



HAL
open science

Transfert des Pesticides par voies Dissoutes et Particulaires aux Antilles-TPDP Evaluation de la Contamination par la Chlordécone en Rivière: Rôle des Voies de Transfert Dissout et Particulaire Rapport Final

Lise Ponchant, Anatja Samouëlian, Patrick Andrieux, Marc Voltz

► To cite this version:

Lise Ponchant, Anatja Samouëlian, Patrick Andrieux, Marc Voltz. Transfert des Pesticides par voies Dissoutes et Particulaires aux Antilles-TPDP Evaluation de la Contamination par la Chlordécone en Rivière: Rôle des Voies de Transfert Dissout et Particulaire Rapport Final. [Rapport de recherche] INRAE. 2020, 55 p. + annexes. hal-02945573

HAL Id: hal-02945573

<https://hal.inrae.fr/hal-02945573v1>

Submitted on 22 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transfert des Pesticides par voies Dissoutes et Particulaires aux Antilles–TPDP

Evaluation de la Contamination par la Chlordécone en Rivière : Rôle des Voies de Transfert Dissout et Particulaire

Rapport Final

Lise PONCHANT¹, Anatja SAMOUELIAN², Patrick ANDRIEUX¹, Marc VOLTZ²

¹INRA UR ASTRO, AgroSysteme TROPicaux, Domaine Duclos, Prise d'eau,
97170 Petit-Bourg, Guadeloupe

²INRA UMR LISAH, Laboratoire des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème,
2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier

Février 2020

Document élaboré dans le cadre de la convention AFB / INRA 2016-2018

N° de l'Action : FF (Code projet 227)

Résumé du livrable

L'étude s'insère dans une problématique de suivi de la qualité des eaux de rivière aux Antilles en se focalisant sur les voies de transfert en distinguant phase dissoutes et particulaire. En effet la connaissance de la partition entre dissout et particulaire permet d'une part d'établir un meilleur diagnostic de l'exposition des écosystèmes aquatiques, et d'autre part sa connaissance rend possible une interprétation sur les contributions réciproques des processus de lessivage et d'érosion impliqués dans la dispersion de contaminants par voie hydrologique. Cette connaissance constitue une étape clé vis à vis des enjeux de gestion et de préservation de la ressource en eau.

Les travaux se focalisent sur la chlordécone (CLD), un insecticide organochloré historiquement utilisé pour lutter contre le charançon des bananiers jusque dans les années 1993, ce qui a conduit notamment à une contamination généralisée de l'environnement (sol, eau de surface et souterraine, biote). Par ailleurs les propriétés d'adsorption élevées de la CLD suggèrent l'existence possible d'un transfert particulaire important.

Pour répondre à l'objectif cognitif de diagnostic des voies de transferts (dissout/particulaire) et d'interprétation des contributions, nous avons mis en place un suivi des contaminations des phases dissoute et particulaire pour une diversité de situations hydrologiques.

Pour répondre à l'objectif opérationnel de surveillance de la qualité des eaux, l'étude a pour ambition de produire des références sur la qualité de l'eau avec une haute résolution temporelle. De plus, en lien avec les Offices de l'eau (ODE) de Guadeloupe et Martinique nous proposons des préconisations pour l'interprétation des données de surveillance de la qualité de l'eau dans le contexte volcanique tropical.

La zone d'étude appartient à l'observatoire OPALE, et correspond au bassin versant (BV) de la rivière Pérou qui est représentatif d'un BV historiquement contaminé en CLD. L'ensemble du suivi est conduit à l'exutoire du BV, et le projet a bénéficié des données hydrologiques et de concentrations hebdomadaires en CLD acquises par l'observatoire. L'analyse hydrologique conduite sur le bassin versant a permis d'identifier que sur l'année la majorité de l'écoulement (70 %) a lieu pour une gamme de débits faibles (entre 0.2 et 3 m³/s), qui correspond à une situation calme et peu turbide, où la contribution du compartiment souterrain est majoritaire. Les crues avec une gamme d'intensité variable représentent l'autre part de l'écoulement où intervient la contribution des eaux de ruissellement. A partir de ce diagnostic, le protocole d'échantillonnage mis en place pour distinguer le transfert dissout et particulaire a été conduit par des prélèvements ponctuels pour une diversité des situations hydrologiques. In fine 226 échantillons ont été prélevés dont 220 en situations de crue, comprenant différentes phases montée, pic et décrue, représentant un total de 12 crues d'intensité variable. Sur chaque échantillon la teneur en matières en suspension (MES) après filtration à 0.7 µm ainsi que la concentration en CLD dissoute et particulaire ont été déterminés.

Les résultats obtenus s'articulent autour de la dynamique de transfert des MES et de la CLD dissoute et particulaire, de l'estimation de l'exportation de CLD, et enfin des recommandations en terme opérationnel.

Concernant les MES on retient que la gamme de teneurs en MES est importante entre 2.10⁻⁴ et 4 g/l et correspond à une augmentation du débit de 0.2 à 40 m³/s. Ce fonctionnement reflète une contribution des nappes peu chargées en MES pour les situations de débit de base, et une augmentation de la contribution du ruissellement lors des événements de crue de plus en plus intenses. Pour les situations de crue les plus intenses la contribution du ruissellement devient alors dominante.

Concernant la CLD dissoute, on enregistre des concentrations parmi les plus élevées pour les situations de débit de base (valeur médiane 1.045 µg/l). Pendant les crues on observe des concentrations en CLD dissoute plus élevées en montée et pic de crue qu'en situation de décrue (valeur médiane toutes crues confondues respectivement de 0.12 µg/l et 0.06 µg/l), ainsi qu'un gradient de concentration en fonction du débit de pointe.

Concernant la CLD particulaire, les teneurs présentent une forte variabilité (entre 8 et 1526 µg/kg de MES) qui n'est pas expliquée par l'intensité des crues. Ce n'est qu'en incluant la dynamique du transport de MES, que l'on identifie une évolution de la contribution du particulaire en fonction de l'intensité des crues.

A partir de l'ensemble de ces données un schéma conceptuel de la dynamique de contamination en CLD dissoute et particulaire en fonction du débit est proposé. Pendant l'écoulement de base, la CLD est présente quasi-exclusivement sous forme dissoute issue de l'exfiltration des eaux de nappes. La gamme de concentration est élevée en lien avec la contamination élevée des nappes. Lors de l'augmentation du débit en rivière (épisode de crue), les flux de ruissellement contribuent à l'écoulement, en participant notamment par la phase particulaire. La concentration en CLD total est la plus faible pour les épisodes de faibles crues (<0,1 µg/l), et augmente progressivement avec les intensités de crues pour devenir équivalente à la concentration enregistrée pendant le débit de base. On attribue à la contribution des eaux de ruissellement une double propriété, suivant son importance elle est à l'origine d'un mécanisme de

concentration (cas des fortes crues) ou bien de dilution en CLD (cas des crues de faible intensités). En conséquence le rôle des crues est à prendre en compte pour estimer la contamination en CLD de la rivière. Sur la base de ce schéma de fonctionnement, une fonction d'exportation de la CLD est proposée en considérant explicitement le rôle des crues en fonction du débit de pointe. La validation de cette fonction d'estimation est conduite à partir des données indépendantes acquises par l'observatoire OPALE. Sur la base d'une durée de 82 semaines on estime respectivement un export de 27.2 kg et de 29.5 kg pour nos travaux et ceux de l'observatoire. A l'échelle annuelle on identifie un transport majoritaire de CLD sous forme dissoute (98 %) cohérent avec un fonctionnement hydrologique où 70 % de la lame écoulée s'effectue pour des débits compris entre 0,2 et 3 m³/s. La contribution particulaire (2 %) est négligeable à l'échelle annuelle, et se concentre lors des épisodes de crues. Pour ces situations de crues, le transport sous forme particulaire est équivalent à la forme dissoute.

En étendant le raisonnement aux pesticides actuellement utilisés, on retiendra que dans le cas de la CLD, la persistance de la molécule dans le sol donne lieu à une migration constante en profondeur, qui in fine induit des concentrations élevées jusque dans les aquifères profonds. Ce processus n'est pas observé dans le cas des autres molécules actuellement utilisées dont la persistance est plus faible. Pour ces molécules le soutien de l'écoulement de la rivière par les nappes profondes joue un rôle de dilution. Concernant l'importance du transfert particulaire, les propriétés d'adsorption élevées de la CLD impliquent qu'elle peut être considérée comme un majorant du transfert particulaire par rapport à la plupart des pesticides actuels. La proportion annuelle du transfert particulaire des autres molécules pourra cependant être supérieure à celle de la CLD en raison d'un moindre apport de la phase dissoute via la contribution du souterrain notamment. Toutefois cette proportion ne restera toujours que très minoritaire, puisque la contribution du ruissellement de surface, chargé en particules à l'écoulement de rivière, est elle-même faible à l'échelle annuelle.

Concernant les suivis réglementaires de la qualité de l'eau tels que conduits par les ODE, nous soulignons l'importance de la connaissance du débit de la rivière pour interpréter les concentrations mesurées pendant les programmes de surveillance. Voici les principaux éléments mis en avant :

- Si les prélèvements sont majoritairement réalisés pour de faibles débits et teneurs en MES, ce qui revient au moment où la rivière est facilement accessible pour le prélèvement manuel, alors la caractérisation de l'état qualitatif de la rivière cible une fenêtre d'écoulement la plus contaminée par rapport à la CLD.
- Le calcul d'une concentration moyenne annuelle en CLD basé uniquement sur des prélèvements en situation de débit de base engendre une surestimation de la concentration moyenne annuelle en CLD.
- Actuellement les suivis ne permettent pas de caractériser les périodes d'exposition du biote aux pics de CLD particulaire qui ponctuellement sont aussi élevés que les concentrations maximales en CLD dissout durant l'écoulement de base

Pour citer ce document :

Ponchant L., Samouelian A., Andrieux P. et Voltz M. 2020. Evaluation de la Contamination par la Chlordécone en Rivière : Rôle des Voies de Transfert Dissout et Particulaire. Rapport final projet « Transfert des Pesticides par voies Dissoutes et Particulaires aux Antilles – TPDP », 55 pages plus annexes

Table des matières

Résumé du livrable.....	2
Table des matières.....	0
Table des illustrations.....	2
Remerciements.....	5
1. Contexte de l'étude et objectifs.....	6
2. Zone d'étude, dispositif et protocole d'échantillonnage.....	8
2.1. Zone d'étude.....	8
2.2. Dispositif.....	9
2.3. Echantillonnage en rivière.....	11
2.4. Préparation des échantillons et analyse de la Chlordécone sur les phases dissoute et particulaire.....	12
3. Fonctionnement hydrologique du bassin versant de la rivière Pérou.....	13
3.1. Analyse des flux : pluies et écoulements.....	13
3.1.1. Les pluies.....	13
3.1.2. Les écoulements en rivière.....	15
3.2. Caractérisation des échantillons prélevés.....	19
3.2.1. Échantillonnage manuel « hors crue ou crue de faible intensité ».....	21
3.2.2. Echantillonnage automatique « en crues ».....	22
4. Le transport solide dans la rivière Pérou.....	25
4.1. Caractérisation du transport solide en fonction de la nature de l'écoulement.....	25
4.1.1. Concentrations en MES dans l'écoulement « hors crue ou crue de faible intensité ».....	25
4.1.2. Concentrations en MES dans l'écoulement en crue.....	26
4.2. Schéma conceptuel des contributions des eaux souterraines et du ruissellement à la dynamique de concentrations en MES.....	28
4.3. Bilan du transport solide à l'échelle de la crue et de l'année.....	30
5. Le transport de chlordécone dans la rivière Pérou.....	32
5.1. La chlordécone dissoute.....	32
5.1.1. Concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement « hors crue et crues de faible intensité ».....	32
5.1.2. Concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement en crue.....	33
5.2. La chlordécone particulaire.....	37
5.3. Transport dissout et particulaire de chlordécone à l'échelle de la crue.....	41
5.3.1. Importance relative des voies dissoute et particulaire dans le transport de CLD à l'échelle de la crue.....	41
5.3.2. Transport de chlordécone en fonction du débit de pointe (Q_{max}).....	42
5.4. Schéma conceptuel de la dynamique de contamination en chlordécone dans la rivière Pérou.....	43
5.5. Transport dissout et particulaire de chlordécone à l'échelle annuelle.....	44
5.5.1. Bilans annuels des transferts en 2016 et 2017.....	44
5.5.2. Comparaison et validation des résultats à l'échelle du bassin versant.....	46
6. Conclusion de l'étude et préconisations associées.....	48

6.1.	Dynamiques et mécanismes de contamination des eaux de rivières par la CLD	48
6.1.1.	Eaux brutes	48
6.1.2.	Phase particulaire	48
6.2.	Implications sur le comportement d'autres molécules	50
6.3.	Conséquences par rapport au suivi de l'ODE	53
6.3.1.	Rappel de la méthode de prélèvement de l'ODE	53
6.3.2.	Interprétations des suivis ODE et ajustements possibles au regard des nouvelles références	53
7.	Références	55
	ANNEXES	56
	Annexe 1 : Présentation des dynamiques de MES et de CLD dissoute et particulaire au sein des crues échantillonnées	56
	Annexe 2 : Résultats analytiques	69

Table des illustrations

Figures :

Figure 1 - Courbes théoriques de variation du pourcentage de substances transportées sur les MES pour différentes valeurs de K_d (Voltz & Louchart, 2002). N.B. Ces courbes supposent des conditions d'équilibre pour la distribution des substances entre phases dissoutes et adsorbées.....	7
Figure 2 – Carte des sols sur le bassin versant de la rivière Pérou, Capesterre Belle-Eau, Basse-Terre, Guadeloupe..	8
Figure 3 - Localisation des stations hydrologiques OPALE sur le bassin versant de la rivière Pérou.....	9
Figure 4 - Abri regroupant la centrale d'acquisition des données et le préleveur (a), Section de l'étalonnage de la rivière sous le pont (b), Echelle limnimétrique et arrivée des capteurs (c), Zone de mesure et de prélèvement (capteur de pression, crépine du préleveur) (d).....	10
Figure 5 – Exemple du pluviographe de la station PONT, rivière Pérou (15 m d'altitude) avec vue sur l'aval de la station	10
Figure 6 - Crue observée à la station PONT de la rivière Pérou	11
Figure 7 - Filtration des échantillons de crue au laboratoire de l'INRA, UR ASTRO	12
Figure 8 - Courbes de pluies cumulées à différentes altitudes symbolisant le gradient pluviométrique du BV Pérou ...	14
Figure 9 - Pluviométrie mensuelle (mm) a) à l'aval et b) à l'amont du BV Pérou en 2016 et 2017.....	14
Figure 10 - Décomposition théorique de l'hydrogramme de crue pour la caractérisation des situations d'écoulement en rivière.	15
Figure 11 - Réurrence statistique des débits de pointes de crues (Q_{max}) de la rivière Pérou par la méthode du renouvellement (Miquel. 1984).....	16
Figure 12 - Répartition de l'écoulement de la rivière Pérou en fonction des gammes de débits a) lames écoulées (mm) et b) part dans l'écoulement total annuel.....	18
Figure 13 - Importance relative des crues et types de crues dans l'écoulement annuel de la rivière Pérou	19
Figure 14 - Répartition chronologique des échantillons prélevés	20
Figure 15 - Répartition du volume écoulé en crue entre la montée et la décrue	22
Figure 16 - Relation linéaire entre la lame d'eau écoulée en crue (mm) et le débit de pointe de crue (m^3/s)	23
Figure 17 - Exemple de dynamique de concentrations en MES à l'échelle d'une crue de type C survenue le 06-11-2016	26
Figure 18 - Variabilité des concentrations en MES au sein des crues échantillonnées	27
Figure 19 - Concentrations en MES dans la rivière en crue et dans les eaux de ruissellement suivant les types de sol	28
Figure 20 - Concentrations en MES dans les eaux de ruissellement des parcelles en fonction du débit de ruissellement	28
Figure 21 - Dynamique de concentration en MES en fonction du débit de la rivière Pérou	29
Figure 22 - Schéma conceptuel du fonctionnement du transport solide dans la rivière Pérou.....	30
Figure 23 – Répartition de la quantité de MES transportée entre la montée de crue et la décrue - rivière Pérou	31
Figure 24 - Relation de la quantité totale de MES transportée et le débit de pointe atteint par la crue - rivière Pérou ..	31
Figure 25 – Dynamique de concentration en CLD dissoute ($\mu g/l$) en fonction du débit (m^3/s) dans l'écoulement «hors crue ou crues de faible intensité».....	33
Figure 26 – Exemple d'évolution de la concentration en CLD dissoute ($\mu g/l$) sur une période de crues survenues le 09-03-2017: Partie1 de type B, échantillon hors crue de fin de décrue, et Partie2 de type C	34
Figure 27 - Variabilité des concentrations en CLD dissoute ($\mu g/l$) au sein des crues échantillonnées a) toute la crue et b) uniquement en montée et pic de crue.....	35
Figure 28 - Comparaison des concentrations en CLD dissoute dans la rivière en crue et dans les eaux de ruissellement par type de sol.....	36
Figure 29 – Evolution des concentrations en CLD dissoute avec le débit de ruissellement dans les parcelles	36

Figure 30 – Teneurs en CLD de la phase particulaire en fonction de la charge en MES des eaux de rivière.....	38
Figure 31 - Exemple d'évolution de la charge en MES et de la teneur en CLD particulaire ($\mu\text{g/l}$) pendant la crue de type D crue survenue le 14-09-2017.....	39
Figure 32 - Variabilité des concentrations en CLD particulaire ($\mu\text{g/l}$) au sein des crues échantillonnées a) toute la crue, b) uniquement en montée et pic de crue.....	39
Figure 33 - Comparaison des teneurs en CLD sur MES (gauche) et des concentrations en CLD particulaire dans les eaux de rivière en crue et les eaux de ruissellement parcelaire selon le type de sol.	40
Figure 34 – Evolution des teneurs en CLD dans les particules et des concentrations en CLD particulaire des eaux en fonction du débit de ruissellement.....	40
Figure 35 - Contributions des voies dissoute et particulaire au transport de CLD pendant les crues	41
Figure 36 - Contributions des voies dissoute et particulaire au transport de CLD pendant la montée et la décrue	42
Figure 37 - Transport de CLD dissoute et particulaire en fonction du débit de pointe atteint par la crue.....	42
Figure 38 - Dynamique de contamination en CLD dans la rivière Pérou.....	43
Figure 39 - Contribution des voies dissoute et particulaire à la dynamique de contamination en CLD dans la rivière Pérou.....	44
Figure 40 - Part des situations d'écoulements et des voies dissoute et particulaire dans le transport de CLD annuel dans la rivière Pérou	45
Figure 41 - Comparaison des quantités de CLD cumulées estimées par l'Action de recherche TPDP et l'Observatoire OPALE	47
Figure 42 - Schéma d'interprétation de la contamination en CLD brute en rivière : cas de la rivière Pérou.....	49
Figure 43 - Demi-vies (DT_{50} , jour) en fonction du coefficient d'adsorption (K_{oc} , L/kg) à partir des références EFSA ou de la base de données PPDB	51
Figure 44 – Export de matière active (%) dans les eaux a) de ruissellement et b) de percolation selon le type de sol et pour différentes matières actives	52
Figure 45 – Contribution du transport particulaire dans les eaux de ruissellement sur parcelles pour différentes matières actives	52

Tableaux :

Tableau 1 - Cumuls de pluie 2016 et 2017 à différentes altitudes - Bassin versant de la rivière Pérou.....	13
Tableau 2- Typologie de crue, station PONT, rivière Pérou.....	16
Tableau 3 - Bilans hydrologiques de 2016 à 2018, Bassin versant de la rivière Pérou.....	17
Tableau 4 – Importance des crues dans l'écoulement annuel de la rivière Pérou	18
Tableau 5 - Caractérisation hydrologique des échantillons <i>prélevés manuellement</i> « hors crue ».....	21
Tableau 6 - Représentativité des crues échantillonnées selon l'importance relative des types de crue dans l'écoulement annuel	22
Tableau 7 – Caractérisation hydrologique et répartition des échantillons prélevés automatiquement « <i>en situation de crues</i> »	24
Tableau 8 - Gammes de concentrations en MES des échantillons hors crue selon leur situation hydrologique.....	25
Tableau 9 – Gammes de concentrations en MES en crues	26
Tableau 10 – Gammes de concentrations en CLD dissout dans l'écoulement hors crue et selon la situation hydrologique.....	32
Tableau 11 - Gammes de concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement en crue	33
Tableau 12 - Gammes de teneurs en CLD particulaire dans les MES transportées par la rivière	37
Tableau 13 - Gammes de concentrations en CLD particulaire ($\mu\text{g/l}$) des eaux de rivière dans l'écoulement en crue...	38
Tableau 14 - Estimations des quantités de CLD transportées à l'échelle des crues échantillonnées dans la rivière Pérou.....	41
Tableau 15 - Bilans annuels du transport de CLD : contributions des voies dissoute et particulaire, de l'écoulement de base et des crues	45
Tableau 16 - Transport de CLD par les eaux de surface (g/ha/an), en crue et dans le ruissellement parcellaire	46
Tableau 17 - Comparaison des pluies sur les périodes de mesure par rapport à l'échelle annuelle.....	46
Tableau 18 : Estimation du transport de CLD par le ruissellement de surface sur parcelles contaminées au CLD et selon les types de sols	46

Remerciements

Cette étude a été mise en œuvre avec la contribution active d'agents INRA appartenant à deux unités de recherche partenaires que nous souhaitons vivement remercier : Thierry Bajazet, Jean-Baptiste Nannette et Nazaire Robin pour l'UR ASTRO en Guadeloupe (Domaine Duclos, Petit-Bourg) et Sandrine Negro et Olivier Huttel pour l'UMR LISAH de Montpellier.

Il est important de rappeler que ces travaux ont été conduits sur un site de l'Observatoire OPALE et que nous avons bénéficié des données hydrologiques et analytiques acquises dans ce cadre ainsi que d'un contexte favorable pour acquérir et interpréter nos résultats.

Enfin nous remercions les Offices de l'eau de Guadeloupe et Martinique et en particulier Sophie Kanor, Julie Gresser et Melissa Bocaly pour nos échanges constructifs qui ont permis de préciser les recommandations opérationnelles et scientifiques de ce livrable.

1. Contexte de l'étude et objectifs

La directive n°2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000, établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite Directive Cadre sur l'Eau (DCE) prévoit que les *états membres veillent à ce que soient établis des programmes de surveillance de l'état des eaux afin de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque district hydrographique*. L'unité homogène d'évaluation de l'état est une *masse d'eau*, de surface ou souterraine. Pour l'ensemble du district hydrographique de Guadeloupe et de Saint-Martin, les masses d'eaux de surface à suivre sont uniquement définies sur l'île de Basse-Terre en Guadeloupe.

L'Arrêté de surveillance du 25 janvier 2010 décrit les méthodologies à mettre en œuvre pour la réalisation des prélèvements et recommande l'utilisation des guides d'échantillonnage *AQUAREF* pour les opérations de terrain en rivière. Actuellement, il s'agit de réaliser des mesures à une certaine fréquence dans les différents compartiments du milieu appelés *éléments de qualité* : *biologique*, *hydro-morphologique* et *physico-chimique*. Des prélèvements ponctuels d'eaux brutes sont réalisés afin d'en déterminer les teneurs en micropolluants. Ces analyses reflètent donc un état global de la masse d'eau qui englobe la phase dissoute et la phase particulaire. Depuis 2009, l'Office de l'Eau de Guadeloupe (ODE971) réalise un suivi de la qualité des eaux sur un réseau de 25 stations hydrologiques, une station étant un tronçon de cours d'eau sur lequel sont réalisés plusieurs types de mesures. Ce suivi ODE concerne 41 substances prioritaires, 5 pesticides et 5 polluants non synthétiques et permet de définir l'état des masses d'eaux en utilisant les méthodes de calcul et règles d'évaluation établies dans le guide *AQUAREF*.

Les protocoles de suivi réglementaires peuvent évoluer par le biais de travaux scientifiques afin de s'adapter à des contextes particuliers : climat tropical maritime, polluant persistant, insularité. L'Observatoire de la Pollution Agricole aux antilles (OPALE) mis en place en 2015 par un consortium d'organismes de recherche (Rapport final Allenvi OPA-C, 2015) réalise ainsi un suivi en continu de la contamination des eaux sur deux bassins versants à forte composante agricole. Près de 500 matières actives phytosanitaires et métabolites sont analysés à une fréquence hebdomadaire sur des prélèvements d'eau brute asservis aux débits des rivières afin d'étudier les dynamiques de transferts de contaminants de la parcelle agricole à la rivière. Par ailleurs, d'autres programmes de recherche comme la présente l'action R&D INRA-AFB, objet de ce rapport, s'appuient sur le dispositif OPAL afin de bénéficier d'un contexte d'étude favorable où différentes variables sont acquises (climatiques, hydrologiques, pédologiques, pratiques agronomiques, contamination) pour l'interprétation des résultats. En effet, bien que délicate à mettre en place dans le cadre d'un suivi réglementaire, la connaissance de la répartition d'un contaminant entre les deux phases dissoute et particulaire apporte plusieurs intérêts. Au plan cognitif, cette partition indique les contributions réciproques des processus de lessivage et d'érosion impliqués dans la dispersion des contaminants par voie hydrologique. Ceci constitue une étape de diagnostic nécessaire vis à vis des enjeux de gestion et de préservation de la qualité des eaux. Par ailleurs concernant les écosystèmes aquatiques, la distinction entre dissout et particulaire aide à mieux identifier les phases d'exposition majoritaire des organismes aux contaminants. Dans le cas spécifique de la Guadeloupe, l'utilisation massive de chlordécone (CLD) entre 1972 et 1993, comme insecticide pour lutter contre le charançon du bananier, a entraîné une contamination chronique et durable des sols qui s'est progressivement diffusée aux autres éléments constituant l'environnement comme l'eau et le biote. Ainsi les eaux souterraines sont contaminées par les eaux de percolation issues de sols contaminés où la désorption de la molécule, bien que faible, est néanmoins suffisante. Selon les premières modélisations réalisées par Cabidoche *et al.* (2009), ces transferts vers le milieu souterrain pourraient durer plusieurs décennies à plusieurs centaines d'années selon les types de sol et l'hétérogénéité des aquifères. Les concentrations en CLD dans les eaux souterraines sont très variables mais globalement élevées, entre 0.5 et 25 µg/l (Rapport final Allenvi OPA-C, 2015). Crabit *et al.* (2016) montrent ainsi que les concentrations décennales en CLD dans la rivière Pérou diminuent avec l'augmentation du volume écoulé, signifiant encore l'importance de la contribution des eaux souterraines (débit de base) à la contamination en CLD de la rivière. Or les propriétés de sorption élevées de la CLD sur les phases organo-minérales des sols (coefficient de partage eau-sol K_{oc} observé en situation de désorption) comprises entre 2000 L/kg et 20100 L/kg suivant les études

(Bonvallet et Dor, 2004 ; Cabidoche *et al.* 2009 ; Howard *et al.* 1981 ; Kenaga, 1980) suggèrent également la possibilité d'un transport important en phase particulaire en rivière, la plaçant comme un majorant du transport particulaire de pesticides en général (Figure 1) (Voltz et Louchart, 2002).

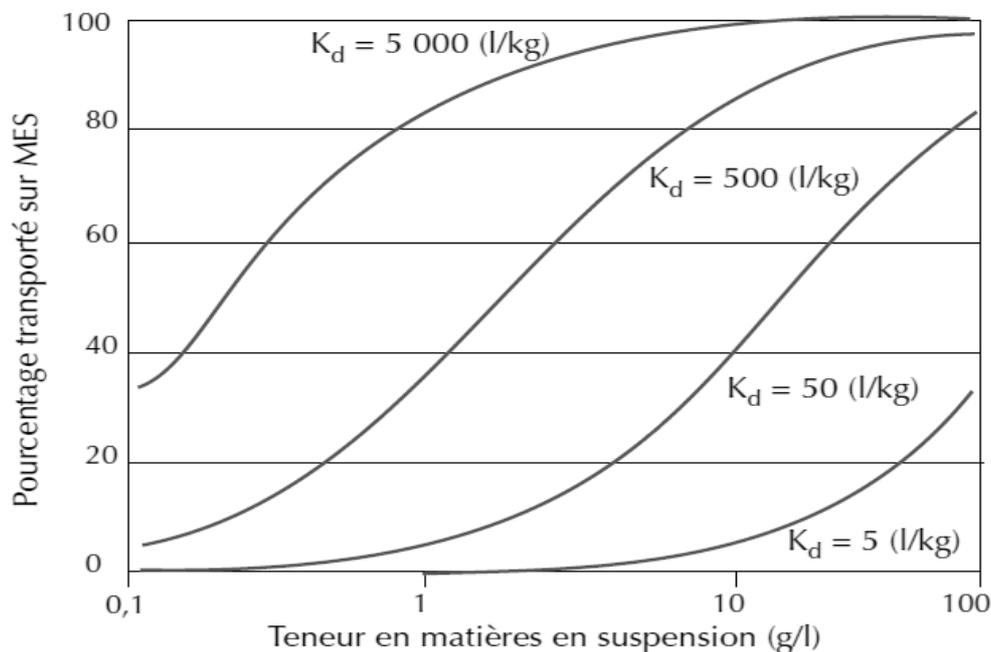


Figure 1 - Courbes théoriques de variation du pourcentage de substances transportées sur les MES pour différentes valeurs de K_d (Voltz & Louchart, 2002). N.B. Ces courbes supposent des conditions d'équilibre pour la distribution des substances entre phases dissoutes et adsorbées.

On recense actuellement peu d'études alliant une détermination conjointe de la CLD sur les phases dissoute et particulaire. Une première synthèse bibliographique (Livrable 1 TPDP) a permis de distinguer différentes situations de transferts de matières actives via la phase particulaire dans des situations de ruissellement de parcelles. On identifie une contribution du transport particulaire pour des matières actives avec une faible solubilité et un coefficient d'adsorption élevé ($K_{oc} > 1000$ L/kg), combinée à une charge en matières en suspension (MES) comprise entre 0.12 g/l à 115 g/l et à des taux d'érosion compris entre 0.002 Kg/ha et 4.35 Kg/ha. Pour certaines études, on n'identifie pas de contribution particulaire majoritaire quand bien même les matières actives recherchées présentent des propriétés physico-chimique favorables, des charges en MES comprises entre 0.3 et 63 g/l et un taux d'érosion entre 0.003 Kg/ha et 2 kg/ha. Ainsi dans certaines situations la contribution du particulaire n'est pas évidente quand bien même l'ensemble du contexte taux d'érosion, charge en MES, et propriétés physico-chimique des matières actives y sont favorables. Une proposition d'interprétation de ces variations repose sur la nature des particules mobilisée lors du ruissellement, et donc d'un lien étroit avec la mobilisation des particules en fonction de la nature des sols. Ainsi la CLD présente des propriétés favorables à une contribution de la phase particulaire (faible solubilité de 3 mg/L et K_d élevé entre 2000 et 20 100 L/kg). On peut ainsi faire à priori l'hypothèse que la CLD est une bonne candidate pour un transfert majoritaire sous forme particulaire et ce même avec une faible teneur en MES. Néanmoins cette hypothèse doit être vérifiée au vue des précédentes conclusions relatives au rôle possible de la nature des MES.

L'objectif des travaux présentés dans ce rapport est de caractériser de façon précise les modes de transferts majoritaires de la CLD pour différents contextes d'écoulement en rivière. A cet effet, nous avons effectué un suivi des contaminations des phases dissoutes et particulaires des eaux de rivière du bassin versant de la rivière Pérou sur des périodes d'écoulement représentatives de différentes situations hydrologiques et notamment lors de périodes de crues où la concentration en MES peut-être importante.

L'objectif opérationnel de l'étude, en lien avec les attentes des Offices de l'Eau, est de produire des références pour interpréter et analyser les résultats analytiques issus des suivis effectués dans le cadre de la DCE.

2. Zone d'étude, dispositif et protocole d'échantillonnage

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située en Guadeloupe sur l'île de la Basse-Terre dans la commune de Capesterre-Belle-Eau et correspond au bassin versant de la rivière Pérou qui occupe une surface de 12,66 km² (Figure 2). Celui-ci est caractérisé par une forme en « entonnoir » avec un amont forestier représentant presque 70 % de la surface totale et un gradient d'altitude important (15 – 1411 m). Le climat tropical maritime amène de fortes précipitations, avec 4669 mm de pluie en moyenne interannuelle sur le bassin (ORSTOM, 1981), qui augmentent avec l'altitude (de 2900 mm en aval à 5400 mm en amont) (ORSTOM, 1981).

L'activité volcanique et les fortes variations climatiques locales ont abouti à une richesse pédologique importante, et organisée selon une toposéquence de trois types de sol principaux (Colmet-Daage, 1965) : les andosols en altitude (76 % de la surface du bassin), les sols bruns andiques en position intermédiaire (15 %) et les nitisols en aval (9 %) (Figure 2).

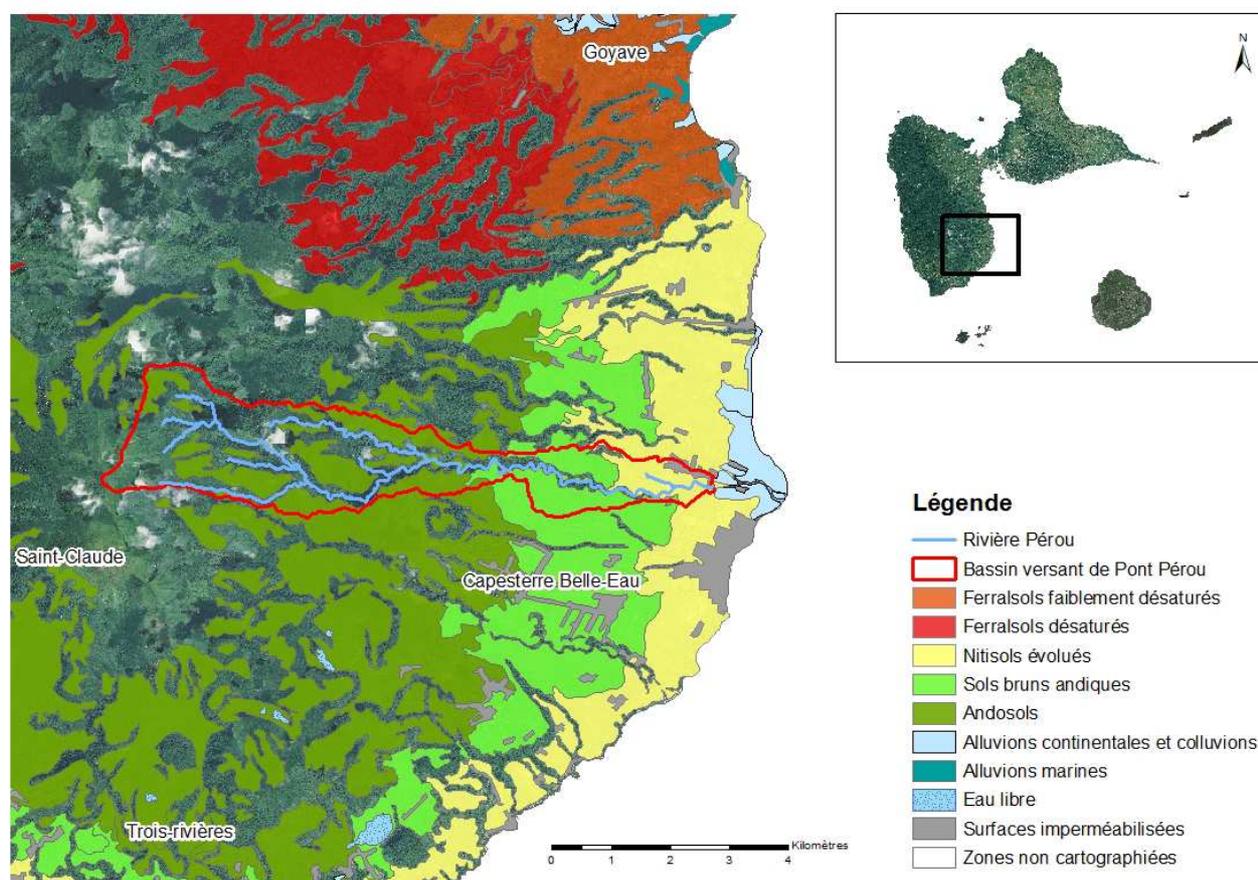


Figure 2 – Carte des sols sur le bassin versant de la rivière Pérou, Capesterre Belle-Eau, Basse-Terre, Guadeloupe

En termes d'occupation des terres, la forêt domine avec 900 ha soit 71 % de la surface totale du bassin, essentiellement située à l'amont. Ce dernier est en effet recouvert à 90 % par une forêt tropicale dense (784 ha sur 876,4 ha). Le bassin agricole représente environ 390 ha principalement occupés par la culture de banane export (23 %), de canne à sucre en rotation avec la banane (5 %) et une agriculture périurbaine en aval (16 %) (RPG 2010 à 2014).

2.2. Dispositif

Bien que l'étude ait développé son propre dispositif d'acquisition, via l'installation d'un préleveur automatique dédié à l'échantillonnage de crue (2.3) et d'un turbidimètre à l'exutoire de la rivière Pérou, elle repose également sur un ensemble de données acquises dans le cadre du dispositif de mesures de l'Observatoire de la Pollution Agricole aux AntILes (OPALE).

Les **données hydrologiques** utilisées ici concernent les débits mais OPALE suit également la conductivité et la température de l'eau grâce à trois stations hydrométriques installées sur la rivière Pérou qui mesurent en continu ces variables à un pas de temps de 3 min (Figure 3) :

- la station PONT, située à l'aval (15 m d'altitude) représente l'exutoire de la rivière,
- la station NOVILLE (91 m d'altitude) est en plein cœur de la zone de culture (non concernée par cette étude),
- la station CONCESSION (220 m d'altitude) représentant l'exutoire de l'amont forestier et « l'entrée » du domaine agricole du bassin versant.

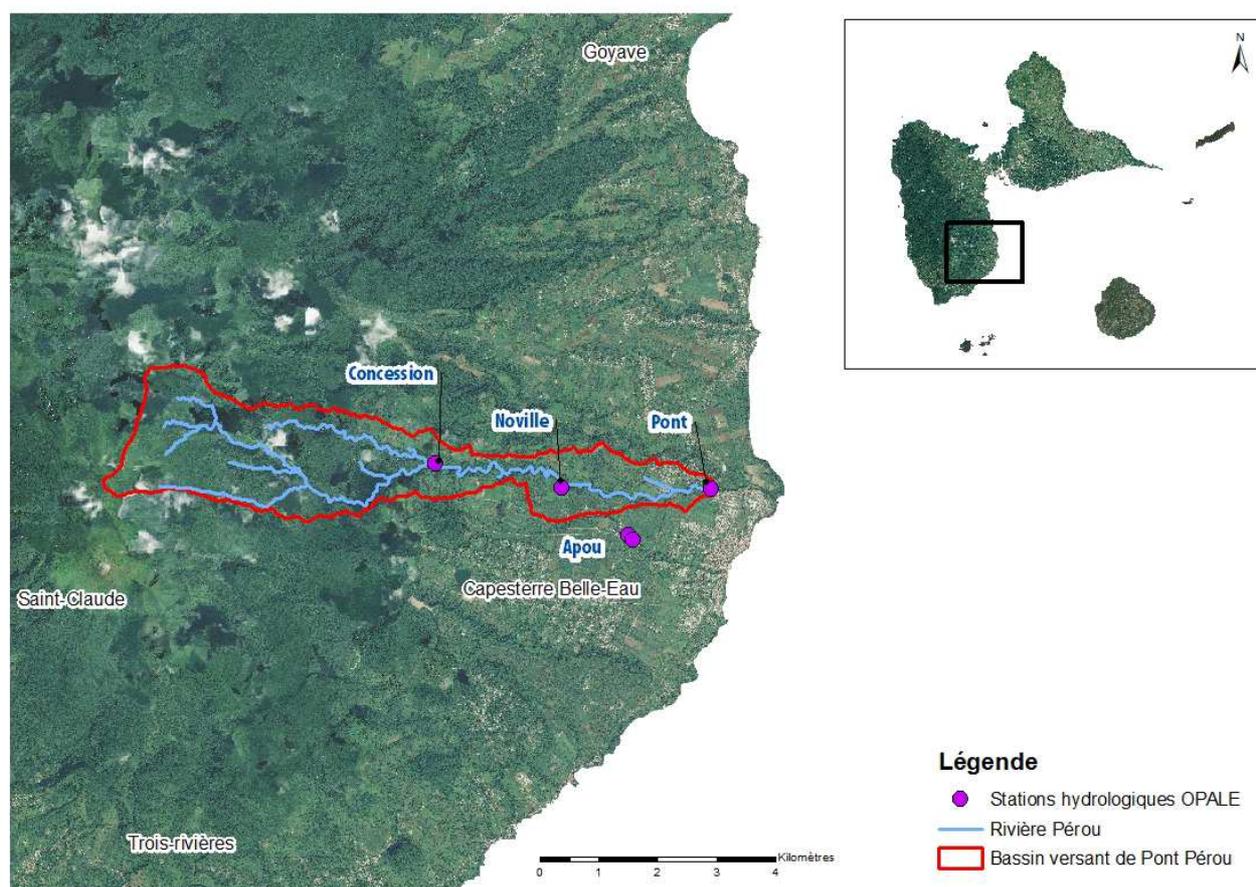


Figure 3 - Localisation des stations hydrologiques OPALE sur le bassin versant de la rivière Pérou

Le débit est ici une variable élaborée qui n'est pas mesurée directement par un capteur dans la rivière mais issu de la conversion de hauteurs d'eau. En effet, une sonde de pression calée à une échelle limnimétrique mesure la hauteur d'eau dans la rivière (Figure 4c et d), qui est ensuite convertie en débit grâce à une courbe d'étalonnage intégrant les caractéristiques hydrauliques de la station (Figure 4b). La construction de la courbe d'étalonnage implique de connaître le profil en travers et en long de la rivière (section mouillée, rayon et pente hydrauliques, rugosité sur la section du profil) et de réaliser des jaugeages à différentes hauteurs d'eau. Or les pluies tropicales, abondantes et

intenses sur le bassin, peuvent provoquer de violentes crues et modifier la morphologie de la rivière (creusement ou ensablement du lit, modification des berges et de la rugosité sur le profil) au niveau des stations ce qui peut rendre délicat l'établissement de la courbe d'étalonnage et nécessite un suivi topographique régulier.



Figure 4 - Abri regroupant la centrale d'acquisition des données et le préleveur (a), Section de l'étalonnage de la rivière sous le pont (b), Echelle limnimétrique et arrivée des capteurs (c), Zone de mesure et de prélèvement (capteur de pression, crépine du préleveur) (d)

Les **données pluviométriques** utilisées (cumul et intensité de pluie) sont générées par 3 pluviographes à augets de 0.5 mm de capacité (Hydreka®) (Figure 5) implantés à différentes altitudes du bassin afin d'apprécier les variations climatiques du gradient altitudinal : 15 m (Pont), 52 m (Apou) et 220 m (Concession). La pluie étant la variable la plus difficile à spatialiser, les données de pluie de 3 stations pluviométriques Météo France avoisinantes ont également été utilisées ; elles sont localisées aux altitudes de 70 m (Bois Debout), 253 m (Neufchâteau) et 1141 m (Citerne).



Figure 5 – Exemple du pluviographe de la station PONT, rivière Pérou (15 m d'altitude) avec vue sur l'aval de la station

Enfin, OPALE suit la contamination par les pesticides en rivière via un échantillonnage en continu à l'exutoire (station PONT) grâce à un préleveur automatique asservi au débit (Hydreka®, AS900). Cet échantillonnage, en fonction du volume écoulé dans la rivière, permet de constituer des échantillons d'eau brute hebdomadaires, mélangeant phases dissoute et particulaire, sur lesquels sont analysés un ensemble de paramètres physico-chimiques : pesticides multi-résidus (469 molécules), carbone organique, conductivité et turbidité.

2.3. Echantillonnage en rivière

L'échantillonnage, distinguant les formes de transport dissout et particulaire, repose sur des prélèvements spécifiques réalisés en période de crue par un préleveur automatique (Hydreka®, AS950) à l'exutoire de la rivière Pérou (station PONT) (Figure 6). De manière optimale, le préleveur est programmé pour pouvoir constituer 8 échantillons de 990 ml par crue, afin d'assurer une quantité minimale d'eau (dissout) et de matières en suspension (particulaire) pour analyser la chlordécone. En effet, une consigne de déclenchement est envoyée par la centrale au préleveur, qui lui est programmé pour remplir 3 flacons de 330 ml à la suite puis pour attendre une autre consigne de prélèvement. Un échantillon est donc composé de 3 flacons contenant 330 ml d'eau brute.

Enfin, certaines crues ont été échantillonnées sur le format de 24 échantillons de 300 ml afin de disposer d'un plus grand nombre de mesures de la concentration en MES (g/l) en crue et d'étoffer la relation au débit. Dans certains cas, des échantillons composites ont été réalisés pour l'analyse de la CLD.

A cela s'ajoute un échantillonnage qualifié de « hors crue » prélevé manuellement dans des conditions de débits faibles permettant l'accès à la rivière.

Dans la mesure du possible, l'échantillonnage des crues s'attache à couvrir la diversité des situations hydrologiques rencontrées en se basant sur une typologie de crue établie à partir d'une analyse fréquentielle des débits de pointe (section 3.1.2 ; Tableau 2). De façon opérationnelle, le préleveur automatique est programmé pour se déclencher à une certaine hauteur d'eau en lien avec le débit de pointe de crue visé. Les prélèvements suivants sont déclenchés en fonction d'une différence de hauteur d'eau entre deux mesures (montée de crue) ou un intervalle de temps (30 à 45 min) lorsque cette différence de hauteur est trop longue à atteindre (décru).



Figure 6 - Crue observée à la station PONT de la rivière Pérou

2.4. Préparation des échantillons et analyse de la Chlordécone sur les phases dissoute et particulaire

Les échantillons d'eau brute sont prélevés dans des flacons en verre sur site et collectés quelques heures après l'évènement, en général 3 à 4 heures. Après homogénéisation manuelle, la séparation entre les phases dissoute et particulaire s'effectue par filtration sous vide sur filtres en fibre de verre (Whatman®, Ø45 mm et 0,7 µm de porosité) et dans un ensemble de filtration en verre (Figure 7) (Livrable 2 de l'action).

L'ensemble des échantillons collectés (en crue et hors crue) est filtré. Les matières en suspension (MES) déposées sur les filtres, sont séchées à l'étuve pendant 24 h à 40°C, pour permettre conjointement l'estimation de la charge solide et la conservation de l'échantillon pour la détermination analytique de la CLD. Le filtrat est conservé au frais (4°C) dans un flacon en verre avant d'être envoyé à l'analyse.



Figure 7 - Filtration des échantillons de crue au laboratoire de l'INRA, UR ASTRO

La CLD est analysée par chromatographie en phase liquide HPLC au Laboratoire La Drôme (LDA26, Valence, France), son incertitude analytique est de 30 % sur la matrice liquide et de 40 % sur la matrice solide. Lorsque les quantités d'eau ou de MES par échantillon étaient trop faibles pour la détermination analytique de CLD nous avons regroupé les échantillons en respectant l'hydrogramme de crue.

3. Fonctionnement hydrologique du bassin versant de la rivière Pérou

3.1. Analyse des flux : pluies et écoulements

Les données acquises dans le cadre de l'observatoire OPALE depuis 2013 (pluies et débits) permettent de caractériser les flux d'eau sur le bassin versant et leur variabilité intra et interannuelles. Ainsi le climat tropical maritime guadeloupéen correspond à une alternance entre une période sèche dite du « carême » plus ou moins longue en début d'année et une saison humide dite « hivernage », caractérisée par des pluies intenses amenées par les alizés pendant le second semestre. Selon les années, les saisons vont être plus ou moins marquées et générer des flux variables.

L'étude couvre la période 2016-2018 avec des échantillonnages de crues et hors crue qui s'étendent d'août 2016 à mars 2018. Nous nous attacherons donc à décrire en particulier ces années à partir des données disponibles à ce jour où les lacunes présentent dans les chroniques ne sont pas reconstituées.

3.1.1. Les pluies

Les cumuls annuels de pluie ainsi que les courbes de pluies cumulées permettent d'apprécier la variation interannuelle, entre 2016 et 2017, du flux d'eau entrant sur le bassin et mettent en lumière le gradient altitudinal de pluviométrie typique de la zone étudiée (Tableau 1 et Figure 8).

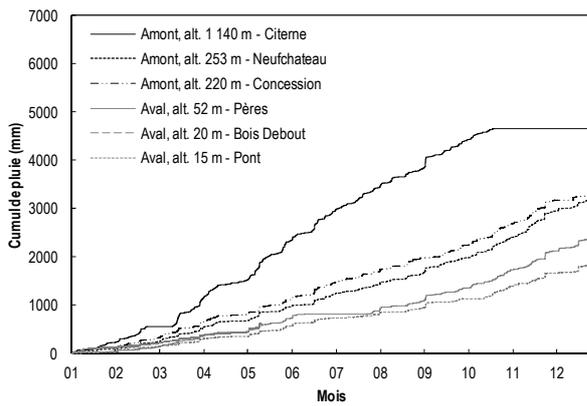
Globalement, l'année 2017 a été plus humide que 2016 et 2018, avec des lames de pluies annuelles systématiquement supérieures pour les différentes altitudes considérées exceptées en aval à 15 m où la lame de pluie annuelle est presque équivalente à celle de 2016 (Tableau 1). Cette différence semble moins marquée dans la zone aval du bassin (stations situées à 15 et 52 m d'altitude) avec moins de 300 mm de différence entre 2017 et 2016/2018 contre plus de 500 mm pour les autres stations.

Altitude	Cumul de pluie annuel (mm)		
	2016	2017	2018
Aval BV : 15 m	2444.7	2397.9	2081.9
Aval BV : 52 m	2855.8	2906.3	2634.7
Amont BV : 253 m	3270	3819.7	3296.1
Amont BV : 1140 m	6100	7771.1	6896.7
Pluie « moyenne » sur le BV Pérou	4393.2	4993.5	4853.4

Tableau 1 - Cumuls de pluie 2016 et 2017 à différentes altitudes - Bassin versant de la rivière Pérou

Notons que de nombreuses lacunes sont présentes dans les chroniques de la station Citerne : 81 jours en 2016 dont 58 jours pendant le 4^{ème} trimestre et 21 jours en 2017. De même, les mois de juillet et août 2017 de la station Pont ne comptent plus de 30 jours de lacunes. Enfin, aucune donnée n'a été acquise pendant le mois de juillet 2016 à la station Pères (52 m) car le pluviographe a été déplacé et réinstallé pendant cette période. A ce jour, ces données ont été reconstituées et les lacunes compensées grâce à des régressions avec les données issues d'autres stations pluviométriques proches, mais l'erreur serait plus importante pour la station Citerne que pour les autres stations du fait de l'importance des pluies en amont et car l'essentiel des lacunes s'est produit pendant la saison des pluies (4^{ème} trimestre) (Figure 8). En aval, l'erreur pour le cumul à la station Pères en 2016 est presque négligeable car le mois de juillet a été particulièrement sec (74 mm à Pont). Cette erreur est cependant non négligeable en 2017 à la station Pont où on peut voir une augmentation de la lame de pluie pendant cette période au niveau des stations Pères et Neufchâteau (Figure 8).

a) 2016



b) 2017

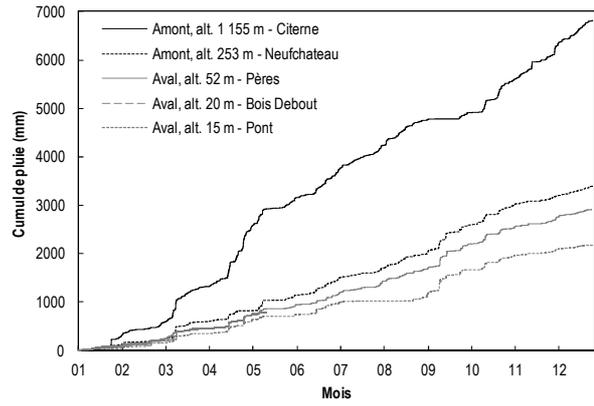
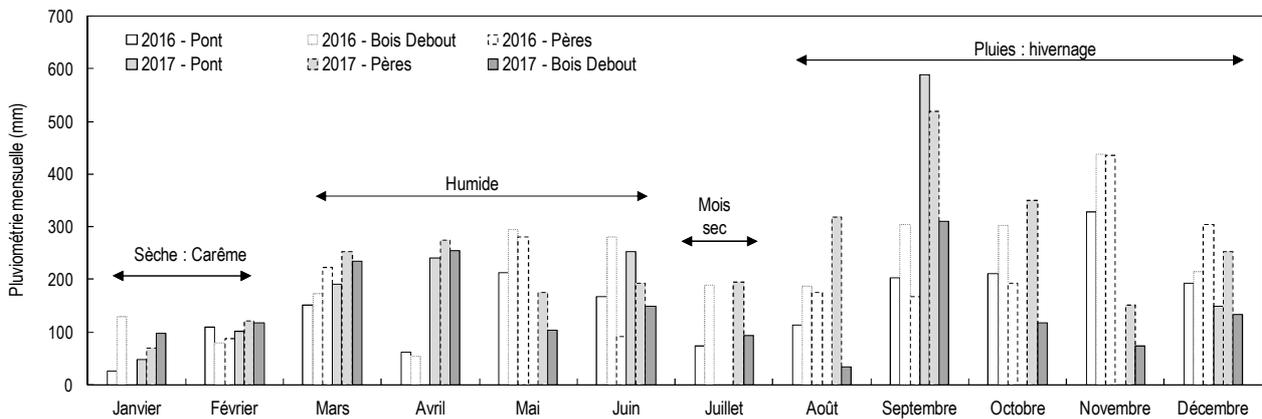


Figure 8 - Courbes de pluies cumulées à différentes altitudes symbolisant le gradient pluviométrique du BV Pérou

La pluviométrie mensuelle à l'aval du bassin, entre 15 et 52 m d'altitude (stations Pont et Pères) ainsi qu'à l'amont à 253 m d'altitude (station Neufchâteau) et à 1140 m (station Citerne) permet d'apprécier l'ambiance climatique sur la période d'acquisition des mesures et en particulier celle des crues (Figure 9).

a) Aval du BV : pluies entre 15 et 52 m d'altitude



b) Amont du BV : pluies entre 253 et 1155 m d'altitude

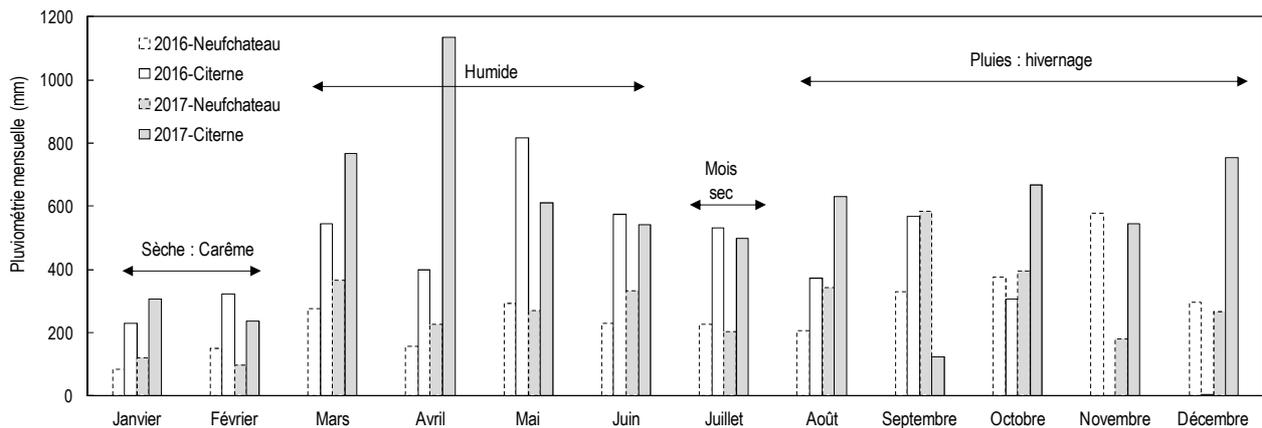


Figure 9 - Pluviométrie mensuelle (mm) a) à l'aval et b) à l'amont du BV Pérou en 2016 et 2017

Sur les deux années étudiées, les mois de janvier et février sont secs par rapport aux autres mois et correspondent à la saison sèche dite du carême. Les pluies reprennent courant mars et continuent jusqu'à juin pour former une saison humide, bien que le mois d'avril fût particulièrement sec en 2016 (pluies < 100 mm en aval et ~400 mm en amont) et très pluvieux en 2017 avec un cumul de pluie mensuel de près de 1100 mm en amont et supérieur à 200 mm en aval.

(Figure 9). Les mois de juillet et août 2016 semblent assez secs bien que cela soit plus visible à l'aval qu'à l'amont, ainsi que le mois de juillet 2017, formant une courte période de sécheresse avant la reprise des pluies courant août (Figure 9).

La saison des pluies s'étend d'août à décembre, voire jusqu'à janvier de l'année suivante pour la saison des pluies 2017, avec un cumul de pluie maximal en novembre pour l'année 2016 (> 400 mm en aval à 52 m et > 550 mm en amont à 253 m d'altitude) et en septembre pour 2017 (> 500 mm en aval à 52 m et presque 600 mm en amont à 253 m d'altitude) (Figure 9). Ces mois correspondent aux épisodes de pluies les plus importants et les plus intenses recensés sur ces deux années : l'onde tropicale du 28/11/2016 cumulant un peu plus de 100 mm de pluie à l'aval et 125,5 mm à l'amont, l'onde tropicale du 14/09/2017 cumulant un peu plus de 220 mm de pluie à l'aval, et le cyclone du 18/09/2017 (MARIA) avec des cumuls de pluies de 100 mm à l'aval et 140 mm à l'amont.

3.1.2. Les écoulements en rivière

On distingue 3 situations afin de qualifier les écoulements en rivière : l'écoulement ou débit de base (Q_b), la crue (y compris la décrue) et le tarissement.

Le **débit de base** correspond aux périodes de soutien des eaux souterraines (ESO) à l'écoulement en rivière. Pour ces périodes il n'y a pas de contribution de l'écoulement des eaux de ruissellement de surface (ER) au débit de la rivière. En écoulement de base, la rivière est calme avec un débit faible, l'eau est claire et limpide car les nappes souterraines ne sont pas chargées en matières en suspension (MES). Cette situation de base s'oppose aux **événements de crues** pendant lesquels la rivière voit son débit augmenter rapidement liés à la contribution de nouveau d'écoulement lié au transfert des eaux de ruissellement de surface (ER) générés par les pluies (Figure 10). En crue, la rivière est agitée et turbide car chargée en MES apportées par les eaux de ruissellement (Figure 6). La décrue commence lorsque le ruissellement diminue (diminution de l'intensité des pluies voire arrêt) et ne permet plus de faire augmenter le débit de la rivière. La fin de la décrue correspond donc à l'arrêt de la contribution des ER. Se produit alors une phase de **tarissement** pendant laquelle la rivière est uniquement alimentée par les eaux de nappes qui se vidangent après s'être élevées fortement (Figure 10). En effet, pendant l'évènement de crue, le niveau des nappes augmente également suite aux transferts par percolation. Le tarissement correspond donc au vidage des nappes dans la rivière c'est-à-dire à une *décroissance du débit de base* jusqu'à atteindre un niveau de stabilité, équivalent ou non au débit de base antérieur à la crue considérée.

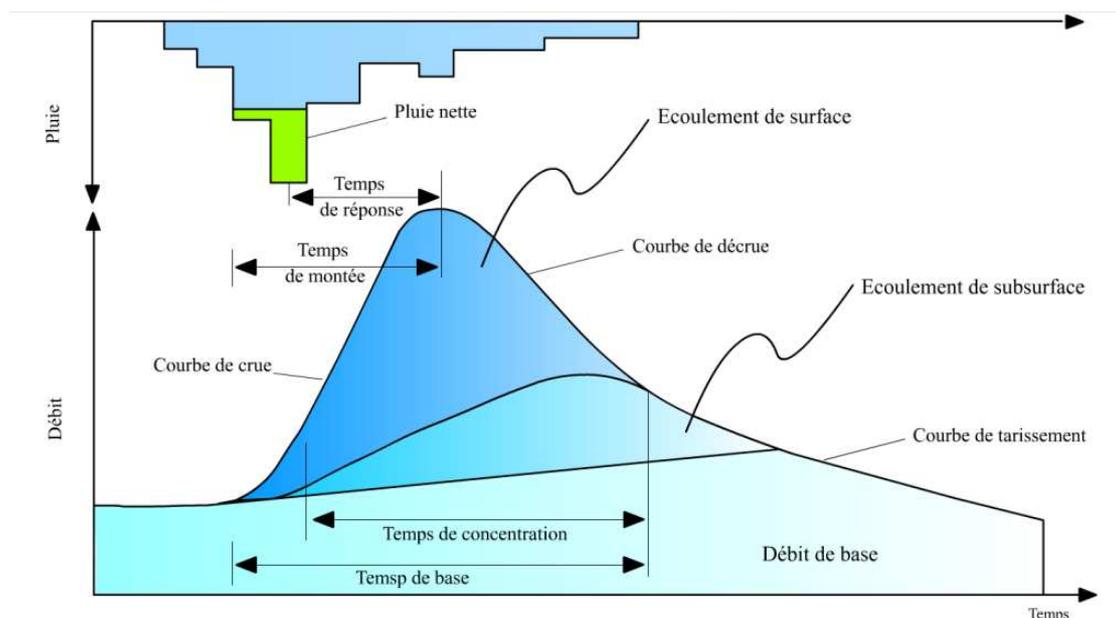


Figure 10 - Décomposition théorique de l'hydrogramme de crue pour la caractérisation des situations d'écoulement en rivière.
source : <http://echo2.epfl.ch/e-hydrologie>

En hydrologie, la situation de « crue » rassemble une diversité de mécanismes qui peuvent être caractérisés par des variables représentées sur l'hydrogramme (Figure 10) :

- le débit de pointe ou le débit maximal : Q_{max} ,
- la forme de la crue avec ses temps caractéristiques : simple ou complexe, temps de montée et temps de base,
- la lame ou volume écoulé.

Cependant, l'identification des crues dans le contexte guadeloupéen peut s'avérer difficile car les crues s'enchaînent et se chevauchent selon des profils simples avec une seule pointe (débit de pointe) (Figure 10), ou complexes avec plusieurs pointes de crues correspondant aux différents épisodes d'une averse de durée supérieure au temps de réponse du bassin. Une analyse fréquentielle des débits de pointe de crue de la rivière Pérou a donc été réalisée afin de s'affranchir de la complexité des hydrogrammes. La méthode du renouvellement¹ (Miquel, 1984) a été choisie car elle permet d'utiliser de courtes séries de données (inférieures à 20 ans) et de définir un débit-seuil au delà duquel toutes les pointes de crues indépendantes sont considérées pour l'analyse, au lieu du débit maximum annuel comme avec la méthode plus courante de Gumbel². Ceci permet d'étoffer la chronique de débits pour un traitement statistique.

Ici l'analyse a été réalisée sur 7 années hydrologiques pour des débits de pointe supérieurs à 5 m³/s (599 débits de pointe sélectionnés) (Figure 11) et a permis d'établir une typologie de crue afin de qualifier les écoulements et les prélèvements (Tableau 2).

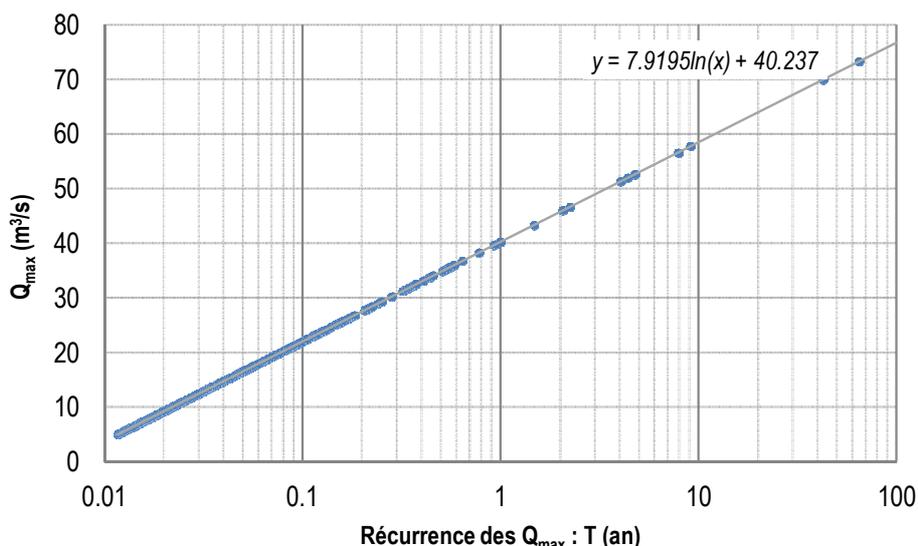


Figure 11 - Récurrence statistique des débits de pointes de crues (Q_{max}) de la rivière Pérou par la méthode du renouvellement (Miquel, 1984)

Typologie de crue	Probabilité d'occurrence	Débit de pointe : Q_{max}
Type A	Très récurrentes : $T < 0,05$ an	Entre 5 et 16 m ³ /s
Type B	Récurrentes : $0,05 < T < 0,2$ an	Entre 16 et 27 m ³ /s
Type C	Fréquentes : $0,2 < T < 0,5$ an	Entre 27 et 35 m ³ /s
Type D	Peu récurrentes : $0,5 < T < 1$ an	Entre 35 et 40 m ³ /s

Tableau 2- Typologie de crue, station PONT, rivière Pérou

¹ La loi d'ajustement s'exprime par : $F(Q) = 1 - \mu \cdot \exp[-\rho(Q_{max}-S_0)]$, avec : S_0 = seuil de débits de pointe ; μ = nombre de crue / nombre d'année considérée ; ρ = nombre de crue / $\sum(Q_{max}-S_0)$

² La méthode linéaire de Gumbel utilise les débits de pointe maximum annuels ce qui implique de disposer de longues séries de données, en général supérieures à 20 ans.

En fonction des saisons et des années, l'écoulement de base ou les phases de tarissement peuvent couvrir différentes gammes de débits. Ainsi, depuis 2013, la rivière Pérou se caractérise par un débit de base qui a globalement varié de 0.2 à 1.3 m³/s en raison de la variation intra et interannuelle des niveaux et de la recharge des nappes qui alimentent la rivière.

En 2013, le débit de base était plutôt élevé et se maintenait autour de 1.16 m³/s. L'année suivante, il a augmenté pour atteindre 1.3 m³/s en décembre 2014. Puis, les périodes de sécheresse survenues pendant l'année 2015 se sont traduites par une diminution progressive du débit de base vers 0.3 m³/s en fin d'année.

L'année 2016 a donc débuté avec un débit de base plutôt faible estimé entre 0.2 – 0.3 m³/s, puis s'est caractérisée par une recharge importante des nappes suite à des pluies abondantes et bien réparties sur l'année (Figure 9) et des sols non saturés en eau en début de saison favorisant la percolation (conséquence de l'année 2015 « sèche »). Le bilan hydrologique de 2016 permet de mettre en évidence cette importante recharge avec une variation de stock de près de 1460 mm (Tableau 3). Ainsi, le débit de base atteint 0.9 m³/s en fin d'année.

Les années 2017 et 2018 ont un débit de base assez stable qui a oscillé entre 0.5 et 1 m³/s, diminuant légèrement en début d'année puis progressant avec la reprise des pluies en mars et le début de la saison des pluies en août. En 2017, la lame écoulée a presque doublé par rapport à 2016 confirmant la contribution importante des nappes à l'écoulement de base pendant cette année, grâce à la recharge de 2016 (Tableau 3). En 2018, l'écoulement annuel est estimé à 3250 mm, soit une lame comparable à 2017 mais plus faible en lien avec la moindre variation de stock du bilan 2017 (Tableau 3).

Année	Evapotranspiration potentielle ET ₀ (mm)	Pluie (mm)	Lame écoulée (mm)	Δ stock (recharge) (mm)
2016	1038	4393.2	1889	1466
2017	1038	4993.5	3634.4	321
2018	1038	4853.4	3248.2	567

Tableau 3 - Bilans hydrologiques de 2016 à 2018, Bassin versant de la rivière Pérou

Les lames écoulées réparties par classe de débit et leur part respective dans l'écoulement total annuel, montrent que **plus de 50 % de l'écoulement de la rivière Pérou se fait entre 0 et 1.5 m³/s soit en débit de base**, avec un maximum de 60 % en 2016 (Figure 12). Si l'on ajoute à cela le volume écoulé entre 1.5 et 3 m³/s, soit dans une classe de débits recouvrant une diversité de situations telles que des tarissements, des fins de décrue ou des crues de très faibles ampleurs, on atteint alors plus de 70 % de l'écoulement total annuel. **L'écoulement de la rivière Pérou se fait donc essentiellement à des débits faibles compris entre 0.2 et 3 m³/s pour lesquels la rivière est relativement calme et peu turbide avec une contribution dominante des eaux issues du milieu souterrain.**

L'écoulement compris entre 3 et 5 m³/s recouvre principalement des situations de petites crues fréquentes et de décrues d'événements plus importants et moins fréquents. Il ne représente que 4 à 6 % de l'écoulement annuel du fait des débits peu élevés de cette classe. En comparaison, l'écoulement entre 5 et 16 m³/s représente 13 à 23 % de la lame annuelle, soit une part non négligeable et potentiellement importante dans les dynamiques de contamination de la rivière par les eaux de ruissellement. Cette classe correspond aux débits de pointes des crues de type A, très récurrentes également (Tableau 2). Enfin, le volume écoulé à des débits élevés supérieurs à 16 m³/s, soit les crues et début de décrues de type B, C, et D (Tableau 2), ne représente que 1.2 à 6 % de l'écoulement total (le maximum de 6 % étant observé en 2017).

➔ On retient de l'analyse hydrologique que la contribution du souterrain est majoritaire à l'échelle annuelle.

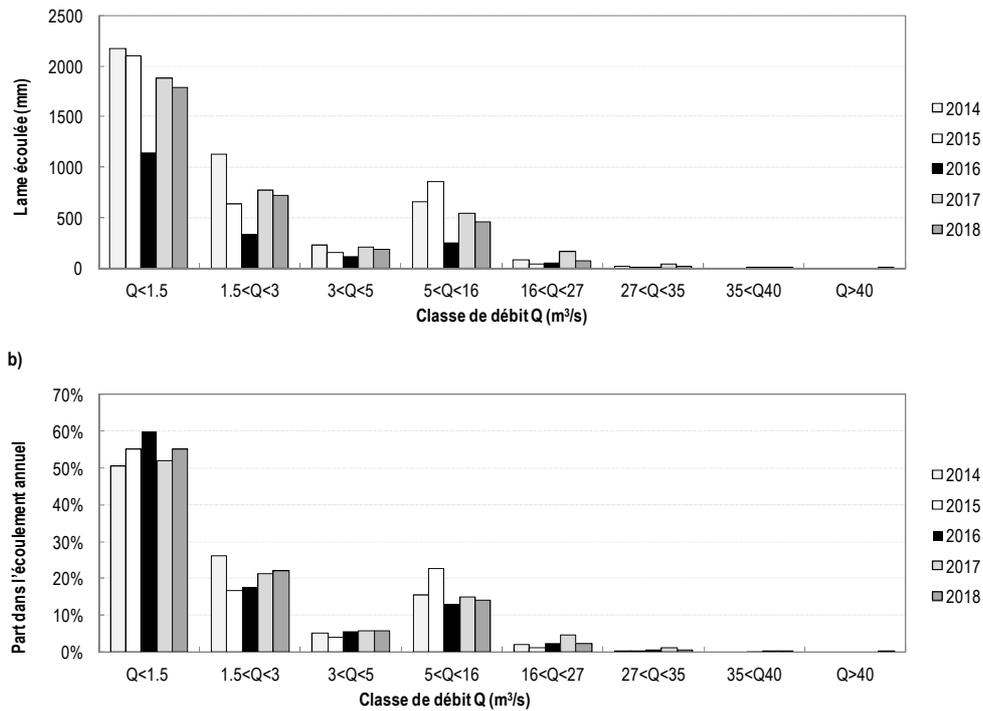


Figure 12 - Répartition de l'écoulement de la rivière Pérou en fonction des gammes de débits a) lames écoulées (mm) et b) part dans l'écoulement total annuel

Cependant, la répartition de l'écoulement par classe de débit ne permet pas d'apprécier les *lames réellement écoulées en crues*, car les décrues sont lentes et se dispersent sur l'ensemble des classes de débits selon l'ampleur de la crue considérée. Les lames écoulées en crues ont donc été calculées pour les années 2016, 2017 et 2018, en considérant toutes les crues même celles dont le débit de pointe était inférieur à 5 m³/s (Tableau 4 et Figure 13).

Les crues représentent près d'un tiers (30 % à 40 %) de l'écoulement annuel de la rivière Pérou (Figure 13), soit une part non négligeable qui influe sur la dynamique générale de contamination de la rivière et représente la contribution des eaux de ruissellement de surface (ER).

La part des crues ciblées pour l'échantillonnage (crues de types A, B, C, D avec $5 < Q_{\max} < 40$ m³/s) représente environ un quart de l'écoulement annuel sur les trois années considérées (environ 70 % de l'écoulement total en crue) (Tableau 4 et Figure 13), soit presque la totalité de l'écoulement en crues. Les types de crues échantillonnés sont donc bien représentatifs de l'essentiel des flux d'eau en situation de crue.

	Lame écoulée (mm)			Part dans la lame totale écoulée (%)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Totale	1889	3634.4	3248.2	100 %	100 %	100 %
Écoulement de base	1109.4	2322	2273.4	59 %	64 %	70 %
Toutes crues	779.6	1312.4	974.8	41 %	36 %	30 %
→ Crues ciblées avec $Q_{\max} > 5$ m³/s	501	996	708.5	27 %	27 %	28 %

Tableau 4 – Importance des crues dans l'écoulement annuel de la rivière Pérou

Les crues de type A (Q_{\max} compris entre 5 et 16 m³/s) et les crues avec un débit de pointe inférieur à 5 m³/s représentent une lame écoulée importante par rapport aux crues plus violentes mais beaucoup moins récurrentes (Figure 13). Les crues violentes de type C et D seraient presque négligeables dans l'écoulement annuel (environ 5 %) (Figure 13), mais leur rôle en terme de transport solide reste au vu de l'intensité des flux qui génèrent ces événements.

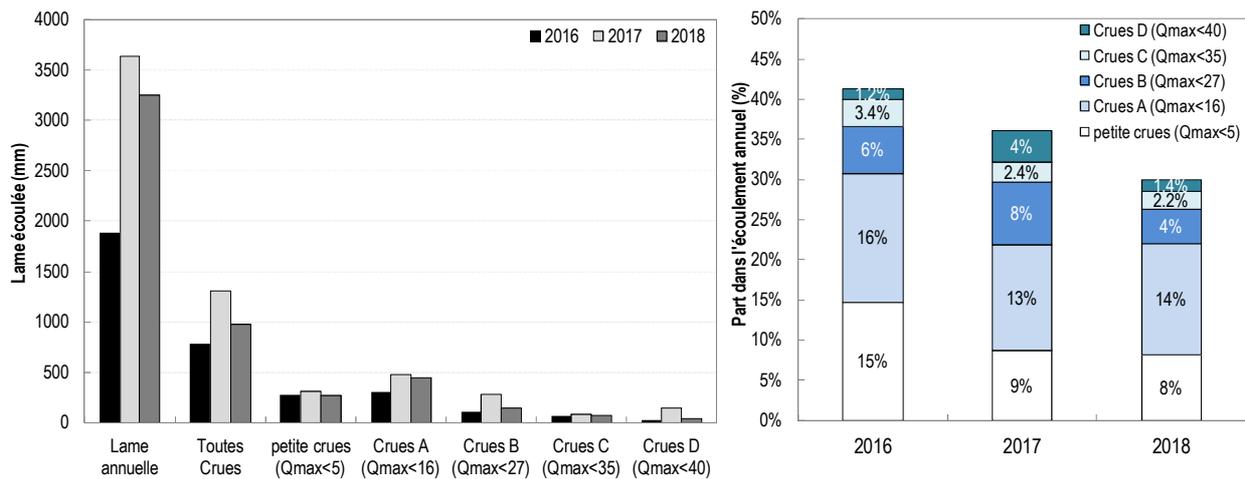


Figure 13 - Importance relative des crues et types de crues dans l'écoulement annuel de la rivière Pérou

3.2. Caractérisation des échantillons prélevés

Chaque échantillon d'eau brute représente un prélèvement ponctuel auquel une valeur de débit instantané est associée. Suivant la situation hydrologique de la rivière deux types d'échantillonnage ont été mis en place :

- ceux prélevés *manuellement* à des débits permettant l'accès à la rivière et qualifiés de « *hors crue ou crue de faible intensité* »,
- ceux prélevés *automatiquement* au moyen d'un échantillonneur automatique programmé en fonction d'une valeur seuil d'hauteur d'eau, afin de cibler une diversité d'intensité de crues lorsque l'accès en rivière est dangereux.

Légende prélèvements :

- Bleu** Prélèvements en Crues
- Normal Prélèvements "Hors Crues"
- Souligné Prélèvements OPALE ponctuels

2016	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Cumul pluies aval (mm)	32	99	187	76	246	129	74	144	185	202	382	249
	saison sèche : carême		saison humide : reprise des pluies; avril est sec				mois sec	saison des pluies : hivernage				
Prélèvements								17/08/2016 24/08/2016	26/09/2016	29/09/2016 (A) 11/10/2016 (A) 22/10/2016 (A)	06/11/2016 (C) 10/11/2016 (A) 10/11/2016 17/11/2016 (B)	
2017	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Cumul pluies aval (mm)	59	111	222	257	146	223	129	182	554	302	133	201
	saison sèche : carême		saison humide : reprise des pluies				plutôt sec	saison des pluies : hivernage				
Prélèvements			01/03/2017 (A) 09/03/2017 (P1, B) 09/03/2017 09/03/2017 (P2, C) 10/03/2017	20/04/2017 28/04/2017 (B) 05/05/2017	22/05/2017	06/06/2017 12/06/2017 19/06/2017 26/06/2017 27/06/2017 03/07/2017 10/07/2017	20/07/2017	02/08/2017 (B) 03/08/2017 07/08/2017 18/08/2017 (A) 16/08/2017 (A) 23/08/2017	14/09/2017 (D) 18/09/2017 (D)	05/10/2017 09/10/2017		
2018	Janvier	Février	Mars									
Cumul pluies aval (mm)	140	93	42									
	fin s. pluies	saison sèche : carême										
Prélèvements	18/01/2018		01/03/2018									
			26/03/2018									

Figure 14 - Répartition chronologique des échantillons prélevés

3.2.1. Échantillonnage manuel « hors crue ou crue de faible intensité »

Ces échantillons, au nombre de **26** ont été prélevés manuellement entre le 17/08/2016 et le 26/03/2018 à des débits compris entre 0.2 et 5 m³/s. Ils sont donc représentatifs des écoulements en saisons sèche et pluvieuse (Figure 14). L'analyse hydrologique précédente indique que ces échantillons sont représentatifs de près de 70 % des situations d'écoulement en rivière. Le Tableau 5 présente pour l'ensemble des échantillons leur situation hydrologique au moment du prélèvement :

- 10 échantillons en débit de base entre 0.2 à 1.3 m³/s,
- 7 échantillons en situation de tarissement, soit dans une dynamique décroissante du débit de base entre 0.8 et 1.66 m³/s,
- 7 échantillons en situation de décrue entre 1.67 et 5 m³/s,
- 2 échantillons en situation de crue (montée ou pic) à 2.53 m³/s

Date et heure de prélèvement	Libellé	Débit : Q (m ³ /s)	Situation hydrologique
17/08/2016 11:30	PP_20160817_BE1	0.21	Débit de base
26/09/2016 11:15	PP_20160926_BE3	0.31	Débit de base
22/05/2017 08:30	PP68-20170522P	0.87	Débit de base
06/06/2017 09:00	PP70-20170606P	0.83	Débit de base
12/06/2017 11:00	PP71-20170612P	0.8	Débit de base
10/07/2017 10:00	PP75-20170710P	0.94	Débit de base
23/08/2017 14:15	PP_20170823_HC11	1.06	Débit de base
05/10/2017 10:37	PP_20171005_HC12	1.29	Débit de base
09/10/2017 08:35	PP88-20171009P	1.13	Débit de base
01/03/2018 12:00	PP_20180301_HC14	0.77	Débit de base
10/11/2016 12:23	PP_20161110_BE4	0.8	Tarissement, après crue type A (Q _{max} = 7,33 m ³ /s)
10/03/2017 11:30	PP_20170310_BE5	1.42	Tarissement, après crue type B (Q _{max} = 27.73 m ³ /s)
20/04/2017 15:00	PP_20170420_BE6	0.97	Tarissement, après crue type B (Q _{max} = 19.2 m ³ /s)
05/05/2017 12:40	PP_20170505_HC7	1.5	Tarissement, après crue type A (Q _{max} = 10.72 m ³ /s)
27/06/2017 15:30	PP_20170627_HC8	1.12	Tarissement, après crue type A (Q _{max} = 12.95 m ³ /s)
03/07/2017 08:45	PP74-20170703P	1.66	Tarissement, après crue type A (Q _{max} = 11.57 m ³ /s)
03/08/2017 10:53	PP_20170803_HC10	1.2	Tarissement, après crue type B (Q _{max} = 16.47 m ³ /s)
24/08/2016 11:20	PP_20160824_BE2	1.44	Fin décrue de « petite » crue (Q _{max} = 2.23 m ³ /s)
09/03/2017 13:45	PP_20170309_C9	5.01	Fin décrue type B (Q _{max} = 18.42 m ³ /s)
09/05/2017 14:00	PP66-20170509P	2.29	Fin décrue type C (Q _{max} = 27.78 m ³ /s)
19/06/2017 08:26	PP72-20170619P	1.88	Fin décrue type B (Q _{max} = 23.76 m ³ /s)
07/08/2017 11:45	PP79-20170807P	2.25	Fin décrue type A (Q _{max} = 9.15 m ³ /s)
26/03/2018 12:45	PP_20180326_HC15	1.67	Décrue de « petite » crue (Q _{max} = 2.24 m ³ /s)
26/06/2017 10:00	PP73-20170626P	3.9	Mi décrue type A (Q _{max} = 12.95 m ³ /s)
20/07/2017 11:10	PP_20170720_HC9	2.53	Pic de « petite » crue
18/01/2018 10:15	PP_20180118_HC13	2.53	Montée de « petite » crue (Q _{max} = 3.7 m ³ /s)

Tableau 5 - Caractérisation hydrologique des échantillons prélevés manuellement « hors crue »

3.2.2. Echantillonnage automatique « en crues »

Les échantillons d'eau brute en situation de crue concernent 15 crues, soit 200 échantillons, prélevés automatiquement sur presque une année hydrologique, entre le 29/09/2016 et le 19/09/2017, à des débits compris entre 2.04 à 39.59 m³/s. Ils se répartissent sur les différentes saisons : 4 crues pendant la saison humide du premier semestre 2017 et 11 crues pendant les saisons des pluies 2016 et 2017 (Figure 14). La variation du seuil d'hauteur d'eau pour le prélèvement automatique a été adaptée pour assurer un échantillonnage d'une diversité de crues. Pour l'ensemble des crues le débit de pointe maximal varie entre 5.47 et 39.59 m³/s, ce qui par rapport à la typologie établie donne 7 crues de type A, 4 crues de type B et respectivement 2 crues pour chacun des types C et D. L'échantillonnage est cohérent par rapport à la représentativité des crues dans l'écoulement annuel (Figure 13 et Tableau 6).

Les montées et les pointes de crue sont moins représentées du fait de leur caractère soudain et rapide (9 crues sur 15 échantillonnées ayant un temps de montée compris entre 6 et 12 min) (Tableau 7). A l'inverse, les décrues sont longues et représentent l'essentiel du volume écoulé pendant les crues (52 % à 96 %) (Figure 15) d'où le nombre important d'échantillons dans cette phase (Tableau 7).

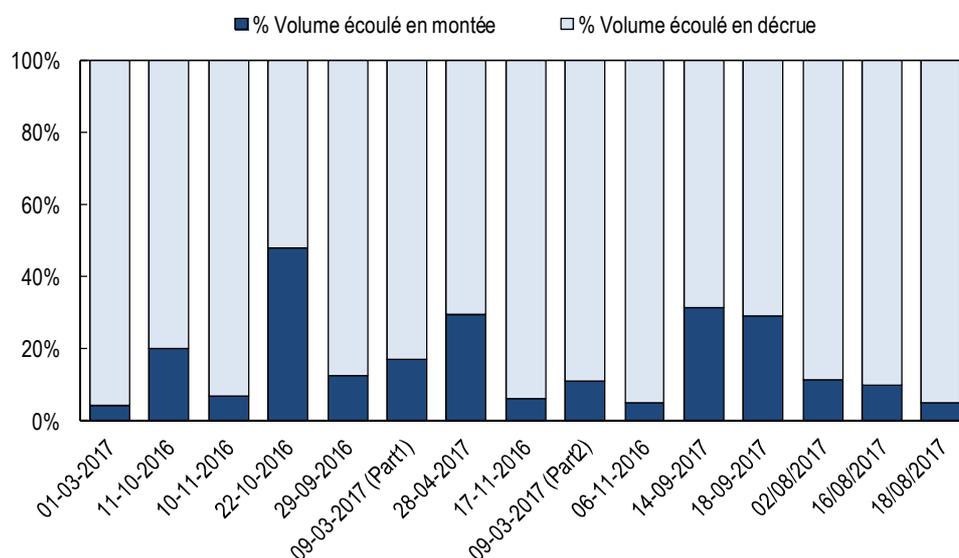


Figure 15 - Répartition du volume écoulé en crue entre la montée et la décrue

Type de crue	Part dans l'écoulement annuel % (2016-18)	Nombre de crues échantillonnées	Nombre d'échantillons d'eau brute
A	13 à 16%	7	88
B	4 à 8%	4	48
C	2.2 à 3.4%	2	16
D	1.2 à 4%	2	48

Tableau 6 - Représentativité des crues échantillonnées selon l'importance relative des types de crue dans l'écoulement annuel

Enfin, les lames d'eau écoulées pendant les crues varient de quelques millimètres à quelques dizaines de millimètres et montrent une tendance linéaire à augmenter avec le débit de pointe, lui-même fonction de l'intensité et de la durée de l'évènement pluvieux (Figure 16). Le débit de pointe est donc ici une variable prédictive du volume total écoulé pendant la crue.

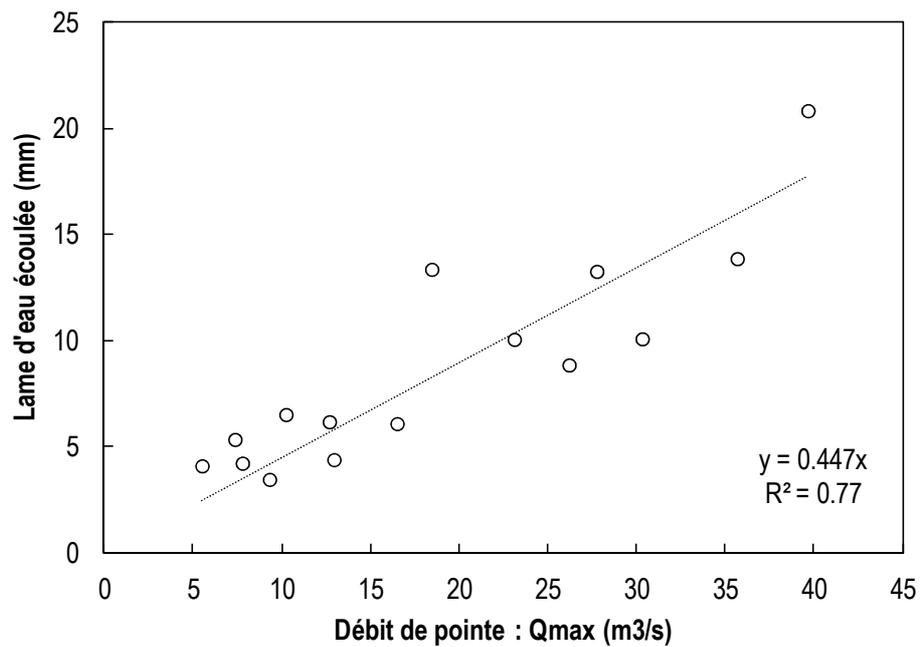


Figure 16 - Relation linéaire entre la lame d'eau écoulée en crue (mm) et le débit de pointe de crue (m³/s)

Date	Débit de pointe : Q_{max} m ³ /s	Type	Profil de la crue	Lame écoulée mm	Temps de montée hh:mm	Temps de base hh:mm	Echantillons d'eau brute prélevés	Répartition des échantillons sur l'hydrogramme de crue	Nombre d'échantillons destinés aux analyses CLD
01/03/2017	5.47	A	Simple	4.12	00:09	06:24	8 x 990 ml	1 en montée, 1 au pic, 6 en décrue	8 liquides; 1 MES
11/10/2016	7.33	A	Simple	5.37	00:38	06:36	8 x 990 ml	1 en montée, 1 au pic, 6 en décrue	8 liquides; 5 MES
10/11/2016	7.75	A	Simple	4.25	00:09	04:54	8 x 990 ml	1 en montée, 6 en décrue	8 liquides; 2 MES
16/08/2017	9.28	A	Complexe, 2 pointes	3.48	00:09	01:57	24 x 330 ml	1 au pic, 22 en décrue, 1 en montée (2 ^{ème} pointe)	0
18/08/2017	10.21	A	Complexe, 2 pointes	6.54	00:09	04:06	24 x 330 ml	1 au pic, 2 en montée, 21 en décrue	0
22/10/2016	12.65	A	Complexe, 3 pointes	6.2	01:57	04:21	8 x 990 ml	3 en montée, 1 au pic, 4 en décrue	8 liquides; 7 MES
29/09/2016	12.91	A	Simple	4.41	00:12	02:06	8 x 990 ml	1 en montée, 1 au pic, 6 en décrue	8 liquides; 4 MES
02/08/2017	16.47	B	Simple	6.11	00:09	02:03	24 x 330 ml	1 en montée, 23 en décrue	0
09/03/2017 Part 1	18.42	B	Complexe, 4 pointes	13.38	00:57	04:06	8 x 990 ml	5 en montée, 3 en décrue	8 liquides; 5 MES
28/04/2017	23.08	B	Complexe, 2 pointes	10.08	00:42	02:13	8 x 990 ml	5 en montée, 3 en décrue	8 liquides, 6 MES
17/11/2016	26.17	B	Simple	8.87	00:09	03:51	8 x 990 ml	1 en montée, 1 au pic, 6 en décrue	8 liquides; 6 MES
09/03/2017 Part 2	27.73	C	Simple	13.28	00:12	03:45	8 x 990 ml	2 en montée, 1 au pic, 5 en décrue	8 liquides ; 7 MES
06/11/2016	30.29	C	Simple	10.1	00:06	03:00	8 x 990 ml	1 en montée, 1 au pic, 6 en décrue	8 liquides; 7 MES
14/09/2017	35.64	D	Simple	13.88	00:33	02:21	24 x 330 ml	3 en montée, 1 au pic, 20 en décrue	13 liquides; 13 MES
18/09/2017 (MARIA)	39.63	D	Simple (1 ^{ère} pointe) complexe	20.85 (1 ^{ère} pointe) 97.22	02:42	05:06 (1 ^{ère} pointe) 22 :24	24 x 330 ml	1 en montée, 1 au pic et 22 en décrue	6 liquides; 6 MES

Tableau 7 – Caractérisation hydrologique et répartition des échantillons prélevés automatiquement « en situation de crues »

4. Le transport solide dans la rivière Pérou

Le **transport solide** désigne ici le *transport de particules ou matières en suspension par le cours d'eau*. Il existe en effet différents modes de transport solide qui peuvent coexister dans la rivière selon la granulométrie des matériaux et l'intensité du débit. En général, les matériaux les plus lourds comme les sédiments « roulent » au fond sans « décoller » et on parle plutôt de *charriage*. Ils ne sont *a priori* pas pris en compte ici car la « crépine » du préleveur est située bien au-dessus du lit de la rivière, environ 47 cm plus haut. Quand la force de sustentation est telle que les grains légers flottent entre deux eaux, il s'agit de matières en *suspension*. Celles-ci sont mesurées par récupération et pesée des particules retenues lors de la filtration des échantillons d'eau à 0.7 μm .

4.1. Caractérisation du transport solide en fonction de la nature de l'écoulement

Les concentrations en matières en suspension (MES), mesurées sur 216 des 226 échantillons d'eau, varient de $2.7 \cdot 10^{-4}$ à 3.97 g/l, toutes situations d'écoulement confondues. La concentration la plus faible a été mesurée dans un échantillon prélevé en écoulement de base ($Q_b = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$) et la concentration la plus forte dans un échantillon de montée de crue de type D ($Q = 26.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.1.1. Concentrations en MES dans l'écoulement « hors crue ou crue de faible intensité »

Les concentrations en MES des échantillons manuels « hors crue ou crue de faible intensité » sont faibles et varient de $2.7 \cdot 10^{-4}$ à 0.025 g/l pour une médiane de 0.0016 g/l, soit une gamme de concentration en MES où la rivière est claire, très peu chargée en particules provenant du ruissellement de surface (Tableau 8).

Situation hydrologique	Nombre d'échantillons	[MES] g/l				Débits m^3/s
		min	max	médiane	moyenne	
Ensemble des échantillons	26	$2.68 \cdot 10^{-4}$	0.025	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$4.08 \cdot 10^{-3}$	0.2 à 5
Débit de Base	10	0.00027	0.0011	0.0005	0.0006	0.2 à 1.3
Tarissement	7	0.00032	0.0037	0.0015	0.0017	0.8 à 1.65
Fin de décrues	7	0.00265	0.0105	0.0076	0.007	1.44 à 5
Petites crues	2	0.00338	0.0251	0.0143	0.0143	2.53

Tableau 8 - Gammes de concentrations en MES des échantillons hors crue selon leur situation hydrologique

→ Focus sur l'écoulement de base et de tarissement :

Si l'on ne prend en compte que les échantillons prélevés en écoulement de base, c'est-à-dire pendant les périodes où seules les nappes alimentent la rivière (régime de débit de base et tarissement), alors la concentration en **MES est très faible, toujours inférieure à $4 \cdot 10^{-3}$ g/l** (médiane de $7.7 \cdot 10^{-4}$ g/l), et le transport solide apparaît **négligeable** (Tableau 8).

→ Focus sur les prélèvements de crues de faibles intensités :

Pour les échantillons prélevés en fin de décrues ou lors de petites crues ($Q_{\text{max}} < 5 \text{ m}^3/\text{s}$), c'est-à-dire pendant les périodes où la rivière est alimentée principalement par les nappes mais avec une faible contribution du ruissellement de surface (ER), les concentrations en **MES sont plus élevées que pour les situations d'écoulement de base et de tarissement, mais restent faibles de l'ordre de 0.01 g/l** (Tableau 8). Cela est néanmoins non négligeable en termes de transport solide, au vu des grands volumes écoulés pendant les décrues en particulier (Figure 15 et section 4.3).

4.1.2. Concentrations en MES dans l'écoulement en crue

Comprises entre 0.0053 et 3.97 g/l, les concentrations en MES mesurées dans les échantillons prélevés en crue ($Q_{\max} > 5 \text{ m}^3/\text{s}$) sont plus importantes que les échantillons précédents prélevés manuellement en situation qualifiée de « hors crue ou crue de faible intensité ». La concentration médiane est 100 fois plus élevée (0.16 g/l contre 0.0016 g/l) (Tableau 8 et 9). D'autre part, les gammes de concentration en MES mesurées pendant les montées de crue (incluant les pics de crues) sont plus importantes que celles mesurées en décrues, même si elles sont similaires pour les concentrations les plus élevées. En montée de crue, la concentration en MES médiane est de l'ordre de 0.5 g/l alors qu'en décrue elle est 5 fois plus faible, de l'ordre de 0.1 g/l (Tableau 9). Cela est encore plus visible sur les moyennes, influencées par les valeurs extrêmes. Un transport solide intense se ferait donc pendant la phase de crue (montée + pic) avec des eaux qui se chargent en MES. En décrue, le transport solide serait moins intense, associé à une diminution des concentrations en MES, mais pourrait conduire néanmoins à de grandes quantités de MES exportées au vu des grands volumes d'eau écoulés pendant cette phase (Figure 15).

Situation hydrologique	Nombre d'échantillons	[MES] g/l			
		min	max	médiane	moyenne
Toutes crues	197	0.0053	3.97	0.16	0.5
Montée + Pic	41	0.026	3.973	0.45	1.08
Décrue	156	0.005	3.291	0.11	0.35

Tableau 9 – Gammes de concentrations en MES en crues

A l'échelle de la crue, les concentrations en MES varient en fonction du débit et se dispersent en général sur au moins un facteur 10 (Figure 17 et Figure 18). On observe aussi une augmentation de concentration en fonction du type de crue, c'est-à-dire avec l'augmentation du débit de pointe : les crues peu récurrentes avec un Q_{\max} élevé (type C et D) sont plus chargées en MES que les crues récurrentes aux Q_{\max} « faibles » (type A) (Figure 18).

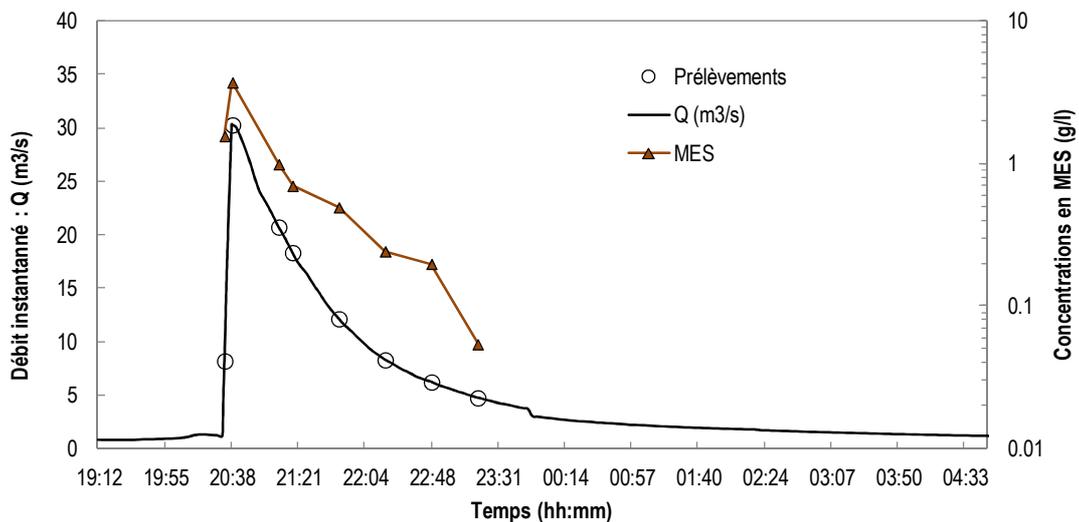


Figure 17 - Exemple de dynamique de concentrations en MES à l'échelle d'une crue de type C survenue le 06-11-2016

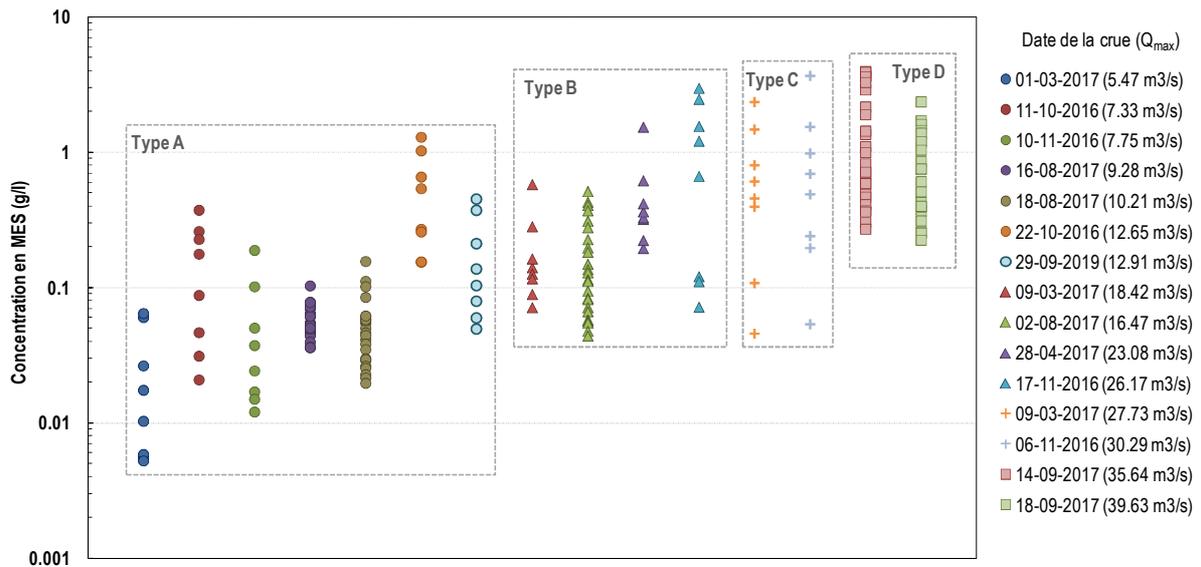


Figure 18 - Variabilité des concentrations en MES au sein des crues échantillonnées

En crue, l'écoulement de la rivière cumule les contributions des eaux souterraines (ESO) et des eaux de ruissellement de surface (ER) en termes de flux d'eau et de particules (MES). Selon l'intensité de l'évènement, les berges de la rivière peuvent aussi être érodées et devenir une source de MES, en plus de l'érosion hydrique sur les parcelles agricoles.

Afin d'identifier l'origine des MES en phase de crue, les concentrations en MES mesurées dans la rivière ont été comparées à celles mesurées dans les eaux de ruissellement sur différentes parcelles et types de sol du bassin versant de la rivière Pérou (livrable «Bilan et analyse des risques de transferts de pesticides selon une gamme de situations agropédoclimatiques en contexte tropical antillais, Guadeloupe» de l'action TPDP) (Figure 19). Les charges solides mesurées dans les eaux de ruissellement à l'échelle parcellaire sont comprises entre 0.1 et 2.4 g/l soit une gamme de concentrations présentant moins de variabilité que celle des crues (Figure 19). Les eaux de ruissellement à l'échelle parcellaire sont logiquement plus chargées en MES que les eaux de la rivière Pérou en crue, même si certains évènements comme les crues violentes et peu récurrentes (type D) présentent une gamme de concentration en MES similaire à celle des eaux de ruissellement (Figure 18). Par ailleurs la valeur médiane des concentrations en MES durant la montée de crue est du même ordre de grandeur que celle des eaux de ruissellement (Figure 19), ce qui correspond au schéma de contribution théorique des eaux d'un hydrogramme de crue (Figure 10). Cela suggère la force et la rapidité du phénomène érosif durant les crues associé à peu de re-sédimentation entre parcelles et rivière lorsque les débits de ruissellement sont les plus intenses. Cette hypothèse reste néanmoins à confirmer puisque l'érosion des berges lors des crues pourrait compenser une sédimentation des MES transportées par les eaux de ruissellement parcellaire.

On observe par ailleurs en Figure 19 une variabilité des teneurs maximales en MES en fonction des types de sol : la concentration la plus élevée a été mesurée sur andosol (bananeraie) et la plus faible sur nitisol (bananeraie). Cela suggérerait que l'érosion hydrique dans les zones amont du bassin agricole (hors amont forestier), zones de production de bananes sur andosols et sols bruns andiques (sous-type d'andosol), contribue fortement à la dynamique de transport solide de la rivière Pérou en crue, et plus fortement que la zone aval caractérisée par des nitisols. Connaître la nature des MES (constituants organiques et minéraux) de la rivière en crue pourrait étayer cette hypothèse, mais ce serait difficile du fait des grandes quantités de MES à prélever pour effectuer les analyses. Par ailleurs, la relation entre intensité de la crue et concentration en MES observée à l'échelle du bassin versant (Figure 18) est également observée à l'échelle parcellaire (Figure 20) en utilisant le débit de ruissellement pour chaque épisode de prélèvement. La variabilité observée à l'échelle parcellaire peut s'expliquer par une évolution de l'état de surface qui influence la mobilisation des particules lors des évènements pluvieux.

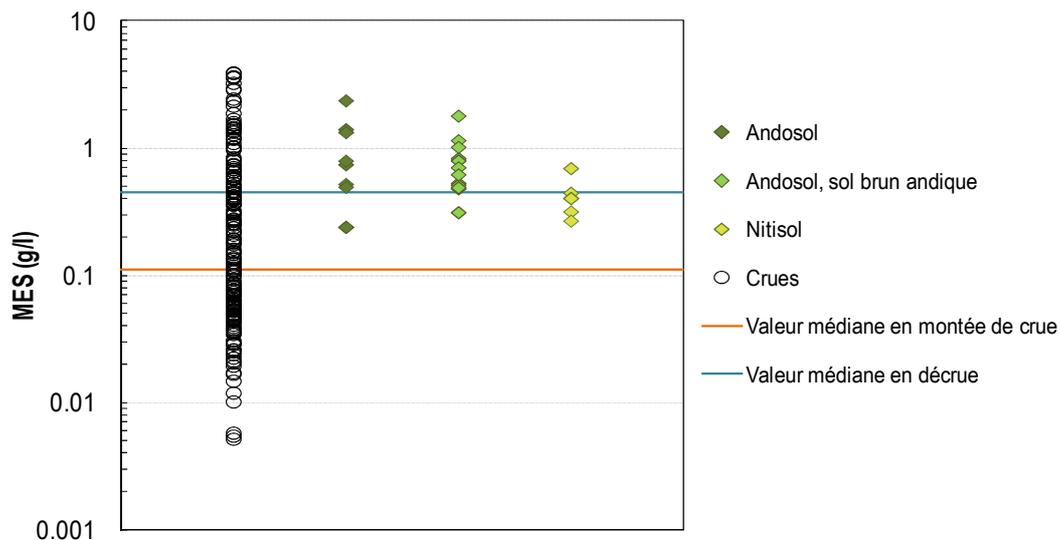


Figure 19 - Concentrations en MES dans la rivière en crue et dans les eaux de ruissellement suivant les types de sol

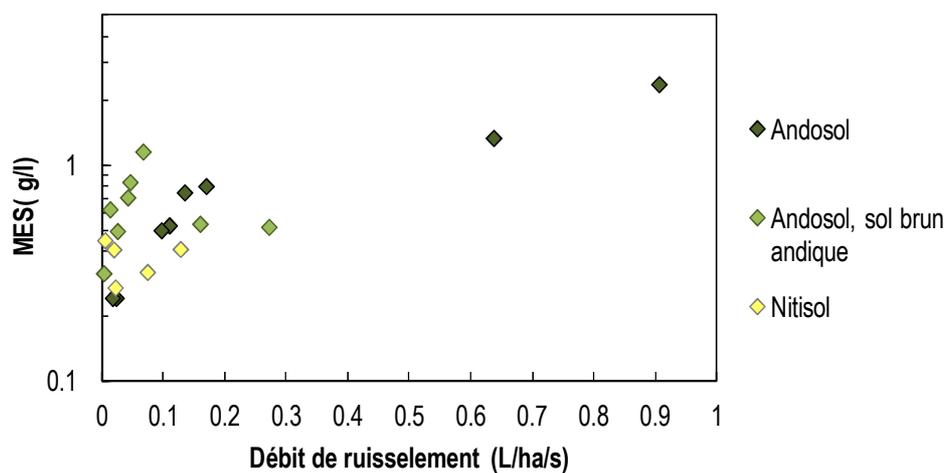


Figure 20 - Concentrations en MES dans les eaux de ruissellement des parcelles en fonction du débit de ruissellement

4.2. Schéma conceptuel des contributions des eaux souterraines et du ruissellement à la dynamique de concentrations en MES

La concentration en MES dans la rivière résulte de la contribution des eaux souterraines ESO et des eaux de ruissellement de surface ER. Les eaux souterraines sont très faiblement chargées en MES comme cela est observé et quantifié en situation de débit de base (rivière claire et limpide) où leur contribution est prépondérante. En situation de mélange avec les eaux de ruissellement de surface, les eaux souterraines exfiltrées contribuent à diluer la concentration en MES dans la rivière. En effet, la charge en MES des eaux de ruissellement est forte pendant les événements de crue et lorsque l'intensité des pluies est suffisamment élevée pour provoquer l'érosion des sols (Figure 20).

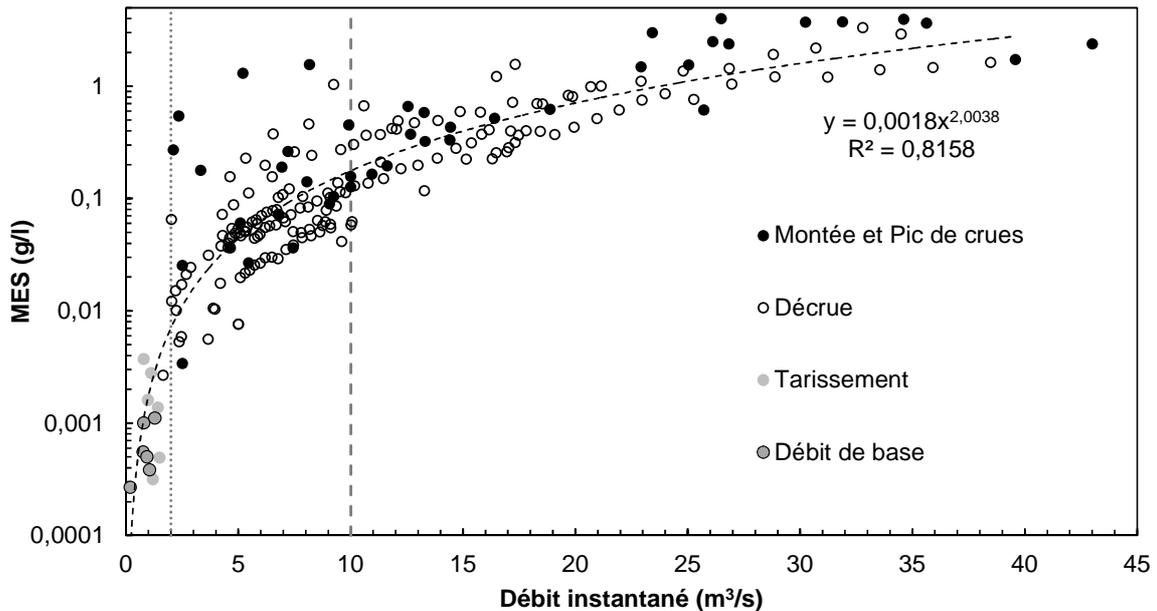


Figure 21 - Dynamique de concentration en MES en fonction du débit de la rivière Pérou

La Figure 21 met en évidence la relation entre la concentration en MES et le débit de la rivière (au moment du prélèvement) selon une fonction puissance au carré ($r^2 = 0.82$). L'augmentation de la concentration en MES avec le débit s'interprète par une augmentation de la contribution du ruissellement à l'écoulement en rivière.

A partir de ce jeu de données, un schéma conceptuel des contributions des eaux de ruissellement de surface (ER) et des eaux souterraines (ESO) au transport solide en fonction du débit de la rivière est proposé en Figure 22:

- Lorsque le débit est faible et inférieur à $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentration en MES dans la rivière est très faible et inférieure à $4 \cdot 10^{-4} \text{ g/l}$ (Figure 21). Dans cette situation les nappes contribuent essentiellement au débit de la rivière (situation hydrologique de débit de base ou tarissement).
- Entre 1.6 et $10 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentration en MES augmente fortement, passant de $4 \cdot 10^{-4} \text{ g/l}$ à près de 0.2 g/l (certains points en montée de crue dépassent 1 g/l , Figure 21). Cette importante variabilité de la charge solide s'explique par la diversité des situations hydrologiques (montée et décrue) dans cette gamme de débit. L'écoulement de la rivière résulte d'une combinaison d'eaux de ruissellement de surface ER et d'eaux souterraines ESO dont les contributions respectives varient selon la situation.
- Au-delà de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentration en MES de la rivière est élevée, entre 0.2 et 4 g/l , en lien avec la contribution dominante des eaux de ruissellement aux débits de montées, pics, et décrues des crues d'intensité les plus importantes.

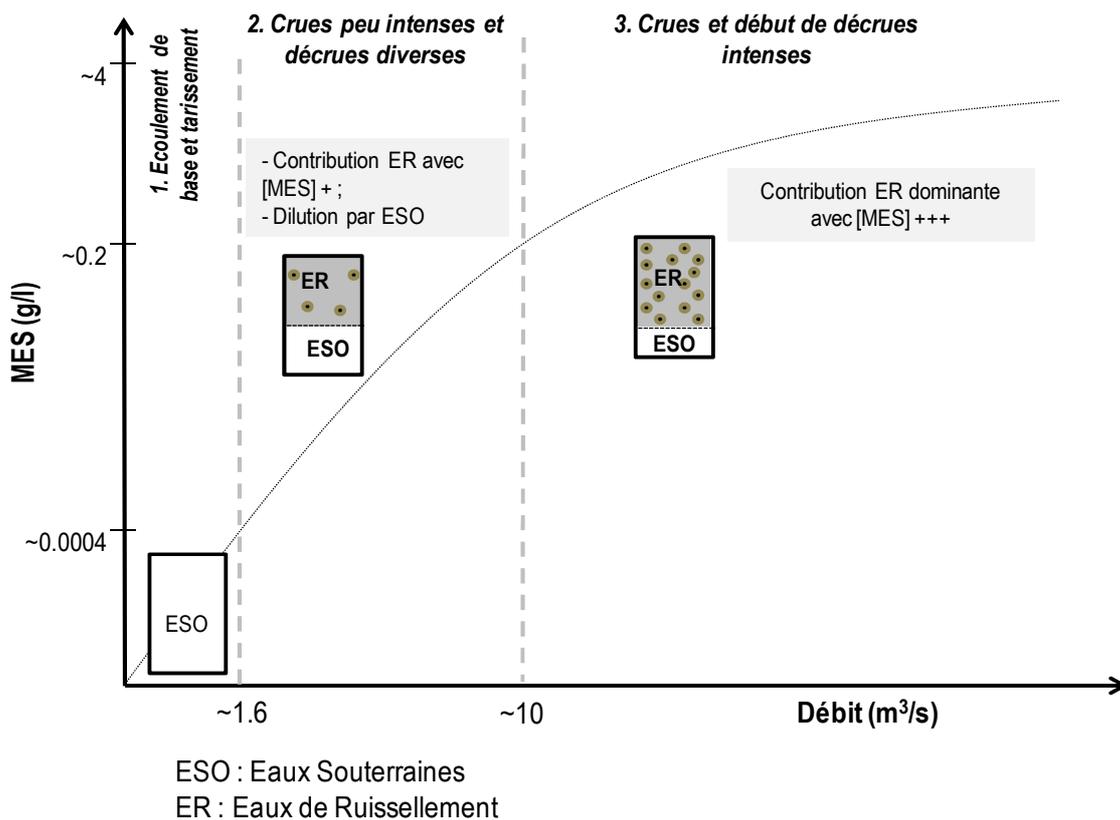


Figure 22 - Schéma conceptuel du fonctionnement du transport solide dans la rivière Pérou

4.3. Bilan du transport solide à l'échelle de la crue et de l'année

A partir des mesures de concentration en MES dans les crues échantillonnées, il est possible de calculer le transport solide à l'échelle de l'évènement, c'est-à-dire la quantité de matière solide exportée par la crue. Les calculs d'export solide sont basés sur les relations établies entre concentrations en MES mesurées et débit, à l'échelle de la crue ou d'une partie de la crue (en général une relation en décrue), et/ou une interpolation des concentrations pour les « durées » de la crue non prélevées.

On observe ainsi pour les crues échantillonnées (Figure 23) que le transport solide en montée n'est pas majoritaire par rapport à la décrue, bien que les eaux soient plus chargées en MES pendant la montée de crue (pic inclus) (Figure 21). Seule la crue complexe survenue le 22-10-2016 présente un transport solide majoritaire en montée (60 %) du fait du grand volume d'eau écoulé en montée, équivalent à celui de la décrue, alors que la montée de crue représente au maximum 30 % du volume écoulé lors des autres crues.

La quantité totale de MES transportée au sein d'une crue est très variable, allant de plusieurs centaines de kilogrammes (785 kg de MES exportés par la crue A du 01-03-2017) à quelques centaines de tonnes (302.9 t de MES exportées par la crue D du 14-09-2017). Une relation croissante entre le débit de pointe atteint par la crue (Q_{max}) et le transport total de MES a été établie selon une fonction puissance ($r^2 = 0.87$) (Figure 24). Elle s'explique par la combinaison des relations entre concentration en MES et débit instantané (Figure 21) et entre lame écoulée en crue et débit de pointe (Q_{max}) (relation linéaire, Figure 16).

En extrapolant à partir des concentrations médianes en MES dans l'écoulement hors crue et la relation au débit de pointe pour les crues, on peut estimer le transport solide dans la rivière Pérou à l'échelle annuelle. **Il représenterait 1500 tonnes en 2016 et 2000 tonnes en 2017, soit un taux d'érosion sur le bassin versant de 1.2 à 1.6 t/ha/an.** Comparativement, les taux d'érosion estimés sur les parcelles expérimentées sont de 0.3 t/ha/an sur le nitisol à 4.6 t/ha/an sur l'andosol. **Le taux moyen d'érosion sur parcelle de banane (tous types de sol confondus) estimé à 1.5 t/ha/an est compatible** avec les estimations de transport solide dans la rivière ce

qui suggère l'hypothèse d'une faible sédimentation entre parcelle et rivière. On ne peut toutefois pas exclure à nouveau un processus de compensation entre une sédimentation du flux parcellaire avec un processus d'érosion des berges. Une connaissance de la nature des MES transportées permettrait de conforter le processus dominant.

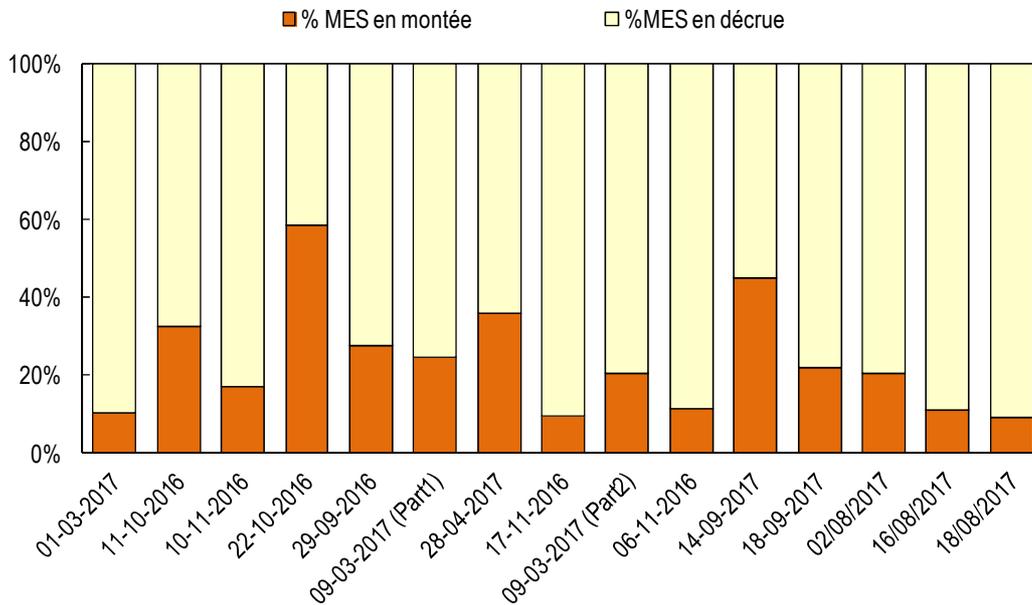


Figure 23 – Répartition de la quantité de MES transportée entre la montée de crue et la décrue - rivière Pérou

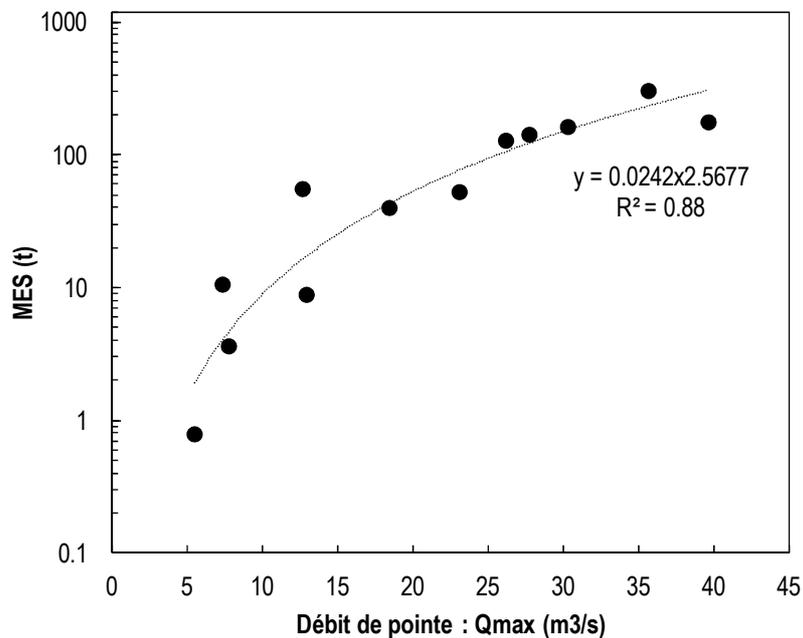


Figure 24 - Relation de la quantité totale de MES transportée et le débit de pointe atteint par la crue - rivière Pérou

5. Le transport de chlordécone dans la rivière Pérou

Le **transport de chlordécone** en rivière est appréhendé par la concentration en chlordécone (CLD) dans les matrices « eau » et « solide » des échantillons d'eau brute filtrés. La concentration dans la matrice « eau » correspond à la *CLD* mesurée dans l'eau filtrée à 0.7 µm (*CLD_d*). La concentration dans la matrice « solide » correspond à la *CLD* mesurée, adsorbée sur les MES recueillies après une filtration à 0.7 µm (*CLD_p*). Les deux concentrations observées sont assimilées respectivement à la CLD dissoute et particulaire. Le cumul des deux représente donc la concentration en CLD dans l'eau brute (*CLD_{brute}*). Enfin, rappelons que les incertitudes analytiques sont importantes pour les deux matrices, respectivement de 30 % pour l'eau et 40 % pour les MES, ce qui complexifie les interprétations.

5.1. La chlordécone dissoute

Les concentrations en CLD dissoute ont été analysées dans 121 échantillons d'eau de la rivière Pérou et varient de 0.01 µg/l (limite de quantification, LQ) à 4.18 µg/l pour une médiane de 0.11 µg/l. La contamination en CLD de la rivière par la voie dissoute est donc avérée avec une médiane légèrement supérieure à la norme de potabilité de l'eau (0.1 µg/l) et une concentration maximale supérieure à la limite de concentration pour la production d'eau potable (2 µg/l³). Seul un échantillon de décrue (type A du 10-11-2016) présente une concentration inférieure à la LQ pour un débit de 2.5 m³/s.

5.1.1. Concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement « hors crue et crues de faible intensité »

Les concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement hors crue ou crue de faible intensité sont toujours supérieures à la LQ et varient de 0.04 à 4.18 µg/l, une variabilité importante qui se déploie sur un facteur 100 et une médiane de 0.27 µg/l, près de trois fois supérieure à la norme de potabilité (Tableau 10). La concentration maximale a été analysée dans un échantillon de débit de base à 0.87 m³/s, une situation où seules les eaux souterraines alimentent la rivière. Le minimum a été analysé dans un échantillon de fin de décrue de faible intensité qui correspond à une situation où les eaux souterraines et les eaux de surface contribuent au débit de la rivière.

Situation hydrologique	Nombre d'échantillons	[CLD]-dissoute (µg/l)				écart-type	Débits m ³ /s
		min	max	médiane	moyenne		
Ensemble des échantillons	26	0.04	4.18	0.265	0.847	0.98	0.2 à 2.53
Base	10	0.24	4.18	1.49	1.528	1.22	0.2 à 1.3
Tarissement	7	0.07	1.43	0.24	0.614	0.58	0.8 à 1.65
Fin de décrues	7	0.04	0.67	0.15	0.216	0.21	1.44 à 5
Petites crues	2	0.07	0.85	0.46	0.46	0.55	2.53

Tableau 10 – Gammes de concentrations en CLD dissout dans l'écoulement hors crue et selon la situation hydrologique

La dynamique des concentrations en fonction du débit est présentée dans la Figure 25.

→ Focus sur l'écoulement de base et de tarissement :

Les échantillons prélevés aux faibles débits (débit de base et de tarissement) présentent les concentrations les plus élevées de l'ensemble des échantillons. En débit de base, les concentrations sont comprises entre 0.24 et 4.18 µg/l pour une médiane/moyenne de 1.5 µg/l. En situation de tarissement, les concentrations en CLD dissoute plus faibles restent toutefois dans une gamme de concentration (0.07 à 1.43 µg/l) significative (Tableau 10). Pour ces deux situations la rivière peut être supposée essentiellement alimentée

³ Limite de concentration pour une matière active au-delà de laquelle l'eau ne pourra plus être traitée pour la production d'eau potable.

par l'exfiltration des nappes, la teneur en MES est très faible (Tableau 8), et le transport de la CLD s'effectue sous forme dissoute. **L'origine de la contamination en CLD est alors surtout souterraine**, ce qui est cohérent avec les fortes concentrations enregistrées dans les nappes en CLD ($[CLD]_{brute-ESO}$: 0.5 à 25 $\mu\text{g/l}$, Rapport final Allenvi OPA-C, 2015). Dans les situations de tarissement, le débit en rivière est plus élevé en lien avec des niveaux plus élevés des nappes, ou avec la contribution supplémentaire de nappes superficielles.

➔ **Focus sur les prélèvements de faibles intensités de crues:**

Les échantillons de faibles intensités de crues, prélevés entre 1.44 et 5 m^3/s , présentent les plus faibles concentrations en CLD dissoute 0.04 $\mu\text{g/l}$ et 0.85 $\mu\text{g/l}$ (Tableau 10). Les concentrations en MES de ces échantillons comprises entre 0,003 g/l et 0.02 g/l (Tableau 8) indiquent une faible contribution des eaux de ruissellement de surface. **Pour ces situations la contribution des eaux de ruissellement est un facteur de dilution de la concentration en CLD dissoute issue des eaux souterraines.**

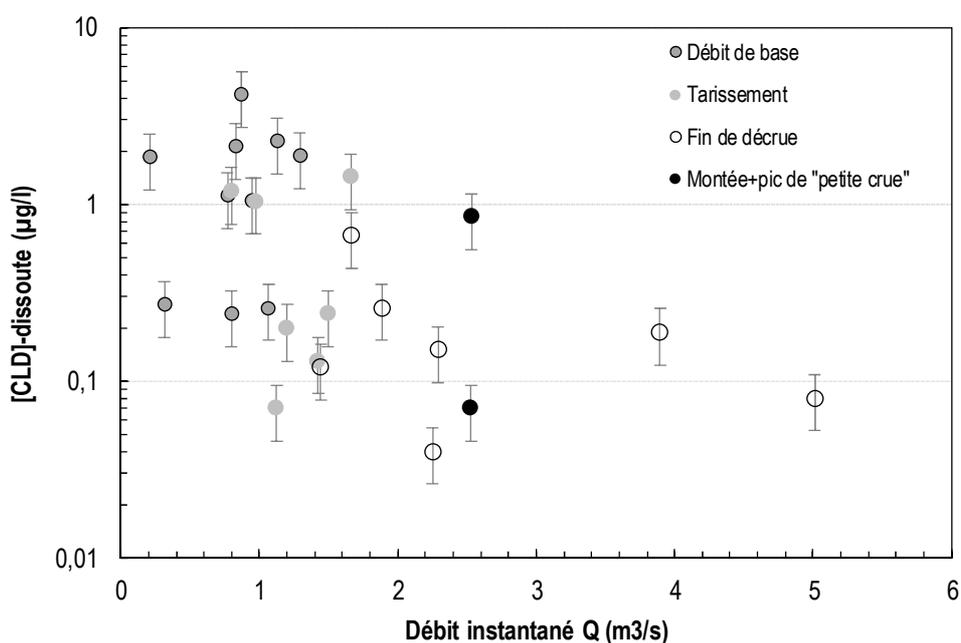


Figure 25 – Dynamique de concentration en CLD dissoute ($\mu\text{g/l}$) en fonction du débit (m^3/s) dans l'écoulement « hors crue ou crues de faible intensité »

5.1.2. Concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement en crue

Comprises entre la LQ et 1.04 $\mu\text{g/l}$ pour une médiane de 0.1 $\mu\text{g/l}$, **les concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement en crue sont globalement inférieures à celle de l'écoulement « hors crue ou crues de faible intensité »** (médiane de 0.26 $\mu\text{g/l}$) (Tableau 10 et 11). Ce premier constat s'interprète par un **processus de dilution de la concentration en CLD dissoute de la rivière pendant les crues par les eaux de ruissellement de surface (ER)**.

Situation hydrologique	Nombre d'échantillons	[CLD]-dissoute $\mu\text{g/l}$				
		min	max	médiane	moyenne	écart-type
Toutes crues	95	0.01	1.04	0.10	0.13	0.14
Montée + Pic	35	0.02	1.04	0.12	0.19	0.21
Décru	60	0.01	0.45	0.06	0.10	0.09

Tableau 11 - Gammes de concentrations en CLD dissoute dans l'écoulement en crue

A l'échelle de la crue, la concentration en CLD dissoute semble varier sur un facteur 10 environ, en fonction des phases de montée et de décrue, mais les différences ne sont pas toujours significatives compte tenu de la forte incertitude analytique de 30% (Figure 26 et Figure 27). La concentration est généralement plus élevée en montée qu'en décrue (9 crues sur 12 présentent cette dynamique) (Tableau 11; Figure 26 et Figure 27) et peut même passer de façon ponctuelle en décrue sous la limite de quantification (cas des décrues du 06-11-2016 et 10-11-2016). La gamme de concentration en CLD dissoute au sein d'une crue semble peu dépendante du débit de pointe (Q_{max}) atteint pas la crue (Figure 27). Cependant, si l'on ne considère que les concentrations en CLD dissoute en montée et au pic de crue alors l'augmentation de la concentration avec le débit de pointe se distingue plus nettement (Figure 27), comme cela a pu déjà être montré avec la concentration en MES (Figure 18).

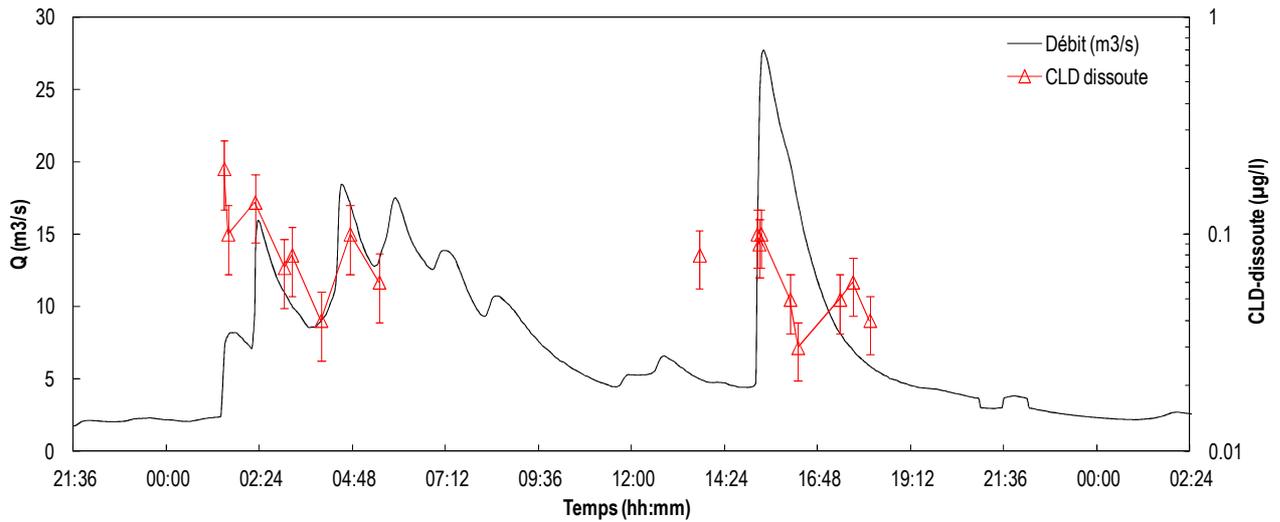


Figure 26 – Exemple d'évolution de la concentration en CLD dissoute ($\mu\text{g/l}$) sur une période de crues survenues le 09-03-2017: Partie1 de type B, échantillon hors crue de fin de décrue, et Partie2 de type C

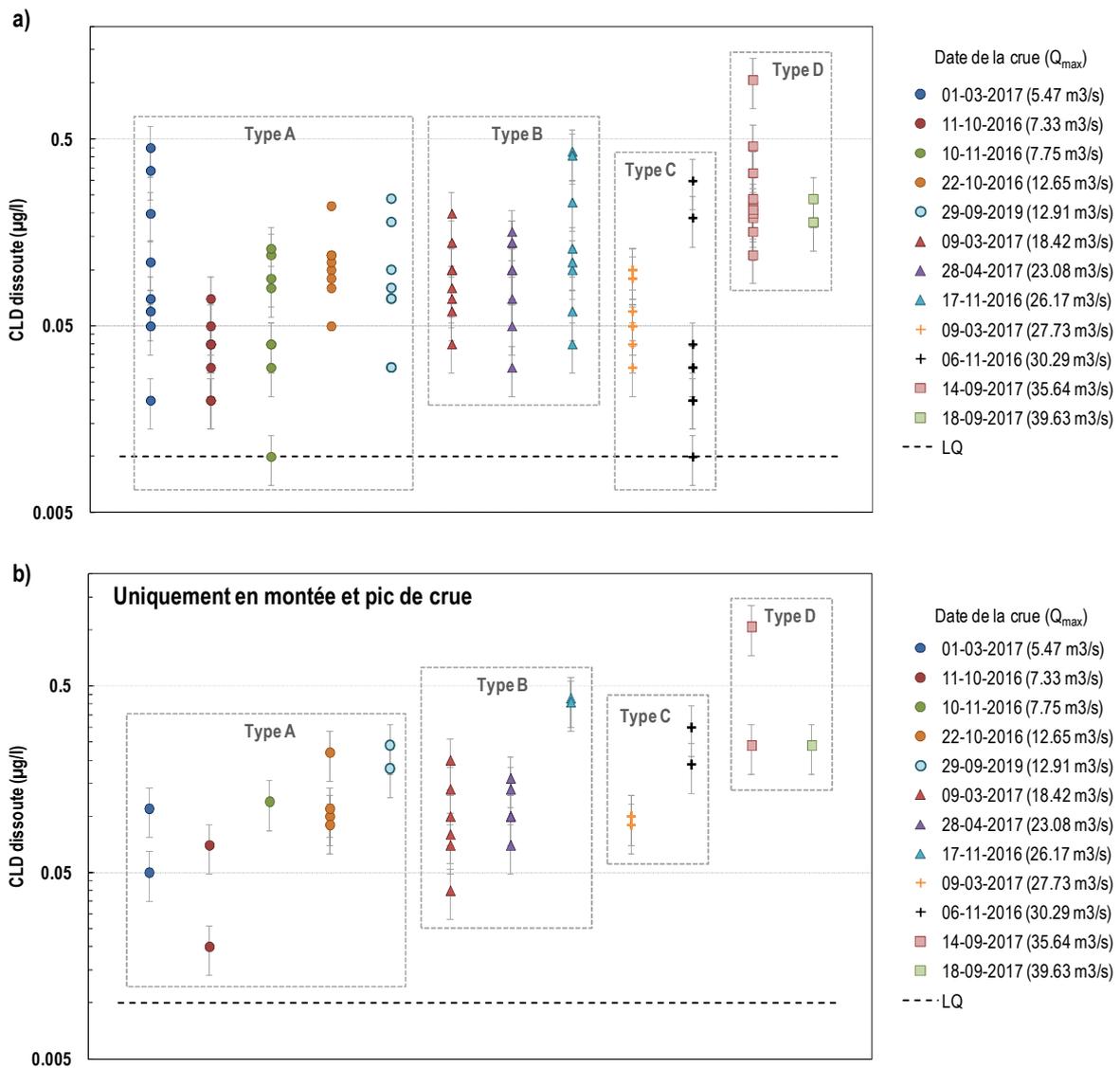


Figure 27 - Variabilité des concentrations en CLD dissoute ($\mu\text{g/l}$) au sein des crues échantillonnées a) toute la crue et b) uniquement en montée et pic de crue

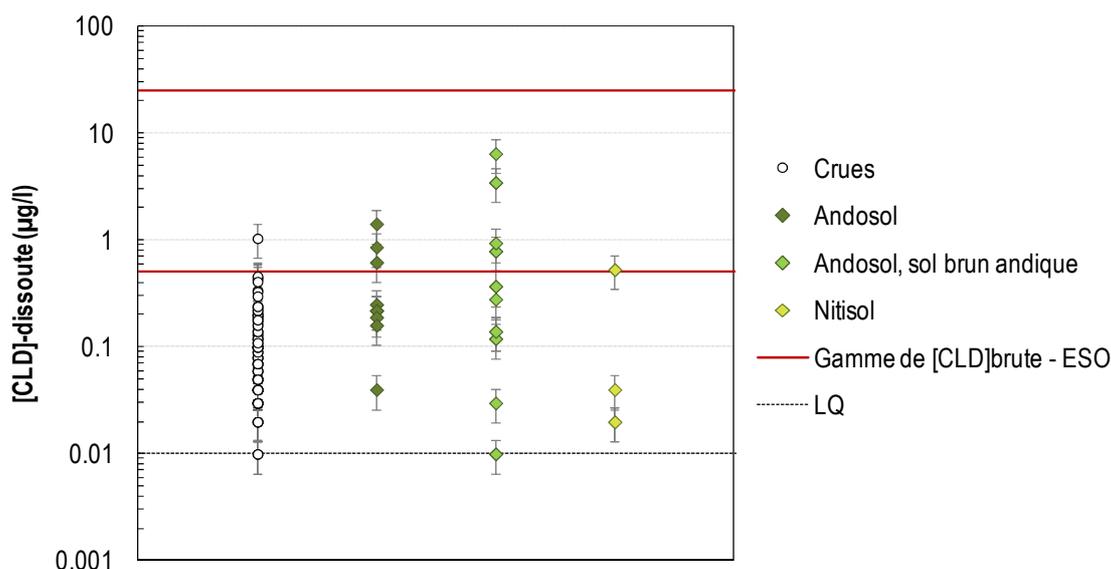


Figure 28 - Comparaison des concentrations en CLD dissoute dans la rivière en crue et dans les eaux de ruissellement par type de sol

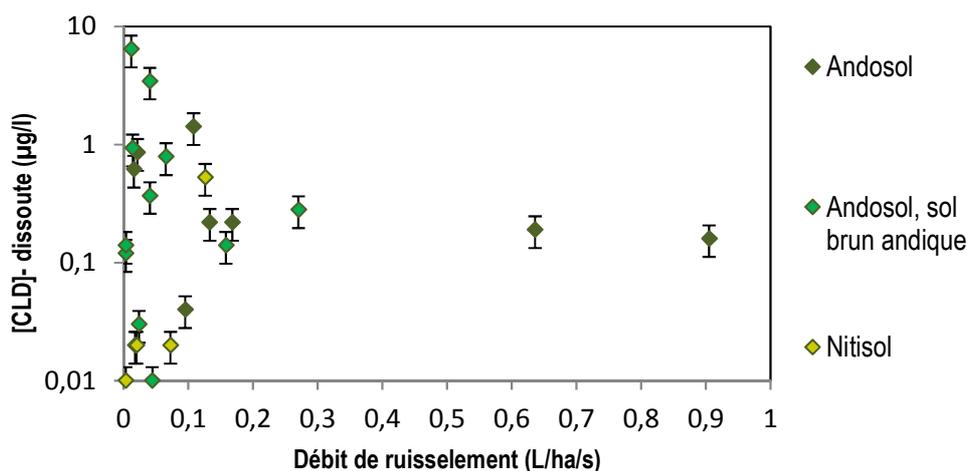


Figure 29 – Evolution des concentrations en CLD dissoute avec le débit de ruissellement dans les parcelles

Les épisodes de crues étant liés à une contribution majoritaire des eaux de ruissellement à l'écoulement de rivière, la gamme de concentration en CLD dissoute dans les eaux de ruissellement sur différentes parcelles contaminées en CLD est comparée aux concentrations en rivière (Figure 28). Les gammes de concentrations sont similaires, mais on note que suivant le type de sol des parcelles, les valeurs maximales sont assez variables en lien avec leur niveau de contamination en CLD dans les sols (6.45 µg/l sur la parcelle de sol brun andique (andosol), 1.42 µg/l sur l'andosol et 0.53 µg/l sur la parcelle de nitisol). Contrairement à ce l'on observe en rivière, à savoir une augmentation de la concentration en CLD dissoute avec l'intensité des crues, la relation entre débit de ruissellement et concentration en CLD dissoute est plus complexe (Figure 29) et apparaît fragile à l'échelle parcellaire et fortement dépendant des situations pédologiques (nature de sol et taux de contamination en CLD notamment). On remarque par contre que la gamme de concentrations dans le ruissellement parcellaire est bien inférieure à la gamme de concentration en CLD brute dans les eaux souterraines (essentiellement sous forme dissoute) mesurée dans différentes nappes au sein du bassin versant du Pérou (Rapport final Allenvi OPA-C, 2015) et qui varie de 0.5 à 25 µg/l.

Ces ordres de grandeur indiquent globalement un **processus de dilution de la concentration en CLD dissoute de la rivière pendant les crues par les eaux de ruissellement de surface (ER)**. Seulement lors de certains événements à fort débit (Figure 27), les eaux de ruissellement pourraient être particulièrement concentrées en CLD dissoute (haut de la gamme) et contribuer à une augmentation de la concentration dans la rivière. L'identification de ces événements ruisselants repose sur deux hypothèses : les pluies générant la crue (et en particulier la montée de crue) seraient plutôt localisées sur le bassin agricole (et non sur la zone forestière en amont du BV) et de manière similaire au raisonnement établi pour les MES (Figure 20), l'augmentation du débit de ruissellement sur le bassin entraînerait une augmentation de la concentration en CLD dissoute.

5.2. La chlordécone particulaire

Les teneurs en CLD particulaire sont analysées directement sur les MES filtrées séchées de taille supérieure à 7 µm (2.4) et exprimées en µg/kg MES. Comme pour la forme dissoute, l'incertitude analytique est importante de 40 %.

Les teneurs en CLD sur la phase particulaire présentent une forte variabilité, encore plus importante que celle mesurée pour la CLD sous forme dissoute, avec un minimum de 8 µg/kg de MES dans un échantillon de décrue de type B (17-11-2016) et de 1526 µg/kg de MES dans un échantillon de décrue de type D (14-09-2017) (Tableau 12). Contrairement à la voie dissoute, il n'y a pas de changement de gamme de teneurs en CLD particulaire entre la montée et la décrue.

Les faibles concentrations en MES dans l'écoulement hors crue (entre 3.10⁻⁴ et 0.03 g/l, Tableau 8) ne permettent pas d'obtenir facilement la quantité de MES suffisante pour réaliser une analyse CLD (0.25 g minimum). Elles montrent néanmoins que le transport de CLD particulaire serait négligeable dans cette situation d'écoulement. Seuls deux échantillons ont pu être constitués pour analyse; ils se situent dans la gamme de teneur en CLD observée en crue, respectivement de 17 et 700 µg/kg (Tableau 12).

Situation hydrologique	Nombre d'échantillon	[CLD]-particulaire µg/kg				
		min	max	médiane	moyenne	écart-type
Toutes crues	68	8	1526	202	251	256
Montée + Pic	30	14	1339	254	300	258
Décrue	38	8	1526	161	211	254
Hors crue ou crues de faible intensité	2 échantillons : Q base = 17 µg/kg et fin de décrue = 700 µg/kg					

Tableau 12 - Gammes de teneur en CLD particulaire dans les MES transportées par la rivière

Il n'y a pas de relation entre les teneurs en CLD adsorbée sur les MES et la charge en MES dans la rivière (Figure 30). La forte variabilité des teneurs en CLD particulaire pourrait s'expliquer par la variabilité d'origine des particules mobilisées (localisation des ruissellements) et de leur nature physico-chimique (constituants minéraux et carbone organique notamment) des particules mobilisées et transportées vers les rivières.

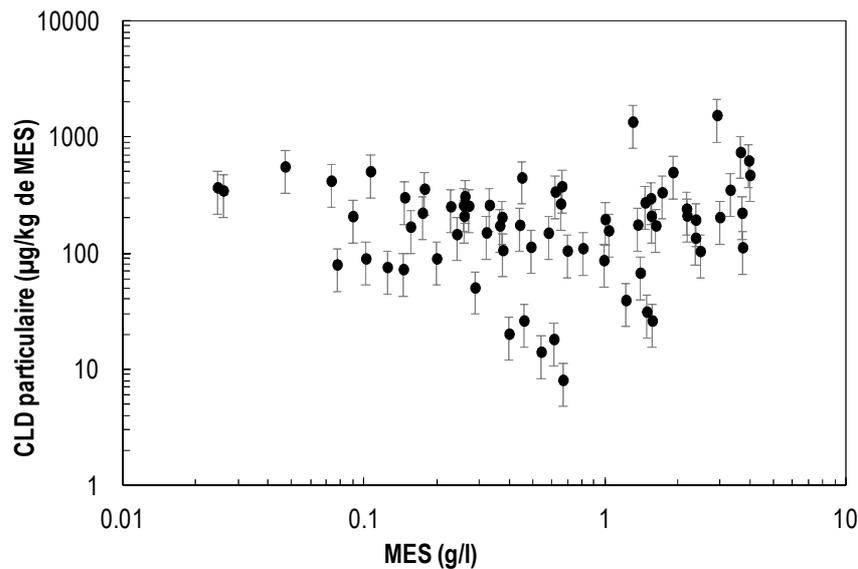


Figure 30 – Teneurs en CLD de la phase particulaire en fonction de la charge en MES des eaux de rivière

Les concentrations en MES sont utilisées pour calculer une concentration de l'eau en CLD particulaire en $\mu\text{g/l}$ (Tableau 13). Comprises entre 0.0053 et 4.43 $\mu\text{g/l}$ pour une médiane de 0.08 $\mu\text{g/l}$, la gamme de concentration de l'eau en CLD particulaire dans l'écoulement en crue est plus étendue que celle sous forme dissoute, avec des valeurs minimale et maximale plus importantes ($0.01 < [\text{CLD}]\text{-dissout} < 1.04 \mu\text{g/l}$). La concentration en CLD particulaire est globalement 2 fois plus élevée en montée et au pic de crue que pendant la phase de décrue (Tableau 13) en lien avec la dynamique du transport solide, et ceci bien que le « pic » de teneur en CLD des particules puisse se produire au début de la décrue comme ce fût le cas pour la crue violente du 14-09-2017 (Figure 31).

A l'échelle de la crue, la concentration de l'eau en CLD particulaire ($\mu\text{g/l}$) peut varier sur un facteur 100 voire plus (Figure 31 et Figure 32). 7 crues sur 12 ont une concentration plus élevée en montée et significativement différente des concentrations en décrue (Figure 32). Moins encore que pour la CLD dissoute, il n'y a pas de logique nette d'évolution de concentration de l'eau en CLD particulaire en fonction du débit de pointe (Q_{max}) atteint par la crue (Figure 32).

Situation hydrologique	Nombre d'échantillon	[CLD]-particulaire $\mu\text{g/l}$				
		min	max	médiane	moyenne	écart-type
Toutes crues	68	0.0053	4.428	0.075	0.351	0.728
Montée + Pic	30	0.0089	2.662	0.143	0.431	0.704
Décrue	38	0.0053	4.428	0.051	0.259	0.720

Tableau 13 - Gammes de concentrations en CLD particulaire ($\mu\text{g/l}$) des eaux de rivière dans l'écoulement en crue

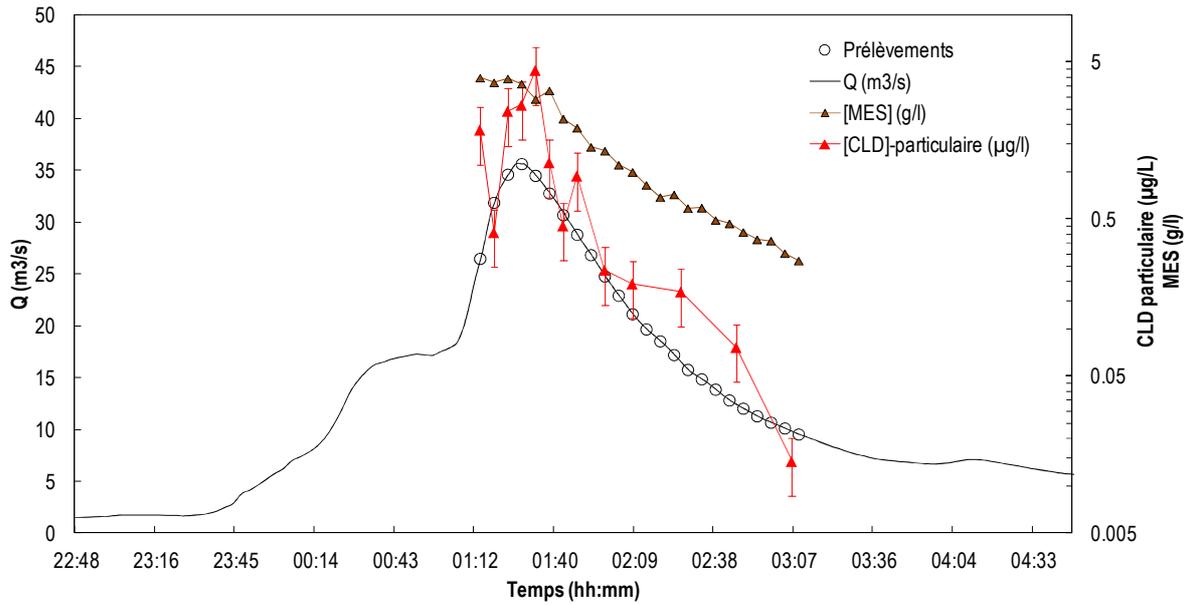


Figure 31 - Exemple d'évolution de la charge en MES et de la teneur en CLD particulaire (µg/l) pendant la crue de type D crue survenue le 14-09-2017

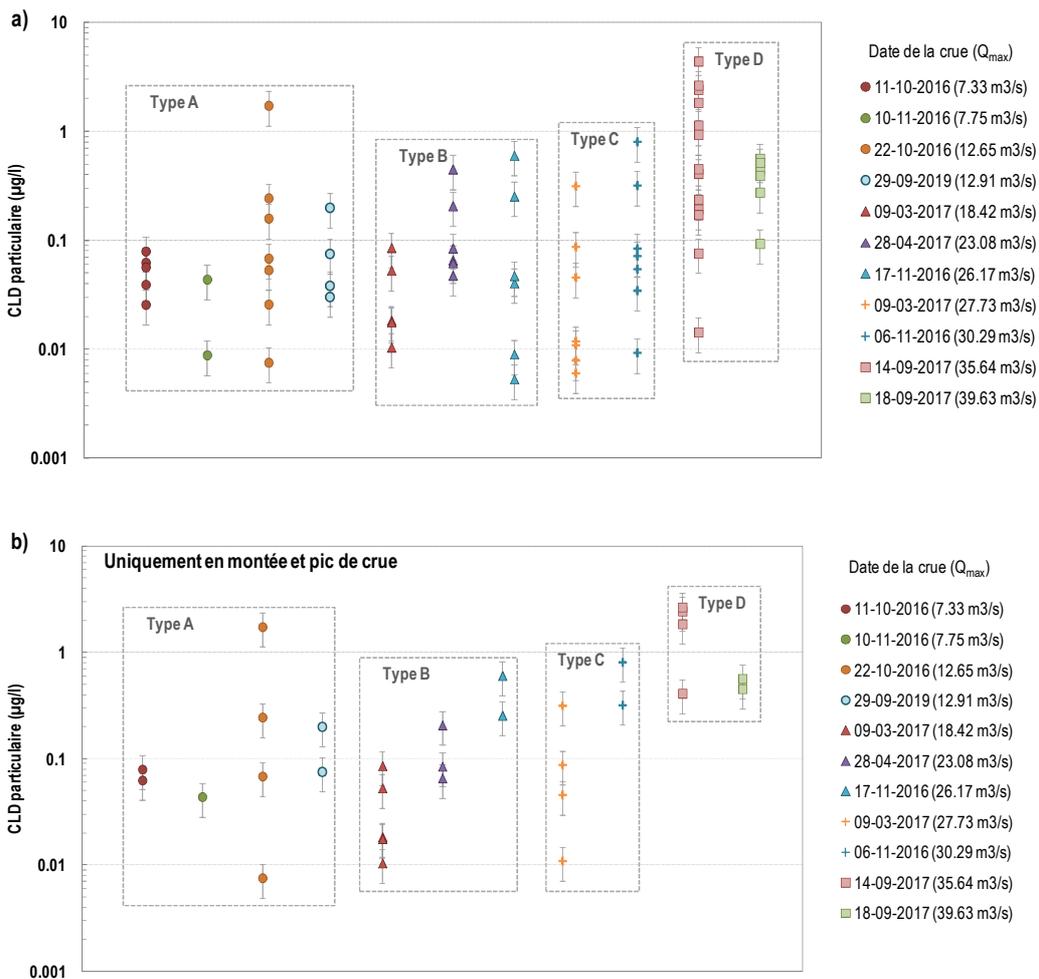


Figure 32 - Variabilité des concentrations en CLD particulaire (µg/l) au sein des crues échantillonnées a) toute la crue, b) uniquement en montée et pic de crue

Pour comprendre l'origine de la CLD particulaire adsorbée sur les MES transportées par la rivière, les teneurs en CLD particulaire sur les MES ($\mu\text{g}/\text{kg}$) et dans l'eau ($\mu\text{g}/\text{l}$) sont comparées à celles des eaux de ruissellement sur les différents types de sol présents dans le bassin versant. En effet si l'origine des MES est difficile à établir, de toute évidence les parcelles contaminées représentent une source de départ de contamination. En crue, la CLD particulaire proviendrait des MES issues de l'érosion hydrique sur les différents types de sol du bassin. La gamme de concentration dans la rivière en crue couvre celle du ruissellement sur les trois types de sol (Figure 33), sachant que l'amplitude de la gamme varie selon les crues (Figure 32). En fonction des types de sols on observe également une variation de la teneur en CLD particulaire des MES. Cette variabilité est cohérente avec le gradient de teneur en CLD des différents sites d'étude, à savoir que l'andosol présente les concentrations les plus élevées ($2000 \mu\text{g}/\text{kg}$), puis le sol brun andique ($500 \mu\text{g}/\text{kg}$) et enfin et le nitisol de $35 \mu\text{g}/\text{kg}$.

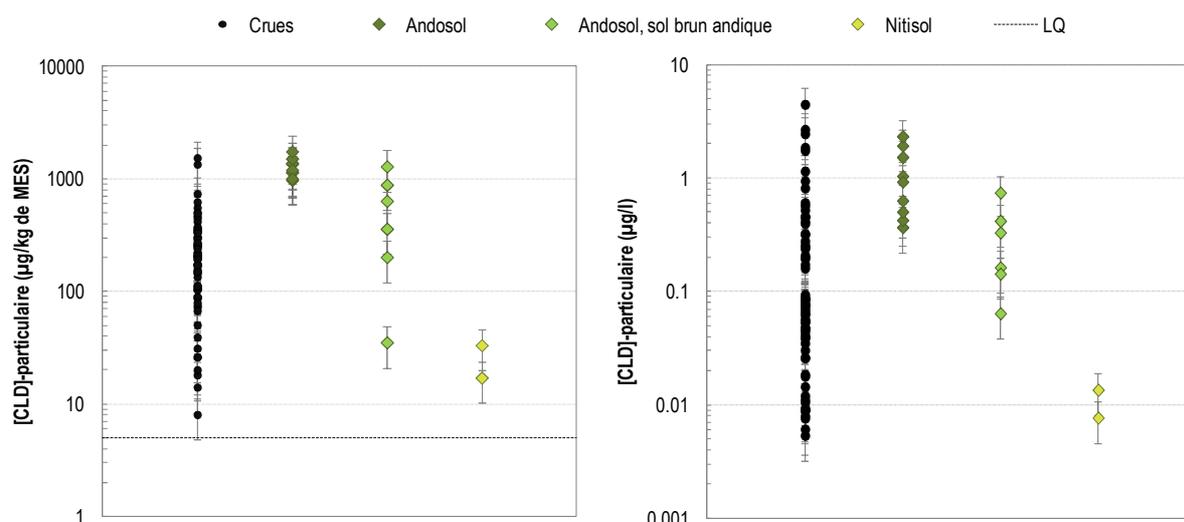


Figure 33 - Comparaison des teneurs en CLD sur MES (gauche) et des concentrations en CLD particulaire dans les eaux de rivière en crue et les eaux de ruissellement parcelaire selon le type de sol.

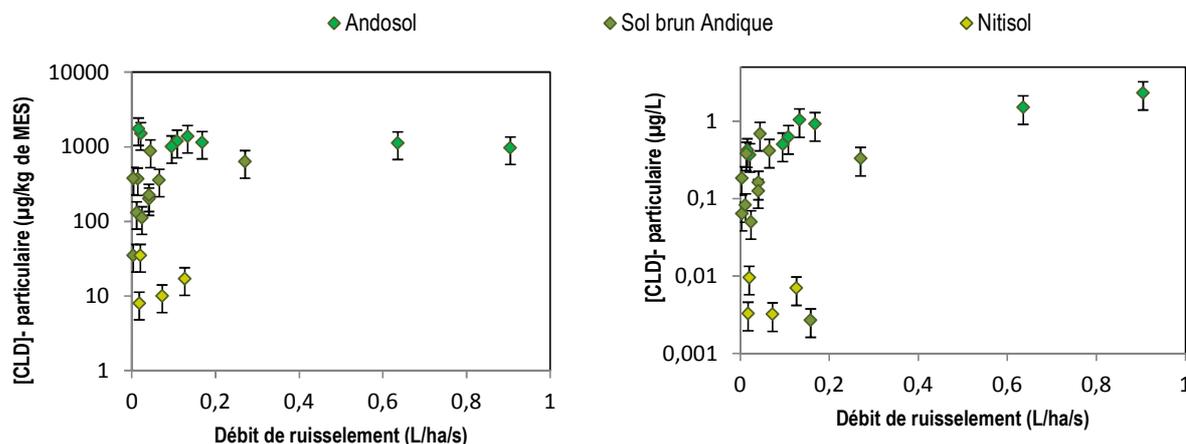


Figure 34 – Evolution des teneurs en CLD dans les particules et des concentrations en CLD particulaire des eaux en fonction du débit de ruissellement

Par ailleurs, de manière similaire au raisonnement établi précédemment à l'échelle parcelaire entre débit de ruissellement et concentration en CLD dissoute, on observe peu de variation de concentration en CLD particulaire avec le débit de ruissellement (Figure 34). A nouveau à l'échelle parcelaire, le lien entre débit de ruissellement et concentrations en CLD particulaire apparaît fragile et fortement dépendant des situations pédologiques (nature de sol et taux de contamination en CLD notamment).

5.3. Transport dissout et particulaire de chlrodécone à l'échelle de la crue

5.3.1. Importance relative des voies dissoute et particulaire dans le transport de CLD à l'échelle de la crue

La quantité de CLD transportée pendant la crue a été estimée pour les 12 crues échantillonnées et représenterait entre 5 et 265 grammes selon les crues (Tableau 14). Le transport de CLD est donc très variable selon les événements de crue, de quelques grammes à plusieurs centaines de grammes, d'où l'intérêt de coupler le suivi qualitatif de la rivière (analyse des concentrations en CLD dans des prélèvements ponctuels) avec un suivi hydrologique pour comprendre l'hétérogénéité de la contamination des rivières, estuaires et sédiments en Basse-Terre.

Ici, plus de la moitié des crues (7 sur 12) ont des contributions équivalentes des voies dissoute et particulaire au transport total de CLD pendant la crue (au vu des fortes incertitudes analytiques on considère une équivalence des phases pour des quantités de CLD comprises entre 40 et 60 % du transport total) (Figure 35). Le transport particulaire n'est majoritaire à 67 % que pour la crue de type C du 06-11-2016 sinon il est équivalent ou minoritaire par rapport à la voie dissoute. **La CLD n'est donc pas transférée majoritairement par voie particulaire dans la rivière en crue.**

Date de la crue	Q _{max} (m ³ /s)	Durée (hh:mm)	Lame écoulée (mm)	MES (t)	CLD dissoute (g)	CLD particulaire (g)	CLD total (g)
10-11-2016	7.75	04:54	4.25	3.61	3.77	1.14	4.91
11-10-2016	7.33	06:36	5.37	10.54	2.55	3.27	5.82
29-09-2016	12.91	02:06	4.41	8.83	4.73	2.82	7.56
01-03-2017	5.474	06:24	4.12	0.79	10.82	0.27	11.09
22-10-2016	12.65	04:21	6.20	55.28	9.92	13.65	23.57
09-03-2017-Partie2	27.73	03:45	13.28	141.76	10.12	14.02	24.13
28-04-2017	23.08	02:13	10.08	52.43	13.10	12.76	25.85
17-11-2016	26.17	03:51	8.87	127.81	19.31	7.29	26.60
06-11-2016	30.29	03:00	10.10	162.33	10.80	21.98	32.78
09-03-2017-Partie1	18.42	04:06	13.38	39.81	16.69	19.95	36.64
18-09-2017	39.63	05:06	20.85	175.96	40.55	42.21	82.76
14-09-2017	35.64	02:21	13.88	302.86	115.57	148.89	264.46

Tableau 14 - Estimations des quantités de CLD transportées à l'échelle des crues échantillonnées dans la rivière Pérou

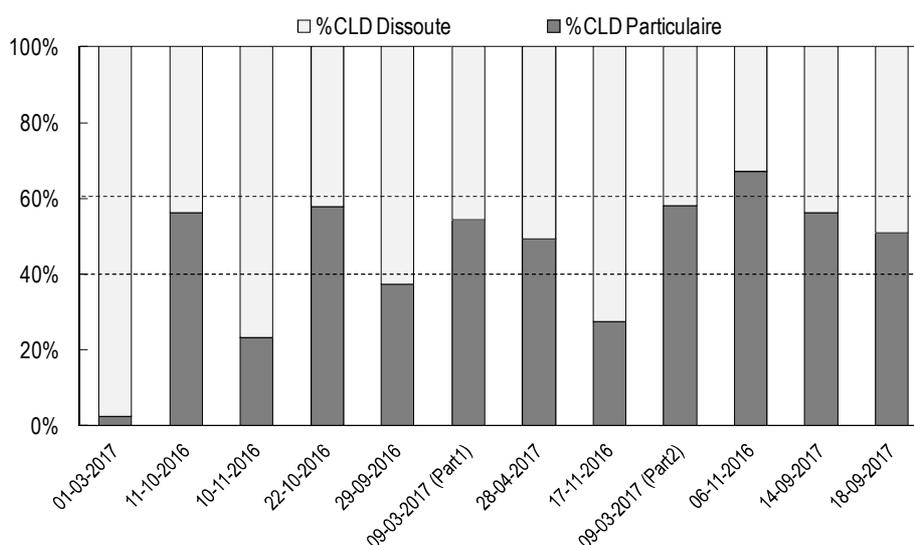


Figure 35 - Contributions des voies dissoute et particulaire au transport de CLD pendant les crues

En montée, le transport particulaire de CLD est majoritaire entre 61 et 72 % dans la moitié des crues échantillonnées et équivalent au transport dissout pour 4 crues (Figure 36). En décrue, les contributions sont équivalentes dans 7 cas sur 12 mais la voie dissoute domine entre 62 et 98 % du transport de CLD dans 4 décrues, ce qui la rend majoritaire en décrue bien que le transport particulaire ne soit pas négligeable (2 à 68%) (Figure 36). Ainsi l'hypothèse d'un transfert majoritaire par la voie particulaire de la chlordécone se confirme uniquement pour la phase de crue (montée et pic).

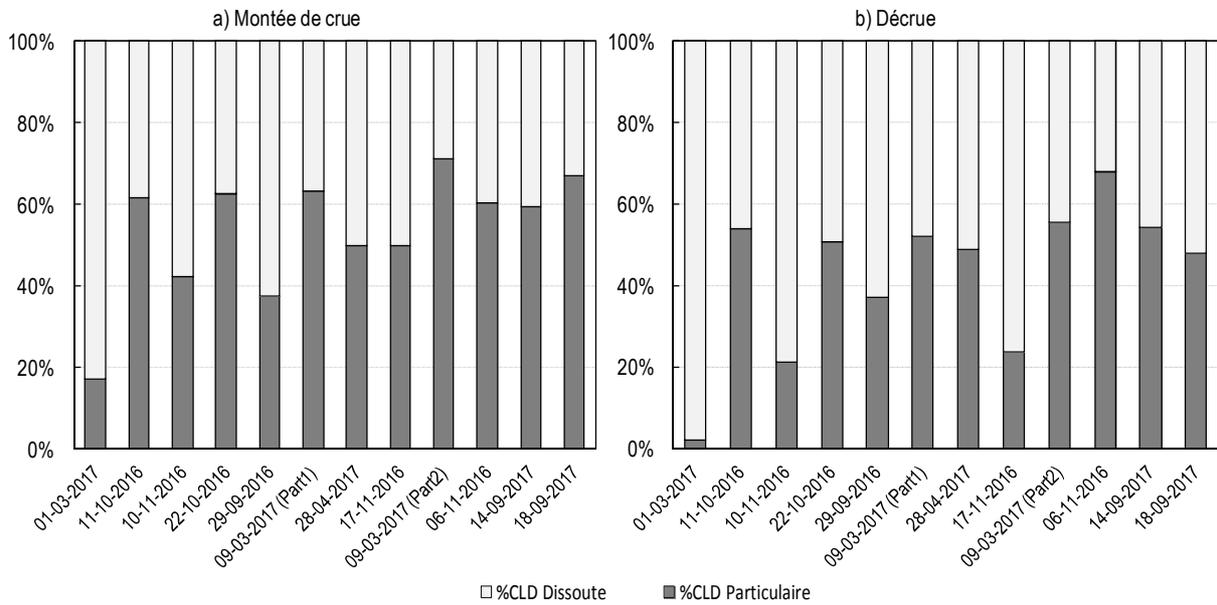


Figure 36 - Contributions des voies dissoute et particulaire au transport de CLD pendant la montée et la décrue

5.3.2. Transport de chlordécone en fonction du débit de pointe (Q_{max})

Pour extrapoler le transport de CLD à l'échelle de la semaine ou de l'année, il s'avère important de tenir compte de la variabilité du transport de la CLD en fonction de l'intensité de la crue. Les relations établies entre le débit de pointe atteint par la crue et le transport de CLD par voie dissoute et particulaire (Figure 37) permettent d'appréhender cette variabilité. L'intensité de la crue, mise en évidence par son débit de pointe, sert de variable prédictive du transport dissout et particulaire de CLD en crue.

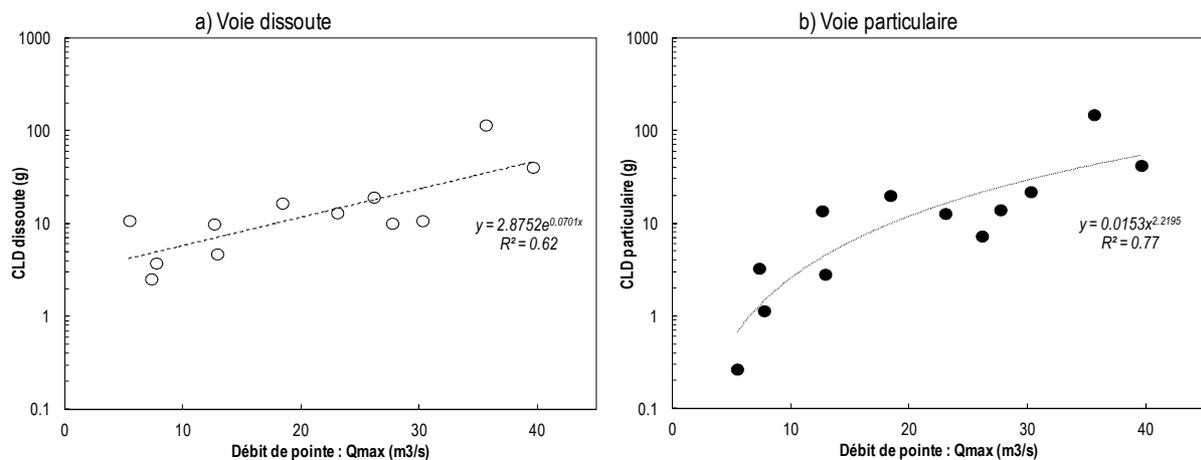


Figure 37 - Transport de CLD dissoute et particulaire en fonction du débit de pointe atteint par la crue

5.4. Schéma conceptuel de la dynamique de contamination en chlordécone dans la rivière Pérou

Pour analyser la dynamique de la contamination en CLD de la rivière en fonction du débit, on représente en Figure 38, la variabilité des concentrations en CLD brute calculées par la somme des contributions des phases dissoute et particulaire. On peut distinguer des variabilités de contamination différentes selon deux gammes de débit de rivière :

- I. Débit inférieure à 5 m³/s → diminution progressive des concentrations en CLD brute, de valeurs élevées supérieures à 1 µg/l pour les débits les plus faibles à des concentrations inférieures à 0.1 µg/l quand le débit augmente,
- II. Débit supérieur à 5 m³/s → ré-augmentation progressive de la concentration en CLD brute pour atteindre un niveau de concentration similaire à la phase I pour les débits les plus forts.

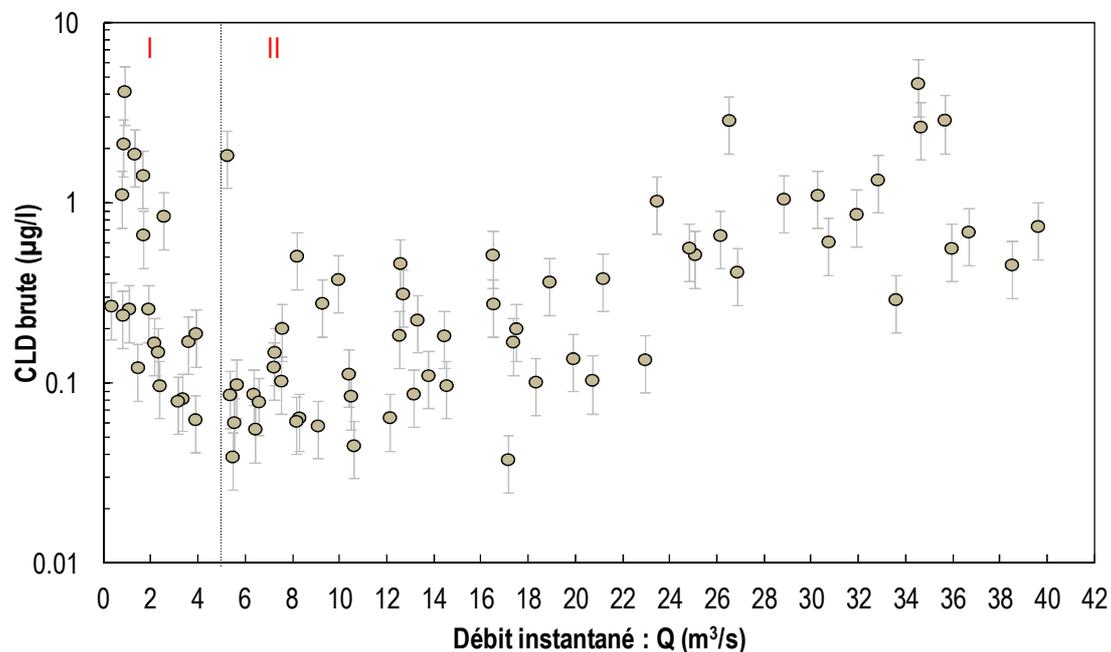


Figure 38 - Dynamique de contamination en CLD dans la rivière Pérou

Les contributions des phases dissoute et particulaire à la contamination totale en CLD de la rivière sont illustrées par la Figure 39. Cela permet d'interpréter l'origine des différences de contamination des 2 gammes de débit par rapport aux contributions des eaux souterraines et de surface à l'écoulement de la rivière :

- I. Débit inférieure à 5 m³/s → diminution de la concentration en CLD dissoute de la rivière avec l'augmentation du débit associée à une faible concentration en CLD particulaire. On interprète ici une contribution croissante et significative des eaux de ruissellement (ER) peu contaminées en CLD dissoute et faiblement chargées en MES.
- II. Débit supérieur à 5 m³/s → ré-augmentation de la concentration en CLD dissoute et contribution de la CLD particulaire de plus en plus marquée. L'augmentation progressive de la contribution en CLD particulaire avec le débit est associée à la capacité de lessivage et d'érosion de la CLD lors des fortes crues. Pour cette situation la rivière est alimentée principalement par des eaux de ruissellement de surface (ER) chargées en particules (MES) et contaminées en CLD dans les deux phases.

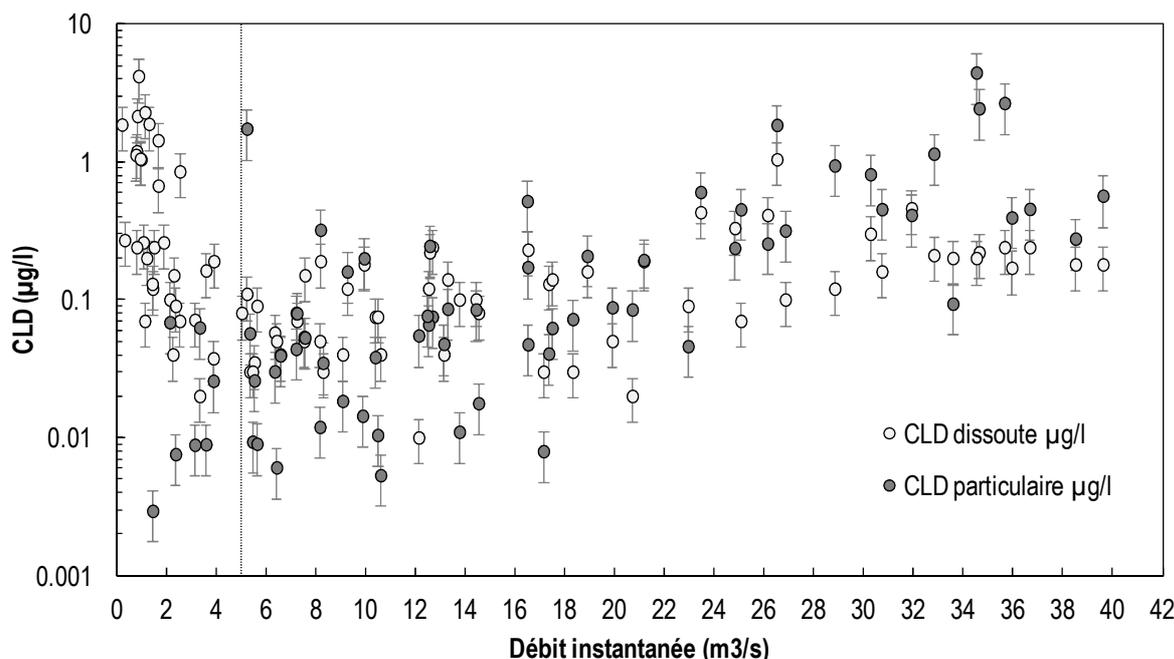


Figure 39 - Contribution des voies dissoute et particulaire à la dynamique de contamination en CLD dans la rivière Péro

5.5. Transport dissout et particulaire de chlordécone à l'échelle annuelle

A partir de la proposition de schéma conceptuel de la dynamique de contamination en CLD de la rivière, une méthode d'estimation de l'exportation de la CLD à partir des débits est proposée. Elle repose sur les deux situations hydrologiques qui explicitent les contributions des eaux souterraines et de ruissellement à la contamination en CLD.

- Pour la première gamme de débit entre 0 et 5 m³/s, on distingue deux situations d'écoulement pour estimer l'exportation de CLD :
 - En situation d'écoulement de base et de tarissement, pour les débits les plus faibles entre 0 et 2 m³/s, la CLD est majoritairement présente sous forme dissoute dont la concentration est estimée par une valeur unique de 1.05 µg/l (valeur médiane des échantillons compris entre 0 et 2 m³/s). La fraction particulaire est estimée pour une charge en MES très faible équivalente à 0.0007g/l et une teneur en CLD particulaire de 17 µg/kg, ce qui constitue une contribution de $1,32 \cdot 10^{-5}$ µg/l.
 - Pour les débits compris entre 2 et 5 m³/s, les situations hydrologiques sont associées à des crues de faible intensité ($Q_{max} < 5 \text{ m}^3/\text{s}$), avec une faible contribution de la phase particulaire. De manière similaire à la situation précédente, on a choisi d'utiliser une valeur unique de concentration en CLD : une concentration en CLD dissoute estimée à 0,115 µg/l et une contribution de 0,003 µg/l pour la fraction particulaire qui associe une concentration en MES à 0.0087 g/l et une teneur en CLD particulaire à 364 µg/kg.
- Pour les débits supérieurs à 5 m³/s, les exportations de CLD selon les voies dissoute et particulaire sont basées sur les relations établies à partir des débits de pointe (Q_{max}) des crues (Figure 37).

5.5.1. Bilans annuels des transferts en 2016 et 2017

A l'échelle annuelle, le transport de CLD par la rivière Péro est estimé à **quelques dizaines de kilogrammes, mais peut varier du simple au double** selon les années comme le montrent les bilans sur les années 2016 et 2017, avec des estimations respectives de 16.4 et 34 kg de CLD (Tableau 15). Cette différence interannuelle s'explique par l'augmentation de la lame écoulée qui a doublé entre 2016 et 2017. **La répartition des transferts entre voies dissoute (98 %) et particulaire (2 %) ou entre phase d'écoulement de base et de tarissement (90 %) et phase de crues marquées (10 %) est restée stable sur les deux années (Tableau 15). Les transferts se font donc essentiellement par voie dissoute (plus de 97 % du transport annuel) car**

l'écoulement se fait majoritairement entre 0.2 et 3 m³/s (plus de 70 % de la lame annuelle écoulée, Figure 12), soit dans une gamme de débits faibles où les eaux sont peu turbides et fortement contaminées en CLD dissoute issue des eaux souterraines.

Année	Lame écoulée (mm)	BILAN ANNUEL									
		MES (t)		Quantité de CLD transportée (kg)					Transport de CLD (g/ha/an)		
		Total	Transport (t/ha/an)	Total	Dissout	Particulaire	Q-base	Crues	Total	Dissout	Particulaire
2016	1889	1555.7	1.23	16.4	97.7%	2.3%	90.1%	9.9%	42.0	41.0	0.96
2017	3634	2028.7	1.6	34.0	97.6%	2.4%	90.6%	9.4%	87.2	85.1	2.10

Tableau 15 - Bilans annuels du transport de CLD : contributions des voies dissoute et particulaire, de l'écoulement de base et des crues

Le transport particulaire est estimé à 2 % du transport annuel de CLD dans la rivière Pérou ce qui est presque négligeable (Figure 40). Si l'on considère uniquement l'écoulement en crue alors le transport particulaire de CLD représente 25 % du transport de CLD. Cela s'explique par la contribution des crues fortes, aux débits de pointe supérieurs à 5 m³/s, qui présentent un transport particulaire significatif, voire équivalent à la voie dissoute (Figure 40). Toutefois, les crues ayant un débit de pointe inférieur à 5 m³/s et identifiées comme des événements avec une faible participation de la charge solide (Tableau 8) présentent aussi une contribution faible de la CLD particulaire de l'ordre de 3 %.

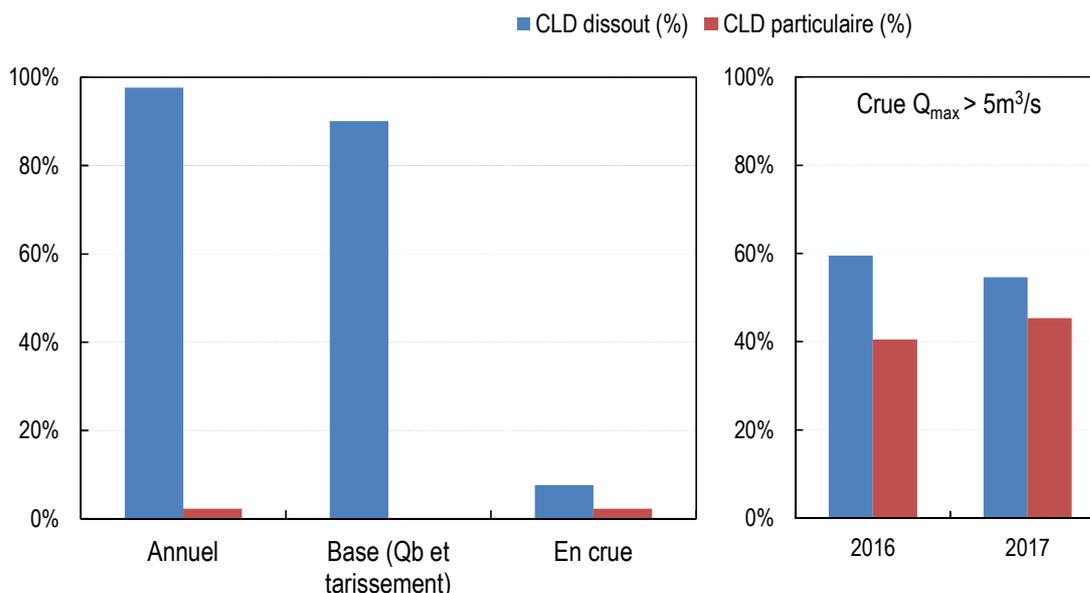


Figure 40 - Part des situations d'écoulements et des voies dissoute et particulaire dans le transport de CLD annuel dans la rivière Pérou

Durant les épisodes de crues, la contribution des eaux de ruissellement de surface au transport de CLD est majoritaire. Ce transport, ramené à la surface des sols présentant un risque élevé de contamination en CLD soit 380.14 ha dans le bassin agricole de la rivière Pérou (Carte des risques de contamination en CLD des sols de Guadeloupe, DAAF 2018, Projet ChleauTerre), représente un export de CLD moyen 6.4 g/ha contaminés/an (Tableau 16). Le transport annuel de CLD dans les eaux de ruissellement parcellaire a été estimé en extrapolant à partir de l'export mesuré sur la période de l'essai (entre 50 et 75 jours) en se basant sur le cumul de pluie de la période de mesure et du cumul de pluie annuel de la station pluviométrique la plus proche du site expérimenté (Tableau 18). On retient que l'extrapolation à partir des résultats sur parcelles pourrait surestimer faiblement le transport annuel de CLD par le ruissellement sur le bassin du fait de deux biais : les périodes de mesures ont été légèrement plus pluvieuses que la pluviométrie journalière à l'échelle de l'année (min de +0.36 mm/j sur l'andosol

et de +1.37 mm/j sur le sol brun) (Tableau 17) et le dispositif ne permet pas de prendre en compte les processus éventuels de ré-adsorption et re-déposition dans la parcelle pendant un évènement pluvieux.

La contribution du ruissellement de surface sur le bassin versant ne correspondrait qu'à moins de la moitié (38%) du transport total de CLD par la rivière en crue. Si l'on ne considère que les crues intenses avec un débit de pointe supérieur à 5 m³/s alors le ruissellement de surface représenterait plus de la majorité (72%) du transport de CLD dans la rivière en crue. La contribution des eaux souterraines au transport de CLD dans la rivière en crue serait donc importante de l'ordre de 60% mais diminuerait avec l'intensité des crues (28%).

Transport de CLD par les eaux de surface (g/ha contaminés/an) : crue vs ruissellement			
	Dissout	Particulaire	Total
Ecoulement en crue	4.79	1.57	6.36
Ecoulement en crue Q _{max} > 5m ³ /s	1.92	1.49	3.41
Ruissellement - tous sols (moyenne pondérée par la surface)	0.55	1.90	2.44
Ruissellement - Andosol	1.22	6.66	7.88
Ruissellement - Sol brun andique	0.43	0.35	0.78
Ruissellement - Nitisol	0.15	0.004	0.15

Tableau 16 - Transport de CLD par les eaux de surface (g/ha/an), en crue et dans le ruissellement parcellaire

Site	Cumul de pluie sur l'essai (mm)	Période de mesure (jour)	Pluie journalière sur l'essai (mm/j)	Station pluviométrique	Pluie annuelle station (mm)	Pluie journalière station (mm/j)
Andosol	703.48	65	10.82	Neufchateau (253 m)	3819.7	10.46
Andosol, sol brun	523.4	50	10.47	Concession (284 m)	3321	9.10
Nitisol	516.188	75	6.88	Bois Debout (70 m)	2152	5.90

Tableau 17 - Comparaison des pluies sur les périodes de mesure par rapport à l'échelle annuelle

Sols	Surface à risque de contamination en CLD (ha)	Cumul de pluie sur l'essai (mm)	Pluie annuelle station (mm)	CLD brut exporté (g/ha/an)	CLD dissout exporté (g/ha/an)	CLD particulaire exporté (g/ha/an)
Andosol	109.84	703.48	3819.7	7.88	1.22	6.66
Andosol, sol brun	171.10	523.4	3321	0.78	0.43	0.35
Nitisol	99.20	516.19	2152	0.15	0.15	0.004

Tableau 18 : Estimation du transport de CLD par le ruissellement de surface sur parcelles contaminées au CLD et selon les types de sols

5.5.2. Comparaison et validation des résultats à l'échelle du bassin versant

La validation de la fonction d'estimation de la CLD a été réalisée à partir d'un jeu de données indépendant sur la base du suivi hebdomadaire assuré par l'observatoire OPALE. Les échantillons prélevés ne sont pas filtrés, et représentent donc des concentrations en CLD brute. Le cumul d'exportation de CLD sur une durée de 82 semaines (460 jours) entre février 2016 et septembre 2017 est estimé suivant la fonction issue de nos travaux à 27.2 kg, et a été calculé à 29.5 kg sur la base des données de l'Observatoire. De même, la dynamique des courbes de quantités cumulées de CLD transportées est similaire sur cette période (Figure 41) confirmant la fiabilité des deux approches de mesures et d'estimation des transferts de CLD dans la rivière Pérou. Notons toutefois qu'après le cyclone MARIA (18/09/2017) l'estimation faite par l'approche TPDP sous-estime les quantités exportées par rapport aux estimations basées sur les prélèvements OPALE. Pour mémoire la fonction d'estimation de CLD basée sur les débits a été établie à partir de 226 échantillons ponctuels acquis entre Aout 2016 et Mars 2018, et seulement 5 échantillons se situent après l'évènement cyclonique Maria. L'augmentation du transport de CLD après cet évènement peut s'expliquer par une augmentation de la concentration en CLD durant l'écoulement de base. En effet on peut faire l'hypothèse que lors d'évènement

extrême l'augmentation des flux de percolation vers les nappes entraine par effet piston une exfiltration des eaux les plus anciennes et les plus contaminées en CLD vers la rivière.

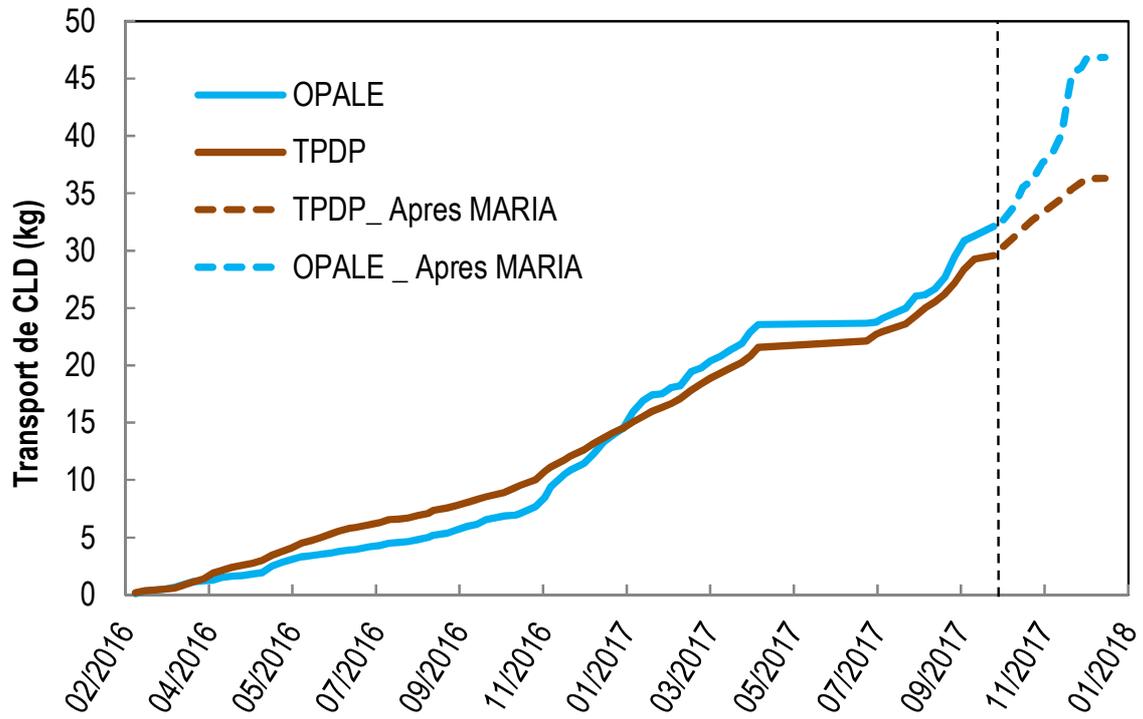


Figure 41 - Comparaison des quantités de CLD cumulées estimées par l'Action de recherche TPDP et l'Observatoire OPALE

6. Conclusion de l'étude et préconisations associées

6.1. Dynamiques et mécanismes de contamination des eaux de rivières par la CLD

6.1.1. Eaux brutes

L'étude est localisée sur le bassin versant de la rivière Pérou, dont l'occupation du sol est caractérisée par un amont forestier important (70 % de la superficie) et la gamme de contamination des eaux à l'exutoire par la CLD brute est comprise entre 0,01 et 5 µg/L, ce qui est représentatif de plus de 80 % des bassins versants de la Basse-Terre (Rochette et al., 2017). Les résultats ont mis en évidence le rôle réciproque des contributions des eaux souterraines et de surface dans la dynamique de transfert de la CLD sous forme dissoute et particulaire en rivière. Pour expliciter la dynamique de la concentration en CLD en fonction du débit, un schéma conceptuel des différentes voies de contamination en fonction du débit en rivière est proposé (Figure 42). L'approche développée permet de comprendre l'origine de la concentration en CLD brute dans la rivière et met en évidence l'importance du suivi hydrologique pour qualifier l'origine de l'écoulement lors de l'échantillonnage.

Les exports de CLD sont estimés à l'échelle annuelle via une fonction d'extrapolation établie à partir des échantillonnages ponctuels. A ces fins le débit sert de variable prédictive pour l'estimation des concentrations en CLD dissoute et particulaire dans la rivière. Les estimations proposées sont cohérentes avec l'estimation proposée par ailleurs par l'observatoire OPALE (Figure 41) ce qui conforte les approches et méthodologies proposées. Cependant les relations *débit vs concentration* établies pourraient évoluer suivant les intensités des épisodes pluvieux notamment dans le cas des ondes tropicales et des cyclones (section 5.5.2).

A l'échelle annuelle, l'analyse hydrologique a montré que 70 % de l'écoulement de la rivière se produit pour une gamme de débits faibles (0.2 et 3 m³/s) caractérisés par des situations de débit de base, de tarissement et de crues de très faible ampleur pour lesquelles la contribution des eaux souterraines à l'écoulement est majoritaire voire entière. Pour ces situations, la concentration en CLD de la rivière est élevée en lien avec les gammes de concentrations importantes analysées dans les eaux souterraines. La contamination s'effectue quasi exclusivement par voie dissoute. Ainsi pour 70 % du volume annuel écoulé, la qualité de l'eau de rivière est directement influencée par la qualité des eaux souterraines.

6.1.2. Phase particulaire

La contamination des eaux de rivière par voie particulaire s'observe uniquement en période de crue où la charge en MES de la rivière augmente avec le débit (Figure 21), ce qui implique une contribution importante des eaux de ruissellement de surface. A l'échelle annuelle, le volume écoulé en crue représente 30% du volume annuel, pendant lequel le transfert de la CLD s'effectue par voie dissoute et particulaire. L'analyse des crues prélevées montre qu'en situation intra-crue la quantité totale de MES transporté en décrue est plus importante qu'en montée de crue, bien que la charge en MES soit plus importante en montée de crue. Ce résultat s'explique par le volume d'eau écoulée en décrue beaucoup plus important qu'en montée de crue (Figure 15). Par ailleurs à l'échelle de la crue on identifie clairement une augmentation de l'exportation des MES en fonction du débit de pointe de la crue (Figure 24). Ainsi les crues les plus intenses sont le lieu de transfert de particulaire le plus important.

Concernant le transfert particulaire de CLD, les analyses sur les MES prélevées lors des crues montrent qu'il n'y a pas de relation entre teneur en CLD adsorbée sur les MES et la charge en MES de l'eau de rivière (Figure 30). A l'échelle de la crue, incluant montée et décrue, on démontre que le transfert de la CLD représente une contribution équivalente entre phase dissoute et particulaire (Figure 35). On observe néanmoins que la contribution en CLD particulaire est majoritaire en montée de crue associée à une charge en MES plus importante pour cette phase de la crue. Ainsi l'hypothèse d'un transfert particulaire majoritaire à l'échelle de la crue n'est vérifiée que pour la phase de montée de crue.

Pour tenir compte spécifiquement du rôle de la phase particulaire présent lors des épisodes de crues, nous proposons une fonction d'estimation du transport de CLD en fonction du débit de pointe de la crue (Figure 37). La

fonction de transfert proposée tient compte également du transfert sous forme dissoute lors des épisodes de crues, permettant ainsi de rendre compte de la contribution des deux phases.

Interprétation de la contamination en CLD brute en fonction des contributions des eaux de souterraines et des eaux de ruissellement de surface au débit de la rivière

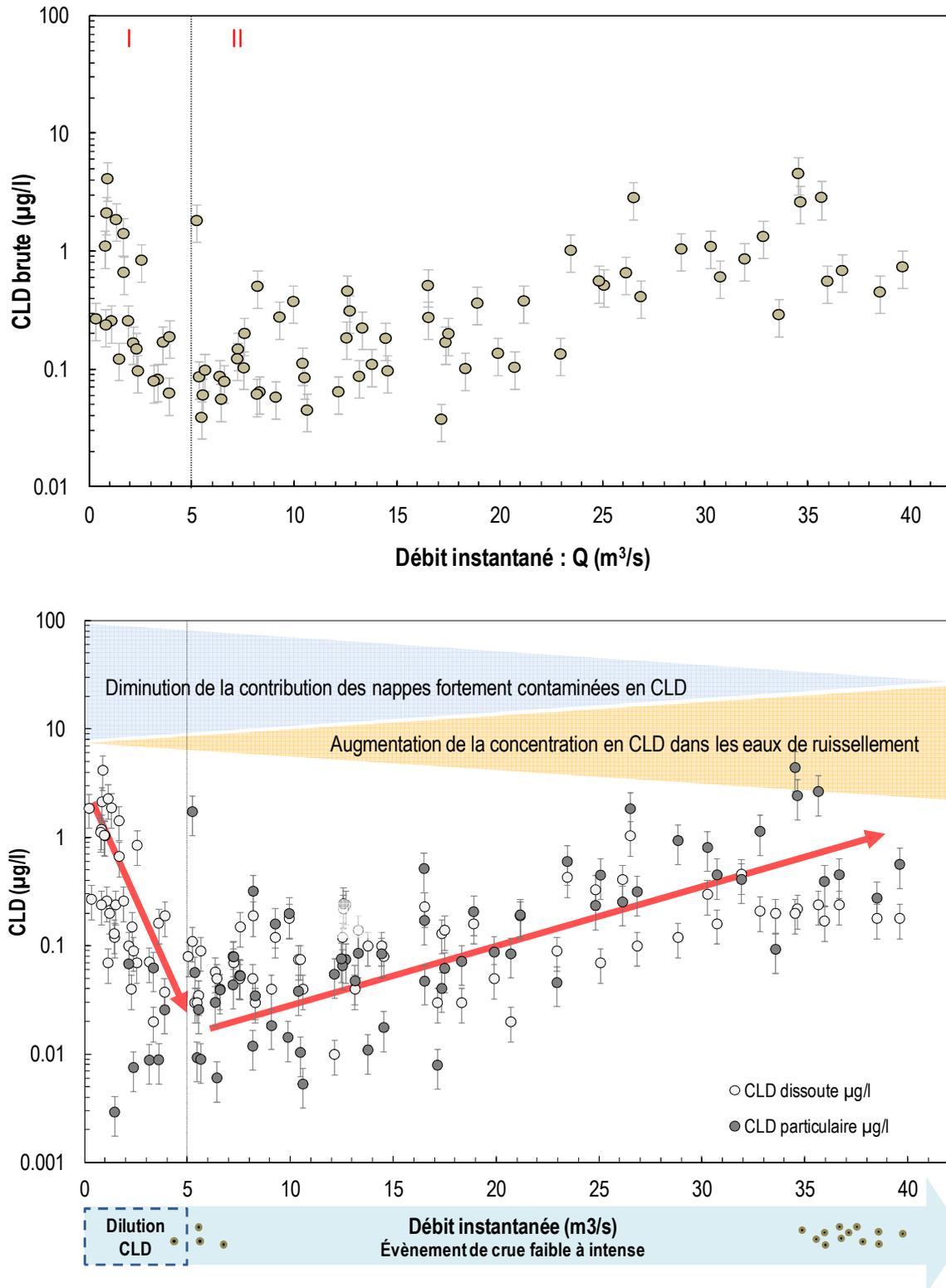


Figure 42 - Schéma d'interprétation de la contamination en CLD brute en rivière : cas de la rivière Pérou

6.2. Implications sur le comportement d'autres molécules

Ce diagnostic apporte des éléments de compréhension par rapport au comportement d'autres pesticides. En effet les caractéristiques de la contamination en CLD s'appuient sur i) une grande persistance de la molécule dans les sols et les eaux, et ii) un transfert par percolation depuis les sols contaminés vers les eaux souterraines. Ainsi le stock de CLD dans les eaux souterraines est important, contrairement aux molécules actuellement épandues qui ont des capacités de dégradation plus importantes. Les travaux conduits par Charlier et al. (2009) sur la dynamique de transfert de cadusafos dans un sous bassin versant situé dans la partie amont du bassin versant de la rivière Pérou confirment ce diagnostic. Suite à l'épandage de cadusafos, deux comportements se distinguent, i) les aquifères superficiels en continuité hydraulique avec les sols fortement drainants et vulnérables à la contamination en cadusafos, ii) des aquifères plus profonds peu impactés par le flux contaminant de cadusafos car formés à partir de matériaux volcaniques moins poreux à l'origine d'une discontinuité hydraulique importante. Par ailleurs la dynamique de concentration dans la rivière est également fortement liée aux dates d'application, et les concentrations les plus élevées sont associées aux contributions des eaux de ruissellement pour les événements les plus proches de l'application. Ainsi il apparaît que le rôle des aquifères profonds peut varier suivant la nature de la molécule. Dans le cas de la CLD, la persistance de la molécule dans le sol donne lieu à une constante migration en profondeur, qui in fine induit des concentrations élevées jusque dans les aquifères profonds. Ce processus n'est pas observé dans le cas des autres molécules dont la persistance est plus faible. Pour ces molécules, le soutien de l'écoulement de surface par les nappes profondes joue sans doute un rôle de dilution.

Pour le ruissellement de surface, qui correspond aux situations de crues, on a identifié que le transport de la CLD via la phase particulaire est globalement minoritaire à l'échelle annuelle (Figure 40) et ne dépasse le transfert dissout que pour les crues les plus fortes. Comme la CLD, par rapport à d'autres molécules actuellement utilisées, présente un coefficient de partage eau-sol élevé (K_{oc} de l'ordre de 2500 à 20100 l.kg⁻¹) et une persistance très forte, elle est un majorant du transport particulaire de la plupart des pesticides actuels. En d'autres termes, si la capacité d'adsorption et la demi-vie d'un autre pesticide ne sont pas plus élevées que celles de la CLD, ce qui semble peu vraisemblable, alors on peut supposer que cette molécule sera transférée essentiellement par voie dissoute dans les eaux de ruissellement.

Si l'on considère l'ensemble des situations d'écoulement en rivière, la proportion du transfert particulaire des autres molécules pourra toutefois être supérieure à celui établi pour la CLD. En effet dans le cas de la CLD, les eaux souterraines contribuent fortement à l'apport de CLD dissoute, ce qui n'est pas le cas pour les molécules actuellement utilisées. Toutefois cette proportion de transfert particulaire restera toujours très minoritaire à l'échelle annuelle, puisque la contribution du ruissellement de surface, chargé en particules, à l'écoulement de rivière est elle-même faible.

On peut conforter ce raisonnement par l'analyse des données recueillies à l'échelle parcellaire après un traitement phytosanitaire. Les 7 matières actives appliquées sur les différents types de sol dans le cadre des expérimentations sur parcelles (Livrable 4 du présent projet, Ponchant et al., 2019) ont des propriétés physico-chimiques contrastées (K_{oc} et DT50) (Figure 43) mais très inférieures à celles de la CLD. Seul le difénoconazole présente des propriétés cumulant une adsorption élevée et une dégradation faible, rendant cette molécule la plus favorable à un transfert particulaire. Par ailleurs, il est à noter que les conditions d'apport ne sont pas les mêmes, dans le cas des matières actives elles sont appliquées par pulvérisation sur les sols aux doses recommandées par les fournisseurs alors que la CLD n'est plus appliquée depuis plus de 20 ans mais persiste dans les sols, jusqu'à des profondeurs significatives. Les analyses réalisées dans le cadre des essais sur parcelles montrent une teneur en CLD dans le sol homogène sur les 40 premiers centimètres du sol, sans évolution de la concentration au cours du temps. Ce profil de contamination n'est pas reproduit dans le cas des molécules actuellement utilisées qui se concentre majoritairement dans les premiers centimètres du sol, et pour lesquels on

observe une dégradation au cours du temps. Les teneurs en CLD dans les sols contaminés sont toutefois variables, il a été montré que son adsorption varie en fonction des types de sols.

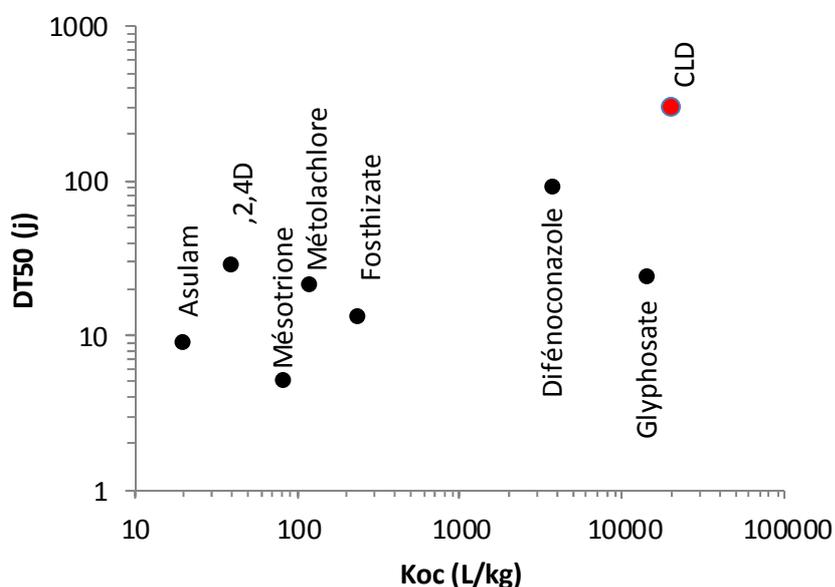


Figure 43 - Demi-vies (DT50, jour) en fonction du coefficient d'adsorption (K_{oc} , L/kg) à partir des références EFSA ou de la base de données PPDB

Après leur application le transfert des matières actives dans les eaux de ruissellement est faible, toujours inférieur à 1% de la quantité appliquée pour l'ensemble des matières actives sur les périodes de mesure, soit entre 50 et 75 jours. Dans les eaux de percolation, le transfert des pesticides serait très variable selon les molécules et pourrait atteindre jusqu'à 45% de la quantité apportée (Figure 44). A noter que dans cette situation une contamination des aquifères profonds est néanmoins peu probable, comme indiqué précédemment dans les travaux de Charlier et al. (2009), du fait d'une capacité de dégradation plus importante pour les molécules actuelles par rapport à la CLD et de possible discontinuité hydrologique avec les aquifères profonds ralentissant le transfert vers les aquifères profonds.

Dans les eaux de ruissellement, les transferts s'effectuent principalement par la voie dissoute hormis pour la CLD sur les andosols NS et GV1 et pour le difénoconazole dans le cas de l'andosol NS (Figure 45). A noter que sur ce site, on observe également un transfert particulaire important dans le cas de l'asulam bien que cette molécule présente un K_{oc} relativement faible. On constate par ailleurs une grande variabilité de la contribution du particulaire en fonction du type de sol, mais aussi au sein d'un même type de sol dans le cas des expérimentations sur andosols. Ce résultat parcellaire est néanmoins à pondérer en termes de risque de transfert effectif car les processus de re-déposition particulaire au sein de la parcelle n'ont pas été étudiés avec le dispositif en place. Toutefois les résultats confirment le statut de majorant du transport particulaire pour la CLD, et ceci quel que soit le site d'étude. Par conséquent pour les périodes de crues il est peu probable que les matières actives actuellement utilisées présentent une contribution de la voie particulaire élevée. Après une application, les matières actives seraient transférées essentiellement par voie dissoute dans le ruissellement et atteindraient les eaux de rivière lors d'évènement de crue intense avec des pluies localisées sur le bassin agricole.

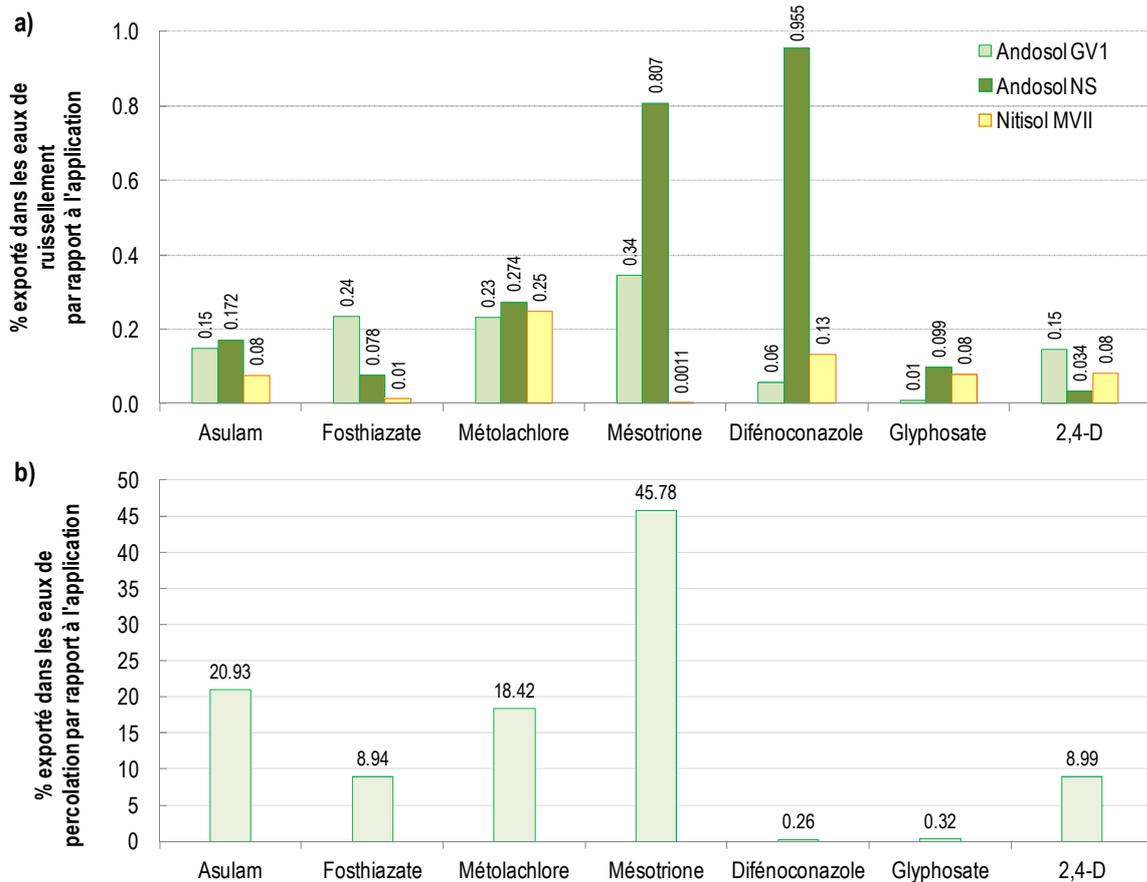


Figure 44 – Export de matière active (%) dans les eaux a) de ruissellement et b) de percolation selon le type de sol et pour différentes matières actives

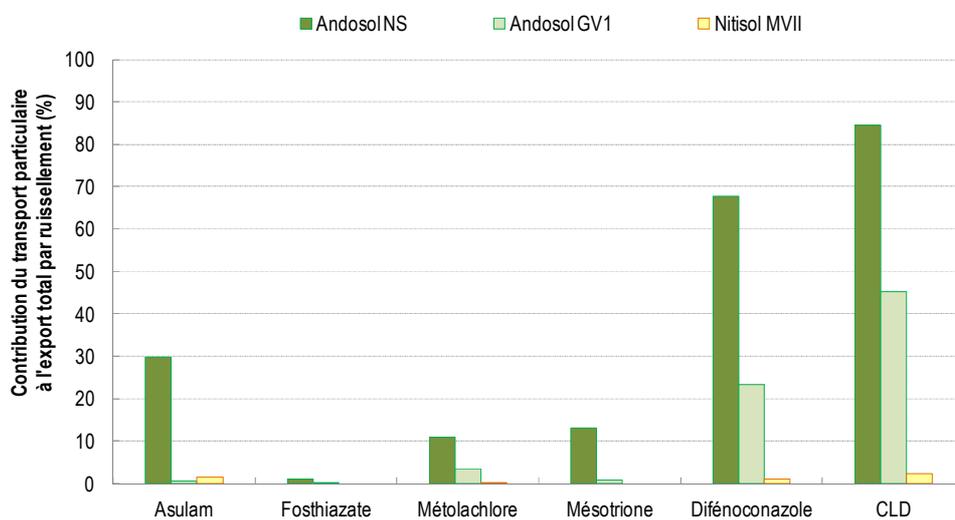


Figure 45 – Contribution du transport particulaire dans les eaux de ruissellement sur parcelles pour différentes matières actives

6.3. Conséquences par rapport au suivi de l'ODE

Le dispositif de suivi de la qualité des cours d'eau mis en place par l'ODE971, qui s'appuie sur des directives nationales peut être analysé au vu des connaissances complémentaires acquises dans le cadre de ce projet dans les conditions agropédologiques spécifiques aux Antilles.

6.3.1. Rappel de la méthode de prélèvement de l'ODE

Les prélèvements ODE en rivière sont réalisés manuellement par une entreprise prestataire de l'ODE971 (HYGITECH), qui peut contrôler la prestation de façon ponctuelle en accompagnant les agents sur le terrain (respect des conditions de prélèvement et du conditionnement des échantillons définis dans la DCE).

Un seul prélèvement représente environ 10 litres d'eau brute et une dizaine de « bouteilles » de différentes natures et formats en fonction du nombre de paramètres/substances actives à suivre.

Concernant la CLD, les prélèvements sont généralement réalisés tous les deux mois au niveau de chaque « station » suivie, soient 6 prélèvements/an/station. Les prélèvements sont donc réalisés à des dates programmées à l'avance sans prendre en considération les variables hydrologiques (débit, turbidité) au moment du prélèvement. Ils sont généralement réalisés à des faibles débits permettant l'accès à la rivière : débit de base, tarissement, fin de décrue, crues de faibles ampieurs avec débit de pointes < 5 m³/s.

Le suivi de la contamination en CLD est effectué sur 20 stations de rivière (DCE-Qualité RCS contrôle de Surveillance) en Basse-Terre. La Grande Rivière de Capesterre, voisine de la rivière Pérou, possède une station dans ce réseau, la rivière Pérou est suivie par rapport à d'autres paramètres (RCO contrôle opérationnel).

6.3.2. Interprétations des suivis ODE et ajustements possibles au regard des nouvelles références

L'ODE définit la qualité des eaux de surface en comparant la concentration de chaque substance active de la rivière à leur norme environnementale DCE qui représente soit une concentration moyenne, soit une concentration maximale admissible sur l'année ou les deux dernières années selon les substances actives pesticides. L'état global de la masse d'eau est ensuite défini en prenant en compte des groupes de paramètres selon des arbres de décision : si un groupe est en « mauvais état » alors la masse d'eau est déclassée.

Sur la base des nouvelles références de contamination acquises sur la rivière Pérou dans le cadre de ce projet nous soulignons les principaux éléments contextuels qui peuvent servir à une amélioration des interprétations des données de suivi ODE :

- **Signification des prélèvements effectués vis-à-vis de la dynamique de contamination des eaux de rivière**
 - La contamination en CLD de la rivière par les eaux souterraines est dominante par rapport à celle par les eaux de surface et représente l'essentiel de la contamination annuelle par la voie dissoute. Cette forte contamination est caractéristique des situations d'étiage (débits faibles) qui représentent donc des périodes critiques pour le biote au niveau quantitatif et qualitatif.
 - Les résultats obtenus mettent en avant la forte dépendance entre dynamique hydrologique et concentration en CLD. Le schéma d'interprétation proposé (Figure 42) explicite les évolutions de concentration en CLD en fonction du débit, et les processus associés. Ainsi il en résulte qu'une connaissance à minima du débit au moment du prélèvement s'avère importante pour resituer l'échantillonnage effectué en termes de situation d'écoulement. Notons que cette interprétation ne s'applique pas aux molécules actuellement utilisées, principalement à cause du lien avec les eaux souterraines qui dans le cas de la CLD constitue un stock important tandis que pour les molécules actuelles cela représente une source de dilution.

- A priori, les prélèvements de l'ODE sont majoritairement réalisés pour des faibles débits et teneurs en MES qui correspondent à une situation d'écoulement de base. Pour ces situations hydrologiques, nous avons montré une forte concentration en CLD, essentiellement sous forme dissoute. Les prélèvements ODE fournissent donc une caractérisation de l'état qualitatif de la rivière en ciblant la fenêtre d'écoulement la plus contaminée en CLD.
 - Pour des échantillons de suivi ODE prélevés dans une situation plus éloignée du débit de base, ou bien encore difficile à situer hydrologiquement, une détermination de la teneur en MES en (mg/l) pourrait servir d'indicateur de situation hydrologique. En effet nous avons pu montrer une forte dépendance entre contexte hydrologique, origine des écoulements, teneur en MES et concentration en CLD.
 - En conséquence des points précédents, le calcul d'une concentration moyenne annuelle en CLD basé uniquement sur des prélèvements en situation de débit de base peut engendrer une surestimation de la concentration moyenne annuelle en CLD.
- **Signification des prélèvements vis à vis de l'exposition du biote**
 - Les prélèvements ODE ne permettent pas de caractériser les périodes d'exposition du biote aux pics de CLD particulaire qui peuvent être ponctuellement aussi élevés que les concentrations maximales en CLD dissout de l'écoulement de base.
 - Pour une situation de rivière avec peu de sédimentation, il serait souhaitable de caractériser l'exposition du biote à la CLD en situation de crue en ciblant l'analyse sur la phase particulaire (CLD particulaire).
- **Implication des résultats en termes de transport particulaire et de contamination des estuaires**

Le transport particulaire de CLD est négligeable à l'échelle annuelle (~2 % du transport total de CLD) mais équivalent au transport par voie dissoute dans l'écoulement en crue. Pour autant, l'impact du transport de CLD particulaire ne peut être considéré comme négligeable en termes de dépôts sur les sédiments marins aux estuaires par exemple. Il représente une quantité de l'ordre d'un kilogramme de CLD par an pour la rivière Pérou.
- **Impact potentiel du changement climatique sur la contamination en CLD de l'eau de rivière**

Les dernières prédictions du changement climatique montreraient une augmentation des périodes sèches avec une diminution de la saison cyclonique mais une intensification des précipitations et événements extrêmes (cyclones de catégories 4 et 5) (Projet C3AF - Météo France). Ces prédictions pourraient entraîner par effet piston une exfiltration renforcée des eaux de nappes les plus contaminées et une augmentation du ruissellement de surface sur les parcelles. Cela provoquerait une augmentation globale de la contamination en rivière. Les mesures de réduction de l'érosion hydrique comme la mise en place de plantes de couverture dans les inter-rangs en bananeraie, pourraient limiter les flux de ruissellement et de transport particulaire mais ne permettraient pas nécessairement de compenser l'augmentation du transfert de CLD lié au surcroît probable de percolation.

7. Références

- 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. *Environmental Pollution*, 157(5), 1697–1705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.015>
- Consortium OPA-C, 2015. Mise en place de bassins versants instrumentés en Guadeloupe et en Martinique. Rapport Final Allenvi, Février 2015, BRGM-CIRAD-INRA-IRD, 111 pages.
- Colmet-Daage, F., & Lagache, F. 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés des roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahier ORSTOM Antilles, série Pédologie, III (2)*, 91-122.
- Charlier, J.B., Cattan, P., Voltz, M., Moussa R. 2009. Transport of a nematicide in surface and groundwaters in a tropical volcanic catchment. *Journal of Environmental Quality*, 38:1031-1041
- Crabit, A., Cattan, P., Colin, F., & Voltz, M. 2016. Soil and river contamination patterns of chlordecone in a tropical volcanic catchment in the French West Indies (Guadeloupe). *Environmental Pollution*, 212, 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.055>
- J. Miquel. 1984. Guide pratique d'estimation des probabilités de crues, Collection de la direction des Etudes et Recherches d'EDF, n°53, Eyrolles Ed., Paris.
- Rochette, R., Andrieux, P., Bonnal, V. et Cattan, P., 2017. Contamination des bassins versants de la Guadeloupe continentale par la chlordécone. Actualisation des connaissances et cartographie des zones à risque de contamination. Rapport final ChlEauTerre, INRA-Cirad, 82 p.
- Saison, C., Cattan, P., Louchart, X., Voltz, M. 2008. Cadusafos fate on banana cultivated Andosols in humid tropical conditions as influenced by heterogeneous application pattern and within-canopy rainfall. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24), 11947-11955. 10.1021/jf802435c.
- Voltz, M., & Louchart, X. 2002. Les facteurs-clés de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface. *Ingénieries, (Numéro Spécial)*, 3–12.
- Projet C3AF *Changement Climatique et Conséquences sur les Antilles Françaises (2014-2020)*, Météo France : Chauvin F. et al., [en préparation]. Projection of tropical cyclone activity (Antilles and North Atlantic)
- Cantet, Dutrieux et al. [en préparation]. Rainfall and temperature trends and projections over Guadeloupe.

LIVRABLES DE L'ACTION

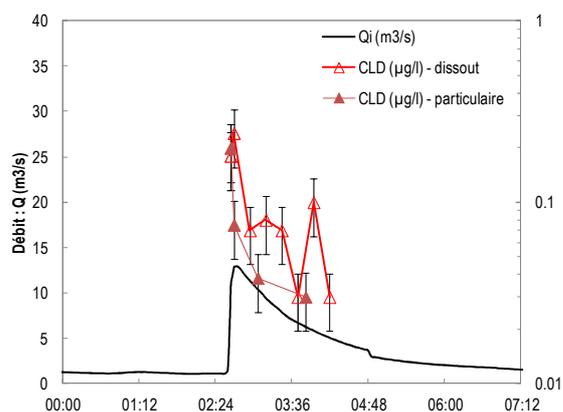
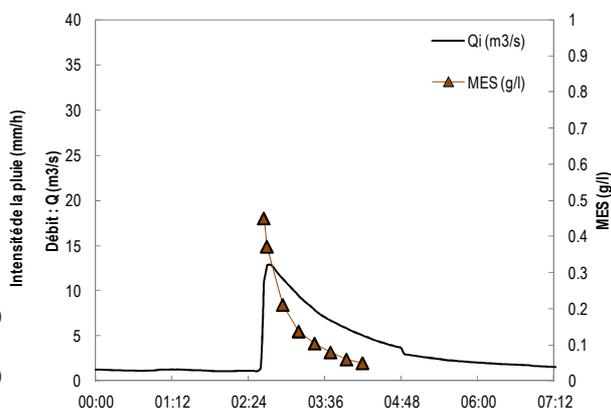
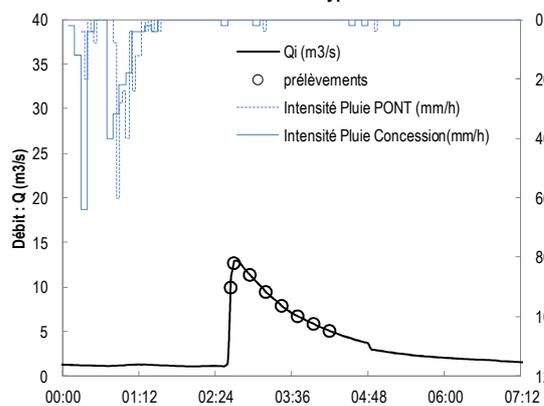
- Samouelian A., Négro S., Andrieux P., Voltz M. INRA_2017_012_LIVRABLE1 : Synthèse bibliographique sur l'identification des contaminations entre les phases dissoutes et particulaires reliées au transfert dans les rivières et aux pratiques agronomiques rencontrées dans les DOM. 20 juin 2017. INRA, 22 pages.
- Samouelian A., Négro S., Ponchant L., Andrieux P., Voltz M. INRA_2017_012_01_LIVRABLE2 : Protocole de prélèvement, conditionnement et séparation d'échantillon d'eau brute en vue d'analyse pesticide sur les matrices eau et particule. 28 février 2017. INRA, 17 pages.

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation des dynamiques de MES et de CLD dissoute et particulaire au sein des crues échantillonnées

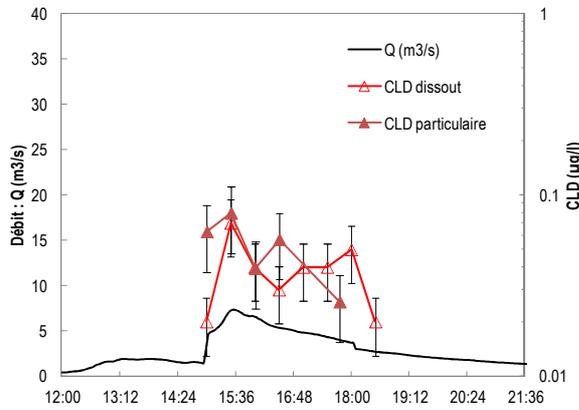
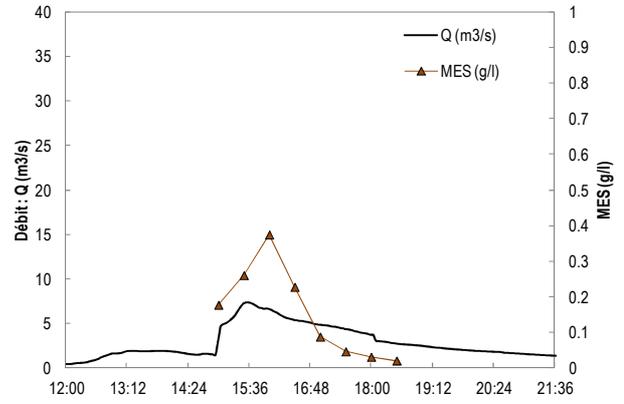
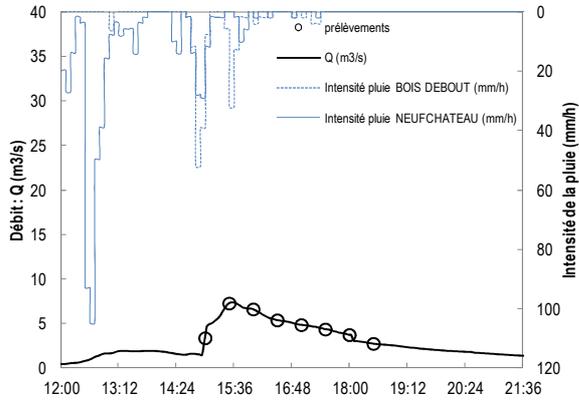
- Evènement du 29/09/2016 :

PONT rivière Pérou : Crue du 29/09/2016 - type A



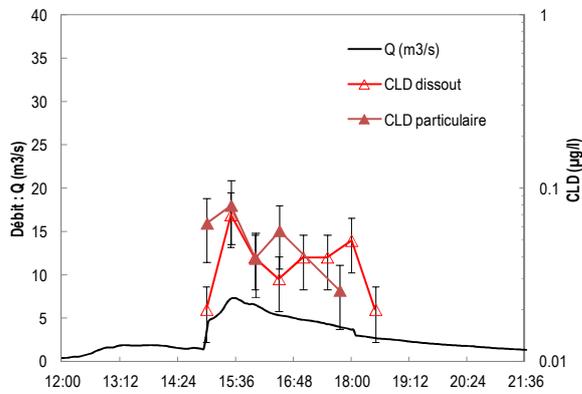
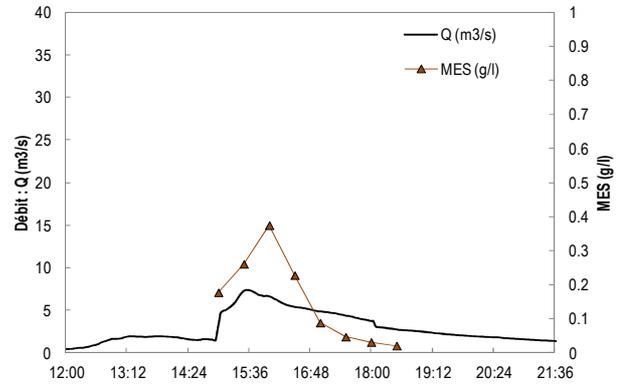
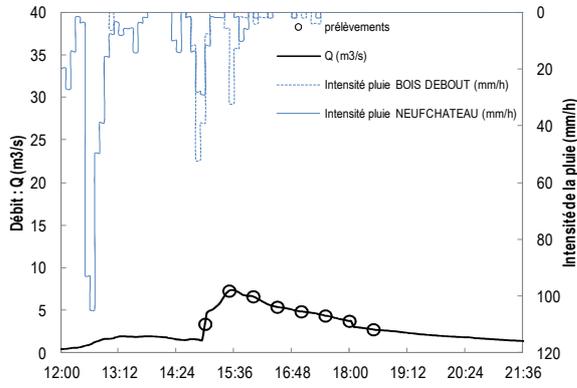
- Evènement du 11/10/2016 :

PONT rivière Pérou : Crue du 11/10/2016 – type A



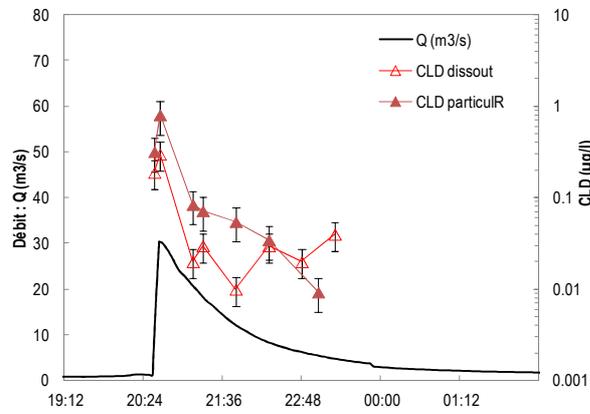
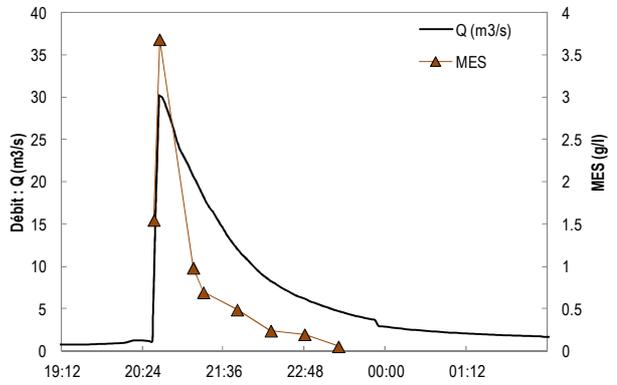
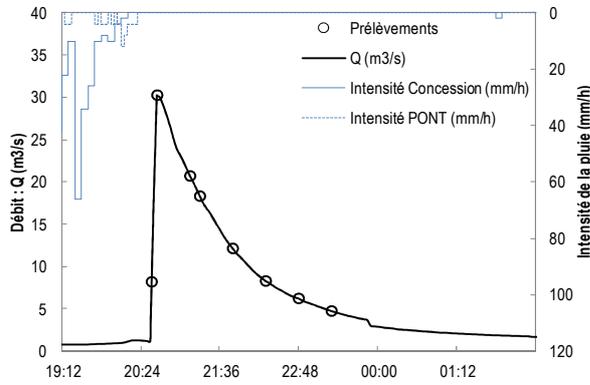
- Evènement du 22/10/2016 :

PONT rivière Pérou : Crue du 11/10/2016 – type A



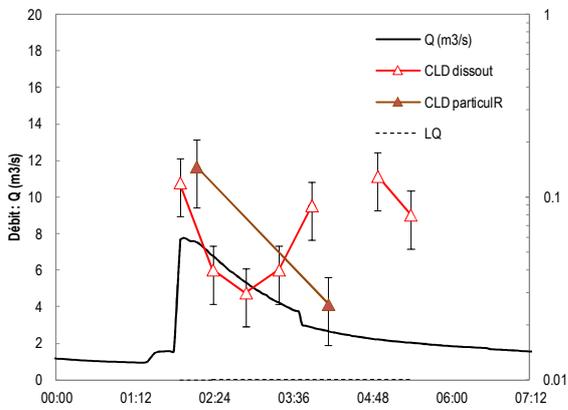
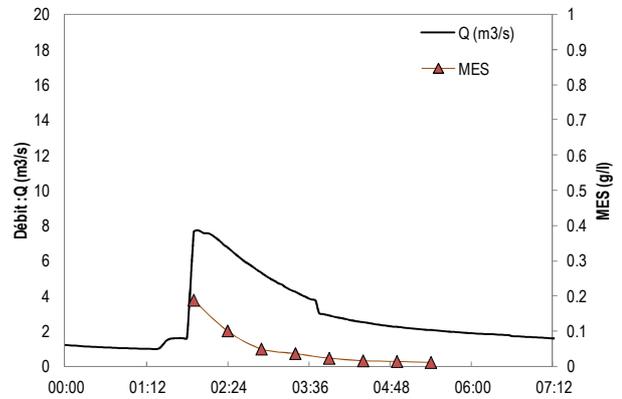
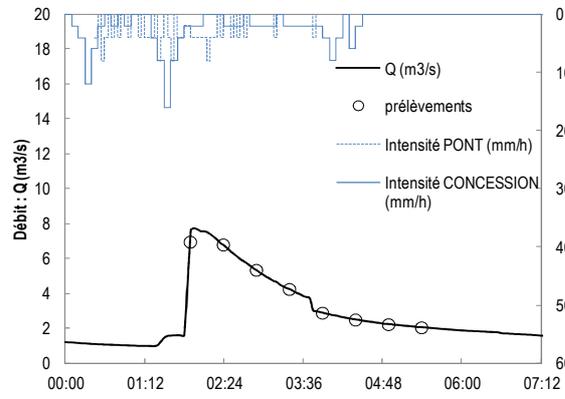
- Evènement du 06/11/2016 :

PONT rivière Pérou : crue du 06/11/2016 – type C



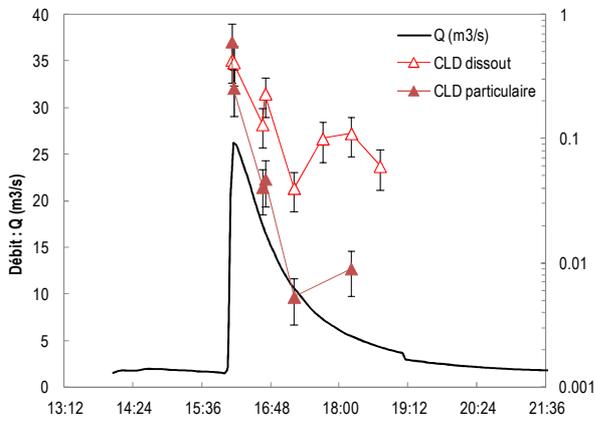
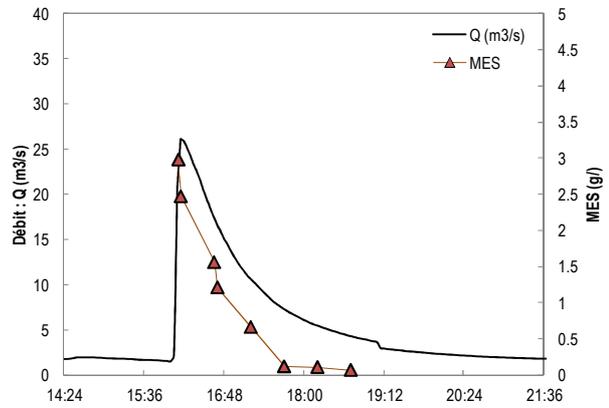
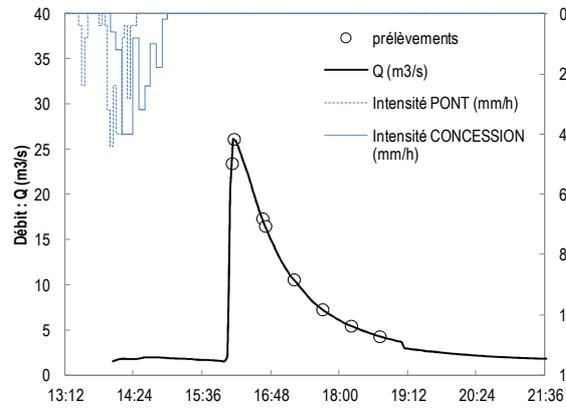
- Evènement du 10/11/2016 :

PONT rivière Pérou : crue du 10/11/2016 - type A



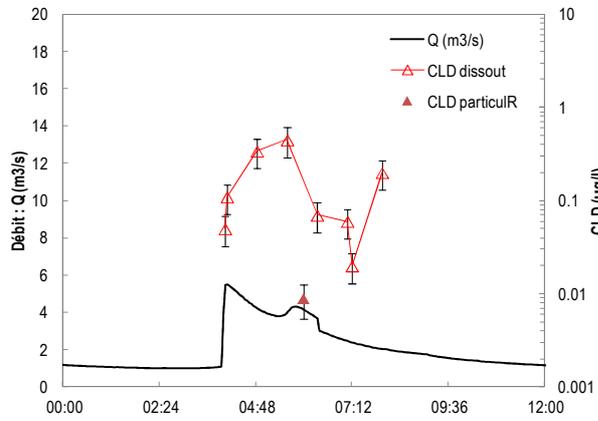
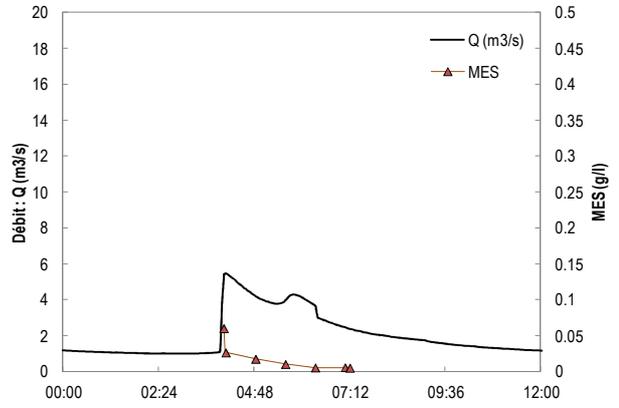
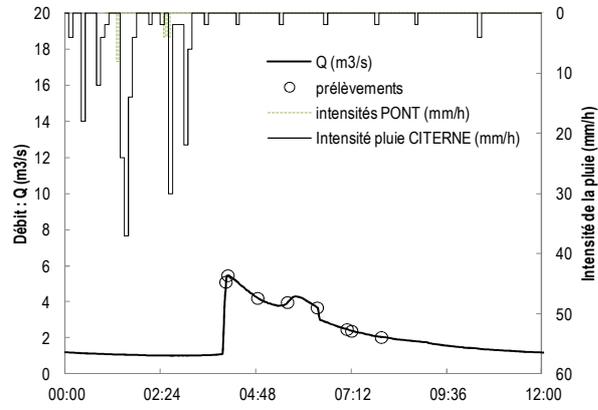
- Evènement du 17/11/2016 :

PONT rivière Pérou : Crue du 17/11/2016 – type B



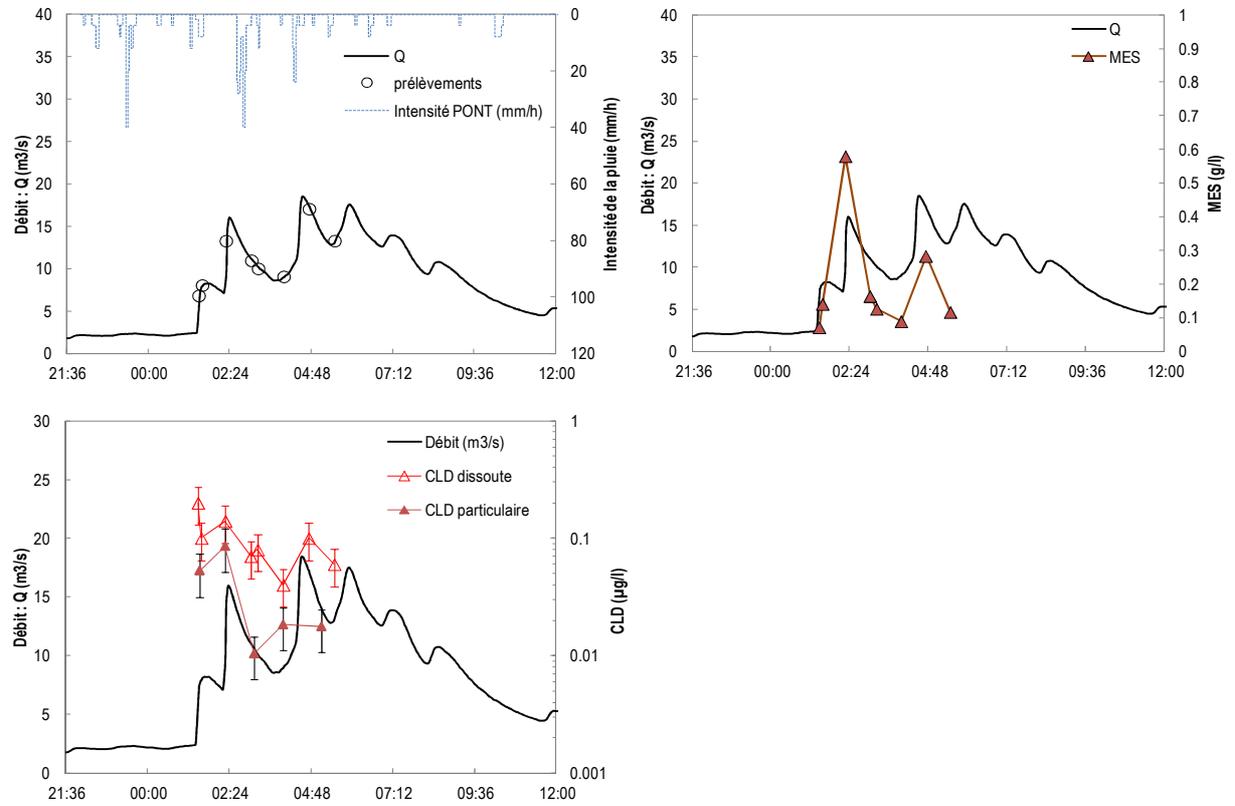
- Evènement du 01/03/2017 :

PONT rivière Pérou : Crue du 01/03/2017 – type A

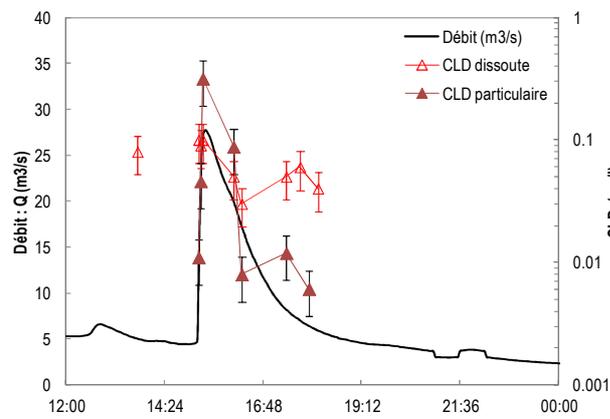
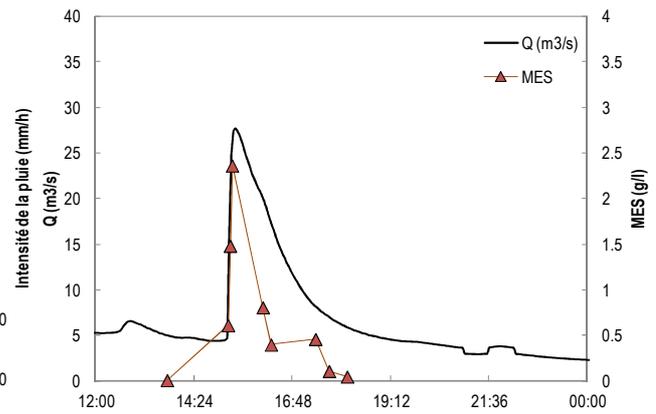
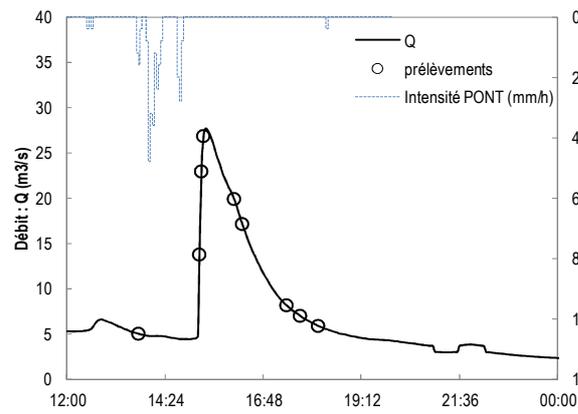


- Evènements du 09/03/2017 :

PONT rivière Pérou : Crue du 09/03/2017 partie 1 – type B

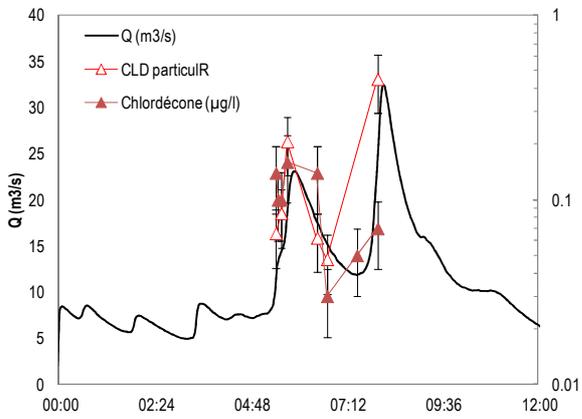
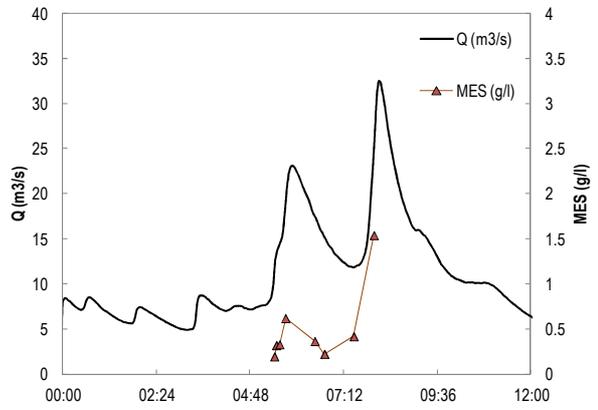
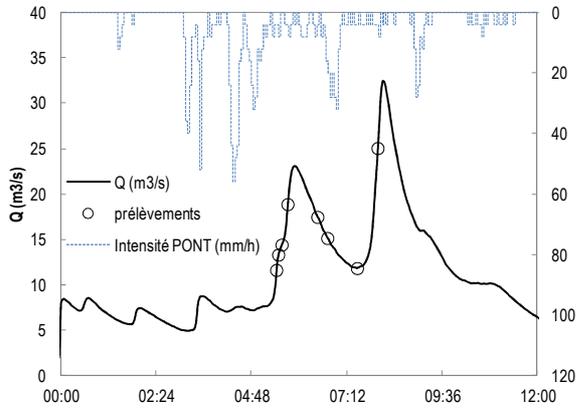


PONT rivière Pérou : Crue du 09/03/2017 partie 2 – type C



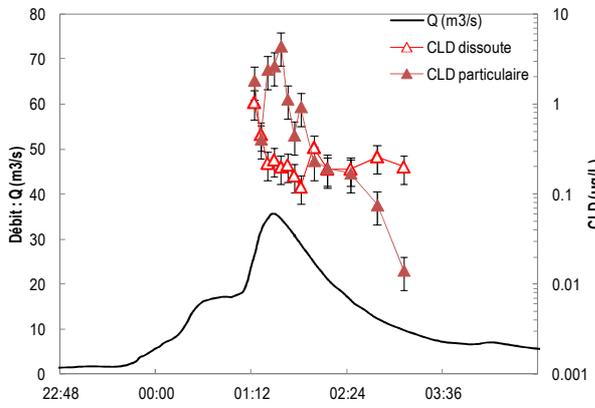
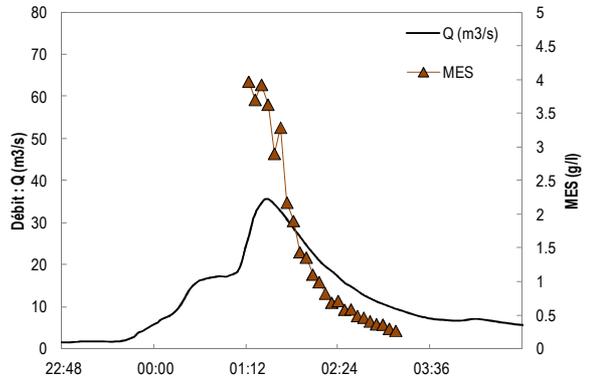
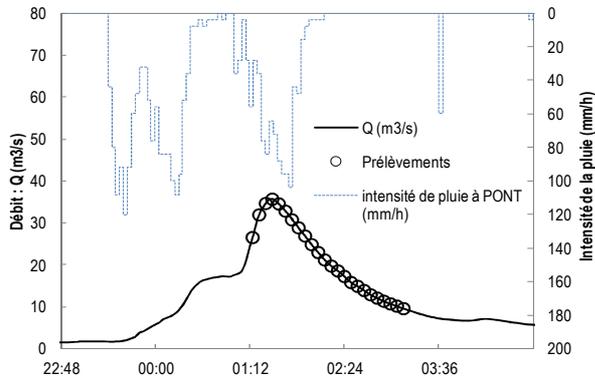
- Evènement du 28/04/2017 :

PONT rivière Pérou : Crue du 28/04/2017 - type C



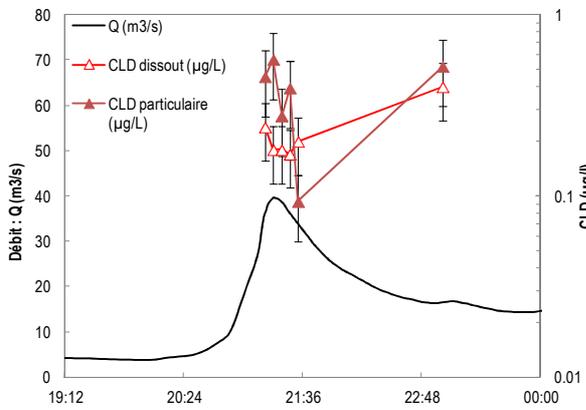
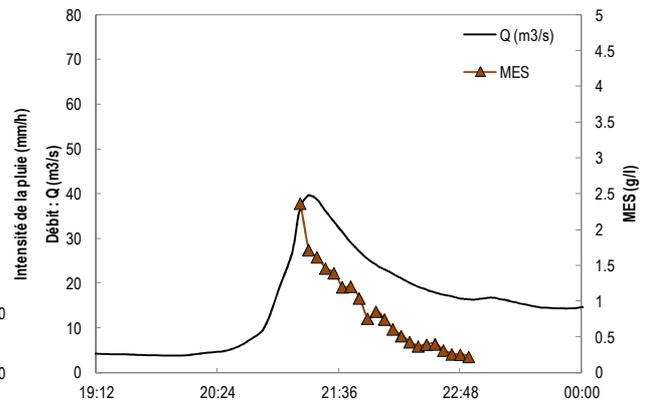
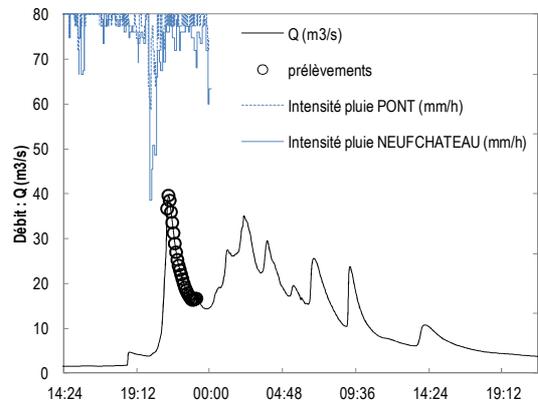
- Evènement du 14/09/2017 :

PONT rivière Pérou : Crue du 14/09/2017 - type D



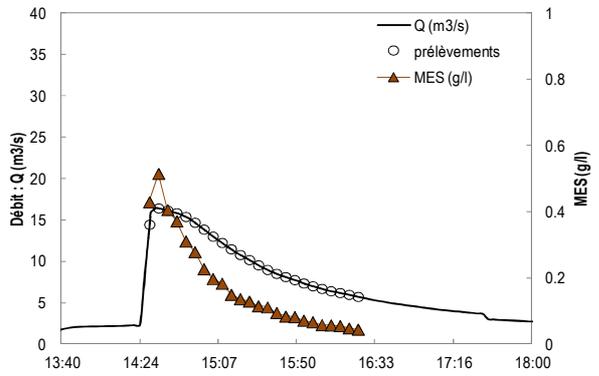
- Evènement du 18/09/2017 : cyclone MARIA

Cyclone MARIA - PONT rivière Pérou : Crue du 18/09/2017 - type D

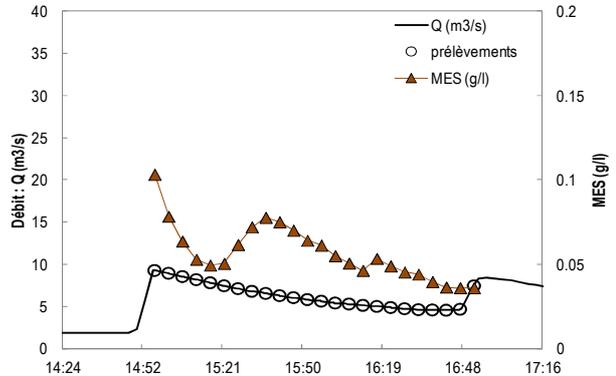


- Evènements du 2, 16 et 18/08/2017 : échantillonnage pour mesurer la charge solide uniquement

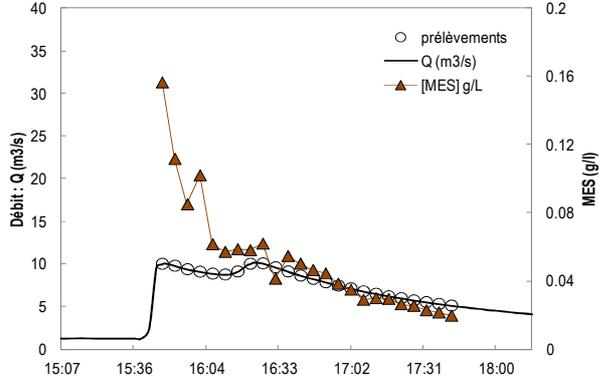
PONT rivière Pérou : Crue du 02/08/2017 - type B



PONT rivière Pérou : Crue du 16/08/2017 - type A



PONT rivière Pérou : Crue du 18/08/2017 - type A



Annexe 2 : Résultats analytiques

- Echantillons avec concentrations en MES et CLD dissoute :

Date et heure	Référence échantillon	Situation hydrologique	Q (m3/s)	[MES] (g/L)	CLD µg/l	dissoute
29/09/2016 02:38	PP_20160929_C1	Montée	9.93	0.449	0.18	
29/09/2016 02:41	PP_20160929_C2	Pic	12.68	0.372	0.24	
29/09/2016 02:56	PP_20160929_C3	Décruée	11.36	0.211	0.07	
29/09/2016 03:11	PP_20160929_C4	Décruée	9.44	0.137	0.08	
29/09/2016 03:26	PP_20160929_C5	Décruée	7.88	0.103	0.07	
29/09/2016 03:41	PP_20160929_C6	Décruée	6.71	0.079	0.03	
29/09/2016 03:56	PP_20160929_C7	Décruée	5.86	0.059	0.10	
29/09/2016 04:11	PP_20160929_C8	Décruée	5.07	0.049	0.03	
11/10/2016 15:00	PP_20161011_C1	Montée	3.33	0.177	0.02	
11/10/2016 15:30	PP_20161011_C2	Pic	7.23	0.261	0.07	
11/10/2016 16:00	PP_20161011_C3	Décruée	6.57	0.375	0.04	
11/10/2016 16:30	PP_20161011_C4	Décruée	5.34	0.228	0.03	
11/10/2016 17:00	PP_20161011_C5	Décruée	4.81	0.088	0.04	
11/10/2016 17:30	PP_20161011_C6	Décruée	4.31	0.047	0.04	
11/10/2016 18:00	PP_20161011_C7	Décruée	3.69	0.031	0.05	
11/10/2016 18:30	PP_20161011_C8	Décruée	2.70	0.021	0.02	
22/10/2016 13:16	PP_20161022_C1	Montée	2.13	0.271	0.10	
22/10/2016 13:19	PP_20161022_C2	Montée	2.36	0.540	0.09	
22/10/2016 13:49	PP_20161022_C3	Montée	5.22	1.297	0.11	
22/10/2016 14:30	PP_20161022_C4	Pic	12.56	0.659	0.22	
22/10/2016 15:00	PP_20161022_C5	Décruée	9.25	1.030	0.12	
22/10/2016 15:30	PP_20161022_C6	Décruée	7.52	0.259	0.05	
22/10/2016 16:00	PP_20161022_C7	Décruée	6.52	0.155	0.08	
22/10/2016 16:30	PP_20161022_C8	Décruée	4.64	0.155	0.12	
06/11/2016 20:34	PP_20161106_C1	Montée	8.18	1.548	0.19	
06/11/2016 20:39	PP_20161106_C2	Pic	30.25	3.684	0.3	
06/11/2016 21:09	PP_20161106_C3	Décruée	20.70	0.984	0.02	
06/11/2016 21:18	PP_20161106_C4	Décruée	18.31	0.694	0.03	
06/11/2016 21:48	PP_20161106_C5	Décruée	12.12	0.490	0.01	
06/11/2016 22:18	PP_20161106_C6	Décruée	8.28	0.241	0.03	
06/11/2016 22:48	PP_20161106_C7	Décruée	6.21	0.197	0.02	
06/11/2016 23:18	PP_20161106_C8	Décruée	4.73	0.054	0.04	
10/11/2016 01:53	PP_20161110_C1	Montée	6.96	0.189	0.12	
10/11/2016 02:23	PP_20161110_C2	Décruée	6.80	0.102	0.04	
10/11/2016 02:53	PP_20161110_C3	Décruée	5.35	0.050	0.03	
10/11/2016 03:23	PP_20161110_C4	Décruée	4.25	0.037	0.04	
10/11/2016 03:53	PP_20161110_C5	Décruée	2.89	0.024	0.09	
10/11/2016 04:23	PP_20161110_C6	Décruée	2.50	0.017	0.01	
10/11/2016 04:53	PP_20161110_C7	Décruée	2.23	0.015	0.13	
10/11/2016 05:23	PP_20161110_C8	Décruée	2.05	0.012	0.08	
17/11/2016 16:07	PP_20161117_C1	Montée	23.44	2.981	0.43	
17/11/2016 16:09	PP_20161117_C2	Pic	26.13	2.472	0.41	
17/11/2016 16:39	PP_20161117_C3	Décruée	17.34	1.562	0.13	
17/11/2016 16:42	PP_20161117_C4	Décruée	16.51	1.214	0.23	
17/11/2016 17:12	PP_20161117_C5	Décruée	10.59	0.666	0.04	
17/11/2016 17:42	PP_20161117_C6	Décruée	7.28	0.121	0.1	
17/11/2016 18:12	PP_20161117_C7	Décruée	5.47	0.111	0.11	
17/11/2016 18:42	PP_20161117_C8	Décruée	4.30	0.072	0.06	

01/03/2017 04:02	PP_20170301_C1	Montée	5.10	0.060	0.05
01/03/2017 04:05	PP_20170301_C2	Pic	5.47	0.026	0.11
01/03/2017 04:50	PP_20170301_C3	Décru	4.21	0.017	0.34
01/03/2017 05:35	PP_20170301_C4	Décru	3.97	0.010	0.45
01/03/2017 06:20	PP_20170301_C5	Décru	3.68	0.006	0.07
01/03/2017 07:05	PP_20170301_C6	Décru	2.48	0.006	0.06
01/03/2017 07:12	PP_20170301_C7	Décru	2.39	0.005	0.02
01/03/2017 07:57	PP_20170301_C8	Décru	2.04	0.065	0.2
09/03/2017 01:30	PP_20170309_C1	Montée	6.83	0.071	0.2
09/03/2017 01:36	PP_20170309_C2	Montée	8.06	0.141	0.1
09/03/2017 02:18	PP_20170309_C3	Montée	13.28	0.579	0.14
09/03/2017 03:03	PP_20170309_C4	Montée	10.96	0.164	0.07
09/03/2017 03:15	PP_20170309_C5	Montée	10.01	0.126	0.08
09/03/2017 04:00	PP_20170309_C6	Montée	9.07	0.089	0.04
09/03/2017 04:45	PP_20170309_C7	Décru	17.05	0.283	0.1
09/03/2017 05:30	PP_20170309_C8	Décru	13.29	0.116	0.06
09/03/2017 15:14	PP_20170309_C10	Montée	13.75	0.610	0.10
09/03/2017 15:17	PP_20170309_C11	Montée	22.94	1.481	0.09
09/03/2017 15:20	PP_20170309_C12	Montée	26.84	2.363	0.10
09/03/2017 16:05	PP_20170309_C13	Décru	19.89	0.806	0.05
09/03/2017 16:17	PP_20170309_C14	Décru	17.13	0.398	0.03
09/03/2017 17:22	PP_20170309_C15	Décru	8.16	0.458	0.05
09/03/2017 17:42	PP_20170309_C16	Décru	6.99	0.108	0.06
09/03/2017 18:08	PP_20170309_C17	Décru	5.88	0.046	0.04
28/04/2017 05:25	PP_20170428_C1	Montée	11.64	0.195	0.14
28/04/2017 05:28	PP_20170428_C2	Montée	13.33	0.320	0.1
28/04/2017 05:33	PP_20170428_C3	Montée	14.42	0.329	0.1
28/04/2017 05:42	PP_20170428_C4	Montée	18.89	0.618	0.16
28/04/2017 06:27	PP_20170428_C5	Décru	17.48	0.364	0.14
28/04/2017 06:42	PP_20170428_C6	Décru	15.16	0.224	0.03
28/04/2017 07:27	PP_20170428_C7	Décru	11.84	0.418	0.05
28/04/2017 07:58	PP_20170428_C8	Montée	25.05	1.539	0.07
14/09/2017 01:14	PP_20170914_C1	Montée	26.50	3.973	1.04
14/09/2017 01:19	PP_20170914_C2	Montée	31.90	3.704	0.46
14/09/2017 01:24	PP_20170914_C3	Montée	34.62	3.928	0.22
14/09/2017 01:29	PP_20170914_C4	Pic	35.64	3.631	0.24
14/09/2017 01:34	PP_20170914_C5	Décru	34.51	2.902	0.2
14/09/2017 01:39	PP_20170914_C6	Décru	32.80	3.291	0.21
14/09/2017 01:44	PP_20170914_C7	Décru	30.72	2.176	0.16
14/09/2017 01:49	PP_20170914_C8	Décru	28.82	1.904	0.12
14/09/2017 01:54	PP_20170914_C9	Décru	26.86	1.438	
14/09/2017 01:59	PP_20170914_C10	Décru	24.81	1.360	0.33
14/09/2017 02:04	PP_20170914_C11	Décru	22.94	1.107	
14/09/2017 02:09	PP_20170914_C12	Décru	21.15	0.997	0.19
14/09/2017 02:14	PP_20170914_C13	Décru	19.70	0.825	
14/09/2017 02:19	PP_20170914_C14	Décru	18.54	0.689	
14/09/2017 02:24	PP_20170914_C15	Décru	17.22	0.716	
14/09/2017 02:29	PP_20170914_C16	Décru	15.79	0.585	
14/09/2017 02:34	PP_20170914_C17	Décru	14.88	0.590	
14/09/2017 02:39	PP_20170914_C18	Décru	13.89	0.493	
14/09/2017 02:44	PP_20170914_C19	Décru	12.85	0.468	
14/09/2017 02:49	PP_20170914_C20	Décru	12.06	0.413	
14/09/2017 02:54	PP_20170914_C21	Décru	11.33	0.371	
14/09/2017 02:59	PP_20170914_C22	Décru	10.71	0.364	
14/09/2017 03:04	PP_20170914_C23	Décru	10.15	0.303	
14/09/2017 03:09	PP_20170914_C24	Décru	9.56	0.272	
18/09/2017 21:13	PP_20170918_C1	Montée	36.65	2.367	0.24

18/09/2017 21:18	PP_20170918_C2	Pic	39.59	1.716	0.18
18/09/2017 21:23	PP_20170918_C3	Décruée	38.49	1.617	0.18
18/09/2017 21:28	PP_20170918_C4	Décruée	35.93	1.459	0.17
18/09/2017 21:33	PP_20170918_C5	Décruée	33.56	1.392	0.2
18/09/2017 21:38	PP_20170918_C6	Décruée	31.23	1.197	
18/09/2017 21:43	PP_20170918_C7	Décruée	28.90	1.205	
18/09/2017 21:48	PP_20170918_C8	Décruée	26.97	1.041	
18/09/2017 21:53	PP_20170918_C9	Décruée	25.28	0.758	
18/09/2017 21:58	PP_20170918_C10	Décruée	24.00	0.856	
18/09/2017 22:03	PP_20170918_C11	Décruée	22.97	0.746	
18/09/2017 22:08	PP_20170918_C12	Décruée	21.96	0.609	
18/09/2017 22:13	PP_20170918_C13	Décruée	20.97	0.512	
18/09/2017 22:18	PP_20170918_C14	Décruée	19.96	0.429	
18/09/2017 22:23	PP_20170918_C15	Décruée	19.10	0.371	
18/09/2017 22:28	PP_20170918_C16	Décruée	18.45	0.395	
18/09/2017 22:33	PP_20170918_C17	Décruée	17.82	0.401	
18/09/2017 22:38	PP_20170918_C18	Décruée	17.34	0.312	
18/09/2017 22:43	PP_20170918_C19	Décruée	16.96	0.259	
18/09/2017 22:48	PP_20170918_C20	Décruée	16.50	0.254	
18/09/2017 22:53	PP_20170918_C21	Décruée	16.32	0.225	
02/08/2017 14:29	PP_20170802_C1	Montée	14.45	0.429	
02/08/2017 14:34	PP_20170802_C2	Pic	16.42	0.515	
02/08/2017 14:39	PP_20170802_C3	Décruée	16.16	0.406	
02/08/2017 14:44	PP_20170802_C4	Décruée	15.84	0.371	
02/08/2017 14:49	PP_20170802_C5	Décruée	15.39	0.311	
02/08/2017 14:54	PP_20170802_C6	Décruée	14.69	0.278	
02/08/2017 14:59	PP_20170802_C7	Décruée	13.86	0.227	
02/08/2017 15:04	PP_20170802_C8	Décruée	13.01	0.197	
02/08/2017 15:09	PP_20170802_C9	Décruée	12.25	0.183	
02/08/2017 15:14	PP_20170802_C10	Décruée	11.48	0.149	
02/08/2017 15:19	PP_20170802_C11	Décruée	10.79	0.136	
02/08/2017 15:24	PP_20170802_C12	Décruée	10.18	0.129	
02/08/2017 15:29	PP_20170802_C13	Décruée	9.55	0.115	
02/08/2017 15:34	PP_20170802_C14	Décruée	8.99	0.111	
02/08/2017 15:39	PP_20170802_C15	Décruée	8.51	0.095	
02/08/2017 15:44	PP_20170802_C16	Décruée	8.13	0.084	
02/08/2017 15:49	PP_20170802_C17	Décruée	7.76	0.082	
02/08/2017 15:54	PP_20170802_C18	Décruée	7.35	0.071	
02/08/2017 15:59	PP_20170802_C19	Décruée	7.02	0.067	
02/08/2017 16:04	PP_20170802_C20	Décruée	6.70	0.058	
02/08/2017 16:09	PP_20170802_C21	Décruée	6.41	0.057	
02/08/2017 16:14	PP_20170802_C22	Décruée	6.19	0.055	
02/08/2017 16:19	PP_20170802_C23	Décruée	5.98	0.048	
02/08/2017 16:24	PP_20170802_C24	Décruée	5.73	0.044	
16/08/2017 14:57	PP_20170816_C1	Pic	9.26	0.103	
16/08/2017 15:02	PP_20170816_C2	Décruée	8.94	0.078	
16/08/2017 15:07	PP_20170816_C3	Décruée	8.54	0.064	
16/08/2017 15:12	PP_20170816_C4	Décruée	8.18	0.053	
16/08/2017 15:17	PP_20170816_C5	Décruée	7.81	0.050	
16/08/2017 15:22	PP_20170816_C6	Décruée	7.45	0.050	
16/08/2017 15:27	PP_20170816_C7	Décruée	7.11	0.062	
16/08/2017 15:32	PP_20170816_C8	Décruée	6.79	0.072	
16/08/2017 15:37	PP_20170816_C9	Décruée	6.55	0.078	
16/08/2017 15:42	PP_20170816_C10	Décruée	6.28	0.075	
16/08/2017 15:47	PP_20170816_C11	Décruée	6.05	0.070	
16/08/2017 15:52	PP_20170816_C12	Décruée	5.82	0.064	
16/08/2017 15:57	PP_20170816_C13	Décruée	5.63	0.061	

16/08/2017 16:02	PP_20170816_C14	Décru	5.41	0.055	
16/08/2017 16:07	PP_20170816_C15	Décru	5.29	0.051	
16/08/2017 16:12	PP_20170816_C16	Décru	5.13	0.046	
16/08/2017 16:17	PP_20170816_C17	Décru	5.01	0.053	
16/08/2017 16:22	PP_20170816_C18	Décru	4.87	0.049	
16/08/2017 16:27	PP_20170816_C19	Décru	4.73	0.045	
16/08/2017 16:32	PP_20170816_C20	Décru	4.62	0.044	
16/08/2017 16:37	PP_20170816_C21	Décru	4.59	0.040	
16/08/2017 16:42	PP_20170816_C22	Décru	4.56	0.036	
16/08/2017 16:47	PP_20170816_C23	Montée	4.66	0.036	
16/08/2017 16:52	PP_20170816_C24	Montée	7.44	0.036	
18/08/2017 15:47	PP_20170818_C1	Pic	10.01	0.156	
18/08/2017 15:52	PP_20170818_C2	Décru	9.79	0.112	
18/08/2017 15:57	PP_20170818_C3	Décru	9.38	0.085	
18/08/2017 16:02	PP_20170818_C4	Décru	9.10	0.102	
18/08/2017 16:07	PP_20170818_C5	Décru	8.87	0.062	
18/08/2017 16:12	PP_20170818_C6	Décru	8.76	0.057	
18/08/2017 16:17	PP_20170818_C7	Décru	9.12	0.059	
18/08/2017 16:22	PP_20170818_C8	Décru	10.03	0.058	
18/08/2017 16:27	PP_20170818_C9	Décru	10.07	0.062	
18/08/2017 16:32	PP_20170818_C10	Décru	9.61	0.041	
18/08/2017 16:37	PP_20170818_C11	Décru	9.12	0.055	
18/08/2017 16:42	PP_20170818_C12	Décru	8.64	0.050	
18/08/2017 16:47	PP_20170818_C13	Décru	8.25	0.046	
18/08/2017 16:52	PP_20170818_C14	Décru	7.86	0.044	
18/08/2017 16:57	PP_20170818_C15	Décru	7.46	0.038	
18/08/2017 17:02	PP_20170818_C16	Décru	7.14	0.035	
18/08/2017 17:07	PP_20170818_C17	Décru	6.79	0.029	
18/08/2017 17:12	PP_20170818_C18	Décru	6.51	0.030	
18/08/2017 17:17	PP_20170818_C19	Décru	6.22	0.030	
18/08/2017 17:22	PP_20170818_C20	Décru	5.99	0.026	
18/08/2017 17:27	PP_20170818_C21	Décru	5.73	0.025	
18/08/2017 17:32	PP_20170818_C22	Décru	5.52	0.023	
18/08/2017 17:37	PP_20170818_C23	Décru	5.31	0.022	
18/08/2017 17:42	PP_20170818_C24	Décru	5.11	0.020	
26/03/2018 12:45	PP_20180326_HC15	Décru de petite crue (2.24 m3/s)	1.67	0.00265	0.67
26/06/2017 10:00	PP73-20170626P	Décru type A (12.95 m3/s)	3.90	0.01050	0.19
07/08/2017 11:45	PP79-20170807P	Décru type A (9.15 m3/s)	2.25	0.01000	0.04
09/03/2017 13:45	PP_20170309_C9	Décru type B (18.42 m/s)	5.01	0.00755	0.08
24/08/2016 11:20	PP_20160824_BE2	Fin decru de petite crue (2.23 m3/s)	1.44	0.00419	0.12
19/06/2017 08:26	PP72-20170619P	Fin decru type B (23.76 m3/S)	1.88		0.26
09/05/2017 14:00	PP66-20170509P	Fin decru type C (27.78 m3/s)	2.29		0.15
18/01/2018 10:15	PP_20180118_HC13	Montée de petite crue (3.7 m3/s)	2.53	0.00338	0.85
20/07/2017 11:10	PP_20170720_HC9	Pic de petite crue (2.24 m3/s)	2.53	0.02514	0.07
01/03/2018 12:00	PP_20180301_HC14	Q base	0.77	0.00055	1.12
22/05/2017 08:30	PP68-20170522P	Q base	0.87		4.18
06/06/2017 09:00	PP70-20170606P	Q base	0.83		2.14
12/06/2017 11:00	PP71-20170612P	Q base	0.80	0.00100	0.24
10/07/2017 10:00	PP75-20170710P	Q base	0.94	0.00050	1.05
09/10/2017 08:35	PP88-20171009P	Q base	1.13		2.28
17/08/2016 11:30	PP_20160817_BE1	Q base	0.21	0.00027	1.86
26/09/2016 11:15	PP_20160926_BE3	Q base	0.31		0.27

23/08/2017 14:15	PP_20170823_HC11	Q base	1.06	0.00038	0.26
05/10/2017 10:37	PP_20171005_HC12	Q base	1.29	0.00111	1.88
05/05/2017 12:40	PP_20170505_HC7	Tarissement après crue type A (10.72 m3/s)	1.50	0.00049	0.24
10/11/2016 12:23	PP_20161110_BE4	Tarissement après crue type A (7,33 m3/s)	0.80	0.00370	1.19
20/04/2017 15:00	PP_20170420_BE6	Tarissement après crue type B (19.2 m3/s)	0.97	0.00160	1.04
10/03/2017 11:30	PP_20170310_BE5	Tarissement après crue type B (27.73 m3/s)	1.42	0.00138	0.13
27/06/2017 15:30	PP_20170627_HC8	Tarissement après crue type A (12.95 m3/s)	1.12	0.00279	0.07
03/08/2017 10:53	PP_20170803_HC10	Tarissement après crue type B (16.47 m3/s)	1.20	0.00032	0.2
03/07/2017 08:45	PP74-20170703P	Tarissement après crue type A (11.57 m3/s)	1.66		1.43

- Echantillons de CLD particulaire ([MES] (g/l) composite) :

Date et heure	Référence échantillon	Statut hydrologique	Q (m3/s)	[MES] (g/L)	CLD particulaire µg/kg	CLD particulaire µg/l
29/09/2016 02:38	PP_20160929_MESC1	Montée	9.93	0.449	443	0.199
29/09/2016 02:41	PP_20160929_MESC2	Pic	12.68	0.372	202	0.075
29/09/2016 03:04	PP_20160929_MESC3-4	Décru	10.38	0.174	220	0.038
29/09/2016 03:49	PP_20160929_MESC5-8	Décru	6.34	0.073	415	0.030
11/10/2016 15:00	PP_20161011_MESC1	Montée	3.33	0.177	354	0.063
11/10/2016 15:30	PP_20161011_MESC2	Pic	7.23	0.261	305	0.080
11/10/2016 16:00	PP_20161011_MESC3	Décru	6.57	0.375	105	0.039
11/10/2016 16:30	PP_20161011_MESC4	Décru	5.34	0.228	250	0.057
11/10/2016 17:45	PP_20161011_MESC5-8	Décru	3.88	0.047	551	0.026
22/10/2016 13:16	PP_20161022_MESC1	Montée	2.13	0.271	253	0.068
22/10/2016 13:19	PP_20161022_MESC2	Montée	2.36	0.540	14	0.008
22/10/2016 13:49	PP_20161022_MESC3	Montée	5.22	1.297	1339	1.736
22/10/2016 14:30	PP_20161022_MESC4	Pic	12.56	0.659	372	0.245
22/10/2016 15:00	PP_20161022_MESC5	Décru	9.25	1.030	155	0.160
22/10/2016 15:30	PP_20161022_MESC6	Décru	7.52	0.259	207	0.054
22/10/2016 16:15	PP_20161022_MESC7-8	Décru	5.52	0.155	167	0.026
06/11/2016 20:34	PP_20161106_MESC1	Montée	8.18	1.548	207	0.321
06/11/2016 20:39	PP_20161106_MESC2	Pic	30.25	3.684	220	0.811
06/11/2016 21:09	PP_20161106_MESC3	Décru	20.70	0.984	86	0.085
06/11/2016 21:18	PP_20161106_MESC4	Décru	18.31	0.694	104	0.072
06/11/2016 21:48	PP_20161106_MESC5	Décru	12.12	0.490	112	0.055
06/11/2016 22:18	PP_20161106_MESC6	Décru	8.28	0.241	144	0.035
06/11/2016 23:03	PP_20161106_MESC7-8	Décru	5.45	0.124	75	0.009
10/11/2016 02:08	PP_20161110_MESC1-2	Montée	7.20	0.147	299	0.044
10/11/2016 04:08	PP_20161110_MESC3-8	Décru	3.13	0.026	342	0.009
17/11/2016 16:07	PP_20161117_MESC1	Montée	23.44	2.981	202	0.602
17/11/2016 16:09	PP_20161117_MESC2	Pic	26.13	2.472	103	0.255
17/11/2016 16:39	PP_20161117_MESC3	Décru	17.34	1.562	26	0.041
17/11/2016 16:42	PP_20161117_MESC4	Décru	16.51	1.214	39	0.047
17/11/2016 17:12	PP_20161117_MESC5	Décru	10.59	0.666	8	0.005
17/11/2016 18:12	PP_20161117_MESC6-8	Décru	5.63	0.101	89	0.009
01/03/2017 05:59	PP_20170301_MESC1-8	Montée/pic/decru	3.58	0.025	364	0.009
09/03/2017 01:32	PP_20170309_MESC1-2	Montée	7.55	0.106	501	0.053
09/03/2017 02:17	PP_20170309_MESC3	Montée	13.28	0.579	148	0.086
09/03/2017 03:08	PP_20170309_MESC4-5	Montée	10.47	0.145	72	0.010
09/03/2017 03:59	PP_20170309_MESC6	Montée*	9.07	0.089	206	0.018
09/03/2017 05:06	PP_20170309_MESC7-8	Montée*	14.52	0.199	89	0.018
09/03/2017 15:14	PP_20170309_MESC10	Montée	13.75	0.610	18	0.011
09/03/2017 15:17	PP_20170309_MESC11	Montée	22.94	1.481	31	0.046
09/03/2017 15:20	PP_20170309_MESC12	Montée	26.84	2.363	134	0.317
09/03/2017 16:05	PP_20170309_MESC13	Montée	19.89	0.806	109	0.088
09/03/2017 16:17	PP_20170309_MESC14	Décru	17.13	0.398	20	0.008

09/03/2017 17:22	PP_20170309_MESC15	Décruée	8.16	0.458	26	0.012
09/03/2017 17:55	PP_20170309_MESC16-17	Décruée	6.42	0.077	79	0.006
28/04/2017 05:27	PP_20170428_MESC1-2	Montée	12.52	0.257	256	0.066
28/04/2017 05:33	PP_20170428_MESC3	Montée	14.42	0.329	257	0.085
28/04/2017 05:42	PP_20170428_MESC4	Montée	18.89	0.618	335	0.207
28/04/2017 06:27	PP_20170428_MESC5	Décruée	17.48	0.364	171	0.062
28/04/2017 07:05	PP_20170428_MESC6-7	Décruée	13.13	0.320	149	0.048
28/04/2017 07:58	PP_20170428_MESC8	Décruée	25.05	1.539	293	0.451
14/09/2017 01:14	PP_20170914_MESC1	Montée	26.50	3.973	465	1.847
14/09/2017 01:19	PP_20170914_MESC2	Montée	31.90	3.704	111	0.411
14/09/2017 01:24	PP_20170914_MESC3	Montée	34.62	3.928	620	2.435
14/09/2017 01:29	PP_20170914_MESC4	Pic	35.64	3.631	733	2.662
14/09/2017 01:34	PP_20170914_MESC5	Décruée	34.51	2.902	1526	4.428
14/09/2017 01:39	PP_20170914_MESC6	Décruée	32.80	3.291	347	1.142
14/09/2017 01:44	PP_20170914_MESC7	Décruée	30.72	2.176	208	0.453
14/09/2017 01:49	PP_20170914_MESC8	Décruée	28.82	1.904	493	0.939
14/09/2017 01:54	PP_20170914_MESC10	Décruée	24.81	1.360	174	0.237
14/09/2017 01:59	PP_20170914_MESC12	Décruée	21.15	0.997	194	0.193
14/09/2017 02:26	PP_20170914_MESC15-16	Décruée	16.50	0.651	264	0.172
14/09/2017 02:46	PP_20170914_MESC19-20	Décruée	12.46	0.440	173	0.076
14/09/2017 03:06	PP_20170914_MESC23-24	Décruée	9.87	0.287	50	0.014
18/09/2017 21:13	PP_20170918_MESC1	Montée	36.65	2.367	192	0.454
18/09/2017 21:18	PP_20170918_MESC2	Pic	39.59	1.716	330	0.566
18/09/2017 21:23	PP_20170918_MESC3	Décruée	38.49	1.617	171	0.276
18/09/2017 21:28	PP_20170918_MESC4	Décruée	35.93	1.459	270	0.394
18/09/2017 21:33	PP_20170918_MESC5	Décruée	33.56	1.392	67	0.093
18/09/2017 23:00	PP_20170118_MESC21-24	Décruée	16.48	2.168	239	0.518
24/08/2016 11:20	PP_20160824_BE2	Fin décruée de petite crue (2.23 m3/s)	1.44	0.004	700	
26/09/2016 11:15	PP_20160926_BE3	Q base	0.31		17	