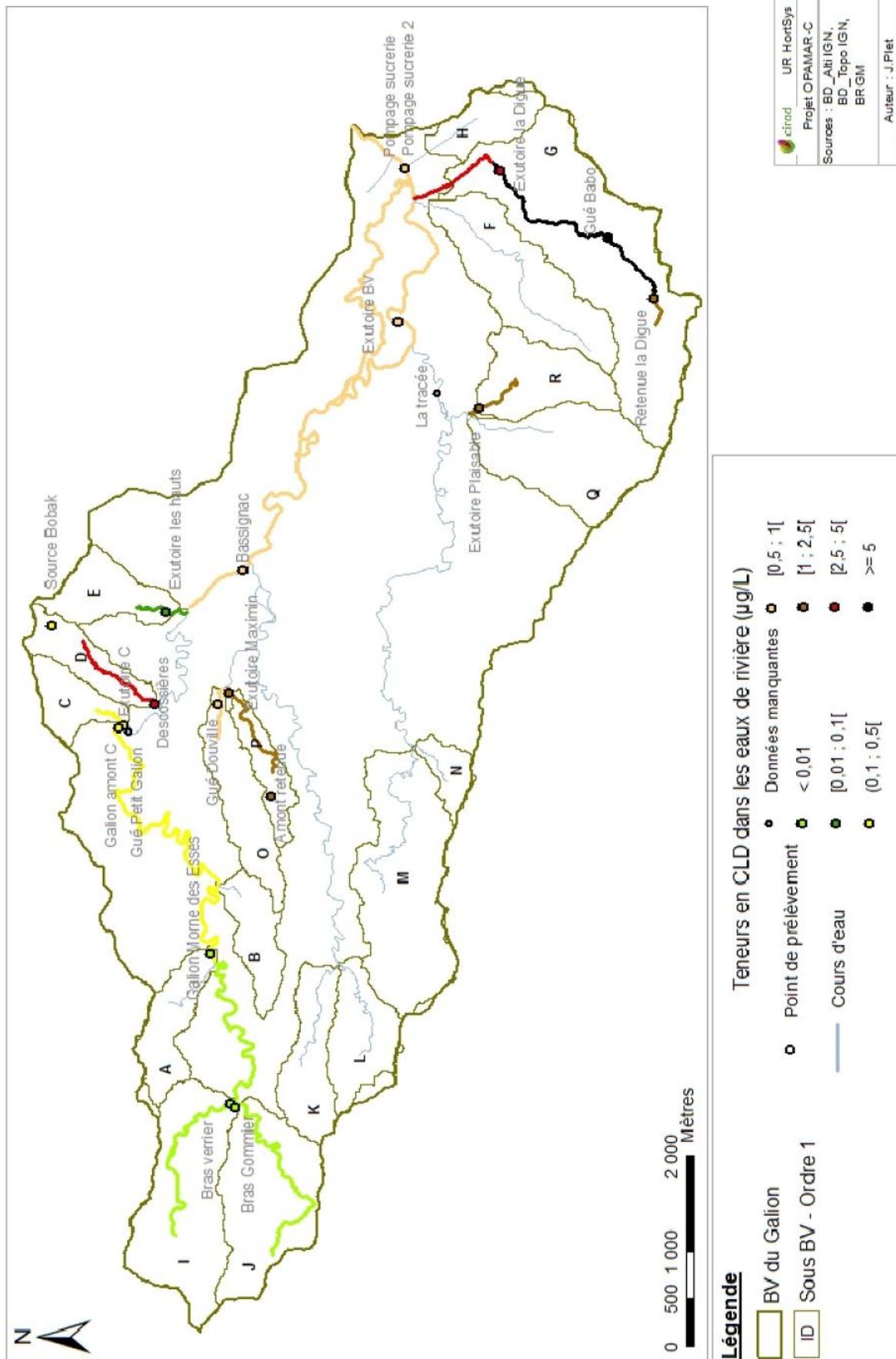
Les résultats de chaque campagne sont cartographiés sous forme de tronçons de contamination de la rivière, créés selon la méthode d'extrapolation de l'ODE Martinique, 2011.

a. Résultats de la campagne 2012 en basses eaux

19 points ont été prélevés entre le 7 et le 12 juin 2012. Pour référence, à cette période le niveau d'eau de la rivière à la station « Grand Galion » oscillait entre 65 et 75 cm (d'après les données de la DEAL).

Ci-dessous la carte présente les résultats d'analyse (Carte 4).

Projet OPA-C : mission Martinique du 7 au 12 juin 2012
- Contamination par la CLD des cours d'eau du BV du Gallion -



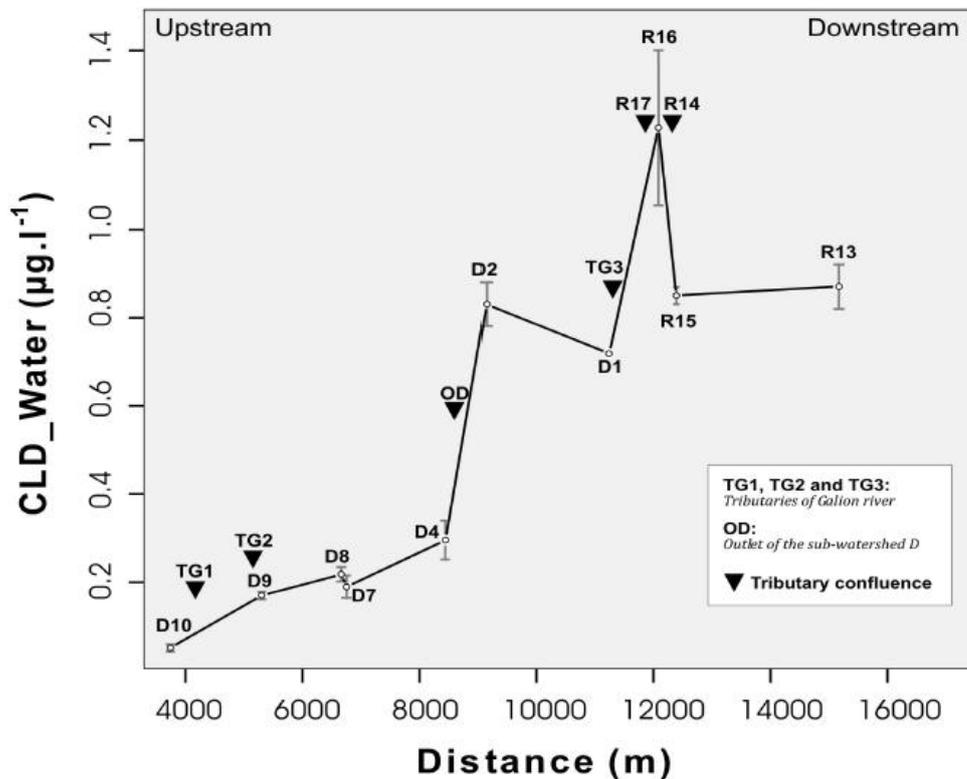
Carte 4 : Résultats de la contamination des cours d'eau par la chlordécone, campagne basses eaux 2012

b. Résultats de la campagne 2013 en basses eaux

Afin d'affiner la première caractérisation de 2012, 35 points ont été prélevés en début mars 2013. Pour référence, à cette période, le niveau d'eau de la rivière à la station « Grand Galion » oscillait autour de 40 cm (d'après les données de la DEAL).

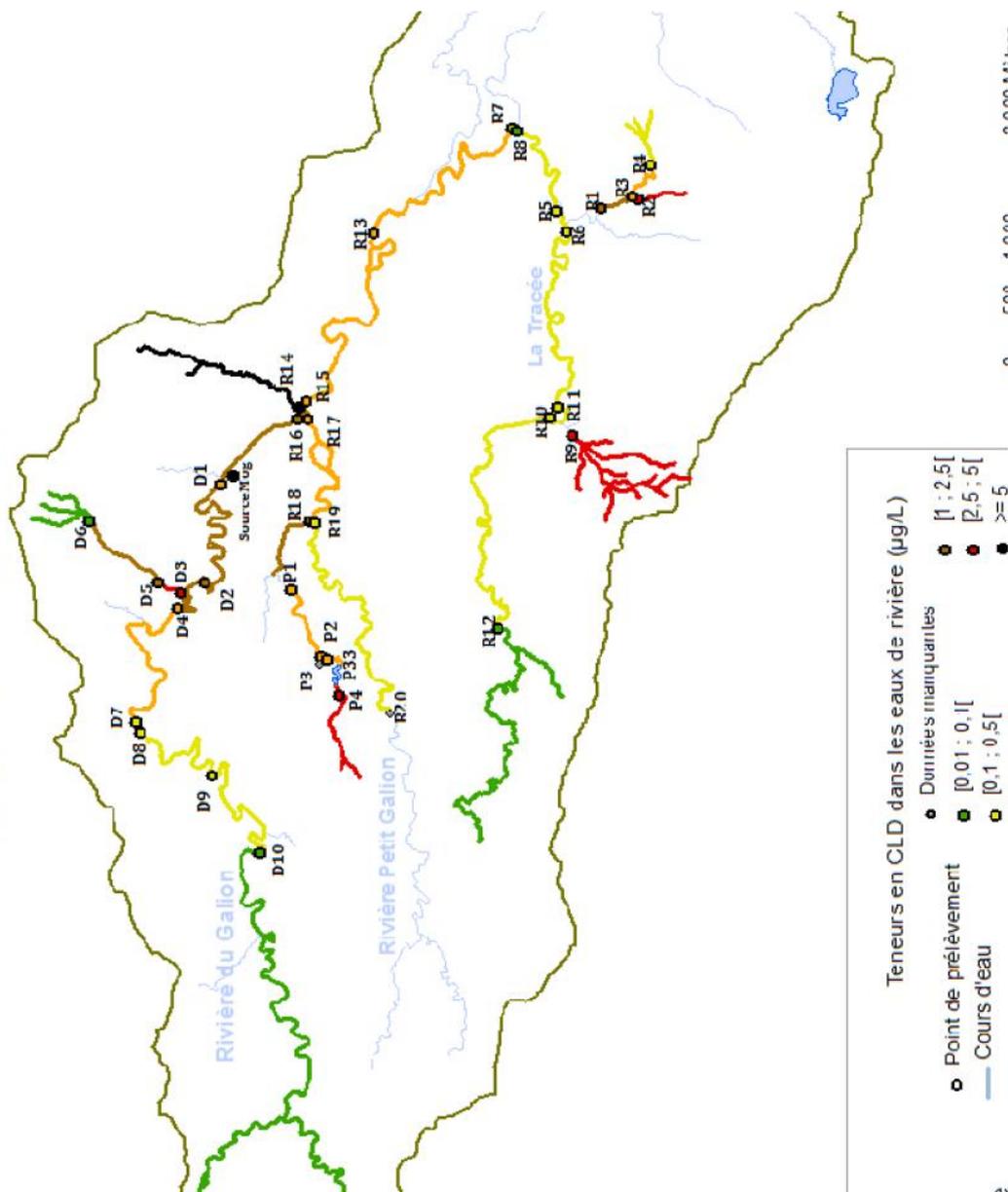
Cette campagne a l'intérêt de présenter un plan d'échantillonnage bien plus complet en réelle période d'étiage. La Carte 5 présente les résultats d'analyse.

Un profil de contamination d'amont en aval de la rivière du Galion a été construit (Graphique 2).



Graphique 2 : Profil de contamination de la rivière Galion, en basses eaux 2013 (Bazizi, 2013)

Contamination par la CLD des cours d'eau du BV du Galion - Campagne 2013 - Basses eaux -



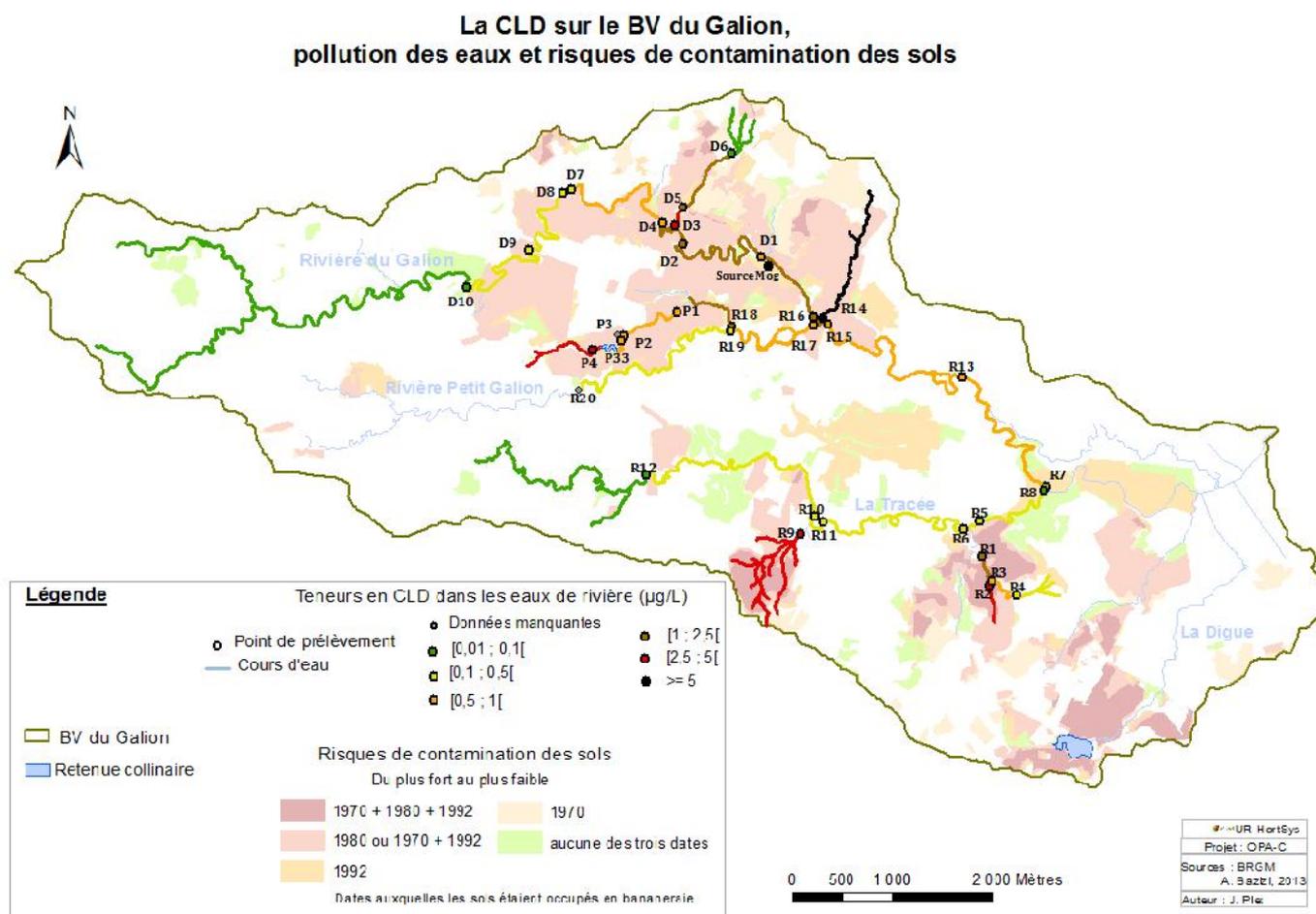
Carte 5 : Résultats de la contamination des cours d'eau par la chlordécone, campagne basses eaux 2013

c. Conclusions sur la contamination des cours d'eau du BV du Galion en basses eaux

A l'issue de ces deux campagnes, nous constatons :

- Un amont de BV non pollué par la chlordécone,
- Une augmentation progressive de la pollution dans la zone médiane du BV,
- Une légère diminution de la contamination à l'exutoire du BV bien que les teneurs en chlordécone restent élevées (supérieures à la norme DCE).

L'augmentation de la contamination des cours d'eau dans la partie médiane du BV est corrélée à leur traversée de zones polluées (en rouge sur Carte 6). Ce schéma général est également valable pour les deux principaux affluents de la rivière Galion, Petit Galion et La Tracée. Dès qu'une zone de sols pollués est traversée par un cours d'eau, celui-ci se charge en chlordécone.



Carte 6 : Corrélation entre présence de sols contaminés et pollution des cours d'eau

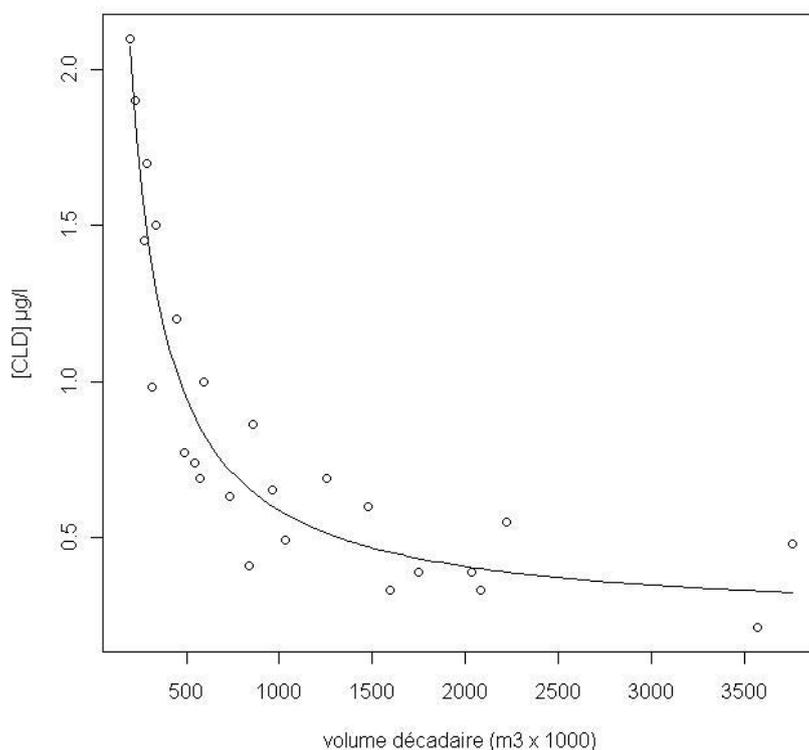
Par ailleurs, nous constatons qu'entre les campagnes en basses eaux de 2012 et de 2013, les grandes tendances de niveau de pollution des eaux superficielles sont similaires.

Ces résultats ont été communiqués aux acteurs du BV (contrat de rivière, agriculteurs, élus, services de l'Etat, collectivités, etc.) lors d'un atelier en novembre

2013 à Trinité. Les perspectives du projet ont également été présentées à cette occasion.

2. Basses eaux, cas de la Guadeloupe

La caractérisation de la contamination des rivières en basses eaux en Guadeloupe a été réalisée au cours d'un projet préalable (projet Chlordexco) et ne constituait pas une tâche spécifique dans le cadre du projet ChlorEauSol. En revanche la mise en relation des caractéristiques géochimiques des eaux avec les niveaux de contamination en CLD a été réalisée par le partenaire BRGM. Ces résultats seront donc exposés en détail dans leur rapport. On se contentera ici de vérifier que les mesures en basses eaux sont bien conformes aux hypothèses formulées dans le projet Chlordexco, à savoir que les concentrations les plus fortes sont observées en basses eaux du fait d'une dilution plus faible en provenance des zones amont (Graphique 3) et se situent autour de $2 \mu\text{g l}^{-1}$ à l'exutoire de la rivière Pérou. Les valeurs mesurées en basses eaux en 2013 sont proches de cette valeur et respectivement de $2.17 \mu\text{g l}^{-1}$ le 13/03/2013 et $1.619 \mu\text{g l}^{-1}$ le 21/11/2013.



Graphique 3 : Evolution des teneurs en chlordécone en fonction du volume décadaire, rivière Pérou, Guadeloupe

3. Période de crue, cas de la Martinique

Un autre aspect important de ce projet concerne la caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux superficielles pendant des épisodes pluvieux. Il s'agit ici de réaliser une première évaluation de la contribution des crues à la pollution de la rivière Galion, d'apprécier la charge en MES lors des crues et la répartition des teneurs en chlordécone entre phase dissoute et phase solide. Cela dans le but de mettre en place et valider un protocole d'analyse qui sera utilisé pour des études plus fines des mécanismes de transfert de polluant et ainsi de démontrer l'hypothèse qu'en Martinique un apport complémentaire de polluant via un transport solide issu des processus de ruissellement et d'érosion a lieu.

Cet objectif se décline à l'échelle d'une crue pour étudier la variabilité de la contamination selon les différentes phases de la crue (montée de crue, son pic et décrue), mais également entre au moins deux crues différentes.

Après discussion avec les experts, au vu des contraintes techniques et de temps, et car des chroniques de données sur deux ans sont déjà disponibles à la DEAL, la station « Grand Galion » est choisie pour cette étude (cf. Carte 7 pour localiser la station). Cette station a l'avantage d'être située la plus aval du BV ce qui permettra d'effectuer des premiers bilans sur la charge en MES et en chlordécone transportées lors d'une crue à l'exutoire du BV.

Les prélèvements à différents temps de la crue se font à l'aide d'un échantillonneur automatique « Sigma SD900 » mis en service du 11 décembre 2013 au 17 mars 2014.

a. Analyse des chroniques de crues et programmation du préleveur

Après discussion avec l'équipe, nous considérons comme crue représentative : une crue dont la fréquence est d'environ 20 fois par an.

Après analyse des chroniques de données de hauteur d'eau de la rivière fournies par la DEAL, nous avons déterminé que les crues sont considérées comme représentatives lorsque la hauteur d'eau atteint 150 cm.

En 2012 : 21 crues ont atteint ou dépassé le seuil de 150 cm dont 3 en décembre.

En 2013 : 23 crues ont atteint ou dépassé le seuil de 150 cm (en excluant avril très particulier, et pas de donnée sur décembre au moment de l'étude). Ces crues ont eu lieu sur les périodes mars, mai, juin, août et octobre en 2012 et avril, mai juin, juillet, septembre en 2013.

Les crues les plus importantes sur ces deux dernières années ont dépassé 450 cm (en décembre 2011 et avril 2013). En basses eaux, la hauteur d'eau est en moyenne entre 50 et 60 cm.

Sur les crues représentatives, nous avons constaté sur les 2 années de données :

- o Un temps de montée de crue variant de 25 minutes à 6h mais dont la majorité des évènements a un temps de montée inférieur à 2h30 (4 sur 40 sont supérieurs à 3h)
- Des temps de décrue très variables, de 1h30 à plus de 20h, cependant sur 40 évènements, 9 ont une durée de décrue supérieure à 10h.

Pour pouvoir échantillonner ces crues, avec une priorité sur la montée et le pic de crue, d'après les chroniques de données et dires d'experts, nous avons programmé le préleveur comme suit :

- Seuil de déclenchement : lorsque la hauteur d'eau dépasse 80 cm
- Prélèvement d'eau toutes les 6 minutes dans un flacon en verre de 260 mL, soit 2h24 d'échantillonnage

b. Récapitulatif des crues échantillonnées, gardées, filtrées

Nombre d'alertes sms, soit le nombre de fois où la rivière a dépassé 80 cm : plus de 40

Nombre de crues échantillonnées, soit le nombre de fois où le préleveur s'est déclenché : 10

- dont 1 seule représentative, celle du 19/12/2013

Nombre de crues conservées (au vu de sa représentativité et de sa charge en MES apparente) : 3

- le 19/12/2013 : pic de crue à 150 cm
- le 23/12/2013 : pic de crue à 100 cm
- le 06/02/2013 : pic de crue à 130 cm

Nombre de crues filtrées : 2

- les crues du 19 et 23 décembre 2013 ont été filtrées courant janvier-février 2014
- par des contraintes de délais, la crue du 6 février 2014 n'a pas pu être filtrée. Elle est conservée en chambre froide pour de futures manipulations.

Nombre de crues représentatives manquées : 2

- le 24/12/2013, pic à 275 cm à 21h42
- le 07/02/2014, pic à 300 cm à 3h33

(Le préleveur n'était pas disponible lors de ces crues. Il aurait de toute façon fallu changer le programme pour échantillonner plus qu'une partie de la montée de ces crues, au risque de manquer les autres.)

c. Protocole et laboratoires

Afin de séparer les MES de la phase liquide, nous avons élaboré un protocole de filtration sous vide. La rédaction de ce protocole est en cours de vérification et approbation. Il est disponible en l'état en ANNEXE 2.

En résumé, chaque flacon est filtré à 0,7 µm sur un système de filtration sous vide à l'aide de filtres en fibres de verres.

Les fractions d'eau filtrée sont envoyées au LDA 972 (sous traitées par le LDA 26) pour analyse chlordécone et chlordécone 5B-hydro avec une incertitude de 30 % et un seuil de quantification de 0,01 µg de CLD l⁻¹.

Les fractions de MES (> 0,7 µm) sont envoyées au LDA 26 pour analyse chlordécone et chlordécone 5B-hydro avec une limite de quantification de 10 µg de CLD/kg de MES sèches. Les contraintes analytiques nécessitent une masse minimale de 0,5 g de MES pour permettre une analyse par échantillon. C'est pourquoi nous avons regroupé les filtrats et MES de certains flacons selon les différentes phases de la crue : montée en crue, pic et décrue.

Néanmoins, des analyses sur les eaux filtrées flacon par flacon sont en parallèle effectuées au laboratoire du CIRAD Martinique afin d'obtenir le plus d'informations possibles.

Les analyses sont actuellement en cours.

d. Récapitulatif des flacons traités et en cours d'analyses

Ci-dessous les tableaux détaillés des échantillons composites construits et envoyés aux LDA.

- Crue du 19/12/2013 :

	Référence de l'échantillon « date_n° flacons »	Nombre de flacons	N° des flacons	Nombre de filtres	m _{MES} (g)	V _{eau filtrée} (mL)	Type analyse demandé
	19/12_1 à 5	5	1-2-3-4-5	18	0,714	950	chlordécone et 5bhydro
	19/12_7 à 11	5	7-8-9-10-11	15	0,548	950	chlordécone et 5bhydro
	19/12_12 à 13	2	12-13	7	0,891	400	chlordécone et 5bhydro
	19/12_14	1	14	4	0,510	200	chlordécone et 5bhydro
	19/12_15 à 16	2	15-16	8	0,827	390	chlordécone et 5bhydro
	19/12_20+22+24	3	20-22-24	11	0,756	390	chlordécone et 5bhydro
TOTAL	6 échantillons composites	18					

- Crue du 23/12/2013 :

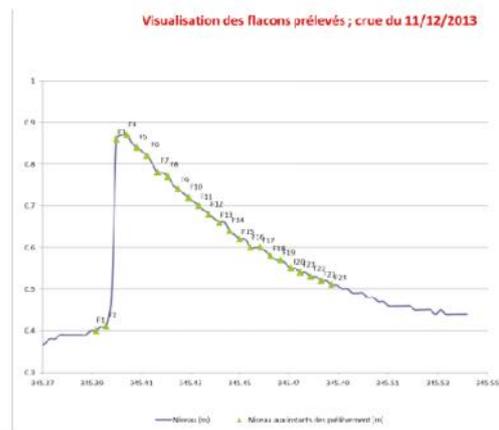
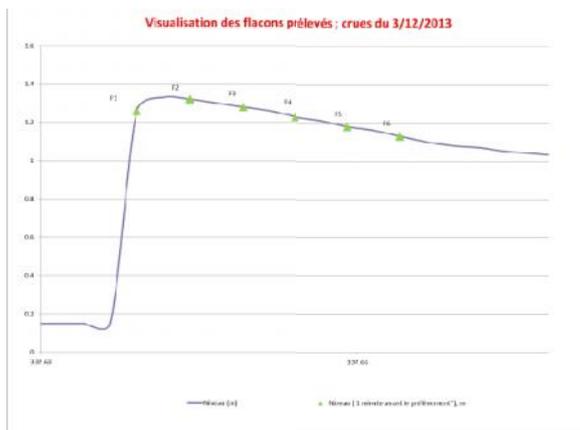
	23/12_1 à 6	6	1-2-3-4-5-6	34	0,577	950	chlordécone et 5bhydro
	23/12_7 à 11	5	7-8-9-10-11	31	0,514	950	chlordécone et 5bhydro
	23/12_13 à 20	8	13-14-15-16-17-18-19-20	47	0,594	950	chlordécone et 5bhydro
TOTAL	3 échantillons composites	18					

Un rapport sur les résultats et conclusions de cette étude sera rédigé dès la réception des rapports d'analyse des laboratoires.

4. Période de crue, cas de la Guadeloupe

En Guadeloupe, 2 crues ont été échantillonnées en décembre 2013 sur la station en aval de la rivière Pérou. De la même façon qu'en Martinique l'analyse des données de débit a permis d'identifier une hauteur minimale à partir de laquelle déclencher le prélèvement automatique. Puis, les prélèvements ont été échelonnés toutes les 6 minutes, pas de temps choisi sur la base d'une analyse du temps de montée de crue, jusqu'au prélèvement de la 24^e bouteille, soit une durée de prélèvement d'un peu plus de 2h30. Seules 2 crues ont pu être exploitées avec ce protocole.

Pour les deux crues, les dates de prélèvements des échantillons sont indiquées ci-après. La crue du 3 décembre 2013 est la plus importante avec une montée de crue de près de 1.4 m. Les teneurs en MES avoisinent les 2g par litre. En revanche, les teneurs en MES restent faibles pour la crue du 11 décembre et sont inférieures à 0.35 g par litre. Des analyses CLD sont prévues sur ces échantillons, au besoin après regroupement, de façon à atteindre la quantité minimale nécessaire à l'analyse. Les difficultés d'échantillonnage et des temps nécessaires pour la filtration, amènent des coûts prohibitifs pour la détermination des MES en crue. D'autres solutions devront être explorées (envoi des eaux brutes au laboratoire par exemple) pour pallier ces inconvénients.



Graphique 4 : Calendrier de prélèvement des échantillons à l'exutoire de la rivière Pérou

TACHE 3 : PROPOSITIONS DE LOCALISATION DES SITES ET DES PROTOCOLES DE SUIVI

1. L'instrumentation des BV

a. Rappel sur le choix des sites à instrumenter

La sélection des sites à instrumenter s'est faite selon les caractéristiques géologiques, pédologiques, climatiques et d'occupation des sols afin de couvrir le plus de facteurs agronomiques et hydrogéologiques pouvant impacter les processus de transfert de la CLD ainsi que sur des zones de contamination avérée. L'instrumentation de sous BV de petite superficie est nécessaire pour comprendre à l'avenir l'intégralité des mécanismes de transfert. Mais l'instrumentation de sites prenant en compte l'échelle du BV du Galion est aussi indispensable pour appréhender l'évolution de la pollution à moyen terme sur ce territoire.

b. L'instrumentation du BV du Galion

D'après les propositions faites dans le rapport Plet, 2012, la faisabilité technique et l'avis des experts de l'IRD, l'instrumentation établie dans le projet OPA-C suit le plan suivant :

- Une station de mesure complète (centrale d'acquisition, sonde température eau/conductivité/hauteur eau/turbidité, préleveur, pluviomètre, échelles limnimétriques) est installée à la station « Base de loisirs ».
- La station « Grand Galion » dont la centrale d'acquisition, la sonde, le pluviomètre et les échelles ont été mis en place par la DEAL, est complétée par un préleveur automatique.
- Un pluviomètre est installé en amont du BV sur la station « Tête bassin ».

Ces trois stations permettent des études à l'échelle globale du BV. Elles pourront être complétées par un préleveur ajouté à la station Conseil Général du pont Bassignac en milieu de bassin.

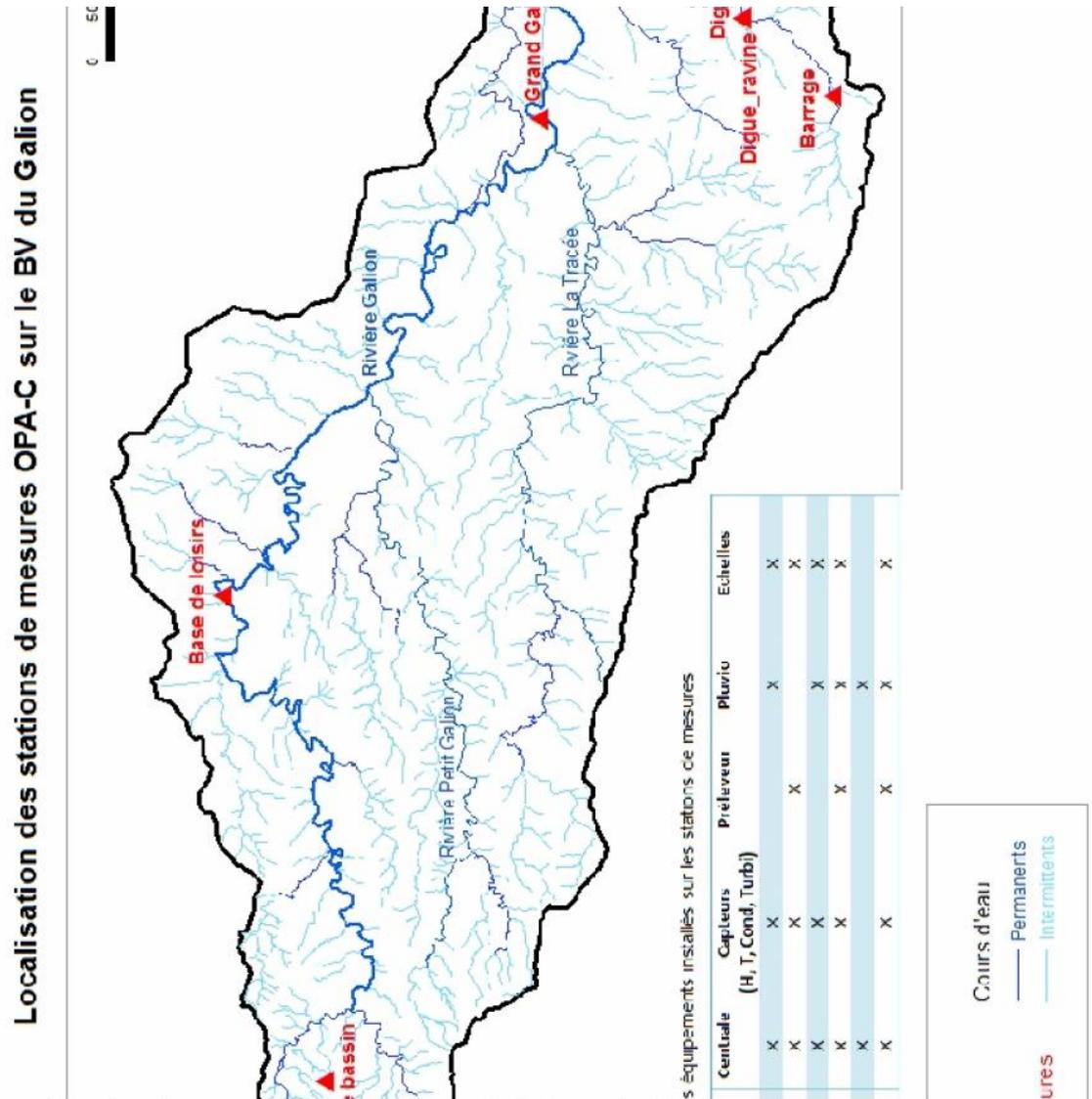
Pour ce qui est des études à l'échelle d'un sous BV, le sous BV de la Digue a été sélectionné. Le plan d'instrumentation est le suivant :

- En amont du sous BV, un pluviomètre, une centrale d'acquisition, une sonde et des échelles sont installés à la station « Barrage »
- Au centre du BV, sur une ravine affluente de la rivière la Digue, une centrale d'acquisition, une sonde et des échelles sont installées à la station « Digue_Ravine ».
- A l'aval de la confluence de la Digue et cette ravine afin de comprendre sa contribution, une centrale d'acquisition, une sonde et des échelles sont également installées sur la station « Digue_principal ».

Un préleveur est également présent sur ce site mais peut-être relié à la station « Digue_principal » ou « Digue_Ravine ».

Un pluviomètre rattaché techniquement à la station « Digue_Ravine » apporte des informations sur cette zone caractéristique des 2 stations « Digue ».

La carte ci-dessous localise et résume le matériel présent sur les sites instrumentés (Carte 7)



Carte 7 : Localisation des stations de mesures OPA-C sur le BV du Gallion

Ces installations ont débuté en mars-avril 2013 pour la Martinique. L'ensemble des stations est considéré opérationnel fin juin 2013 (matériel emporté par les crues d'avril, travaux de réajustement, calibrage, etc.) (Briquet JP., 2013). Des réajustements continus sont et seront à effectuer selon les aléas climatiques, les pannes, etc.

Afin de compléter le dispositif, des forages ont été réalisés par le BRGM qui développera dans son rapport leur positionnement sur le bassin.

2. Propositions de protocoles de suivi complémentaires

a. Les données acquises par les stations de mesures

Les stations de mesures en place permettent d'acquérir des données de hauteur d'eau, température, conductivité, turbidité, dans les rivières et de précipitations sur certaines, toutes les 3 minutes.

En Martinique, aujourd'hui, ces données sont récupérées mensuellement sur site et archivées à l'état brut à l'IRD et au CIRAD depuis la mise en fonction des stations au 17/04/2014.

Il est maintenant important de travailler sur un système de traitement, de stockage et de diffusion harmonisé de ces données afin qu'elles soient disponibles pour les prochaines études hydrologiques plus fines. Les équipes de l'Inra et du CIRAD ont débuté cette tâche.

Parallèlement, la télétransmission de ces données devra être mise en place en Martinique pour faciliter la collecte des données et pouvoir agir plus rapidement, dans le cadre de campagne de prélèvements ou pour effectuer la maintenance du dispositif.

b. Poursuite de la caractérisation de la contamination des BVs par le chlordécone

Les sols :

Comme précisé dans le paragraphe d. en p.13, en Martinique les analyses de sols sont à poursuivre selon le même protocole et la même méthode pour le plan d'échantillonnage. Notamment sur le sous BV « d », 3 parcelles sont à prélever. La cartographie serait à compléter avec l'analyse de parcelles du milieu du bassin du Galion.

La caractérisation de la contamination des eaux superficielles en période de crue, lien entre phase dissoute et particulaire :

L'enjeu est ici de savoir si la chlordécone est transportée de manière significative sur la matière en suspension (MES) des eaux, justifiant par la même de limiter les processus d'érosion en parcelle. Pour cela il est nécessaire d'une part de quantifier les MES et leur évolution au cours du temps et, d'autre part, de mesurer la quantité de chlordécone fixée sur ces MES. L'étude des bassins Guadeloupéens et Martiniquais est pertinente de par les différences de susceptibilité des sols à l'érosion (andosols en Guadeloupe peu sujets à l'érosion; nitisols en Martinique plus érodibles).

Pour cela on s'appuiera sur la méthode de suivi de la contamination en crue sur phase dissoute et MES qui est globalement validée. Elle sera retenue pour les

prochaines études de ce type mais des éléments seront à adapter selon le site de prélèvement, la saison et les objectifs comme par exemple la programmation du préleveur. Des méthodes alternatives pourront être recherchées pour limiter le coût des analyses, notamment celui lié à la filtration. En même temps des études plus théoriques devront être poursuivies en amont afin de caractériser la cinétique d'échange entre l'eau et les MES : en effet la question reste entière de savoir si la contamination du sol n'est pas en partie due à son immersion dans de l'eau contaminée.

Enfin, plus spécifiquement, pour la Martinique, il serait pertinent lors de la prochaine période de « hautes eaux », de réitérer ces analyses sur la station « base de loisirs » afin de compléter la contribution des crues à l'échelle du BV ainsi que sur la station « La_Digue » où le système hydrologique sera caractérisé plus facilement.

c. Caractérisation des pressions agricoles

Les relations mises en évidence entre état de contamination des sols et contamination des rivières montrent l'importance de connaître les pressions exercées par les pratiques agricoles et leur évolution. Des méthodes devront être développées permettant de caractériser ces pressions en exploitant les bases de données existantes (occupation des sols ; types d'exploitation ; ventes de produits phytosanitaires...) et en caractérisant les pratiques (enquêtes, calcul d'indicateurs, ...).

TACHE 4 : BANCARISATION DES DONNEES

Pour la Martinique, toutes données de concentration en chlordécone dans les sols ont été transmises à la SAFER en novembre 2013, afin qu'elles soient intégrées à la base de données sol.

Les données géo-référencées concernant la contamination des eaux continentales en basses eaux sont mises à disposition de l'ODE sous format excel et couches SIG.

Une fois les analyses des eaux et MES réalisées par les LDA, le rapport d'étude et les données sur le lien entre niveau de contamination à la chlordécone des eaux superficielles et charge en MES en période pluvieuse, sera mis à disposition de l'ODE et l'ONEMA.

Finalement, l'ensemble des données produites dans le cadre du projet sous les conventions CIRAD et BRGM seront mises en ligne sur le site opa-c.fr en cours de finalisation.

CONCLUSION

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.

Les objectifs ont déterminé les différentes tâches de ce projet :

- Tâche 1 : caractérisation de la contamination des sols des BV pilotes ;
- Tâche 2 : caractérisation de la contamination des eaux superficielles continentales des BV pilotes ;
- Tâche 3 : propositions de localisation et de priorisation des sites et des protocoles de suivi ;
- Tâche 4 : bancarisation des données.

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.

BIBLIOGRAPHIE

Achard R, Perrier X, Chabrier Ch, Lassoudière A. 2003. Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés, Rapport Phase I : Méthodologie d'échantillonnage à la parcelle. Rapport BRGM / RP-52464-FR.

Amoravain, V., 2000. Analyse du système agraire sur un bassin versant bananier en Guadeloupe. Mémoire de fin d'étude Thesis, CNEARC - ISARA - CIRAD, Montpellier, France, 88 pp.

Bazizi A. 2013. Characterization of chloedecone soil and surface water pollution at the watershed scale. The Galion river in Martinique as a study case. Master2 Montpellier University - University of The Aegean, CIRAD, 27p + appendix.

Bonin, M. and Cattan, P., 2006. Pratiques de jachère et dispositifs d'appui en production bananière guadeloupéenne. Fruits, vol.61:n°2: 83-98.

Bonin, M. and Cattan, P., 2009. Dynamique des exploitations agricoles dans un contexte de crise. Lecas de la production bananière en Guadeloupe, Colloque International « Sociétés en transition et développement local en zones difficiles", 22-24 avril 2009, Djerba. Colloque International « Sociétés en transition et développement local en zones difficiles", 2009-04-22/2009-04-24, Djerba, Tunisie. s.n., s.l., pp. 13 p.

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.

Charlier, J.B., 2007. Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical. Thèse de Docteur de l'Université de Montpellier II Thesis, Montpellier, 247 pp.

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

Charlier, J.-B., Cattan, P., Voltz, M. and Moussa, R., 2009a. Transport of a nematicide in surface and ground waters in a farmed tropical catchment with volcanic substratum. Geophysical research abstracts, 11.

Charlier, J.-B., Cattan, P., Voltz, M. and Moussa, R., 2009b. Transport of a Nematicide in Surface and Groundwaters in a Tropical Volcanic Catchment 10.2134/jeq2008.0355. J Environ Qual, 38(3): 1031-1041.

Charlier, J.-B. et al., 2011. Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed: A multi-disciplinary experimental approach. Journal of Hydrology, 398(3-4): 155-170.

Charlier, J.B., Moussa, R., Cattan, P., Cabidoche, Y.M. and Voltz, M., 2009c. Modelling runoff at the plot scale taking into account rainfall partitioning by vegetation: application to stemflow of banana (*Musa spp.*) plant. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 6: 4307-4347.

Charlier, J.B., Moussa, R., Cattan, P. and Voltz, M., 2006. Hydrological behaviour of a small tropical catchment on volcanic deposits, Proc of the European Geosciences Union, Vienne, Austria.

Charlier, J.-B., Moussa, R., Cattan, P. and Voltz, M., 2007. Hydrological modelling from the plot to the catchment scales in a tropical cultivated area [Abstract]. Geophysical research abstracts, vol.9: [2] p.

Dulcire, M. and Cattan, P., 2002. Monoculture d'exportation et développement agricole durable : cas de la banane en Guadeloupe. Cahiers/Agricultures, 11: 313-321.

Dumon, A., Bourdon, E., Lachassagne, P. and Ladouche, B., 2009. Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Pérou à Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, BRGM, Basse Terre.

Govindin, J.C., 2001. Diagnostic territorial en zone bananière., Université des Antilles et de la Guyane - CIRAD, Pointe à Pitre, France
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. Cergy-Pontoise : ISTOM, 72p + annexes. Mémoire de fin d'études.

Jouve, A., 2010. Présentation du dispositif de mesures hydrologiques mis en place sur le bassin versant de la rivière Pérou., CIRAD, Capesterre Belle Eau, Guadeloupe.

Julien, D., 2000. Diagnostic du bassin versant du Pérou - Guadeloupe, ENSAT - CIRAD, Toulouse, France.

ODE Martinique, Asconit Consultants, DEAL Martinique, ONEMA. 2011. Détermination de la contamination des milieux aquatiques par le chlordécone. Volet

3 : Investigations complémentaires – Têtes de bassins versants et Sud Martinique-
Martinique : ODE Martinique, 68 p. Rapport Août 2011.

Stephan, X., 2006. Analyse des trajectoires d'évolution des exploitations bananières guadeloupéennes, Institut d'Etudes du Développement Economique et Social - CIRAD, Nogent sur Marne, France.

Tixier, P., 2000. Catalogue des états de surface du sol sur la zone du bassin versant de la rivière Pérou, CIRAD FLHOR, Neufchâteau, Guadeloupe, France.

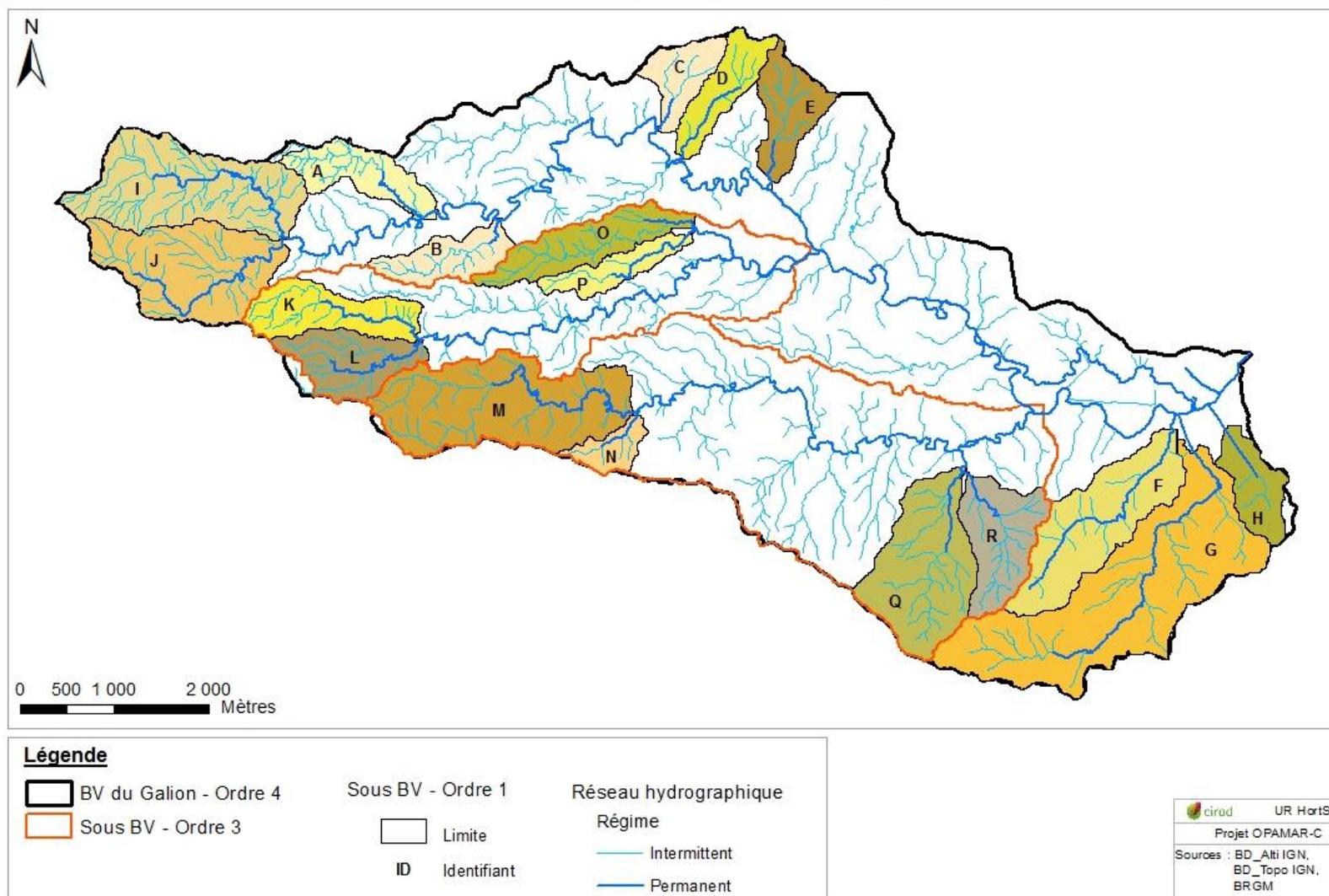
Trouillefou, C., 2007. Contribution à l'élaboration du diagnostic du bassin versant de la rivière Pérou selon la démarche CORPEN., GREPP, DIREN, CIRAD, Basse Terre.

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Localisation des sous bassins versants d'ordre 1 du BV du Galion	39
ANNEXE 2 : Protocole de filtration sous vide d'une eau de rivière chargée en MES (en cours de vérification et d'approbation).....	40

ANNEXE 1 : Localisation des sous bassins versants d'ordre 1 du BV du Galion

Les 18 sous BV topographiques d'ordre 1 du Galion



ANNEXE 2 : Protocole de filtration sous vide d'une eau de rivière chargée en MES (en cours de vérification et d'approbation)

14/04/2014	Protocole
Titre	Filtration sous vide d'une eau de rivière chargée en Matières En suspension (MES)

Objectif	Séparer la phase solide et la phase dissoute d'un échantillon d'eau brute pour analyser la concentration en chlordécone sur chacune de ces matrices
-----------------	---

Projet	OPA-C
Auteurs	J. Plet et P. Andrieux  
Vérificateur et approbateur	A. Samouellian 

INTRODUCTION

Ce protocole a été élaboré et testé dans le cadre de recherches sur la répartition de la chlordécone en phase dissoute et la chlordécone adsorbée sur les matières en suspension (MES) (> 1 µm) dans une eau de rivière tout au long d'une crue.

Les sites de prélèvements qui ont permis de réaliser ce protocole sont la station : « Grand Galion » sur la rivière du Galion en Martinique et la station « Pont Pérou » sur la rivière du Pérou en Guadeloupe.

Il s'agit ici de séparer la phase liquide et la phase solide de nos échantillons d'eau brute afin de déterminer les teneurs en chlordécone sur chacune de ces matrices. Pour séparer ces deux matrices en limitant les pertes de matières et avec des conditions techniques adaptées à cette échelle de manipulation, la méthode la plus optimale est celle de la filtration sous vide.

Avec cette méthode et pour limiter l'absorption de la chlordécone sur le système de filtration, il est nécessaire d'utiliser des filtres en fibre de verre (Arnaud *et al.*, 2013)¹.

La gamme de rétention la plus faible de ces filtres est de 0,7 µm. Avec cette contrainte technique, nous obtenons après filtration :

- Un filtrat contenant : matières dissoutes + colloïdes < 0,7 µm
- Des matières solides contenant : matières en suspension + colloïdes > 0,7 µm

¹ L. Arnaud, N. Baran, L. Gourcy, A.-L. Taïlamé, M. Senergues (2013) – Etude du transfert de la chlordécone vers les eaux souterraines en Martinique. Rapport BRGM/RP-61767-FR, 73p, 49ill

Dans la suite du document, les éléments en gris sont des compléments d'informations propres aux manipulations effectuées sur des crues de décembre 2013 en Martinique et en Guadeloupe. Les quantités de MES et d'eau minimales destinées à être analysées tiennent compte des préconisations faites par le Laboratoire Départemental d'Analyse de la Drôme (LDA26) accrédité par le COFRAC où sont faites les analyses.

Dans le cas de notre expérience, des échantillons d'eau brute d'environ 260 mL ont été filtrés en Martinique. En Guadeloupe des échantillons d'eau brute de 320 mL ont été filtrés.

METHODE

Filtration sous vide

PRECAUTIONS

La chlordécone s'adsorbe plus facilement sur les matières plastiques, il est donc important de manipuler le plus possible nos échantillons sur des matières en verre, aluminium ou acier inoxydable.

La manipulation d'acétone est régulière dans ce protocole. Il est donc vivement conseillé de travailler avec des gants, dans une pièce très bien ventilée.

MATERIEL

- Filtres en fibre de verre, gamme de rétention 0,7 μm , diamètre adapté à l'unité de filtration utilisée (Filtres DURIEUX n°28 en Guadeloupe / Filtres Whatman Cat No 1825-047 en Martinique).
- 1 unité de filtration en pyrex* (entonnoir en verre, support filtre en verre fritté, pince d'assemblage en aluminium, bouchon en silicone percé, fiole à vide en verre)
- 1 pompe à vide
- 1 balance de précision (10^{-4} g)
- 1 balance de capacité suffisante pour la masse de nos flacons et fiole à vide (g)
- 1 étuve à 35 °C
- 1 pince en acier inoxydable
- Coupelles en verre*
- Barquettes en aluminium
- Flacons en verre propres* de capacité suffisante pour recueillir le filtrat
- Etiquettes
- Papier aluminium
- Sachets plastiques

- Marqueur
- Gants
- Acétone technique
- Eau distillée
- Hotte ventilée

* Nettoyage de la verrerie (unité de filtration, coupelles, flacons, boîtes de pétri...) qui est en contact avec des échantillons liquides ou solides destinés aux analyses de pesticides. L'utilisation ultérieure d'un laveur automatique de laboratoire pourra être envisagée en précisant le mode opératoire de lavage. Pour un lavage et nettoyage manuels :

- rincer la verrerie avec de l'eau distillée,
- rincer la verrerie avec de l'acétone sous hotte ventilée pour éliminer toute trace de pesticides,
- laisser sécher la verrerie sous la hotte en fonctionnement,
- boucher tous les flacons après lavage et rinçage à l'acétone.

Il est indispensable de porter des gants de protection en latex ainsi qu'une blouse de laboratoire. Au final tout l'acétone usagé doit être versé et stocké dans un bidon dédié à cet usage et fermé hermétiquement. Ne pas vider l'acétone dans l'évier.

PROTOCOLE

1. Pesée des masses initiales

- Peser avec une balance de précision chaque filtre en fibre de verre encore vierge.
On note : $mF(n^{\circ} \text{ filtre})_i$
Attention, il n'est pas conseillé d'écrire sur les filtres. Pour ne pas mélanger les filtres pesés, il est conseillé de les placer chacun dans une coupelle numérotée, numéro que gardera le filtre jusqu'à la fin de la manipulation.
- Peser le flacon plein d'eau brute à filtrer et son bouchon sur une balance adaptée.
On note : $E(n^{\circ} \text{ échantillon})_i$
- Peser la fiole à vide, vide sur une balance adaptée.
On note : R_i

2. Filtration

- Filtrer progressivement l'échantillon d'eau brute à l'aide du système de filtration ci-dessous illustré, en changeant le filtre dès que nécessaire.

Manipuler les filtres avec précautions avec une pince en acier inoxydable, ne les mettre qu'en contact avec des supports en verre ou en aluminium ou acier inoxydable, limiter les pertes en MES lors de leur transport.

Noter la date de la filtration.

A titre d'informations, lors de nos manipulations, environ 4 à 8 filtres par échantillon d'eau brute (environ 260 mL) étaient nécessaires, pour une durée de filtration d'environ 30 minutes à plus d'une heure. En Guadeloupe, pour les crues testées un seul filtre a été utilisé pour une durée de filtration de 15 minutes à une heure.

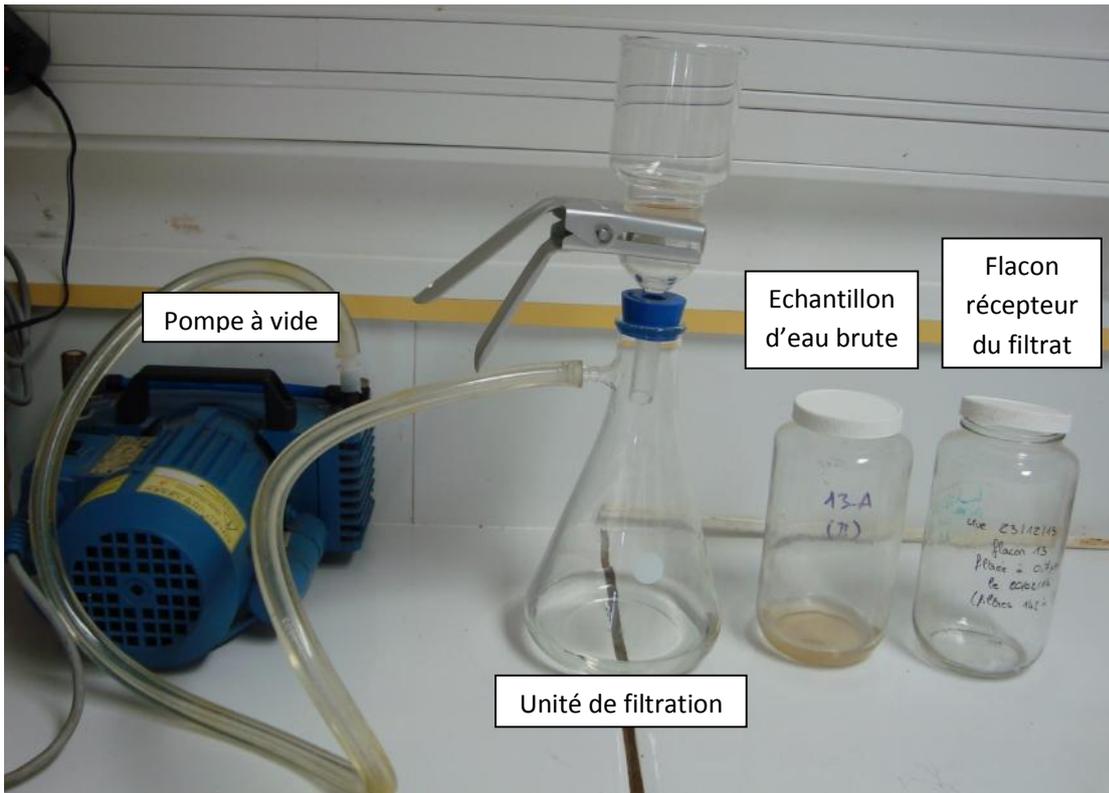


Photo 1 : Vue générale du système de filtration

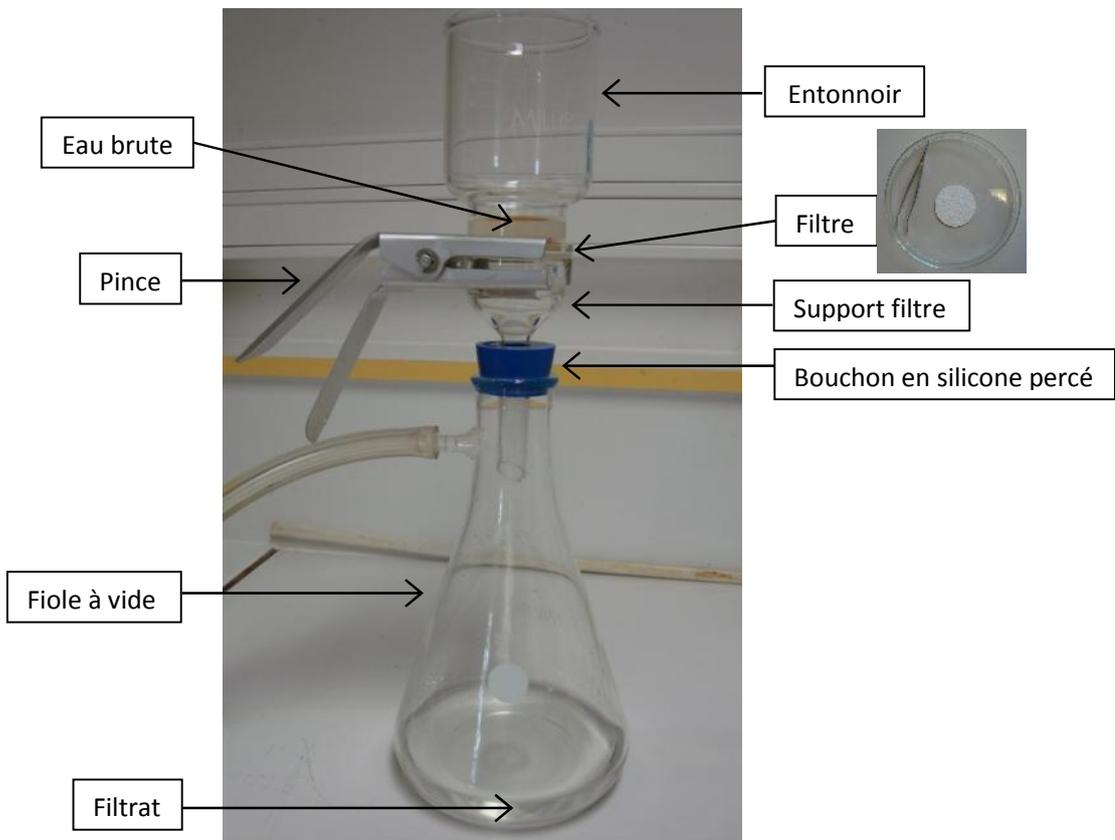


Photo 2 : Zoom sur l'unité de filtration

- Placer les filtres utilisés dans une barquette en aluminium.

Attention à toujours connaître le numéro du filtre.

(Ici pour ne pas mélanger les filtres, leur numéro est inscrit sur la barquette sur laquelle ils sont punaisés.)



Photo 1 : Filtres utilisés en fibre de verre positionnés dans une barquette en aluminium

3. Séchage des filtres utilisés

Mettre la barquette de filtres utilisés dans une étuve à 35 °C pendant environ 15 heures afin que toute l'humidité absorbée s'évapore.

Noter la date et la durée de mise à l'étuve.

4. Pesée des masses finales

- Une fois secs et de masse stable, peser les filtres utilisés avec une balance de précision.

On note : $mF(n^{\circ} \text{ filtre})_f$

- Peser le flacon vide qui contenait l'eau brute et son bouchon sur une balance adaptée.

On note : $E(n^{\circ} \text{ échantillon})_f$

- Peser la fiole à vide, pleine sur une balance adaptée.

On note : $R(n^{\circ} \text{ échantillon})_f$

5. Conditionnement et conservation des échantillons obtenus

- Récupérer le filtrat de la fiole à vide dans un flacon en verre brun propre et étiqueté.

Si l'eau filtrée ne part pas directement à l'analyse, conserver le flacon en milieu réfrigéré à 4°C.

- Emballer les filtres utilisés et secs dans du papier aluminium étiqueté.

Plusieurs filtres peuvent être regroupés dans le même emballage (faciliter les manipulations du laboratoire d'analyse, éviter les confusions entre les échantillons, etc.).

Placer cet emballage dans un sachet plastique étiqueté également.

Si les filtres ne sont pas rapidement envoyés au laboratoire d'analyse, les conserver dans un endroit sec et hermétique.

6. Nettoyage du matériel

- Entre chaque échantillon, rincer l'ensemble du matériel à l'eau distillée
- Puis à l'acétone technique
- Laisser sécher sous hotte ventilée.
- Fermer les flacons

A titre d'informations, lors de nos manipulations, entre les filtrations des flacons d'une même crue, seul un rinçage abondant à l'eau distillée de l'unité de filtration a été effectué (diminution du temps de séchage et limiter les biais d'analyse avec des résidus d'acétone). Le nettoyage de l'unité de filtration à l'acétone a été effectué systématiquement entre des échantillons de crues différentes avec un temps de séchage nécessaire. Par contre tous les flacons en verre ont été et sont lavés à l'acétone.

7. Calculs sur les masses

- $m_{F(n^{\circ} \text{ filtre})f} - m_{F(n^{\circ} \text{ filtre})i} = m_{MES} (n^{\circ} \text{ filtre})$
 $m_{MES} (n^{\circ} \text{ filtre}) = m_{MES} (n^{\circ} \text{ échantillon})$
- $E(n^{\circ} \text{ échantillon})i - E(n^{\circ} \text{ échantillon})f = E(n^{\circ} \text{ échantillon})$ Volume d'eau brute de l'échantillon
- $R(n^{\circ} \text{ échantillon})f - R_i = R(n^{\circ} \text{ échantillon})$ Volume du filtrat de l'échantillon
- $E(n^{\circ} \text{ échantillon}) - R(n^{\circ} \text{ échantillon})$ Pertes dues à la manipulation

Même avec des précautions, des pertes en eau et en MES sur le système de filtration, dans les flacons, lors des manipulations, sur l'aluminium, etc. sont à prévoir. Les résultats de masse et volume peuvent donc être légèrement sous-estimés.

CONCLUSION

Via la méthode de filtration sous vide, nous avons filtré des échantillons d'eau brute prélevés en crue. Nous obtenons par échantillon :

- un filtrat contenant : matières dissoutes + colloïdes $<0,7 \mu\text{m}$,
- des MES $> 0,7 \mu\text{m}$ sur des filtres en fibre de verre.

Ces deux matrices sont envoyées à un laboratoire pour déterminer leur teneur en chlordécone. Dans notre cas, elles sont envoyées au Laboratoire Départemental d'Analyse de la Drôme (LDA26) accrédité par le COFRAC. Attention à se renseigner sur les quantités et volumes minimaux fixés par les laboratoires pour que l'analyse soit faisable et que l'incertitude et les seuils de quantification ne soient pas trop élevés. Le LDA26 nous préconise ici :

- 0,5 g minimum de MES par échantillon,
- 1 L minimum d'eau filtrée par échantillon (possible de diminuer jusqu'à 150 mL avec les biais que cela entraîne).

Ces résultats nous permettront d'étudier la répartition de la chlordécone lors d'un évènement pluvieux entre phase dissoute et adsorbée sur les matières en suspension des eaux superficielles.

Sans contrainte de quantité minimale pour la faisabilité de l'analyse, il aurait été intéressant de compléter les résultats par l'analyse de l'eau brute.

Par ailleurs, nous travaillons ici sur la charge totale mais pour une compréhension plus précise des processus de transport des MES et du transfert de la chlordécone, il serait pertinent de réaliser également une analyse granulométrique des MES et de la concentration en chlordécone sur chacune des fractions. Ceci nécessite des volumes très importants.

Informations complémentaires sur les résultats de nos manipulations :

En Martinique, nous avons filtré 18 flacons sur chacune des deux crues. Pour atteindre les quantités minimales pour permettre l'analyse au laboratoire nous avons regroupé certains flacons selon la montée, le pic de crue et la décrue, pour au final obtenir :

- 6 échantillons sur la crue du 19/12/2013,
- 3 échantillons sur la crue du 23/12/2013.

Un tableau détaillé est présenté ci-dessous :

	Référence de l'échantillon « date_n° flacons »	Nombre de filtres	m _{MES} (g)	V _{filtrat} (mL)	Type analyse demandé
1	19/12_1 à 5	18	0,714	950	chlordécone et 5bhydro
2	19/12_7 à 11	15	0,548	950	chlordécone et 5bhydro
3	19/12_12 à 13	7	0,891	390	chlordécone et 5bhydro
4	19/12_14	4	0,510	200	chlordécone et 5bhydro
5	19/12_15 à 16	8	0,827	390	chlordécone et 5bhydro
6	19/12_20+22+24	11	0,756	390	chlordécone et 5bhydro
7	23/12_1 à 6	34	0,577	950	chlordécone et 5bhydro
8	23/12_7 à 11	31	0,514	950	chlordécone et 5bhydro
9	23/12_13 à 20	47	0,594	950	chlordécone et 5bhydro