



HAL
open science

Traçage de l'origine des écoulements de rivière sur bassin versant tropical volcanique pour la compréhension des mécanismes de contamination des eaux par les pesticides

Charlotte Forner

► To cite this version:

Charlotte Forner. Traçage de l'origine des écoulements de rivière sur bassin versant tropical volcanique pour la compréhension des mécanismes de contamination des eaux par les pesticides. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03602485

HAL Id: dumas-03602485

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03602485v1>

Submitted on 9 Mar 2022

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.



Mémoire de fin d'études

Traçage de l'origine des écoulements de rivière sur bassin versant tropical volcanique pour la compréhension des mécanismes de contamination des eaux par les pesticides

Charlotte FORNER

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES et du Master
Ingénierie et géosciences pour l'environnement (ISIE) de l'EOST

Encadrants :

Anatja SAMOUELIAN, Antoine RICHARD

Adresse du stage :

*Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème (LISAH), 2
place Pierre Viala 34060 Montpellier*

Tuteur :

Sylvain PAYRAUDEAU

Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHYGES), Strasbourg

Stage réalisé du 01/02/2021 au 31/07/2021

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet RIVAGE – T2 cofinancé par l'Union Européenne dans le cadre du programme opérationnel FEDER-FSE Guadeloupe Conseil Régional 2014-2020 / Fonds européen de développement régional.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé au bon déroulement de ce stage.

Tout d'abord, je souhaite remercier mes encadrants de stage, Anatja Samouelian et Antoine Richard pour leur supervision, leur disponibilité et leurs conseils apportés tout au long de mon stage.

Je remercie également Marc Voltz pour son aide et ses suggestions.

Merci également à Olivier Huttel pour sa disponibilité et ses précieux conseils apportés sur le logiciel RStudio.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes du LISAH et en particulier aux stagiaires et doctorants pour leur accueil chaleureux et leur soutien.

Enfin, merci à mes amis et à ma famille pour leur soutien tout au long du stage.

Résumé

La pollution historique des Antilles au CLD est globale puisqu'elle touche tous les compartiments de l'environnement. Les caractéristiques physico-chimiques de cette molécule pesticide empêchent sa dégradation naturelle. En revanche, la CLD est dissipée par les eaux de pluie suivant deux processus de transfert : le ruissellement de surface et la percolation vers les eaux souterraines. Cette migration entraîne finalement la contamination des cours d'eau, alimentés à la fois par les eaux de surface et les eaux souterraines. L'étude menée lors de ce stage a permis d'évaluer les contributions des eaux de surface et des eaux souterraines à l'écoulement de la rivière Pérou en Guadeloupe, grâce à deux traceurs hydrologiques. D'une part la conductivité est utilisée comme un marqueur de la contribution du souterrain, car les eaux d'aquifères sont plus chargées en ions que les eaux de surface, tandis que, d'autre part, la turbidité est utilisée comme un marqueur de la contribution des eaux de surface (matières en suspension). Ces paramètres ont été mesurés en continu de 2016 à 2019 à l'exutoire de la rivière Pérou. Une méthodologie de nettoyage des chroniques de conductivité et de turbidité a également été développée lors de ce stage. Finalement, l'analyse conjointe des dynamiques temporelles de ces deux traceurs a montré qu'un compartiment de subsurface participe également à l'écoulement. Cette nouvelle hypothèse permettra de mieux comprendre les dynamiques de contamination en CLD de la rivière Pérou.

Mots clés : Chlordécone, Rivière Pérou, Traceurs hydrologiques, Conductivité électrique, Turbidité.

Abstract

The historical pollution of the West Indies with CLD is global since it affects all environmental compartments. The physico-chemical characteristics of this pesticide molecule prevent its natural degradation. On the other hand, CLD is dispersed by rainwater following two transfer processes : surface runoff and percolation towards groundwater. This migration ultimately leads to the contamination of rivers, fed by both overland flow and groundwater flow. The study carried out during this internship allowed to evaluate the contributions of surface water and groundwater to the flow of the Pérou River in Guadeloupe, using two hydrological tracers. On the one hand, conductivity is used as a marker of the contribution of groundwater, as aquifer water is more ionically charged than surface water, while on the other hand, turbidity is used as a marker of the contribution of surface water (suspended solids). These parameters were measured continuously from 2016 to 2019 at the Pérou River outlet. A methodology was also developed during this internship to clean up the conductivity and turbidity chronicles. Finally, the analysis of the temporal dynamics of these two tracers showed that a subsurface compartment also participates in the streamflow. This new hypothesis will allow a better understanding of the dynamics of CLD contamination in the Pérou River.

Keywords : Chlordecone, Pérou River, Hydrological tracers, Electrical conductivity, Turbidity.

Table des matières

Table des figures	7
Table des tableaux	7
Liste des abréviations	8
1 Introduction	9
1.1 Pollution à la chlordécone dans les Antilles	9
1.1.1 État de la contamination en chlordécone dans le milieu antillais	9
1.1.2 Propriétés physico-chimiques de la chlordécone	10
1.2 Processus de contamination des cours d'eau par la chlordécone en milieu volcanique tropical	12
1.3 Utilisation de la conductivité électrique et de la turbidité comme traceurs hydrologiques .	14
1.3.1 Conductivité électrique	14
1.3.2 Turbidité	15
1.4 Synthèse bibliographique et objectif de l'étude	15
2 Matériel et méthode	16
2.1 Présentation du site d'étude	16
2.2 Données et acquisition	17
2.3 Traitement et analyse des données	19
2.3.1 Séparation d'hydrogramme par une méthode hydrologique classique	19
2.3.2 Séparation d'hydrogramme par une méthode basée sur la conductivité	21
2.3.3 Nettoyage de la chronique de conductivité et de turbidité	22
3 Résultats	22
3.1 Séparation d'hydrogramme par une méthode hydrologique classique	22
3.2 Utilisation de la conductivité pour identifier la contribution ESO	25
3.2.1 Nettoyage de la chronique de conductivité	25
3.2.2 Relation conductivité/débit	26
3.2.3 Recherche des pôles de conductivité ESO et ESU	28
3.3 Utilisation de la turbidité pour identifier la contribution ESU	29
3.3.1 Nettoyage de la chronique de turbidité	30
3.3.2 Relation turbidité/débit	32

4 Discussion	34
4.1 Remise en question du modèle classique utilisé pour faire la déconvolution crue/hors crue	34
4.2 Nouvelle hypothèse du fonctionnement hydrologique	36
Conclusion	36
Références	39
Annexes	40
I Carte des teneurs en CLD des sols de Guadeloupe	40
II Gamme de valeurs de la conductivité des sources sur le secteur Capesterre-Belle-Eau . . .	41
III Relation MES/débit	42
IV Statistiques des débits ESO	42
V Type d'erreur de la chronique de conductivité brute	43
VI Dispersion des données brutes de conductivité	44
VII Méthode de nettoyage de la chronique de conductivité	44
VIII Relation conductivité/débit	51
IX Méthode de nettoyage de la chronique de turbidité	52

Table des figures

1	Carte des teneurs en CLD mesurées dans les sols de Guadeloupe [DAAF, 2021].	9
2	Structure de la molécule de CLD [Cabidoche et al., 2009].	10
3	Voies de transfert de la CLD vers les eaux de surface et souterraines (Projet RIVAGE). . .	12
4	Évolution de la concentration en CLD ($\mu\text{g/L}$) en fonction du débit décennal (1000 m^3) et courbe de tendance (R^2 ajusté = 0,62) [Crabit et al., 2016]	13
5	Carte des Caraïbes : (a) localisation de l'archipel de Guadeloupe (Antilles Françaises), (b) localisation du BV Pérou, (c) localisation des sites de surveillance sur le BV Pérou subdivisé en trois sous BV (SC1, SC2, SC3) [Crabit et al., 2016].	17
6	Station PONT : (a) Dispositif d'acquisition de données, (b) Vue sur la rivière sous le pont, (c) Echelle limnimétrique et arrivée des capteurs (d) Zone de mesure et de prélèvement (capteur de pression, tuyau d'aspiration, turbidimètre). Crédits : Mégane Crosset (2018), Olivier Huttel (2016).	18
7	Méthodes de séparation des hydrogrammes (RC : récession continue; SLog : tracé demi-logarithmique; CS : pente constante, SL : ligne droite; CK : méthode du k constant) [Blume et al., 2007].	20
8	Méthode du k constant : détermination du gradient de k , visualisation du seuil $5 \times 10^{-5} \text{ min}^{-2}$, et du t_e de la crue du 13/04/2016.	21
9	Nombre de crues par année déterminé par la méthode du k constant à la station Pont. . .	22
10	Débit journalier (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont).	23
11	Débit journalier ESO (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont).	24
12	Débit journalier ESU (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont) et périodes sèches (zones grisées).	24
13	Chroniques de conductivité et de débit du 16/06/2016 au 29/06/2016 (a) avant correction et (b) après correction.	26
14	Relation conductivité/débit à l'échelle journalière entre 2016 et 2019 ($y = 80.926 \times x^{-0.264}$ $R^2=0,66$).	27
15	Évolution des valeurs de conductivité ESO entre 2016 et 2019 (moyenne en ligne pointillée).	28
16	Relation conductivité ESO en fonction du débit ESO.	29
17	Recherche d'une relation entre les paramètres BS et SS : (a) linéaire; (b) logarithmique. . .	31
18	Chronique de turbidité (BS) du 08/03/2017 au 10/03/2017 (a) brute; (b) corrigée.	32
19	Chronique de turbidité (BS) et de débit lors de deux crues du 08/03/2017 au 11/03/2017.	33
20	Relation entre le débit et les paramètres de la turbidité et courbe de tendance (pointillés) : (a) BS ($y = 2.594 \times x^{1.309}$ $R^2=0,65$); (b) SS ($y = 4.655 \times x^{1.269}$ $R^2=0,62$) et (c) ratio ($y = 4.655 \times x^{1.269}$ $R^2=0,62$).	34
21	Chronique de turbidité (ratio) et de conductivité du 08/03/2017 au 15/03/2017 (a) et débit associé (b) (délimitations des périodes de crues par la méthode du k constant en pointillés).	35
22	Exemple d'une remontée rapide de conductivité concordant avec la fin de crue calculée par la méthode hydrologique classique.	36

23	Carte des teneurs en CLD mesurées dans les sols de Guadeloupe [DAAF, 2021].	40
24	Caractéristiques des sources identifiées dans le secteur de Capesterre-Belle-Eau (BRGM) : Localisation GPS, mesures physico-chimiques in situ (21-24 avril 2008), contexte d'émergence (RG = rive gauche, RD = rive droite).	41
25	Dynamique de concentration en MES en fonction du débit de la rivière Pérou [Ponchant et al., 2020].	42
26	Statistiques annuelles des débits ESO.	42
27	Chroniques de conductivité (vert) et de débit (violet) 2016 et types d'erreur : (a) Points aberrants (pics vers le haut et vers le bas); (b) Décrochage; (c) Bruit.	43
28	Dispersion des données brutes de conductivité de 2016 à 2019.	44
29	Exemple de correction d'un décrochage (28/04/2016) (a) avant la correction; (b) après la correction.	45
30	Extrait du tableau des périodes de décrochage et offset associés.	45
31	Schéma de la méthode de nettoyage de la chronique de conductivité.	47
32	Chroniques de conductivité corrigée et de débit à l'échelle journalière (2016-2019).	51
33	Résidus de la relation journalière conductivité/débit en fonction du temps ($ valeur_{theorique} - valeur_{experimentale}$).	51
34	Relation brute turbidité (BS)/débit en 2017.	53
35	Turbidité en fonction de la concentration en MES pour les prélèvements ponctuels corrigés.	53
36	Turbidité en fonction du débit pour les prélèvements ponctuels corrigés.	54

Liste des tableaux

1	Propriétés physico-chimique de la CLD [Crosset et al., 2018].	11
2	Données disponibles à l'exutoire du BV Pérou (station Pont)	19
3	Volumes d'eau écoulés de 2016 à 2019 (dont ESO et ESU).	25
4	Périodes de données supprimées de 2016 à 2019.	46
5	Période de prélèvements ponctuels utilisés pour la relation BS/SS.	52
6	Prélèvements ponctuels utilisés pour la relation BS/SS.	52

Liste des abréviations

BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BV	Bassin versant
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CLD	Chlordécone
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ESO	Eau SOuterraine
ESU	Eau de SUrface
INRA	Institut Nationale de Recherche Agronomique
MES	Matières En Suspension
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
OPALE	Observatoire de la Pollution Agricole aux AntilLES

1 Introduction

1.1 Pollution à la chlordécone dans les Antilles

1.1.1 État de la contamination en chlordécone dans le milieu antillais

La CLD est un pesticide organochloré utilisé aux Antilles de 1972 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier *Cosmopolites sordidus*, un insecte ravageur des cultures de banane. La production intensive de bananes aux Antilles a mené à l'utilisation massive de la CLD sur cette période. Ainsi environ 3 kg/ha de produit concentré à 5% en matière active ont été appliqués une à trois fois par an aux pieds des bananiers [Crabit et al., 2016].

Deux marques commercialisant la CLD ont successivement été utilisées aux Antilles : «Képone™» de 1972 à 1978 puis «Curlone™» de 1982 à 1993. Après un premier avertissement en 1977 sur les dangers de la contamination des sols et des eaux par la CLD [Snegaroff et al., 1977], la marque Képone™ a été interdite aux États-Unis puis en France. Cependant l'utilisation de la CLD a pu reprendre dès 1982 avec Curlone™, malgré de nouveaux rapports alertant sur les risques de l'utilisation de cette molécule. Finalement la CLD est définitivement interdite en 1993. Cependant des études menées par la Direction Régionale de l'ENvironnement (DIREN) et la Direction de la Santé et du Développement Social (DSDS) dans les années 2000 en Guadeloupe montrent que tous les compartiments de l'environnement ont été contaminés par la CLD (sols, sources, rivières, eau potable mais aussi poissons, cultures, animaux) [Cabidoche et al., 2009]. En Guadeloupe, les plus fortes teneurs en CLD (>1 mg/kg) sont mesurées au sud de la Basse-Terre (Figure 1 et légende Annexe sous-section I) et correspondent à des mesures faites sur des andosols (au maximum 25 mg/kg) [Crabit et al., 2016].

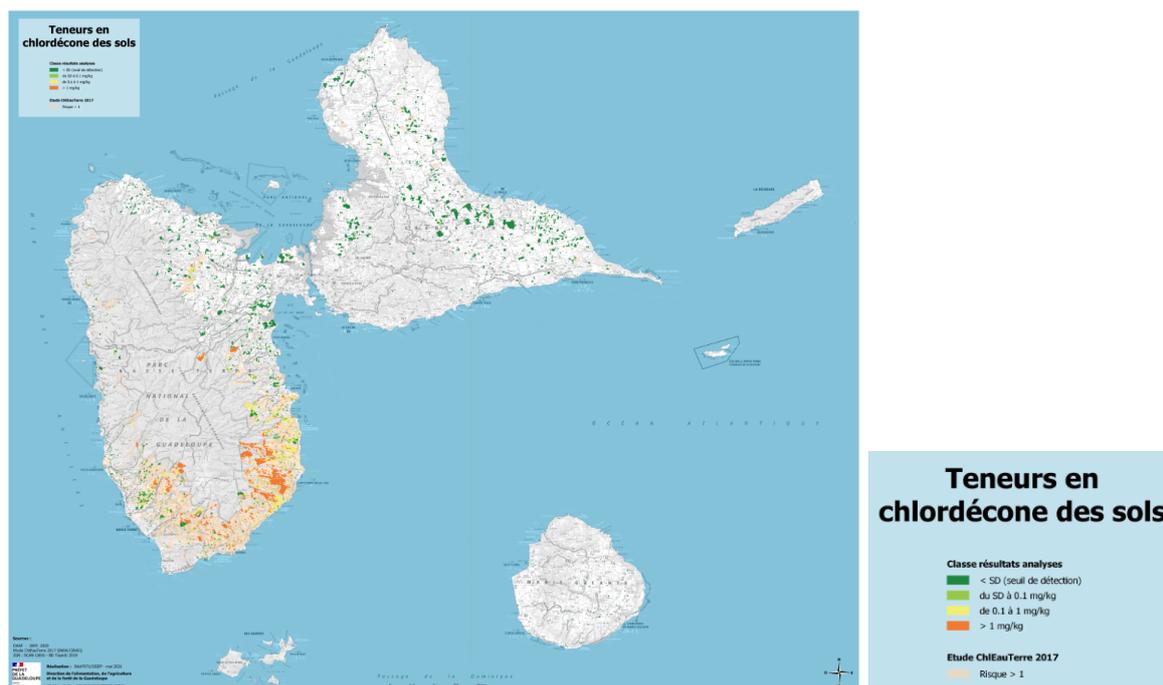


FIGURE 1 – Carte des teneurs en CLD mesurées dans les sols de Guadeloupe [DAAF, 2021].

La pollution à la CLD aux Antilles est globale et touche notamment le biote. Dans une étude menée en 2011, des analyses chimiques ont été réalisées sur le biote d'une rivière tropicale contaminée par la CLD. Les résultats ont montré que toute la chaîne trophique est fortement contaminée par la CLD, notamment par un processus de bioaccumulation [Coat et al., 2011]. Les organismes aquatiques les plus sensibles à cette contamination sont les invertébrés, avec des effets néfastes constatés pour de faibles concentrations dans le milieu [Rocle et al., 2009].

Les suivis de la qualité des cours d'eau par les DEAL dans les Antilles permettent de constater

l'ampleur de la contamination du réseau hydrographique en CLD. En Martinique, ce suivi a permis de montrer que toutes les rivières sont contaminées en CLD à des concentrations variant entre 0,2 et 1 µg/L, et jusqu'à 2 µg/L dans la rivière Rouge [Rocle et al., 2009]. De même en Guadeloupe, [Crabit et al., 2016] ont montré que la concentration moyenne en CLD sur 10 jours à l'exutoire de la rivière Pérou variait entre 0,21 et 2,10 µg/L. L'analyse de la qualité de ces rivières depuis 1999 n'indique pas de diminution de la concentration en CLD au cours du temps. De plus, les eaux souterraines sont également polluées de façon durable : le forage d'Ajoupa-Bouillon (Martinique), destiné à l'Alimentation en Eau Potable (AEP), est contaminé à hauteur de 0,3 µg/L en moyenne [Rocle et al., 2009]. D'après l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, cette concentration est supérieure à la limite autorisée de 0,1 µg/L par substance pesticide [Legifrance, 2021].

1.1.2 Propriétés physico-chimiques de la chlordécone

La CLD ($C_{10}Cl_{10}O$) est une molécule de synthèse dont la structure principale est composée de huit atomes de carbone (C) liés à un atome de chlore (Cl) (Figure 2). Aux deux extrémités de cette structure, sont reliés une fonction cétone ($C=O$) et un atome de carbone relié à deux atomes de chlore.

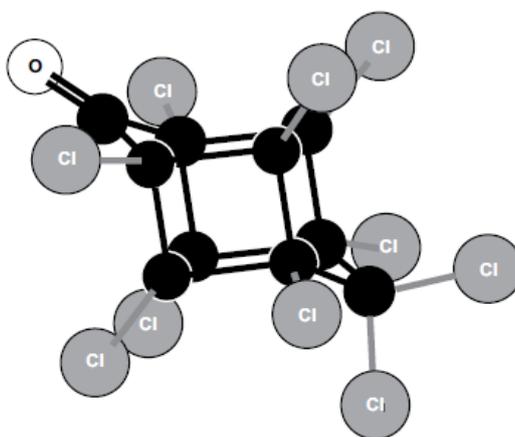


FIGURE 2 – Structure de la molécule de CLD [Cabidoche et al., 2009].

Cette structure particulière confère une grande persistance à cette molécule lorsqu'elle est émise dans l'environnement. En effet, la CLD est très stable car sa volatilité est faible et les conditions normales de température et de pression n'ont pas d'impact sur son état (point de fusion à 350 °C et pas d'oxydation en deçà de 450-500 °C) [Rocle et al., 2009]. De plus, les atomes de chlore entourant la molécule rendent la CLD à la fois hydrophobe et résistante à la biodégradation [Cabidoche et al., 2009]. Ainsi la CLD est résistante à la dégradation chimique, biologique, thermique et à l'action de la lumière, ce qui explique son temps de demi vie élevé. A ce titre la CLD a été introduit dans la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants en 2009 [Lallas, 2001].

TABLE 1 – Propriétés physico-chimique de la CLD [Crosset et al., 2018].

Propriété	Unités	Valeur	Référence
Formule moléculaire	-	C ₁₀ Cl ₁₀ O	
État physique	-	Solide cristallin	
Pression de vapeur	Pa	3 × 10 ⁻⁵ (25°C)	[PPDB, 2021]
Point de fusion	°C	350	[PPDB, 2021]
Solubilité dans l'eau (s)	mg/L	3 (pH=7; 20°C)	[Kenaga, 1980]
		CLD hydratée à pH > 9	[Dawson et al., 1979]
Coefficient de partage octanol-eau (K _{ow})	-	log(K _{ow}) = 4,5	[PPDB, 2021]
Temps de dégradation (DT50)	Jours	450	[PPDB, 2021]
	Ans	46	[Rocle et al., 2009]
Coefficient de partage sol-eau (K _d)	L/kg	2000 < K _{d,désorption} < 10 000	[Cabidoche et al., 2009]
		35,56 < K _{d,sorption} < 144,96	[Fernandez-Bayo et al., 2013]
Coefficient de partage carbone organique du sol-eau (K _{oc})	L/kg	17 500	[Kenaga, 1980]
		2400 < K _{oc} < 2500	[Howard et al., 2017]
		2000	[Bonvallot and Dor, 2004]
		2500 < K _{oc} < 20 100	[Cabidoche et al., 2009]
		1218 < K _{oc} < 2547	[Fernandez-Bayo et al., 2013]

En outre, le coefficient de partage sol-eau (K_d en L/kg) de cette molécule est élevé, ce qui indique que la molécule a tendance à se lier facilement aux particules de sol. La différence entre les valeurs de K_d trouvées dans la littérature s'explique par le type de sol utilisé dans les études. En effet, la teneur en matière organique du sol influence la valeur de K_d. C'est pourquoi il est plus courant de comparer les coefficients de partage carbone organique du sol-eau (K_{oc} en L/kg). Ce coefficient est le coefficient de partage sol-eau K_d normalisé par la teneur en carbone organique du sol (% CO).

$$K_d = \frac{C_s}{C_e} \quad (1)$$

où C_s correspond à la concentration adsorbée sur la phase solide en µg/L et C_e correspond à la concentration dans l'eau en µg/L.

$$K_{oc} = \frac{K_d \times 100}{\%CO} \quad (2)$$

Les valeurs de K_{oc} trouvées dans la littérature sont variables mais restent élevées et du même ordre de grandeur. La variabilité de ces valeurs peut s'expliquer par l'intervention d'autres paramètres influençant l'adsorption de la CLD sur les sols. Ainsi des études ont montré que le type de matière organique et son état de décomposition peuvent induire des variations d'adsorption. D'autre part, la granulométrie influence également l'adsorption. Les argiles et les limons sont les fractions qui adsorbent le plus [Rocle et al., 2009]. Aux Antilles, les sols volcaniques tropicaux sont riches en carbone organique, comme par exemple les andosols (de l'ordre de 80g/kg) [Cabidoche et al., 2009], ce qui favorise la rétention de la CLD sur le sol après son application. Ainsi les teneurs en CLD retrouvées aujourd'hui dépendent fortement des types de sols et des pratiques agricoles passées.

Les premières manifestations de la toxicité de la CLD pour la santé humaine remontent à la fin des années 1970 aux États Unis dans une usine de production de la marque Képone™. L'exposition chronique des travailleurs à la molécule a engendré des problèmes neurologiques (irritabilité, tremblements, troubles de la vision). Mais la toxicité de la molécule affecte également le système hormonal dont la production de spermatozoïdes [Desaiah, 1981]. Enfin une exposition prolongée à la CLD augmente le risque de développer un cancer [Multigner et al., 2010]. L'exposition des populations à la CLD et la consommation de produits contaminés par la molécule représentent donc un problème de santé publique majeure.

Ainsi, la connaissance du devenir de cette molécule et de son transfert dans l'environnement est nécessaire pour la mise en place d'actions de gestion des milieux, comme la surveillance des niveaux de contamination dans l'environnement ou encore la recherche de mesures visant à réduire la dispersion.

1.2 Processus de contamination des cours d'eau par la chlordécone en milieu volcanique tropical

La stabilité et le K_d élevé de la CLD permettent son stockage durable dans les sols où elle a été appliquée. Cependant la durée de stockage peut varier et dépend alors principalement des caractéristiques physico-chimiques du sol ainsi que des conditions climatiques. Une fois dans le sol la CLD n'est pas dégradée (voir partie I-1), mais transférée à d'autres compartiments du système eau-sol-atmosphère-biosphère [Rocle et al., 2009]. Des travaux de recherche ont été menés sur ces voies de transfert depuis les années 2007-2008, avec le lancement du premier «Plan National d'Actions Chlordécone» (PNAC).

On distingue trois types de transfert de la chlordécone dans les eaux [Voltz and Louchart, 2001] :

1. Le transfert vers les eaux de surface est rendu possible par le ruissellement, provoquant l'érosion des sols contaminés. Ce dernier se produit lorsque les précipitations sont supérieures à la capacité d'infiltration du sol ou lorsque le sol est saturé en eau.
2. Le transfert vers les eaux souterraines est observé lorsque les eaux de pluies percolent jusqu'aux nappes.
3. Le drainage des eaux des nappes vers le cours d'eau transfère également la molécule pesticide du compartiment souterrain au compartiment de surface.

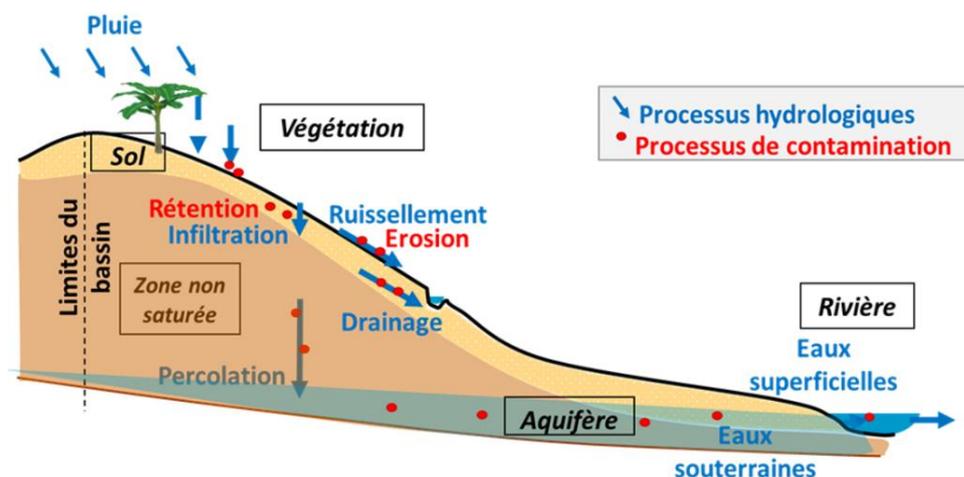


FIGURE 3 – Voies de transfert de la CLD vers les eaux de surface et souterraines (Projet RIVAGE).

Ainsi la CLD est dissipée majoritairement par les précipitations vers les eaux de surface et les eaux souterraines (Figure 3). Selon une modélisation réalisée par [Cabidoche et al., 2009], cette dissipation est estimée à plusieurs dizaines d'années sur des nitisols et jusqu'à plusieurs siècles sur des andosols pour une élimination complète. En effet, les processus impliqués dans la remobilisation de la CLD sont la diffusion, la désorption, la dissolution, le décapage et mise en suspension des molécules à l'état solide ou adsorbés [Rocle et al., 2009]. Or l'affinité de la CLD pour les particules solides et son caractère hydrophobe ralentissent significativement ces processus. D'autant plus que tout le stock de CLD ne peut être remis en solution [Rocle et al., 2009].

Les Antilles sont caractérisés par un climat tropical humide et deux saisons distinctes : la saison des pluies et la saison sèche. Les saisons sont étroitement liées aux débits s'écoulant dans les rivières. Une étude hydrologique menée par l'INRA sur le BV Pérou (Guadeloupe) [Ponchant et al., 2020] indique que la gamme des débits majoritaires pendant une années hydrologique (70% de l'écoulement) se situe entre 0,2 et 3 m³/s. Cette situation est rencontrée davantage lors de la saison sèche, lorsque les précipitations sont plus rares et moins intenses. Elle se caractérise par un comportement calme et une faible turbidité de la rivière, où la contribution des eaux souterraines à l'écoulement est prédominante. Lors d'une crue, les eaux de ruissellement participent également à l'écoulement en rivière et les débits sont alors variables.

Deux études menées en Martinique (BV Galion) et en Guadeloupe (BV Pérou) montrent qu'en période de basses eaux les concentrations en pesticides sont plus importantes qu'en périodes de hautes eaux. Ainsi les eaux souterraines et les eaux de surface des affluents du Galion possèdent des concentrations jusqu'à

10 fois supérieures à celles du cours d'eau principal en période de basses eaux [Mottes et al., 2018]. De même, les concentrations en CLD à l'exutoire de la rivière Pérou sont plus importantes pendant la saison sèche (plus de 2 $\mu\text{g/L}$) que pendant la saison des pluies (entre 0,2 et 1,2 $\mu\text{g/L}$) [Crabit et al., 2016].

A ce titre une relation logarithmique décroissante entre la concentration en CLD et le débit en rivière (Figure 4) a été établie par [Crabit et al., 2016] sur la rivière Pérou.

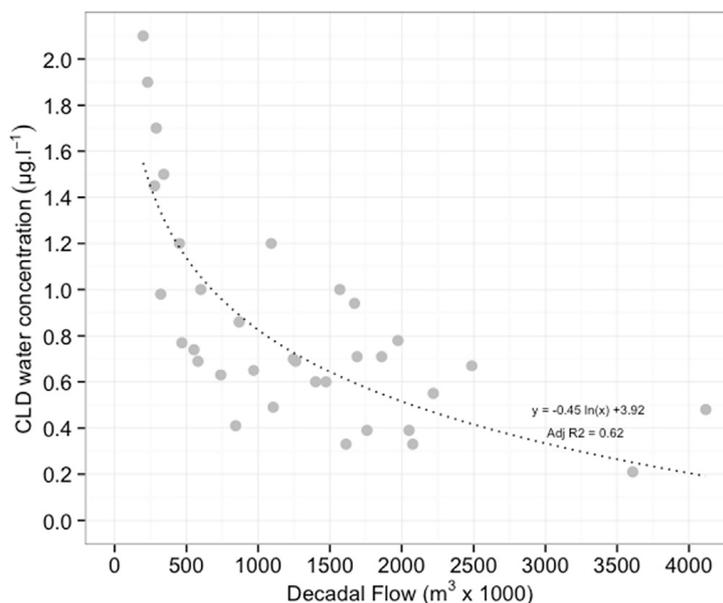


FIGURE 4 – Évolution de la concentration en CLD ($\mu\text{g/L}$) en fonction du débit décennal (1000 m^3) et courbe de tendance (R^2 ajusté = 0,62) [Crabit et al., 2016]

Ce résultat reflète un comportement macroscopique du BV dépendant à la fois des contributions des eaux de surface et des eaux souterraines. Pour mieux comprendre l'origine de la contamination en rivière, des études [Ponchant et al., 2020] [Crosset et al., 2018] ont cherché à déterminer les voies de transfert en distinguant phase dissoute et particulaire. En effet, un transport majoritaire par voie dissoute suggère que les eaux souterraines contribuent majoritairement à la contamination en CLD de la rivière, tandis que le transport par voie particulaire indique que cette contamination provient plutôt des eaux de surface. Ceci s'explique par le fait que les eaux de surface transportent plus de MES que les nappes. L'affinité élevée de la CLD pour les particules de sol laissent penser que le transport de la CLD par voie particulaire est majoritaire. Cependant les résultats de ces recherches ont montré que le transport de la CLD par voie dissoute était majoritaire à l'échelle annuel (98%) [Ponchant et al., 2020]. Les 2% restant correspondent à l'apport sous forme particulaire, concentré lors des épisodes de crues et sont donc négligeables à l'échelle annuel. Plus particulièrement, les concentrations les plus importantes en CLD dissoute ont été relevées pour des valeurs de débit de base. De plus, en situation de crue la concentration en CLD dissoute augmente lors de la montée de crue et du pic de crue puis diminue lors de la décrue. Concernant la CLD particulaire, les teneurs sont beaucoup plus variables (entre 8 et 1526 $\mu\text{g/kg}$ de MES) [Ponchant et al., 2020].

Ainsi une première compréhension des mécanismes de contamination des eaux de rivière par la CLD en contexte tropical volcanique a pu être établie à partir de ces observations. Lorsque le débit de la rivière est caractérisé par son débit de base, les concentrations en CLD proviennent principalement des aquifères très pollués et les molécules pesticides sont sous forme dissoutes. En effet dans le contexte tropical volcanique, les rivières ne sont jamais à sec mais toujours alimentées au moins par les eaux provenant des nappes. Dans le cas d'une crue faible, la concentration en CLD diminue car l'eau de ruissellement apporte une dilution du CLD. En revanche une crue forte ramène les concentrations en CLD à des taux équivalents à ceux enregistrés lors du débit de base, ce qui peut s'expliquer par la contribution de la phase particulaire du pesticide drainée par les eaux de ruissellement. Finalement les eaux de ruissellement possèdent une double propriété vis-à-vis de la concentration en CLD en rivière : soit un mécanisme de concentration (en cas de fortes crues) soit un mécanisme de dilution (en cas de crues d'une faible intensité) (Compte rendu programme RIVAGE).

Ainsi la participation du souterrain et de la surface à l'écoulement n'a pas les mêmes conséquences en ce qui concerne les concentrations en pesticides retrouvées dans la rivière. De plus, les chemins d'écoulement de l'eau peuvent se complexifier lorsqu'il y a plusieurs compartiments souterrains. En effet, les formations volcaniques de type andésites, très présentes aux Antilles, engendrent des processus hydrogéologiques très hétérogènes et complexes [Charlier et al., 2011].

Pour mieux comprendre la dynamique de contamination en rivière il est donc nécessaire d'étudier les contributions des eaux de ruissellement et souterraines à l'écoulement.

1.3 Utilisation de la conductivité électrique et de la turbidité comme traceurs hydrologiques

1.3.1 Conductivité électrique

Les méthodes hydrologiques classiques reposant sur des bilans de flux ne sont pas toujours simples à utiliser en fonction des sites d'études. Aux Antilles, le climat humide engendre des pluies intenses et nombreuses, ce qui conduit à des crues récurrentes et complexes. De plus la complexité des réseaux hydriques souterrains rendent le traçage des flux difficile [Charlier et al., 2011]. C'est pourquoi de nombreuses études ont utilisé des traceurs environnementaux (isotopes stables, silice ou conductivité) pour comprendre les processus hydrologiques complexes en complément des méthodes classiques [Cano-Paoli et al., 2019].

Contrairement à d'autres traceurs environnementaux, la mesure de la conductivité électrique est simple et peu onéreuse. Le fonctionnement des conductimètres peut être automatisé et seules des visites régulières sont nécessaires pour veiller au bon fonctionnement du capteur, notamment lors de conditions climatiques extrêmes. Ainsi contrairement aux autres traceurs environnementaux mesurés ponctuellement, les données de conductivité électrique sont recueillies avec une résolution temporelle élevée [Cano-Paoli et al., 2019].

La conductivité électrique est la mesure de la capacité de l'eau à conduire le courant et par conséquent il s'agit d'une mesure de la concentration total en ions de l'eau. Elle dépend de la géologie du BV (composition des roches), des apports des nappes, de la température de l'eau mais également de la pollution d'origine anthropique [CRE, 2021]. C'est pourquoi la signature de conductivité des eaux diffère selon l'origine des eaux.

Les eaux de surface ont généralement une valeur de conductivité moins importante que les eaux souterraines, dues à leur de temps de résidence plus faible et par conséquent une concentration en ions plus faible que les eaux souterraines [Cano-Paoli et al., 2019]. En effet, [Pellerin et al., 2008] ont mesuré des gammes de valeurs très différentes entre la conductivité des précipitations (12–46 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et celle de la rivière Ipswich (BV Saw Mill Brook, Massachusetts) en période d'étiage (520–1297 $\mu\text{S}/\text{cm}$). D'autre part dans le secteur de Capesterre-Belle-Eau (Basse-Terre, Guadeloupe), des forages réalisés par le BRGM ont montré la diversité des valeurs de conductivité en fonction des sources (voir Annexe sous-section II). Ainsi la valeur de conductivité d'une eau témoigne de la source d'où elle provient et des chemins d'écoulement parcourus.

De plus, le débit et la conductivité ont une relation inverse. En effet, l'augmentation du débit lors d'une crue apporte des eaux nouvelles peu chargées en ions provenant du ruissellement, tandis que les faibles débits ont tendance à concentrer les ions [Cano-Paoli et al., 2019]. Des études ont cherché à exploiter cette relation afin de prévoir le débit dans un cours d'eau à partir des données de conductivité [Cano-Paoli et al., 2019]. Cependant la relation conductivité/débit est complexe et varie d'une crue à l'autre. En effet, un phénomène d'hystérésis entre la conductivité et le débit est observé, c'est-à-dire une relation cyclique entre ces deux variables, ce qui rend difficile l'utilisation de la conductivité pour déterminer le débit [Cano-Paoli et al., 2019] [Evans and Davies, 1998]. Ce phénomène se produit lorsque la concentration des solutés dissous, et donc de la conductivité, est en retard sur les variations de débit pendant les événements pluvieux [Cano-Paoli et al., 2019] [Walling, 1986] [Zuecco et al., 2016]. Mais ce phénomène dépend également de processus de mélange de composantes. Ainsi le modèle de mélange à deux composantes est souvent utilisé dans la littérature pour expliquer les différentes formes d'hystérésis observées. Ce modèle suggère que les sources d'eau sont "événementielles" et pré-événementielles", c'est-à-dire provenant des précipitations ou du ruissellement et de l'apport de l'eau par les nappes [Evans and Davies, 1998].

Cependant d'autres études ont également mis en évidence l'utilité d'un modèle à trois composantes. La troisième composante est alors l'eau de subsurface ou de saturation du sol [Evans and Davies, 1998]. Ces modèles permettent de déterminer les apports relatifs des composantes les unes en fonction des autres et ainsi de mieux comprendre les différentes sources de l'écoulement [Evans and Davies, 1998]. L'utilisation de ces modèles est récurrente à l'échelle de la crue. Ainsi [Ribolzi et al., 2016] utilise le modèle de mélange à deux composantes pour séparer l'hydrogramme de son étude en un hydrogramme événementiel et pré-événementiel de manière à évaluer les débits provenant de la surface et du souterrain. Cependant aucune étude n'a utilisé cette méthode à l'échelle d'un hydrogramme contenant plusieurs crues.

1.3.2 Turbidité

La turbidité, en NTU, est une mesure optique non spécifique de la concentration des solides en suspension. Elle est influencée par la taille et la couleur des particules, et également par la présence de composés dissous et exogènes [Conner and De Visser, 1992]. Le turbidimètre est composé de deux capteurs :

- un capteur pour les fortes concentrations : Back Scatter (BS) qui émet un faisceau se propageant jusqu'à 60 cm devant le capteur selon l'opacité de l'eau.
- un capteur pour les faibles concentrations : Side Scatter (SS) qui émet un faisceau à quelques centimètres du capteur (2,3 cm).

L'enregistrement de la turbidité comporte une troisième valeur appelée Ratio, une valeur directement calculée par le turbidimètre à partir des mesures des deux capteurs optiques.

La turbidité peut être reliée au transport solide en rivière grâce à une calibration spécifique par rapport à la rivière d'intérêt.

Comme pour la conductivité, la mesure de la turbidité est simple, peu onéreuse et automatisée. Pour ces raisons, la mesure de turbidité est souvent privilégiée pour l'étude du transport solide en rivière contrairement au prélèvements ponctuels de MES.

Le transport solide correspond alors au transport de particules ou de MES par la rivière. Le charriage n'est pas pris en compte car la turbidité se limite à la mesure des particules en suspension [Ponchant et al., 2020].

L'analyse du transport solide permet de déterminer la nature de l'écoulement en rivière : les plus faibles concentrations en MES sont mesurées pour les débits les plus faibles, tandis que les plus fortes concentrations en MES sont mesurées lors des montées de crue. De manière générale, les concentrations en MES augmentent avec l'augmentation du débit (Annexe sous-section III). Cependant, une étude menée sur le BV Pérou (Guadeloupe) suggère que le transport solide est plus important en montée et pic de crue qu'en décrue [Ponchant et al., 2020]. C'est pourquoi le processus de transport solide est également caractérisé par un phénomène d'hystérésis [Crosset et al., 2018].

Finalement, la mesure de turbidité est généralement utilisée comme intermédiaire pour réaliser des bilans globaux d'exportation en MES. Par conséquent, aucune étude n'a abordé la turbidité comme traceur pour évaluer les contributions des eaux de surface.

1.4 Synthèse bibliographique et objectif de l'étude

L'utilisation historique de la CLD dans les Antilles a conduit à une pollution chronique de tous les compartiments de l'environnement. En effet, suite à des précipitations sur des sols contaminés, deux processus de dispersion de contamination s'enclenchent : le ruissellement de surface et la percolation vers les eaux souterraines. De plus, la chaîne trophique transfère la molécule au sein du biote, notamment par bioaccumulation.

Les BV volcaniques tropicaux sont caractérisés par l'alimentation continue du débit de la rivière par les eaux souterraines. Par conséquent, la concentration en CLD mesurée dans les cours d'eau est la résultante des contributions des eaux souterraines et des eaux de surface et est étroitement liée au débit. Ainsi plus

le débit augmente, plus la concentration en CLD diminue. Plus précisément, des études antérieures ont montré que lorsque le débit de la rivière est caractérisé par son débit de base les concentrations en CLD proviennent principalement des aquifères très pollués et la CLD est sous forme dissoute. Dans le cas d'une faible crue, les eaux de ruissellement diluent les concentrations en CLD, qui sont alors plus faibles. Enfin, une crue forte ramène la concentration en CLD au niveau de celle du débit de base, notamment par la contribution de la phase particulaire chargée en CLD. La contribution des eaux souterraines et de surface à l'écoulement entraîne donc des modifications de la concentration en CLD dans les cours d'eau.

Pour déterminer ces contributions, deux traceurs hydrologiques sont utilisés. D'une part, la conductivité peut être utilisée comme un marqueur de la contribution du souterrain, car les eaux d'aquifères sont plus chargées en ions que les eaux de surface, tandis que, d'autre part, la turbidité peut être utilisée comme un marqueur de la contribution des eaux de surface (matières en suspension). L'analyse conjointe des dynamiques temporelles de ces deux traceurs est étudiée pour finalement proposer des hypothèses sur l'origine des écoulements en rivière (souterrain/surface).

2 Matériel et méthode

2.1 Présentation du site d'étude

La zone d'étude est le BV Pérou qui se situe sur l'île de la Basse-Terre en Guadeloupe, dans la commune de Capesterre-Belle-Eau (Figure 5). Il s'agit du BV de la rivière Pérou dont la surface est de 12,6 km². Ce BV fait parti de l'Observatoire OPALE, chargé de suivre l'impact des pratiques agricoles. Cet observatoire étudie en effet les dynamiques de transfert de contaminants de la parcelle agricole au cours d'eau grâce à l'analyse de près de 500 matières actives phytosanitaires et métabolites issues des prélèvements d'eau brute asservis aux débits des rivières. Le BV Pérou étant historiquement contaminé à la CLD, il constitue un contexte d'étude favorable où diverses variables sont mesurées par l'observatoire (climatiques, hydrologiques, pédologiques, pratiques agronomiques, contamination) [Ponchant et al., 2020].

Le BV Pérou se caractérise par une altitude de grande amplitude (25-1400 m), la partie la plus haute du BV étant proche du cratère du volcan de la Soufrière. Ce fort gradient l'altitude s'accompagne d'un fort gradient de précipitation (2400mm/an en aval et 6000mm/an en amont). Le climat tropical humide de cette région amène des précipitations importantes avec 3636mm de pluie moyenne annuelle (station de Neufchâteau) de 1952-2004. De plus, deux saisons sont distinguées : la saison sèche de février à mars et la saison des pluies de juillet à novembre [Crabit et al., 2016].

Concernant la géologie du site, le BV se caractérise par quatre formations géologiques récentes. Les laves andésitiques massives couvrent la majeure partie du BV tandis que des dépôts de coulées pyroclastiques et de boue d'origine volcanique sont présents au sud du BV sur la rive droite de la rivière Pérou. Enfin des alluvions de tailles et de nature différentes forment une couche superficielle, principalement située en aval du BV [Crabit et al., 2016].

Deux types de sol se trouvent dans la partie sud de la Basse-Terre et sur le BV Pérou : les andosols et les nitisols. Ces sols ont une forte capacité d'infiltration (conductivité hydraulique > 60 mm/h) et une forte concentration en carbone (supérieure à 2%), ce qui favorise la rétention du sol en pesticide. Les andosols sont le type de sol le plus représenté sur le BV Pérou tandis que les nitisols se trouvent en aval du BV. La partie amont du BV est principalement forestière (70% du BV), les autres zones sont destinées à l'agriculture et principalement aux cultures de bananes et cannes à sucre. A l'aval des zones urbanisées sont présentes [Crabit et al., 2016].

Finalement différentes zones agro-écologiques sont définies par les politiques agricoles sur le BV [Crabit et al., 2016] :

- Deux zones de cultures intensives avec utilisation de larges quantités d'engrais dans le centre et l'aval du BV
- Une zone cultivée par de petits paysans (agriculture paysanne) à l'amont des andosols (bananes ou d'autres cultures)
- Une zone d'agriculture paysanne à l'aval sur des nitisols (combinaison d'activités agricoles et

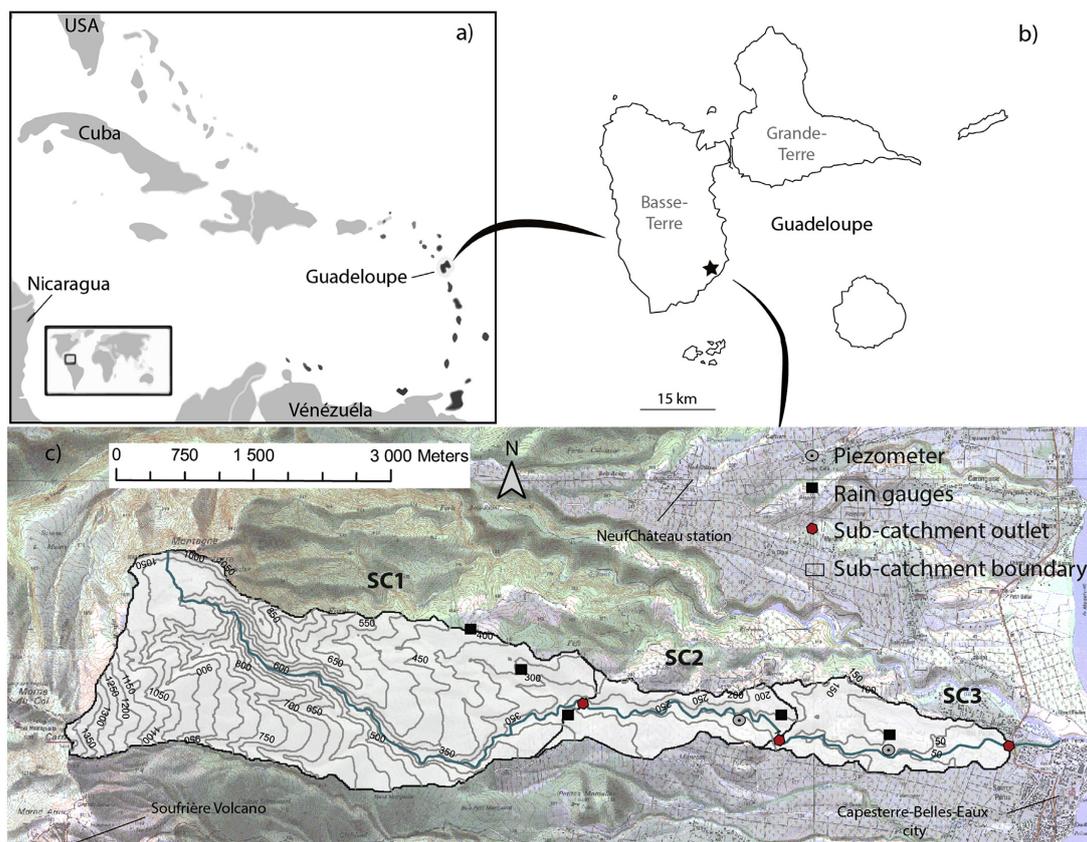


FIGURE 5 – Carte des Caraïbes : (a) localisation de l'archipel de Guadeloupe (Antilles Françaises), (b) localisation du BV Pérou, (c) localisation des sites de surveillance sur le BV Pérou subdivisé en trois sous BV (SC1, SC2, SC3) [Crabit et al., 2016].

d'élevage)

Suivant les caractéristiques géomorphologiques précédentes le BV Pérou peut être divisé en trois sous BV (Figure 5).

Ainsi le sous BV 1 (SC1), d'une superficie de 906 ha, se caractérise par une pente forte (100-295%), un type de sol principalement composé d'andosols. L'occupation du sol de ce sous BV est forestier et le stock spécifique de CLD est 5,13 kg/ha. Ce sous BV contribue majoritairement au fort débit à l'exutoire du fait de ses pentes fortes.

Le sous BV 2 (SC2) est le sous BV intermédiaire de 143 ha. Les pentes y sont plus faibles (20-40%). Le type de sol est composé d'andosols et l'occupation du sol est agricole (banane, canne à sucre). Le stock spécifique de CLD sur ce sous BV est le plus important (11,67 kg/ha).

Enfin, le sous BV 3 (SC3) est situé en aval du BV Pérou et fait 211 ha. Les pentes sont les plus faibles (0-20%). Les nitisols sont les sols prédominants et les cultures de banane, de cannes à sucre et des zones urbaines sont également présentes. Sur ce sous BV, 9,02 kg/ha de CLD sont retrouvés. Par conséquent, le sous BV 3 est la deuxième zone la plus contaminée en CLD [Crabit et al., 2016].

2.2 Données et acquisition

Un dispositif d'acquisition de données en continu est installé à l'exutoire du BV Pérou (station Pont) depuis 2016 et géré par l'Observatoire OPALE. La centrale d'acquisition (CR1000, Campbell Scientific) permet d'acquérir les données mesurées en continu par des capteurs de paramètres hydrologiques en rivières, tels que la hauteur d'eau, la conductivité électrique, le pH, la turbidité et la température [Ponchant et al., 2020].

Ainsi les hauteurs d'eau sont acquises toutes les trois minutes par un capteur de pression (Druck's model PDCR 1830), situé le long de la berge, et par une échelle limnimétrique. La mesure de la hauteur d'eau permet de déterminer le débit de la rivière grâce à la conversion de cette dernière par une courbe de tarage. La connaissance de certaines caractéristiques de la station sont nécessaires pour construire la courbe de tarage, telles que la section mouillée, le rayon et la pente hydrauliques, et la rugosité sur la section du profil [Ponchant et al., 2020]. Certains dysfonctionnements du capteur de pression ont pu engendrer des lacunes dans les données de hauteur d'eau et donc de débit depuis 2016. C'est pourquoi, un précédent travail de reconstitution de cette donnée a été mené. Ainsi la chronique de débit complète est désormais disponible pour cette étude, de 2016 à 2019 à un pas de temps de trois minutes.

D'autre part, la conductivité électrique est mesurée à un pas de temps de trois minutes. Cette mesure est corrigée par la température et est donc une mesure de conductivité spécifique. Une sonde multiparamètres (MS5) permet la mesure en continu de la conductivité de 2016 au 16/09/2019. En 2019, un deuxième capteur (sonde ES2 Campbell Sc.) est également installé et mesure la conductivité en continu à un pas de temps de trois minutes du 15/03/2019 au 16/09/2019. Ce dernier corrige les valeurs brutes par un coefficient d'étalonnage de 1,127. Les données recueillies présentent des lacunes soit ponctuelles soit sur une période plus importante. En 2016, 11,2% des valeurs sont manquantes, tandis que 4,2%, 0,09% sont des valeurs manquantes respectivement en 2017 et 2018. En 2019, 0,77% des données sont manquantes pour la sonde multiparamètres MS5 tandis que 0,81% des données sont manquantes pour la sonde ES2. Ainsi les données de conductivité sont disponibles à un pas de temps de trois minutes de 2016 au 16/09/2019 avec des lacunes.

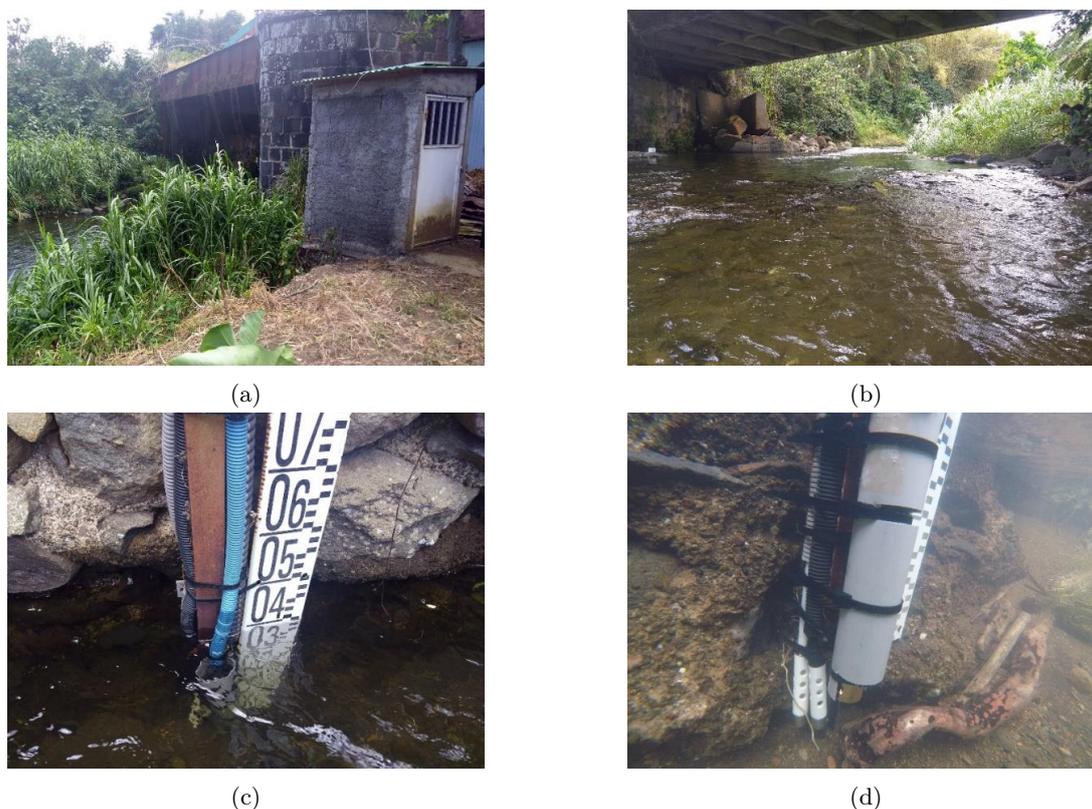


FIGURE 6 – Station PONT : (a) Dispositif d'acquisition de données, (b) Vue sur la rivière sous le pont, (c) Echelle limnimétrique et arrivée des capteurs (d) Zone de mesure et de prélèvement (capteur de pression, tuyau d'aspiration, turbidimètre). Crédits : Mégane Crosset (2018), Olivier Huttel (2016).

La mesure de turbidité a été réalisée en continu à l'aide d'une sonde de turbidité submersible munie d'un système d'auto-nettoyage (OBS501, Campbell Scientific) [Crosset et al., 2018]. Cette mesure est réalisée chaque minute pour l'année 2017 ainsi que pour les quinze premiers jours de l'année 2018. Comme pour la conductivité, la chronique de turbidité présente des lacunes.

Dans le cadre du projet ONEMA [Ponchant et al., 2020], des prélèvements ponctuels ont été effectués

afin de mesurer les concentrations en MES à l'exutoire de la rivière Pérou. Ainsi 226 échantillons ont été prélevés dont 220 en situations de crue entre 2016 et 2018. Les différentes phases de crue (montée, pic et décrue) ont été pris en compte parmi ces prélèvements, ce qui représente un total de 12 crues d'intensité variable. La concentration en MES a ensuite été déterminée après filtration à $0,7 \mu\text{m}$ [Ponchant et al., 2020].

Ainsi l'étude proposée dans ce stage repose sur l'ensemble des données disponibles précédemment citées, dont un récapitulatif se trouve dans le tableau ci-dessous (Table 2). Au cours de la période d'intérêt (2016-2019), des épisodes de pluies et de vents très intenses ont eu lieu [Ponchant et al., 2020]. En effet, une onde cyclonique (14/09/2017) ainsi que le cyclone Maria (19/09/2017) ont été recensés et mesurés à la station Pont grâce aux différents paramètres hydrologiques.

TABLE 2 – Données disponibles à l'exutoire du BV Pérou (station Pont)

Paramètre	Résolution temporelle	Période d'acquisition	État	Source
Débit	3 min	01/01/2016 au 31/12/2019	Complet	OPALE
Conductivité	3 min	01/01/2016 au 16/09/2019	Lacunes	OPALE
Turbidité	1 min	06/01/2017 au 15/01/2018	Lacunes	OPALE
Teneurs en MES	Ponctuelle	2016-2018	226 échantillons	Projet ONEMA

2.3 Traitement et analyse des données

Le traitement et l'analyse des données ont été réalisés avec le logiciel RStudio afin de pouvoir manipuler et visualiser un grand nombre de données.

2.3.1 Séparation d'hydrogramme par une méthode hydrologique classique

Une première analyse pour connaître l'origine des eaux est conduite par une séparation hydrologique classique. Cette méthode utilise uniquement le débit. L'objectif de cette méthode est de quantifier la contribution à l'écoulement des débits provenant des eaux de surface (ESU) et des eaux souterraines (ESO). Les eaux de surface correspondent au ruissellement engendré par les précipitations et peuvent avoir des origines diverses, tandis que les eaux souterraines correspondent aux eaux d'exfiltration provenant des aquifères [Blume et al., 2007]. L'application de cette méthode est menée sur toute la chronique de débit dans cette étude.

Dans son article, [Blume et al., 2007] référence les différentes méthodes de séparation d'hydrogramme dans le but de calculer les débits ESO et ESU (Figure 7).

Les différentes méthodes émettent l'hypothèse qu'en période hors crue, le débit alimentant la rivière provient uniquement du souterrain. Le calcul des débits ESO et ESU est donc réalisé lors des événements de crue et par conséquent le débit ESU est égal à 0 en période hors crue.

La méthode de la pente constante (CS) est ici choisie. La pente p est calculée pour chaque crue à partir des valeurs de débits de début (Q_{debut}) et de fin de crue (Q_{fin}).

$$p = \frac{Q_{fin} - Q_{debut}}{t_{fin} - t_{debut}} \quad (3)$$

L'intersection de la pente p et de la courbe de récession correspond alors au moment où il n'y a plus de contribution du débit ESU. Cette courbe est modélisée par l'équation de Dupuit-Boussinesq :

$$Q(t) = Q_0 \times \exp(-kt) \quad (4)$$

où $Q(t)$ est le débit au temps t (m^3/s), Q_0 est le débit au début de la récession (m^3/s) et k est le coefficient de récession (L/s).

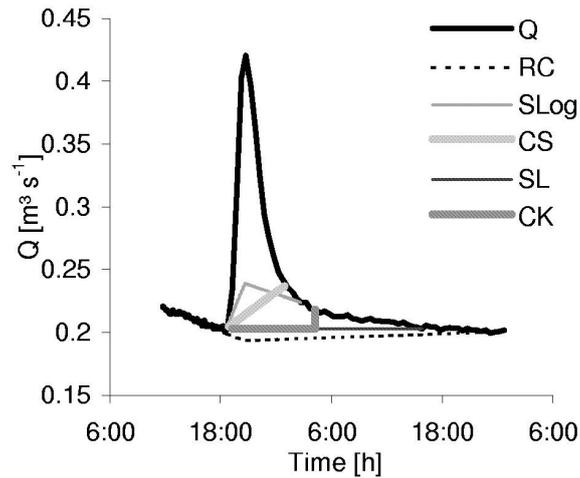


FIGURE 7 – Méthodes de séparation des hydrogrammes (RC : récession continue; SLog : tracé demi-logarithmique; CS : pente constante, SL : ligne droite; CK : méthode du k constant) [Blume et al., 2007].

Afin d'appliquer la méthode de la pente constante, il est nécessaire de déterminer les dates de début et de fin de crue dans la chronique de débit. Le début de crue est simple à repérer puisque les montées de crue sont très rapides. En revanche, les décrues sont lentes et par conséquent la date de fin de crue est difficile à déterminer. C'est pourquoi la méthode du k constant, basée sur le travail de [Blume et al., 2007], est utilisée. Cette méthode permet d'avoir un critère reproductible pour déterminer les dates de fin de crue sur toute la chronique.

La méthode du k constant repose sur la détermination du coefficient de récession k pour tous les points de l'hydrogramme. En dérivant l'équation 4, on obtient :

$$\frac{dQ}{dt} = -k \times Q(t) \quad (5)$$

En divisant par $Q(t)$:

$$k = -\frac{dQ}{dt} \times \frac{1}{Q(t)} \quad (6)$$

Ainsi, il est possible d'identifier le moment t_e après lequel k est constant, correspondant à la fin de la contribution du débit ESU. Pour cela, le gradient de k est calculé (dk). Ainsi t_e correspond au moment où la valeur de dk est proche de 0 et se stabilise autour de cette valeur.

La variation du dk étant élevée, les données de débit ont été moyennées sur 2 heures (1 heure avant et 1 heure après) avant le calcul de la dérivée de Q (Équation 5). De même, nous réalisons une moyenne sur 3 heures de k avant le calcul du gradient de k . De cette manière, le gradient de k est moins bruité, ce qui permet une meilleure lecture du t_e .

Finalement, t_e est défini comme le point où le gradient de k devient approximativement 0 ($< 5 \times 10^{-5} \text{ min}^{-2}$). Il n'est pas possible de choisir la valeur zéro exacte car le critère dk a tendance à osciller. Dans l'article [Blume et al., 2007], la méthode du k constant est utilisée sur une seule crue, c'est pourquoi la valeur seuil du critère a pu être calibrée et fixée. Ici la méthode est appliquée à toute la chronique comprenant plusieurs crues. Par conséquent, une valeur seuil unique pour dk n'est pas possible. La valeur du seuil choisie est donc indicative et c'est la stabilité du critère qui compte et non sa valeur. Ainsi, chaque fin de crue est à vérifier afin de déterminer quand le critère dk se stabilise (Figure 8).

Ainsi, les valeurs des débits ESO (Q_{ESO}) sont calculés grâce à la fonction linéaire ci-dessous (Équation 7) :

$$Q_{ESO} = p \times t + Q_{debut} \quad (7)$$

Enfin, le débit total instantané (Q_{INST}) étant la résultante des contributions ESO et ESU (Q_{ESU}),

les valeurs des débits ESU sont calculés de la manière suivante (Équation 8) :

$$Q_{ESU} = Q_{INST} - Q_{ESO} \quad (8)$$

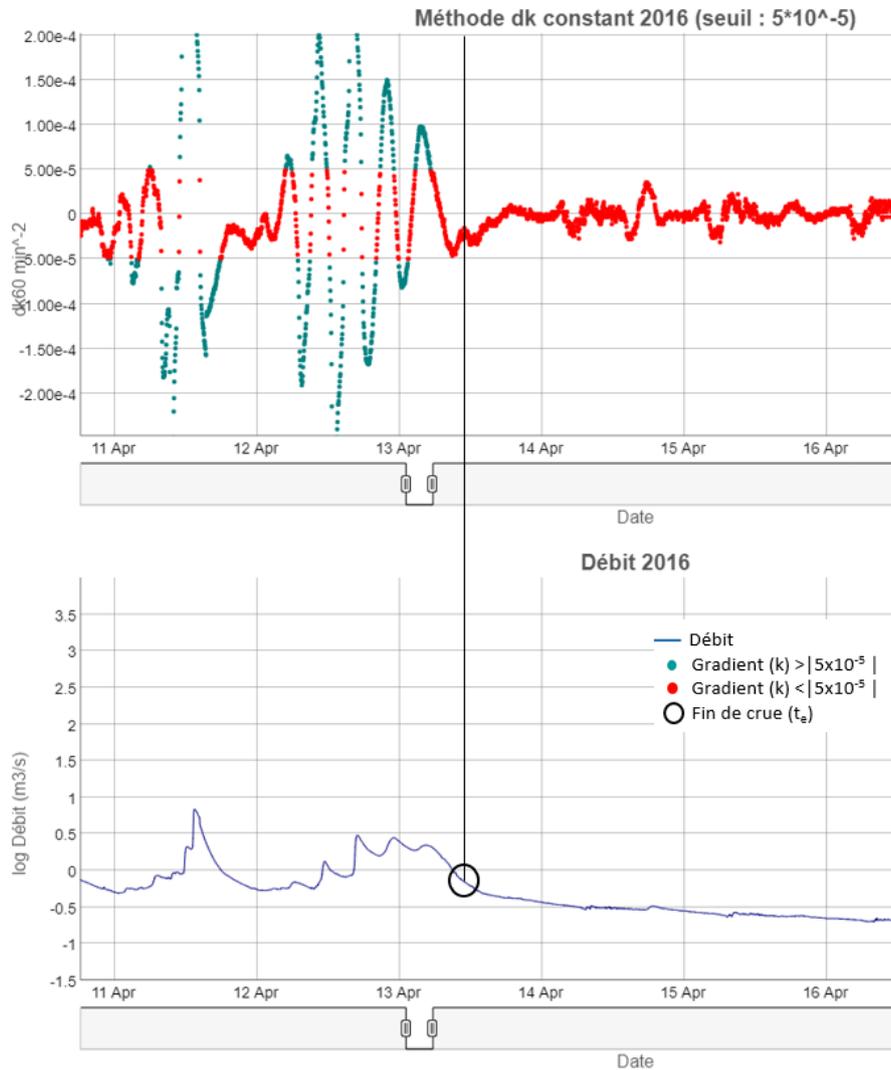


FIGURE 8 – Méthode du k constant : détermination du gradient de k , visualisation du seuil $5 \times 10^{-5} \text{min}^{-2}$, et du t_e de la crue du 13/04/2016.

2.3.2 Séparation d'hydrogramme par une méthode basée sur la conductivité

Un séparation d'hydrogramme basée sur la conductivité est également utilisée dans cette étude. Cette méthode repose sur des équations de mélanges à deux réservoirs et sur les données de conductivité utilisées comme traceur. Cette méthode a notamment été utilisée dans le travail de [Ribolzi et al., 2016]. Les équations sont décrites ci-dessous (Équations 9 et 10) :

$$Q_{INST} = Q_{ESU} + Q_{ESO} \quad (9)$$

$$Q_{INST} \times EC_{INST} = Q_{ESU} \times EC_{ESU} + Q_{ESO} \times EC_{ESO} \quad (10)$$

Q_{INST} représente le débit instantané total à l'exutoire de la rivière, Q_{ESU} , le débit instantané provenant des eaux de surface, et Q_{ESO} le débit instantané provenant des eaux souterraines (m^3/s). EC_{INST}

est la conductivité instantanée à l'exutoire de la rivière, tandis que EC_{ESU} et EC_{ESO} sont respectivement les valeurs moyennes de conductivité des ESU et ESO. La méthode de séparation d'hydrogramme basée sur la conductivité nécessite donc d'avoir les deux pôles de conductivité ESO et ESU.

Dans l'étude de [Ribolzi et al., 2016], la séparation d'hydrogramme basée sur la conductivité est menée sur une seule crue. La valeur de EC_{ESU} a été mesurée sur des échantillons d'eau de ruissellement lors d'un évènement pluvieux et celle de EC_{ESO} a été approximée par la valeur de conductivité à l'exutoire avant un évènement de crue. Dans notre étude, nous avons cherché à connaître les valeurs de EC_{ESU} et EC_{ESO} applicables à toute la chronique de données, comprenant plusieurs crues. Les résultats de cette recherche sont détaillés dans la partie Résultats.

2.3.3 Nettoyage de la chronique de conductivité et de turbidité

Les données acquises en continu sur la station Pont sont issues de mesure par capteurs. Ces mesures sont entachées de bruit et ne peuvent pas être utilisées en l'état. Deux méthodologies différentes de nettoyage des données de conductivité et de turbidité ont été développées lors de ce stage. Ces deux méthodologies reposent sur l'observation des graphes de conductivité et de turbidité en fonction du temps mais également sur l'analyse de ces données par rapport au débit. Ces deux méthodologies sont détaillées dans la partie Résultats.

3 Résultats

3.1 Séparation d'hydrogramme par une méthode hydrologique classique

L'hydrogramme de la station Pont présente de nombreuses crues d'intensité variable sur la période 2016-2019. Le débit instantané maximal sur la période est $57,8 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 08/07/2018 à 21h57. A l'inverse le débit instantané minimal est $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 17/07/2016 de 06h27 à 06h33. Grâce à la méthode du k constant, nous avons délimité les crues et estimé leur nombre pour chaque année (Figure 9). Parmi ces crues, certaines sont simples (un seul pic de crue), tandis que d'autres sont complexes (plusieurs pics de crue). D'une manière générale, les crues simples se produisent lors de la période sèche (janvier à mars), tandis que les crues complexes ont tendance à se produire lors de la saison des pluies.

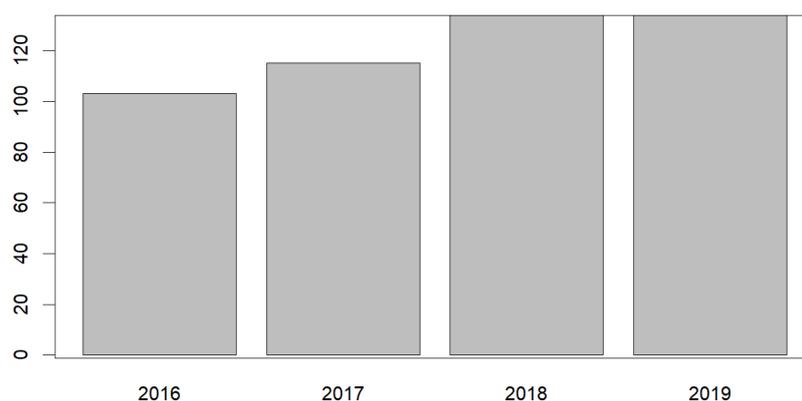


FIGURE 9 – Nombre de crues par année déterminé par la méthode du k constant à la station Pont.

Le graphique ci-dessous permet de visualiser la chronique des débits journaliers de 2016 à 2019 (Figure 10). Les pics de crue semblent plus importants en fin d'année (saison des pluies) qu'en début d'année (saisons sèches grisées Figure 10), sauf pour le début de l'année 2017 où les débits journaliers atteignent $8 \text{ m}^3/\text{s}$. De plus, le cyclone Maria est visible fin 2017 et correspond au débit journalier le plus important ($10 \text{ m}^3/\text{s}$). D'autre part, le débit de base journalier n'est jamais nul et n'est pas constant dans le temps.

Cette observation confirme le fait que la rivière Pérou n'est jamais à sec mais toujours alimentée par des eaux souterraines dans des proportions variables.

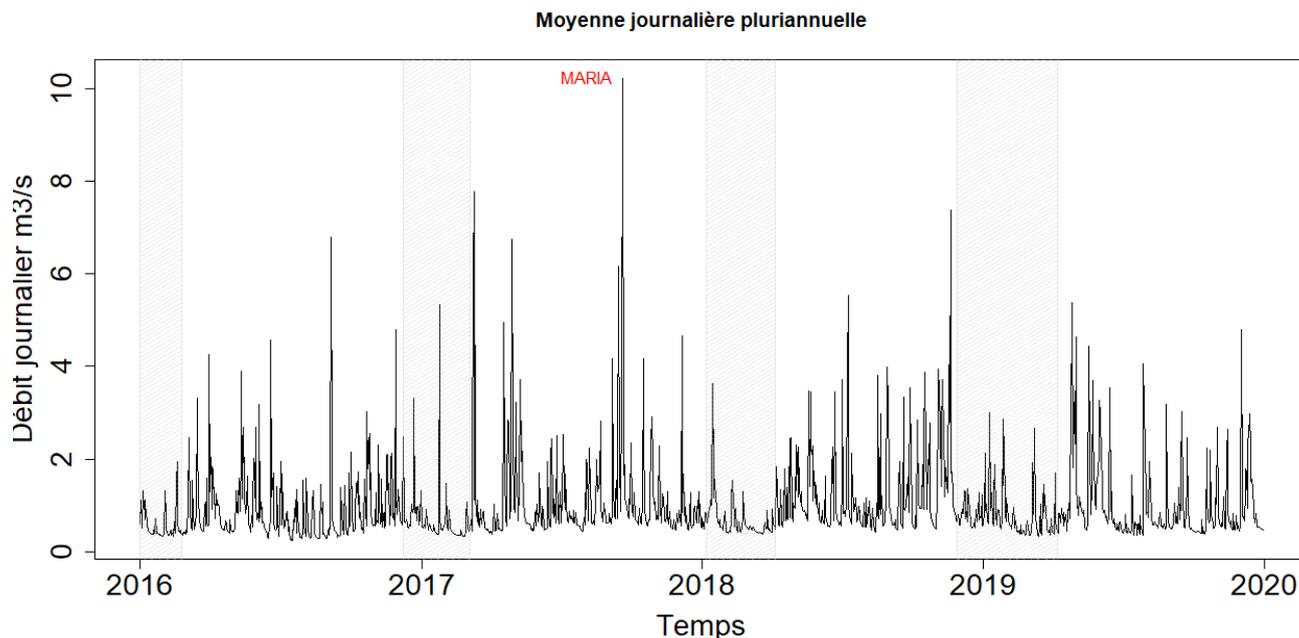


FIGURE 10 – Débit journalier (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont).

Le calcul des débits ESO et des débits ESU par la méthode de la pente constante permet d'avoir une connaissance approfondie de la dynamique des contributions de la surface et du souterrain à l'écoulement. Ainsi le débit ESO n'est pas constant dans le temps (gamme de valeurs du débit instantané ESO entre $0,21 m^3/s$ et $2,57 m^3/s$). D'une manière générale, les périodes sèches enregistrent des débits ESO plus faibles que les périodes de pluie. Cependant le mois de juillet 2016 est la période ayant les débits ESO les plus faibles de toute la période d'étude (Figure 11). Le passage du cyclone Maria entraîne une augmentation des débits ESO sur l'année 2017 tandis que l'année 2019 présente les débits ESO les plus stables. Les années 2017 et 2018 ont les débits ESO moyens plus importants que les deux autres années (Annexe sous-section IV), probablement à cause de l'influence du cyclone Maria. On remarque cependant que cette influence tend à diminuer au cours de l'année 2019. La réactivité de recharge des nappes lors d'un événement climatique extrême est donc rapide mais on observe cependant une forte inertie après cet événement : un apport du souterrain plus fort est constaté de septembre 2017 au cours de l'année 2019.

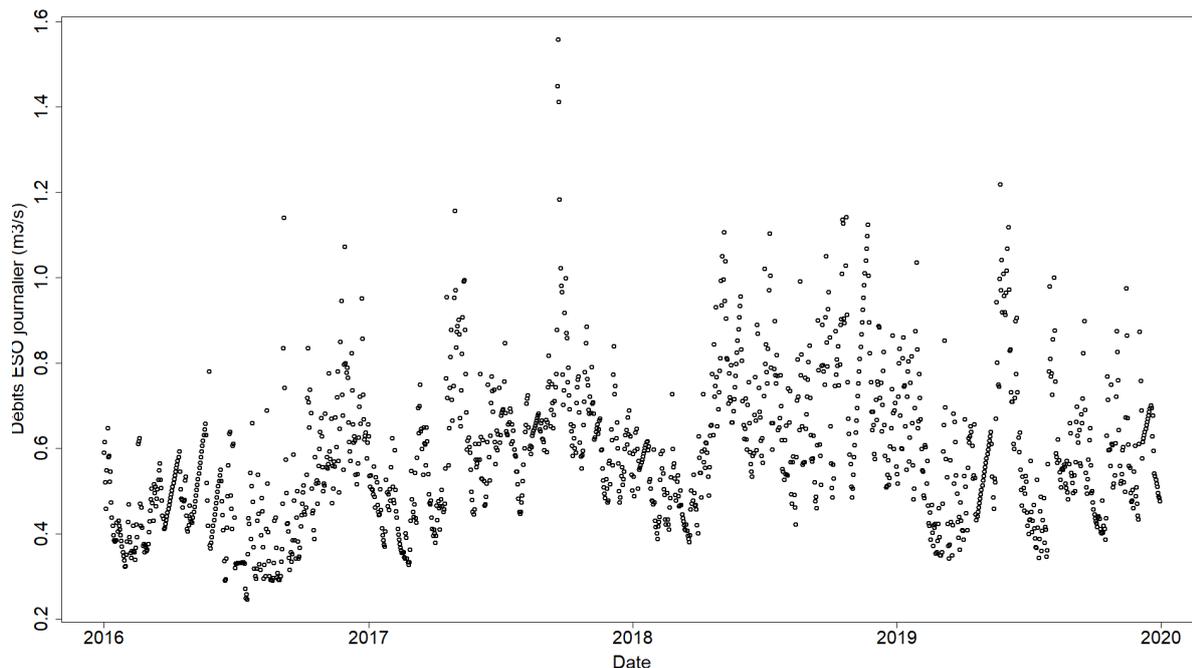


FIGURE 11 – Débit journalier ESO (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont).

D'autre part, les débits ESU sont beaucoup plus variables car ils dépendent directement des précipitations (durée et intensité). C'est pourquoi la gamme de valeurs des débits instantanés ESU est importante (0 à $56,8 m^3/s$). La valeur de débit ESU instantanée la plus élevée correspond à la crue du 08/07/2018 tandis que le débit ESU maximum journalier correspond à l'évènement cyclonique Maria (Figure 12). Lors d'une crue, le débit ESU est majoritaire par rapport au débit ESO, tandis qu'en période hors crue, seul le débit ESO alimente le cours d'eau.

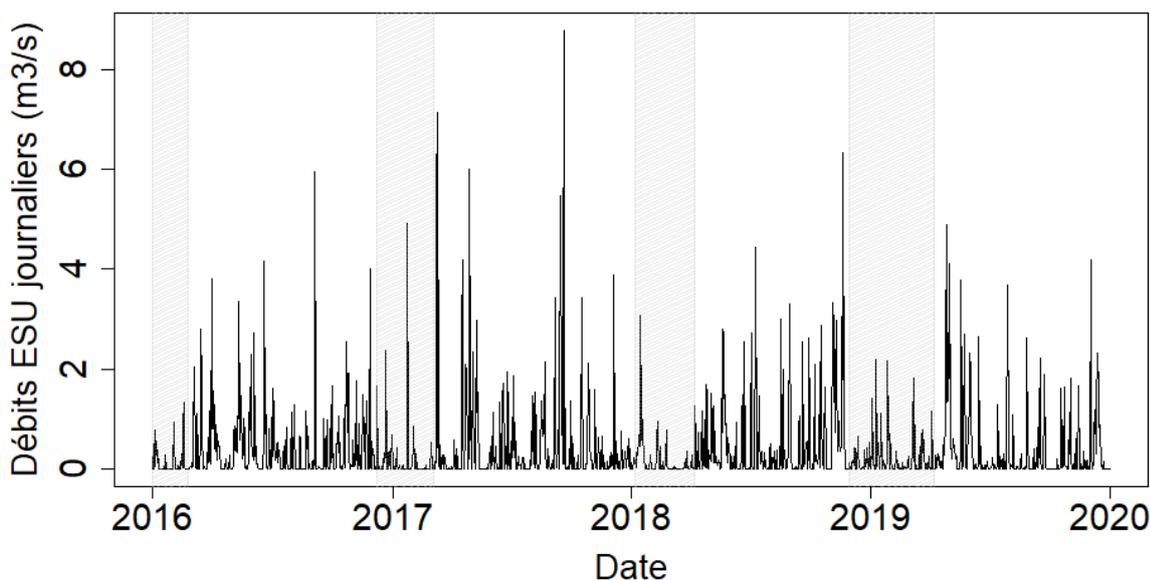


FIGURE 12 – Débit journalier ESU (en m^3/s) de 2016 à 2019 (Station Pont) et périodes sèches (zones grisées).

Finalement, le calcul des volumes ESO et ESU à l'échelle de la chronique confirme les résultats de

[Ponchant et al., 2020] : les débits majoritaires annuels sont des débits faibles. En effet, les débits ESO correspondent aux débits les plus faibles et représentent environ 60% des volumes écoulés sur toute la période d'étude (Table 3). De plus, les volumes ESO écoulés après Maria sont plus importants que les volumes ESO de 2016 et 2017. Les événements climatiques influencent donc l'écoulement provenant du souterrain. Finalement, la contribution du compartiment ESO à l'écoulement est majoritaire sur la période d'étude (Table 3).

TABLE 3 – Volumes d'eau écoulés de 2016 à 2019 (dont ESO et ESU).

Année	Volume ESO ($\times 10^6 m^3$)	Volume ESU ($\times 10^6 m^3$)	Volume total ($\times 10^6 m^3$)	%ESO	%ESU
2016	15,4	11,9	27,3	56,4	43,6
2017	19,4	12,9	32,3	60,1	39,9
2018	21,1	12,6	33,7	62,6	37,4
2019	21,1	12,6	33,7	62,6	37,4
Total	74,3	48,4	122,7	60,6	39,4

3.2 Utilisation de la conductivité pour identifier la contribution ESO

Les ESO possèdent des valeurs de conductivité élevées et variables en fonction des sources. L'étude de l'évolution de la chronique de conductivité va donc pouvoir nous donner des informations concernant la contribution du souterrain à l'écoulement de la rivière Pérou.

3.2.1 Nettoyage de la chronique de conductivité

Les données de conductivité mesurées en continu dans la rivière sont soumises aux aléas climatiques et aux défaillances du capteur. Ensablement du capteur, particules coincées dans le capteur ou encore problème d'alimentation sont des sources potentielles d'erreurs retrouvées dans les données. C'est pourquoi une méthode automatisée avec R a été mise en place pour corriger la chronique de conductivité afin qu'elle soit exploitable. Le but de cette méthode est qu'elle puisse être appliquée de la même manière à l'ensemble de la chronique.

La première étape est de repérer les erreurs dans la chronique et de les répertorier par type d'erreur. Celle-ci a été réalisée à partir des observations issues du graphe de la conductivité au cours du temps, de la conductivité en fonction du débit et d'autres données utiles relatives au capteur ou aux interventions sur le terrain. Ces graphes ont été générés par la fonction *dygraph* du package *dygraphs* de R. Cette fonction permet de visualiser une grande série de données grâce à son zoom.

La recherche des erreurs dans la chronique permet de réaliser une première analyse de la conductivité et par conséquent d'avoir des résultats concernant la dynamique de ce paramètre en fonction du temps et du débit. Ainsi l'augmentation du débit lors d'une crue entraîne la baisse de la conductivité. Lors de la décrue, la conductivité remonte. Cela s'explique principalement par un phénomène de dilution. Si la crue est suivie d'un débit de base suffisamment longtemps alors la conductivité atteint un plateau.

Grâce à ces observations, trois types d'erreurs récurrentes ont été retenus et corrigés sur la période de données disponibles (illustrations sous-section V) :

- Pic aberrant vers le haut ou le bas
- Décrochage : chute brutale de la valeur de conductivité sur une période plus ou moins longue puis remontée brutale de la conductivité
- Bruit

L'analyse de la chronique montre également des pics de conductivité vers le haut avant une crue. Bien que ces pics ne semblent pas liés à des variations de débit dans le cours d'eau, nous avons décidé de les garder au sein des données nettoyées. En effet, ces pics semblent se produire lors de précipitations à la station Pont. Le conductimètre est placé sous une pile de pont dont les matériaux sont métalliques. L'hypothèse retenue est alors que le ruissellement de la pluie sur ces surfaces entraîne des eaux chargées captées par le conductimètre.

La Figure 28 en Annexe sous-section VI représente la dispersion des valeurs de conductivité brute. Ainsi la difficulté ici n'est pas d'enlever des valeurs aberrantes qui plafonnent à des valeurs extrêmes non plausibles, mais d'enlever des valeurs d'une gamme des possibles mais non cohérentes avec la dynamique globale de la chronique.

L'algorithme mis en place répond ainsi aux différentes contraintes décrites ci-dessus (détails Annexe sous-section VII). De plus, bien que la chronique de débit ait permis d'identifier les erreurs, elle n'a pas été utilisée pour la correction de la chronique de conductivité afin de ne pas fausser les futures relations entre les deux variables.

Cependant, le choix a été fait de supprimer quelques périodes sur 2016 et 2017 (Annexe sous-section VII Table 4) où le bruit est trop important et aléatoire, malgré un signal macroscopique cohérent. Ces périodes nécessitent un nettoyage particulier non compatible avec la méthode automatique choisie.

La Figure 13 montre le résultat de l'application de l'algorithme de nettoyage des données brutes, que j'ai pu mettre en place lors de ce stage, sur une partie de la chronique. Les pics vers le bas ont systématiquement été supprimés tandis que certains pics vers le haut ont été conservés comme indiqué plus tôt. La plupart des décrochages ont été corrigés par un offset correspondant à la valeur de la chute de conductivité. La chronique de conductivité finale correspond donc à la chronique brute sans les valeurs aberrantes et les périodes supprimées (sous-section VII Table 4).

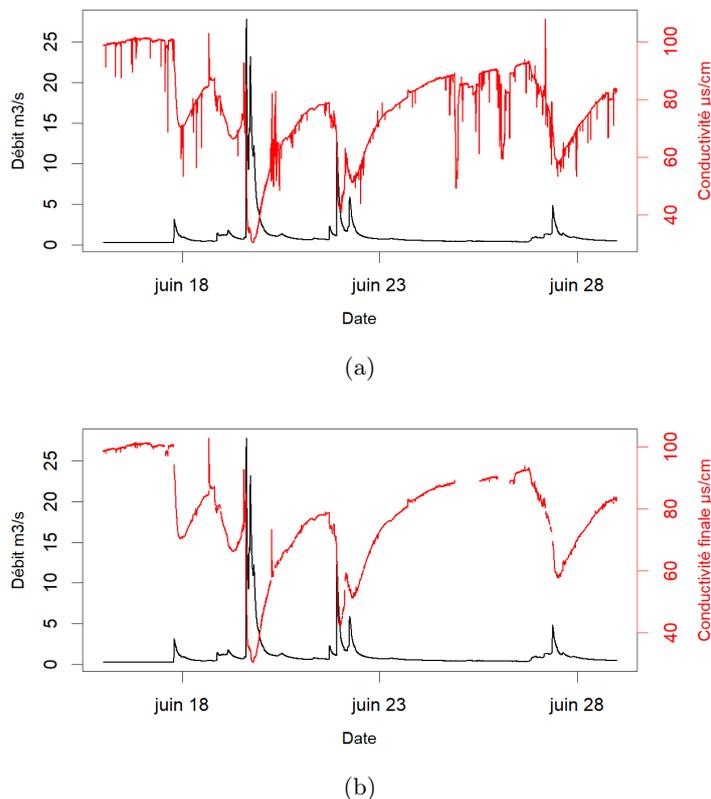


FIGURE 13 – Chroniques de conductivité et de débit du 16/06/2016 au 29/06/2016 (a) avant correction et (b) après correction.

3.2.2 Relation conductivité/débit

La correction de la chronique de conductivité permet une analyse plus approfondie de ce paramètre dans le temps et par rapport au débit, à la fois à l'échelle journalière et à l'échelle de la crue.

Les valeurs de la conductivité instantanées nettoyées s'étendent de $19,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ (23/11/2016 00h57)

à 148,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (14/10/2017 23h33). L'évolution de la conductivité dans le temps montre que les plus fortes valeurs de conductivité ont tendance à être enregistrées en début d'année (Figure 32 Annexe sous-section VIII). Cependant, ce n'est pas toujours le cas : le passage du cyclone Maria, en septembre 2017, augmente significativement la valeur de la conductivité durant les mois suivants. Le passage du cyclone semble donc avoir modifié le fonctionnement hydrologique du BV temporairement. Après le cyclone, il est possible que des sources d'eau souterraines différentes (dont les quantités sont variables) contribuent à l'écoulement, ce qui expliquerait la signature de conductivité différente.

Plus généralement, la conductivité est très réactive aux variations de débit, c'est pourquoi les variations de la conductivité semblent être principalement contrôlées par les événements de crue. Une relation conductivité/débit est établie à l'échelle journalière par la fonction *fitModel* du package *mosaic* (Figure 14). Comme vu précédemment, la conductivité diminue avec l'augmentation du débit lors des crues. Cependant une dispersion des points importantes est observée. Plus le débit augmente, plus la dispersion est importante. De plus, la dispersion des points par rapport à la courbe théorique est sinusoïdale dans le temps : les valeurs les plus éloignées négativement correspondent aux périodes pluvieuses, en fin d'année, tandis que les valeurs éloignées positivement correspondent aux périodes sèches, en début d'année (Figure 33 Annexe sous-section VIII). Par ailleurs, les valeurs oscillent entre plus ou moins 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sauf après Maria où l'écart est plus important (environ 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cela montre une certaine robustesse de la relation, limitée cependant par l'évènement Maria.

A l'échelle de la crue, cette dispersion peut être expliquée principalement par la remontée progressive de la conductivité après une crue. Cette remontée progressive semble aboutir à un plateau, c'est-à-dire une valeur de conductivité stable au cours du temps, lorsqu'il n'y a pas de crue pendant une période suffisamment longue (de l'ordre de plusieurs jours). La durée de remontée semble influencée par les événements de crue qui précèdent. Cependant cette étude n'a pas pu démontrer quels en sont les paramètres. Ici la durée de la remontée varie entre environ quelques heures et trois jours. En revanche, la remontée de la conductivité s'arrête si une crue se produit à nouveau. C'est pourquoi, après une crue, la valeur de la conductivité n'est pas forcément égale à celle d'avant crue (Figure 13b).

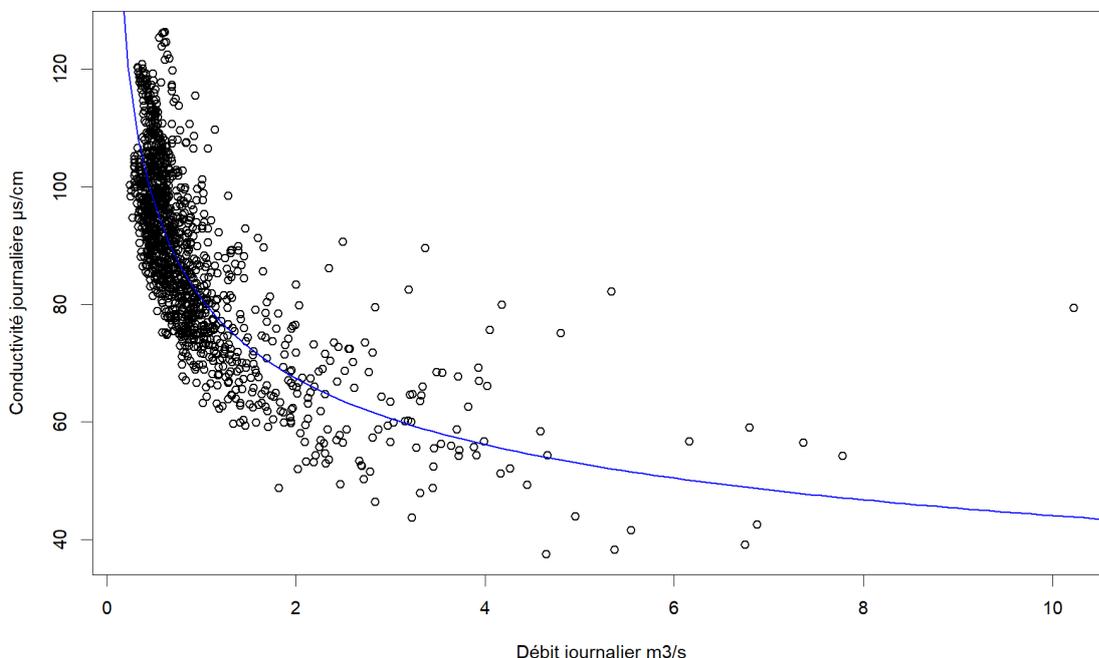


FIGURE 14 – Relation conductivité/débit à l'échelle journalière entre 2016 et 2019 ($y = 80.926 \times x^{-0.264}$ $R^2=0,66$).

3.2.3 Recherche des pôles de conductivité ESO et ESU

Le modèle hydrologique classique indique qu'en période d'étiage seules les ESO alimentent la rivière. L'étude de la conductivité en période d'étiage peut donc donner des informations sur les sources de l'écoulement de la rivière Pérou, en fonction de la signature de conductivité.

Cependant la remontée progressive de la conductivité en période d'étiage implique une large gamme de valeurs possibles pour la conductivité ESO. De plus, chaque période d'étiage est différente. C'est pourquoi une valeur de conductivité ESO a été calculée pour chaque période d'étiage. Cette valeur correspond au maximum de conductivité pour la période d'étiage considérée. La remontée de conductivité étant croissante, le maximum de conductivité se trouve au niveau du plateau, juste avant le début de la crue suivante.

La Figure 15 représente l'évolution des valeurs de conductivité ESO entre 2016 et 2019. La moyenne de ces valeurs est $89,7 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, les valeurs de conductivité ESO ne sont pas constante au cours du temps. En effet, la gamme de valeurs est entre $70 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $127 \mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur la plus élevée est calculée lors de l'évènement cyclonique Maria puis les valeurs se rapprochent de la moyenne à partir du début de l'année 2018.

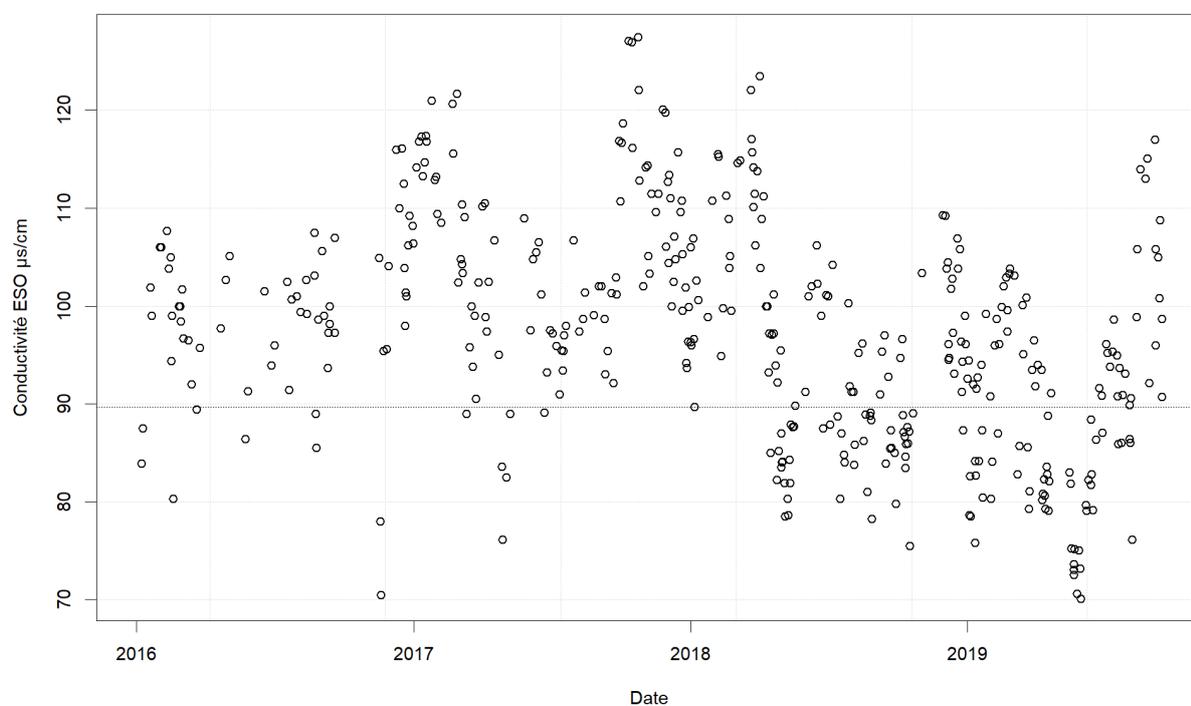


FIGURE 15 – Évolution des valeurs de conductivité ESO entre 2016 et 2019 (moyenne en ligne pointillée).

La variation du débit ESO n'est pas non plus constante dans le temps. Ainsi nous avons cherché la relation entre la conductivité ESO et le débit ESO correspondant (Figure 16). La tendance est que plus le débit ESO est grand, plus la conductivité ESO diminue. Cependant, comme pour la relation générale de la conductivité en fonction du débit, une forte dispersion des points est observée. On constate également que le débit ESO le plus faible n'est pas caractérisé par la valeur de conductivité ESO la plus faible. Ceci s'explique en parti par les évènements climatiques qui ce sont produits au cours de la période d'étude. Ainsi, la zone rouge correspond aux plus fortes valeurs de conductivité et de débits ESO. Cette zone est constituée principalement de données de 2017 après l'évènement Maria. La zone intermédiaire verte contient les données 2018 et l'autre partie des données de 2017 après Maria. Finalement, la zone bleue correspond aux plus faibles débits et valeurs de conductivité regroupant l'essentiel de l'année 2016 mais aussi des valeurs de 2019 et probablement une partie de valeurs 2017 avant Maria. Un retour progressif à un état d'avant évènement cyclonique peut être envisagé en 2019.

Enfin, ce dernier graphe montre principalement que la conductivité ESO n'est pas homogène. Déterminer une seule valeur de conductivité ESO pour toute la chronique semble donc difficile. Ceci démontre néanmoins que la résultante de la conductivité ESO provient d'un mélange d'eaux de signatures en conductivité différentes.

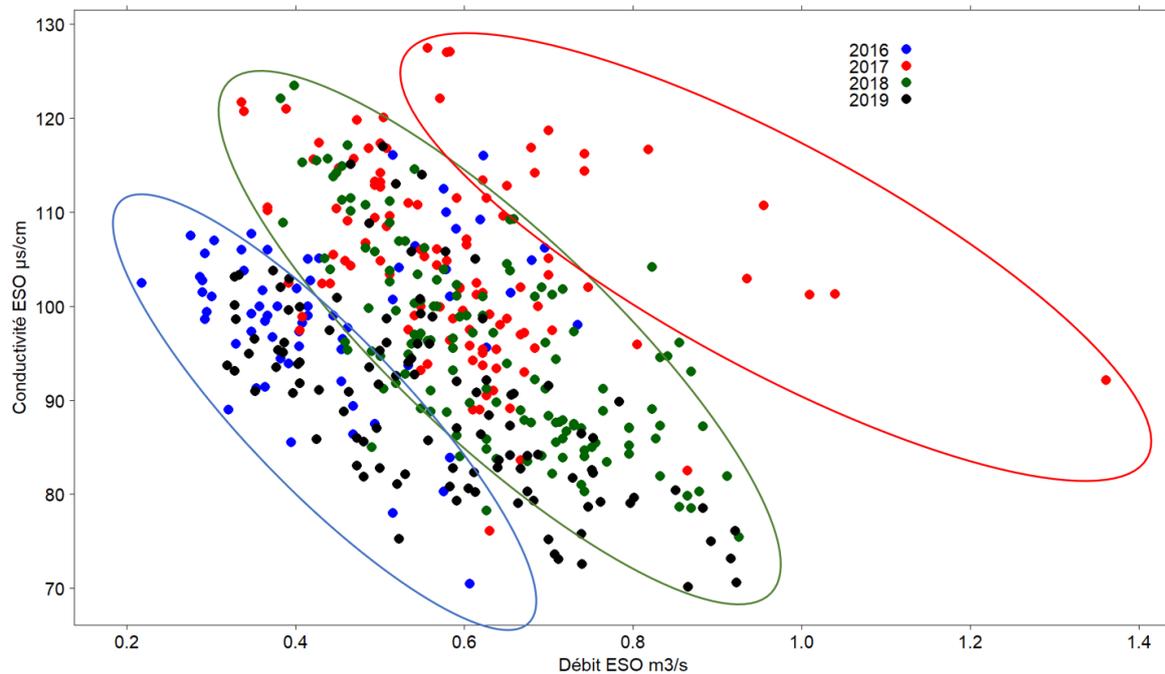


FIGURE 16 – Relation conductivité ESO en fonction du débit ESO.

Concernant la valeur de conductivité ESU, elle est tout aussi complexe à déterminer à l'échelle de la chronique entière. En effet, les ESU sont la résultante d'un mélange d'eau de provenance et de signature en conductivité très variable (eaux de pluie, eaux de ruissellement sur différent type de sol et occupation de sol), et différent en fonction de l'évènement climatique (durée et intensité de la pluie). A l'échelle de la crue, il n'est pas non plus possible de déterminer cette valeur.

Plusieurs valeurs de conductivité ESU ont néanmoins été calculées à partir de la méthode de séparation d'hydrogramme basée sur la conductivité (Équation 9 et 10). A partir des débits ESO et ESU calculés précédemment et des valeurs de conductivité ESO (maximum de conductivité pour chaque période hors crue), nous avons calculé une valeur de conductivité ESU pour chaque valeur de débit ESU.

Cependant les résultats révèlent des valeurs de conductivité négatives. Cela peut s'expliquer par les incertitudes liées à la fois au calcul des débits ESO et ESU, ainsi qu'à l'approximation des valeurs de conductivité ESO. Finalement, aucune valeur de conductivité ESU n'a pu être déterminée dans cette étude.

3.3 Utilisation de la turbidité pour identifier la contribution ESU

Le deuxième traceur hydrologique utilisé dans cette étude est la turbidité. Une valeur de turbidité est mesurée lorsque des particules solides sont transportées dans le cours d'eau. Plus il y a de particules solides en suspension ou MES, plus l'eau est turbide. Les MES proviennent principalement de l'érosion des sols par les eaux de ruissellement. C'est pourquoi l'étude de la chronique de turbidité va pouvoir nous donner des informations concernant la contribution des ESU à l'écoulement de la rivière Pérou.

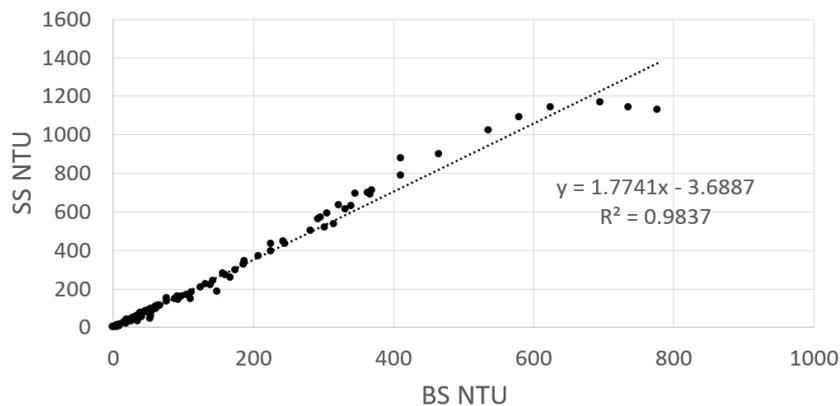
3.3.1 Nettoyage de la chronique de turbidité

Les données de turbidité brutes sont difficiles à interpréter car elles sont très bruitées. En effet, la mesure optique peut être facilement faussée par un obstacle (animal ou végétal) posté devant le capteur. Comme pour la conductivité, une méthode automatisée avec R a été mise en place pour corriger la chronique de turbidité afin qu'elle soit exploitable. Le but de cette méthode est qu'elle puisse être appliquée de la même manière à l'ensemble de la chronique.

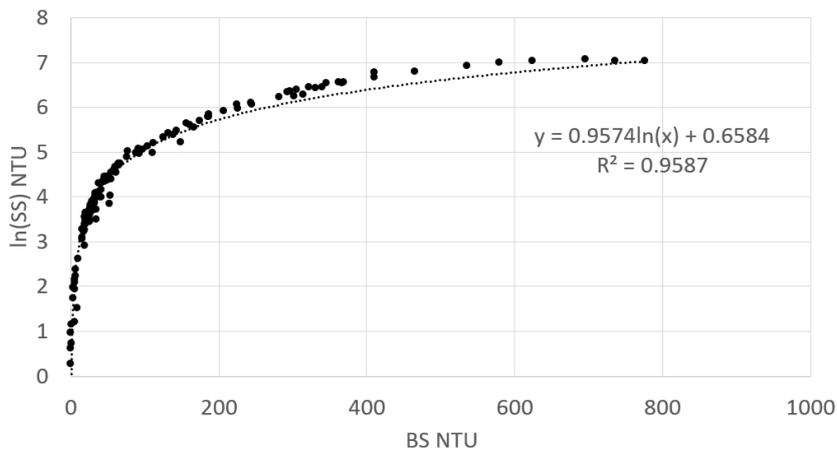
Le nettoyage de la chronique de turbidité a été fait, d'une part, à partir de l'observation des graphes de la turbidité brute et du débit en fonction du temps. Ainsi, on constate que pour les débits faibles, les valeurs de turbidité atteignent parfois des valeurs extrêmes et saturent (BS=7444 NTU, SS=4577 NTU, ratio=7444 NTU), ce qui empêche de visualiser correctement l'évolution de la chronique de turbidité. Il s'agit souvent de valeurs ponctuelles et ne sont pas observées pour les débits supérieurs à $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, la relation turbidité/débit est croissante : plus le débit augmente, plus la rivière est chargée en MES et par conséquent plus la turbidité est élevée. C'est pourquoi les valeurs de turbidité extrêmes mesurées pour des débits faibles sont aberrantes. On peut émettre l'hypothèse que lors d'un fort écoulement il y a moins de possibilité qu'un objet ou particule reste coincé sur le capteur. Par conséquent, les valeurs de turbidité mesurées pour des débits supérieurs à $9 \text{ m}^3/\text{s}$ sont plus sûrs.

D'autre part, la chronique de turbidité a aussi été nettoyée grâce aux prélèvements ponctuels en MES couplés aux données de turbidité brutes mesurées en continu par le capteur. Pour cela, on a sélectionné 9 crues (montée, pic et décrue) et 12 prélèvements ponctuels en faible débit (fin de crue ou débit de base) (Figure 5 et 6 Annexe sous-section IX). En 2017, la plus forte teneur en MES est $3,97 \text{ g/L}$, correspondant à un débit de $32,8 \text{ m}^3/\text{s}$ et une turbidité maximale de 1128 NTU pour le SS, 798 NTU pour le ratio et 777 NTU pour le BS (Figure 17a). Ainsi, on considère que toutes les valeurs supérieures à ces valeurs sont dues à l'obstruction du capteur et ne sont donc pas le témoin de la dynamique de la rivière en terme de transport solide.

Puis, une relation entre les paramètres BS et SS a été établie. Ainsi, les deux paramètres sont reliés par une relation linéaire jusqu'à un plateau de 1200 NTU à partir de BS=696 NTU (Figure 17a). Afin d'obtenir une relation sur toute la plage de valeurs de BS, une échelle logarithmique a été utilisée sur l'axe des ordonnées (Figure 17b).



(a)

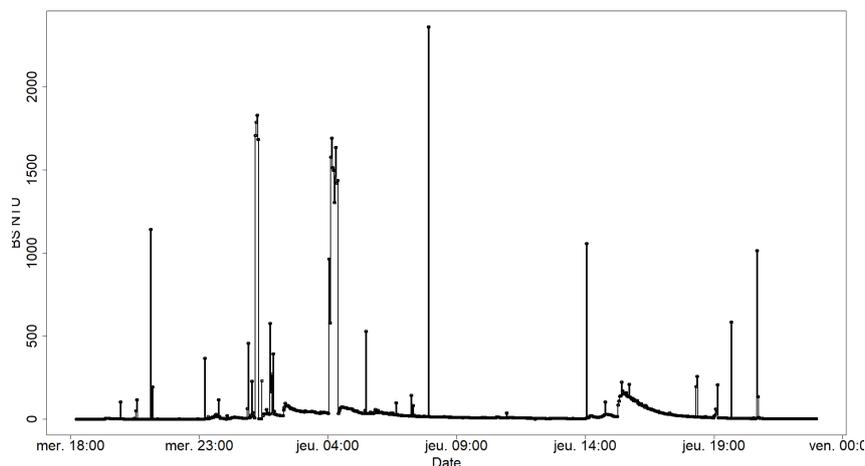


(b)

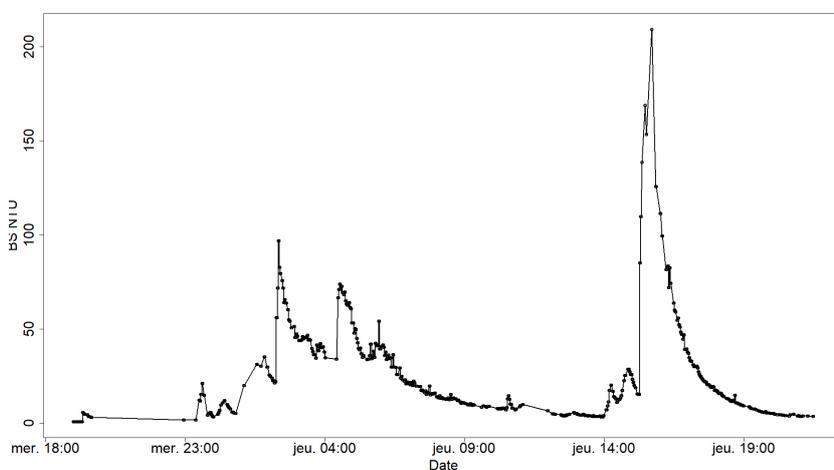
FIGURE 17 – Recherche d’une relation entre les paramètres BS et SS : (a) linéaire ; (b) logarithmique.

Toutefois, il est nécessaire de noter que cette relation repose sur une seule crue à partir de BS=400 NTU. En effet, les crues pour lesquelles les valeurs de NTU sont élevées sont plus rares. Ici, tout les points supérieurs à BS= 400 NTU ont été mesurés pendant la crue du 14/09/2017 (onde cyclonique). Cette crue semble avoir une dynamique différente en terme de transport solide d’après la Figure 36 sous-section IX, avec une augmentation très forte de la turbidité par rapport aux autres données. Cependant les données acquises ne permettent pas de comparer cette crue avec une crue similaire. En revanche, cette observation laisse supposer que la crue du 14/09/2017 a été suffisamment intense pour transporter une grande partie du stock de particules solides disponibles, qui n’ont donc pas été mobilisées durant les crues suivantes.

L’algorithme appliqué sur la chronique repose sur les observations précédentes (détails sous-section IX). Celui-ci est une succession de conditions : si une valeur ne remplit pas toutes les conditions alors elles est supprimées du jeu de données. La chronique de turbidité corrigée correspond finalement à la chronique de turbidité brute sans les valeurs extrêmes et aberrantes.



(a)



(b)

FIGURE 18 – Chronique de turbidité (BS) du 08/03/2017 au 10/03/2017 (a) brute ; (b) corrigée.

3.3.2 Relation turbidité/débit

La turbidité est très réactive au débit. Lors d'une crue, les ESU transportent les matières solides jusqu'au cours d'eau et l'augmentation du débit remobilise les particules déjà présentes dans le cours d'eau. De même, lors de la décrue, la turbidité redescend rapidement jusqu'aux valeurs d'avant crue. La Figure 19 illustre le fait que la dynamique de turbidité suit celle du débit. Pendant les périodes hors crue caractérisées par un débit de base, la turbidité atteint des valeurs très faibles (minimum BS = 0,05 NTU, SS = 0,12 NTU et ratio = 0,12 NTU). En moyenne, les valeurs de turbidité en débit de base sont de l'ordre de 2 à 20 NTU. Cependant, des valeurs plus importantes sont enregistrées, notamment lors du passage ponctuel d'un animal ou végétal près du capteur.

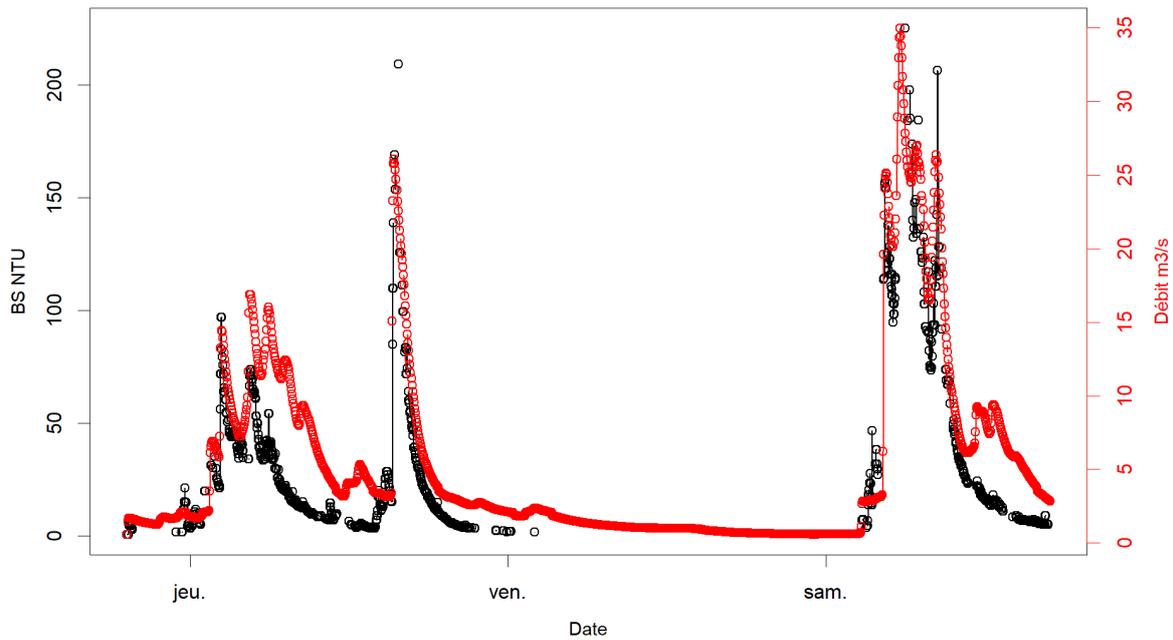


FIGURE 19 – Chronique de turbidité (BS) et de débit lors de deux crues du 08/03/2017 au 11/03/2017.

Des relations puissances ont été établies entre le débit et les trois paramètres de turbidité. Ces relations sont semblables et même égales entre le ratio et le SS. D'une manière générale, les valeurs sont conformes à la courbe de tendance. Plus le débit est élevé plus la turbidité augmente. Cependant, quelques points ne suivent pas la tendance générale et ont des valeurs de turbidité importantes. Ces valeurs correspondent à l'évènement cyclonique Maria et sont en marge de la dynamique générale. Ceci confirme les observations précédentes et montre que la crue durant Maria mobilise davantage les particules solides.

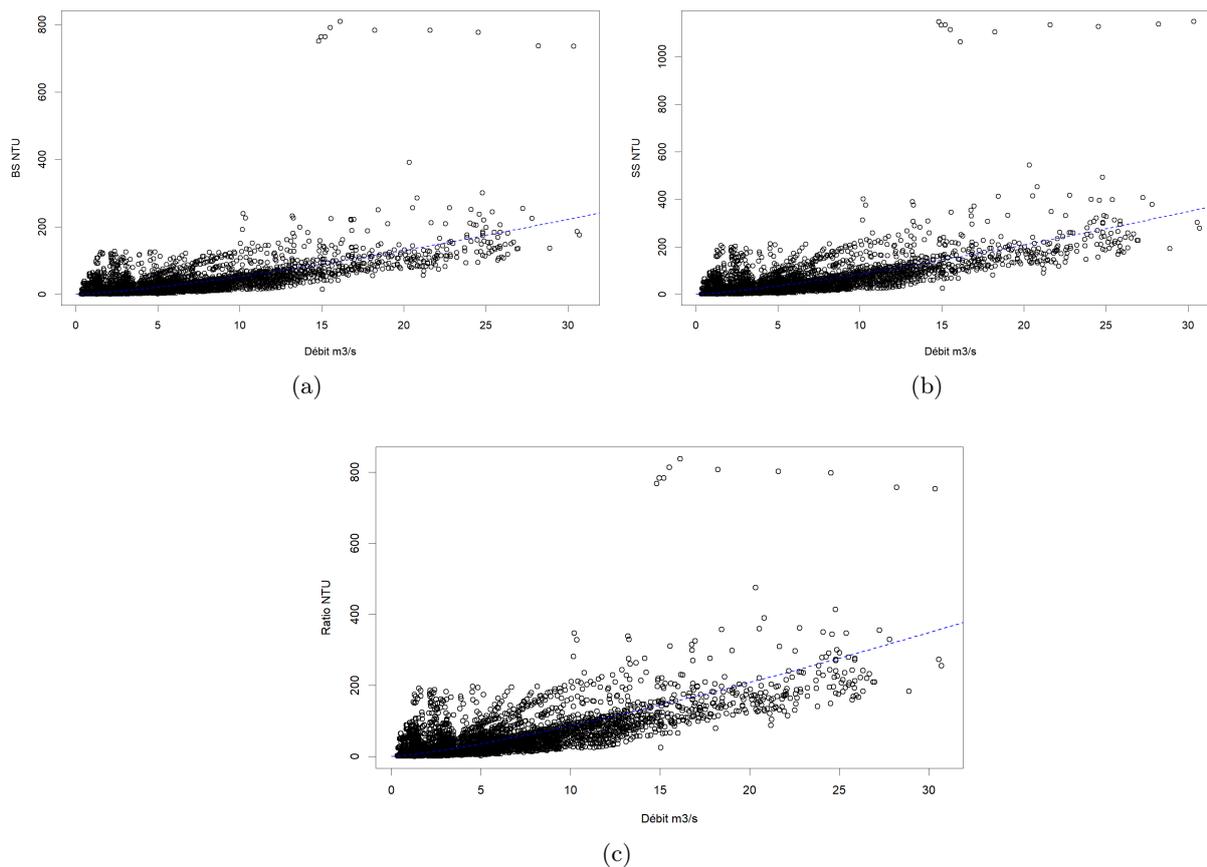


FIGURE 20 – Relation entre le débit et les paramètres de la turbidité et courbe de tendance (pointillés) : (a) BS ($y = 2.594 \times x^{1.309}$ $R^2=0,65$) ; (b) SS ($y = 4.655 \times x^{1.269}$ $R^2=0,62$) et (c) ratio ($y = 4.655 \times x^{1.269}$ $R^2=0,62$).

4 Discussion

4.1 Remise en question du modèle classique utilisé pour faire la déconvolution crue/hors crue

L'utilisation de la conductivité et de la turbidité comme traceurs hydrologiques a permis de déterminer des éléments de fonctionnement hydrologique du BV Pérou. L'analyse conjointe de ces traceurs va permettre de revoir les contributions des ESO et ESU calculées par la méthode hydrologique classique.

La conductivité et la turbidité sont deux variables très réactives au débit. Cependant la turbidité atteint rapidement une valeur seuil constante en hors crue, ce qui n'est pas le cas pour la conductivité. En effet, à l'échelle de la crue, la conductivité se caractérise par une remontée progressive qui aboutit parfois à un plateau. Cette remontée progressive dure plusieurs jours en fonction du débit de la crue précédente et des événements antérieurs. Ainsi, il y a toujours un retard entre la fin de la crue, déterminée avec la méthode du k constant, et le retour de la conductivité à sa valeur d'avant crue (Figure 21). En parallèle, la turbidité diminue très rapidement après le pic de crue et se stabilise à une valeur faible. Ce phénomène est constaté tout au long de la chronique. Cependant les données de turbidité sont souvent absentes pour de faibles débits ($< 5 \text{ m}^3/\text{s}$). Par conséquent, il n'est pas possible de visualiser l'évolution de la turbidité lorsque la remontée de conductivité est rapide (généralement pour des débits inférieurs à $5 \text{ m}^3/\text{s}$). En revanche, les résultats précédents montrent que pour des débits faibles, la turbidité est faible. Ainsi, on peut s'attendre à ce que la turbidité diminue rapidement jusqu'à une valeur faible même lors d'une remontée rapide de la conductivité.

Ainsi la Figure 21 illustre les observations précédentes : les fins de crues, déterminées par la méthode du k constant (lignes pointillées), ne concordent pas avec le retour de la turbidité et de la conductivité à leurs valeurs d'avant crue. Selon la turbidité seule, la crue semble se terminer dès le 10 mars pour la première crue et dès le 12 mars pour la seconde. Concernant la conductivité, celle-ci augmente mais n'atteint pas de plateau pour la première crue à cause d'un nouvel événement. En revanche, un plateau est atteint le mercredi 15 mars pour la seconde crue.

Ainsi la séparation d'hydrogramme réalisée avec la méthode du k constant n'est pas cohérente avec la dynamique des traceurs de turbidité et de conductivité. De plus, les valeurs de conductivité ESU calculées par la méthode basée sur la conductivité ne sont pas plausibles (valeurs négatives). Ceci montre également qu'il existe une incertitude sur les débits ESO et ESU calculés par la méthode classique. La confrontation des différentes données disponibles permet donc de remettre en question la méthode hydrologique classique choisie.

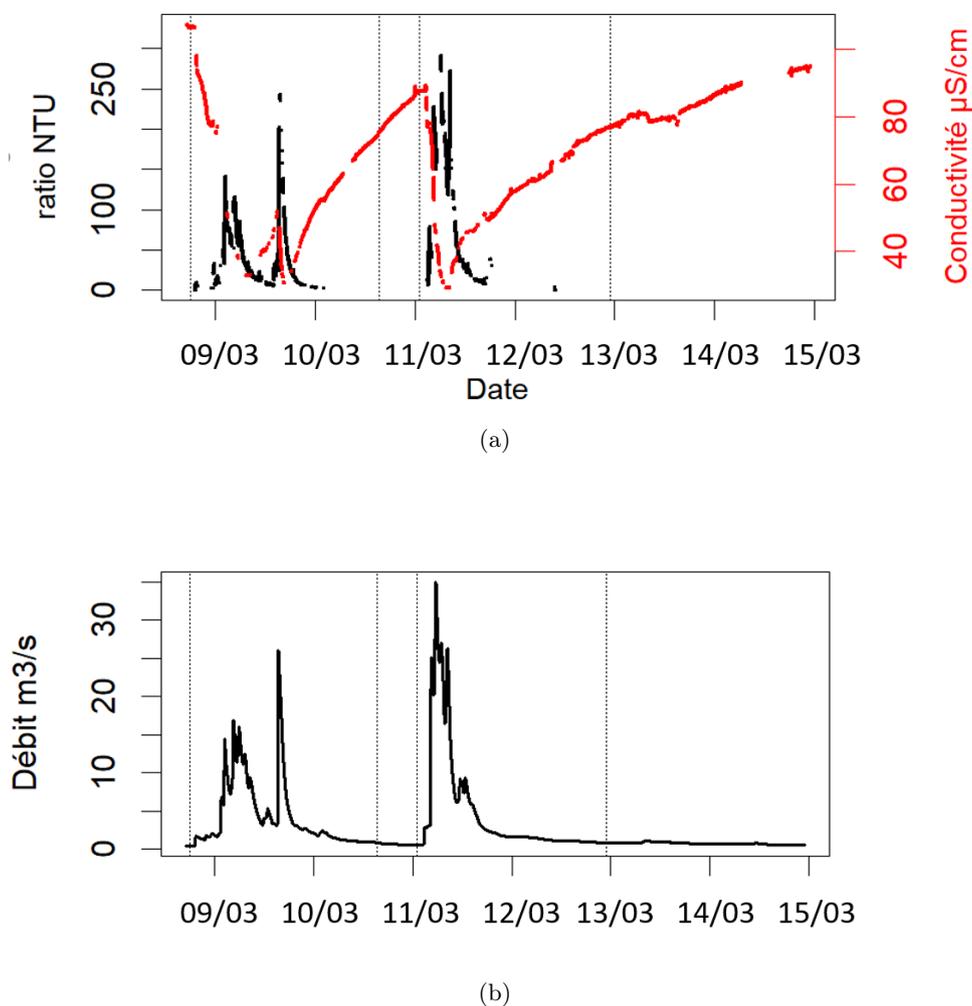


FIGURE 21 – Chronique de turbidité (ratio) et de conductivité du 08/03/2017 au 15/03/2017 (a) et débit associé (b) (délimitations des périodes de crues par la méthode du k constant en pointillés).

Cependant, lorsque la remontée de conductivité est plus rapide, on constate que les fins de crues calculées avec la méthode classique sont à peu près en accord avec la conductivité. Dans ce cas, la méthode classique reste valable. Néanmoins, il s'agit de la minorité des cas.

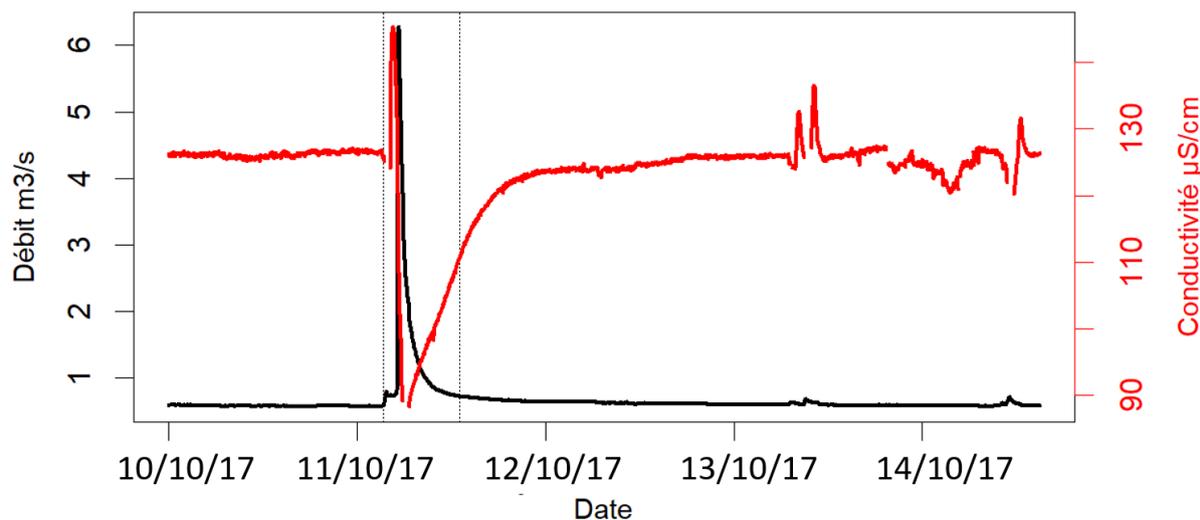


FIGURE 22 – Exemple d’une remontée rapide de conductivité concordant avec la fin de crue calculée par la méthode hydrologique classique.

4.2 Nouvelle hypothèse du fonctionnement hydrologique

Contrairement au débit et à la turbidité, la conductivité varie grandement entre la fin d’une crue et le début de la crue suivante. Ainsi, on distingue deux sous périodes en période d’étéage pour la conductivité : une remontée et parfois une stabilisation. Cette variabilité peut être expliquée par un mélange d’eau de surface et d’eau souterraine pendant les périodes d’étéage. Dans ce cas, la méthode classique sous estimerait le volume ESU pendant les périodes hors crue. Cependant, la turbidité est très faible en hors crue. Ainsi le cours d’eau n’est plus alimenté par des ESU pendant ces périodes. C’est pourquoi, il est nécessaire qu’un autre compartiment vienne alimenter le cours d’eau en plus de la surface et du souterrain. Ce compartiment est caractérisé par une eau peu ou pas turbide et par une conductivité moins élevée que celle des ESO. Ainsi, on peut supposer que le troisième compartiment est un compartiment de subsurface.

Le fonctionnement hydrologique du BV Pérou suit donc un modèle à trois réservoirs. Lors d’un événement de crue, les trois compartiments participent à l’écoulement, où la surface est prédominante (turbidité élevée). Après plusieurs jours sans crues, le souterrain est le seul compartiment qui alimente la rivière (faible débit et conductivité élevée et stable). Enfin, après une crue, le réservoir de subsurface se vide progressivement tandis que le débit ESO augmente en parallèle (conductivité croissante et diminution du débit total). Le temps de vidange du réservoir de subsurface varie donc de quelques heures à quelques jours en fonction de l’évènement pluvieux et du taux de saturation en eau des sols. Dans le cas où la vidange se limite à quelques heures, le fonctionnement hydrologique du BV peut être simplifié à seulement deux réservoirs ESO et ESU.

Conclusion et perspectives

Ce stage a consisté à évaluer les contributions des eaux de ruissellement et souterraines à l’écoulement de la rivière Pérou grâce à la combinaison d’une méthode hydrologique classique et de deux traceurs hydrologiques. Les principales conclusions de ce travail se structurent suivant trois points : i) le traitement des données des traceurs pour assurer l’acquisition de chroniques exploitables, ii) le lien entre les traceurs et le débit et iii) l’évolution sur le long terme de la dynamique des traceurs pour donner une proposition de fonctionnement hydrologique du BV.

Les traceurs choisis dans cette étude sont la conductivité et la turbidité pour leurs résolutions temporelles élevées et leurs fortes réactivités au débit. Cependant, les données de conductivité et de turbidité

nécessitent un traitement long et spécifique avant de pouvoir être exploitées. C'est pourquoi deux méthodologies de nettoyage des chroniques ont été développées lors de ce stage. Néanmoins, ce travail a permis d'expérimenter l'utilisation de la conductivité et de la turbidité sur une chronique longue, là où les travaux précédents les utilisaient uniquement à l'échelle de la crue.

La méthode hydrologique classique a permis de réaliser une séparation d'hydrogramme de 2016 à 2019. Les résultats de cette méthode montrent que les débits ESO ne sont pas constant dans le temps et que les débits ESU sont très variables puisqu'ils sont directement liés aux précipitations et au ruissellement. D'autre part l'étude de la conductivité montre que lors d'une crue la conductivité diminue puis augmente après le pic de crue (de l'ordre de 20 à 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en fonction du débit de crue). De plus, on observe que la remontée de la conductivité est lente après la crue (de quelques heures à environ 3 jours). Les plus fortes valeurs de conductivité semble être mesurées en début d'année (période sèche). En outre, les résultats ont montré qu'il est difficile de déterminer une valeur unique de conductivité ESO et une valeur unique de conductivité ESU à l'échelle des chroniques entières. Finalement, l'étude de la turbidité suggère que la contribution des eaux de surface à l'écoulement est concentrée au niveau des pics de débit. En effet, la turbidité diminue très rapidement après la crue.

La période d'étude est caractérisée par le passage du cyclone Maria en septembre 2017. La méthode hydrologique classique et les deux traceurs sont cohérents quant à l'influence de cet évènement cyclonique sur le fonctionnement hydrologique du BV. Le pic de débit ESU témoigne de l'amplitude de cet évènement. Cela a fortement impacté la turbidité puisque la crue du cyclone Maria semble suivre une dynamique différente de celle des autres évènements de crue. Enfin, l'augmentation des valeurs de conductivité ESO et des débits ESO de septembre 2017 jusqu'au début de l'année 2019 indique que les eaux souterraines sont davantage sollicitées sur cette période et que leur source est en partie différente. Cependant un retour progressif à l'état d'avant cyclone semble débuter en 2019. L'étude des années suivantes pourra permettre de confirmer ou non cette hypothèse.

En revanche, la dynamique des traceurs et les fins de crue délimitées avec la méthode classique ne sont pas toujours cohérents. L'hypothèse retenue est qu'un compartiment de subsurface participe également à l'écoulement entre deux crues, ce qui expliquerait la remontée progressive de la conductivité. Ce troisième compartiment remet donc en question la méthode classique utilisée pour le calcul des débits ESO et ESU. Cependant, cette méthode reste valable ponctuellement lorsque la remontée de la conductivité est rapide (quelques heures). Finalement cette étude démontre l'utilité des traceurs hydrologiques couplés avec une méthode hydrologique basée uniquement sur le débit.

Par la suite, il sera intéressant de comparer les données de concentration en CLD à l'exutoire du BV Pérou avec la nouvelle hypothèse de fonctionnement hydrologique. La vidange du compartiment de subsurface pourrait, par exemple, être à l'origine d'une dilution des concentrations en CLD. D'autre part, bien qu'un premier élément de réponse soit donné dans cette étude, la réponse de la conductivité après une crue n'est pas tout à fait comprise. C'est pourquoi une étude supplémentaire pourra se concentrer sur l'influence des crues qui précèdent les remontées de conductivité. Finalement, la méthode développée ici pour connaître les contributions ESO et ESU pourra être appliquée à d'autres BV, notamment le BV des Pères situé à côté du BV Pérou.

Références

- [Blume et al., 2007] Blume, T., Zehe, E., and Bronstert, A. (2007). Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5) :843–862.
- [Bonvallet and Dor, 2004] Bonvallet, N. and Dor, F. (2004). Insecticides organochlorés aux antilles : identification des dangers et valeurs toxicologiques de référence (vtr). état des connaissances. *Institut de Veille Sanitaire (InVS)*.
- [Cabidoche et al., 2009] Cabidoche, Y.-M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., and 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.

- [Cano-Paoli et al., 2019] Cano-Paoli, K., Chiogna, G., and Bellin, A. (2019). Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in alpine headwaters. *Science of the Total Environment*, 685 :37–49.
- [Charlier et al., 2011] Charlier, J.-B., Lachassagne, P., Ladouche, B., Cattan, P., Moussa, R., and Voltz, M. (2011). Structure and hydrogeological functioning of an insular tropical humid andesitic volcanic watershed : A multi-disciplinary experimental approach. *Journal of Hydrology*, 398(3-4) :155–170.
- [Coat et al., 2011] Coat, S., Monti, D., Legendre, P., Bouchon, C., Massat, F., and Lepoint, G. (2011). Organochlorine pollution in tropical rivers (guadeloupe) : role of ecological factors in food web bioaccumulation. *Environmental Pollution*, 159(6) :1692–1701.
- [Conner and De Visser, 1992] Conner, C. and De Visser, A. (1992). A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, 108(2) :151–159.
- [Crabit et al., 2016] Crabit, A., Cattan, P., Colin, F., and 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.
- [CRE, 2021] CRE (2021). CRE. <https://crelaurentides.org/>.
- [Crosset et al., 2018] Crosset, M. et al. (2018). Dynamique de contamination en chlordécone en phases dissoute et particulaire en rivière.
- [DAAF, 2021] DAAF, G. (2021). Carte des teneurs en chlordécone de guadeloupe. <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/>.
- [Dawson et al., 1979] Dawson, G., Weimer, W., and Shupe, S. (1979). Kepone—a case study of a persistent material. *Water-American Institute of Chemical Engineers*.
- [Desaiah, 1981] Desaiah, D. (1981). Interaction of chlordecone with biological membranes. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A Current Issues*, 8(5-6) :719–730.
- [Evans and Davies, 1998] Evans, C. and Davies, T. D. (1998). Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research*, 34(1) :129–137.
- [Fernandez-Bayo et al., 2013] Fernandez-Bayo, J. D., Saison, C., Geniez, C., Voltz, M., Vereecken, H., and Berns, A. E. (2013). Sorption characteristics of chlordecone and cadusafos in tropical agricultural soils. *Current Organic Chemistry*, 17(24) :2976–2984.
- [Howard et al., 2017] Howard, P. H., Michalenko, E. M., Jarvis, W. F., Basu, D. K., Sage, G. W., Meylan, W. M., Beauman, J. A., and Gray, D. A. (2017). *Handbook of environmental fate and exposure data : for organic chemicals*. Routledge.
- [Kenaga, 1980] Kenaga, E. E. (1980). Predicted bioconcentration factors and soil sorption coefficients of pesticides and other chemicals. *Ecotoxicology and environmental safety*, 4(1) :26–38.
- [Lallas, 2001] Lallas, P. L. (2001). The stockholm convention on persistent organic pollutants. *American Journal of International Law*, 95(3) :692–708.
- [Legifrance, 2021] Legifrance (2021). <https://www.legifrance.gouv.fr/>.
- [Mottes et al., 2018] Mottes, C., Della Rossa, P., Defontaine, L., Lesueur Jannoyer, M., Plet, J., Charlier, J.-B., Woignier, T., Adele, G., Tailame, A.-L., Arnaud, L., et al. (2018). Variabilité spatiale et temporelle de la pollution des cours d’eau du galion par la chlordécone : quels résultats pour la gestion des territoires pollués ? BRGM.
- [Multigner et al., 2010] Multigner, L., Ndong, J. R., Giusti, A., Romana, M., Delacroix-Maillard, H., Cordier, S., Jégou, B., Thome, J. P., and Blanchet, P. (2010). Chlordecone exposure and risk of prostate cancer. *Journal of clinical oncology*, 28(21) :3457–3462.
- [Pellerin et al., 2008] Pellerin, B. A., Wollheim, W. M., Feng, X., and Vörösmarty, C. J. (2008). The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments. *Hydrological Processes : An International Journal*, 22(12) :1810–1818.
- [Ponchant et al., 2020] Ponchant, L., Samouelian, A., Andrieux, P., and Voltz, M. (2020). *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*. PhD thesis, INRAE.
- [PPDB, 2021] PPDB (2021). PPDB - Pesticides Properties DataBase. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/>.

- [Ribolzi et al., 2016] Ribolzi, O., Evrard, O., Huon, S., Rochelle-Newall, E., Henri-Des-Tureaux, T., Silveira, N., Thammahacksac, C., and Sengtaheuanghoung, O. (2016). Use of fallout radionuclides (^{7}Be , ^{210}Pb) to estimate resuspension of *Escherichia coli* from streambed sediments during floods in a tropical montane catchment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(4) :3427–3435.
- [Rocle et al., 2009] Rocle, N., Gresser, J., Nivet, A., Marie, P., Pinte, K., Devault, D., and de la Foye, F. (2009). *Gestion agro-environnementale intégrée du risque de contamination de la ressource halieutique par les produits phytopharmaceutiques : cas du transfert de la Chlordécone dans la baie du Robert, site atelier de la baie du Robert Martinique, FWI*. PhD thesis, irstea.
- [Snegaroff et al., 1977] Snegaroff, J. et al. (1977). Les résidus d’insecticides organochlores dans les sols et les rivières de la région bananière de Guadeloupe.
- [Voltz and Louchart, 2001] Voltz, M. and Louchart, X. (2001). Les facteurs-clés de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface. *Ingénieries Numéro Spécial «Phytosanitaires : transfert, diagnostic et solutions correctives*, pages 45–54.
- [Walling, 1986] Walling, D. (1986). Solute in river systems. *Solute processes*, pages 251–327.
- [Zuecco et al., 2016] Zuecco, G., Penna, D., Borga, M., and Van Meerveld, H. (2016). A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. *Hydrological Processes*, 30(9) :1449–1466.

Annexes

I Carte des teneurs en CLD des sols de Guadeloupe

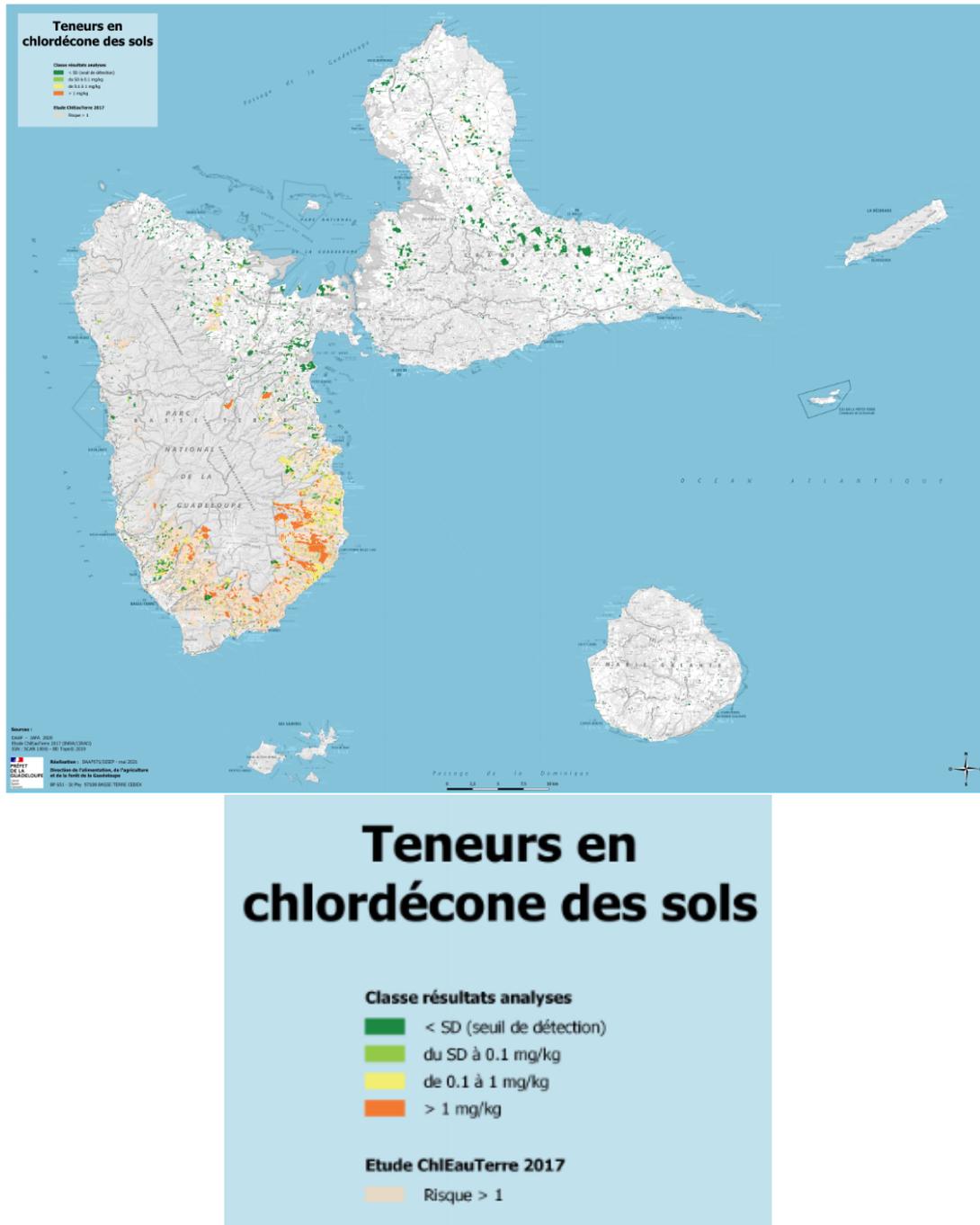


FIGURE 23 – Carte des teneurs en CLD mesurées dans les sols de Guadeloupe [DAAF, 2021].

II Gamme de valeurs de la conductivité des sources sur le secteur Capesterre-Belle-Eau

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

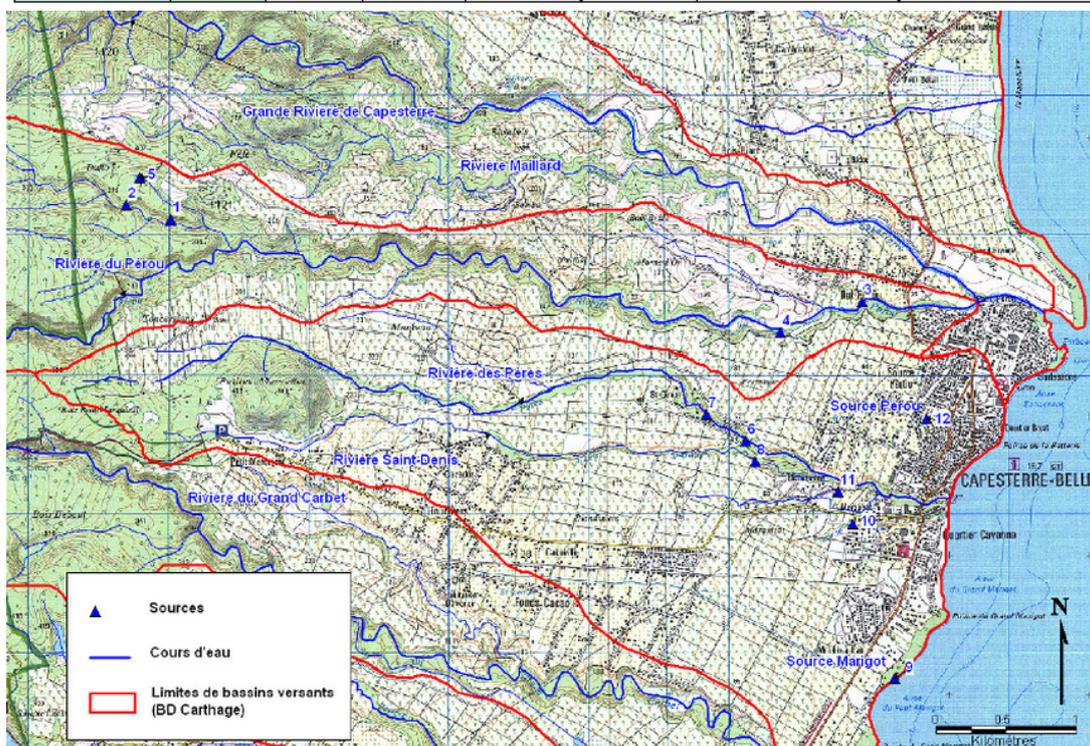


FIGURE 24 – Caractéristiques des sources identifiées dans le secteur de Capesterre-Belle-Eau (BRGM) : Localisation GPS, mesures physico-chimiques in situ (21-24 avril 2008), contexte d'urgence (RG = rive gauche, RD = rive droite).

III Relation MES/débit

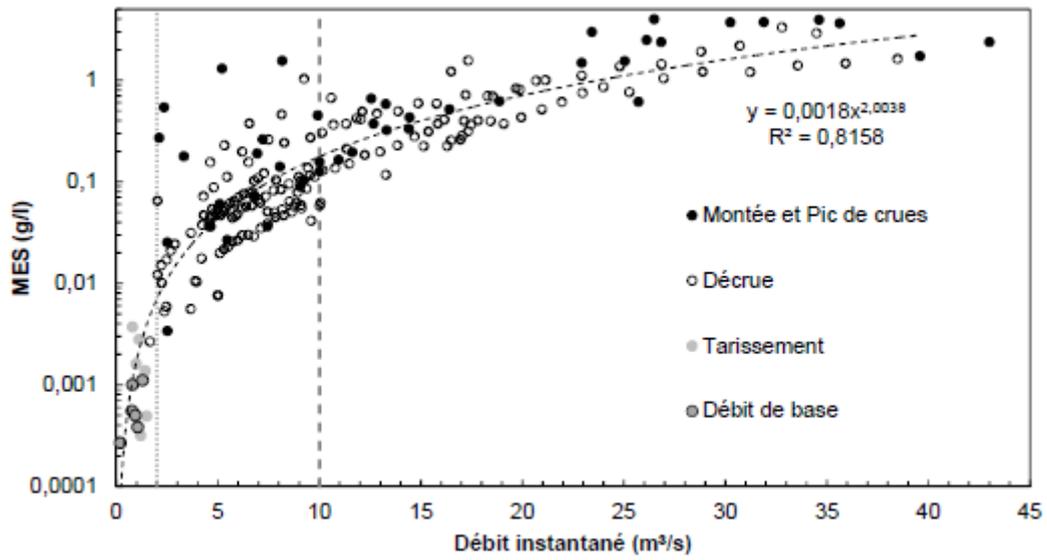


FIGURE 25 – Dynamique de concentration en MES en fonction du débit de la rivière Pérou [Ponchant et al., 2020].

IV Statistiques des débits ESO

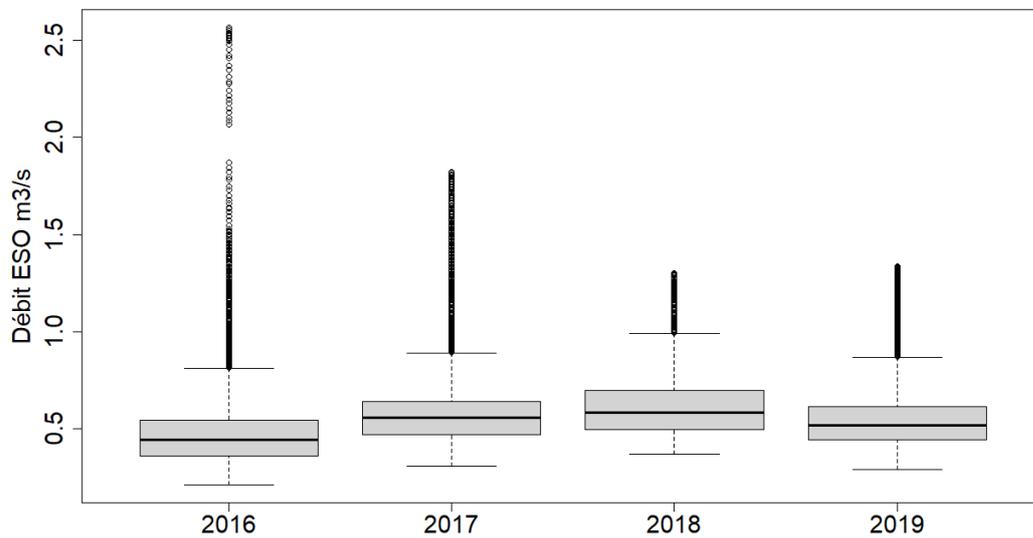
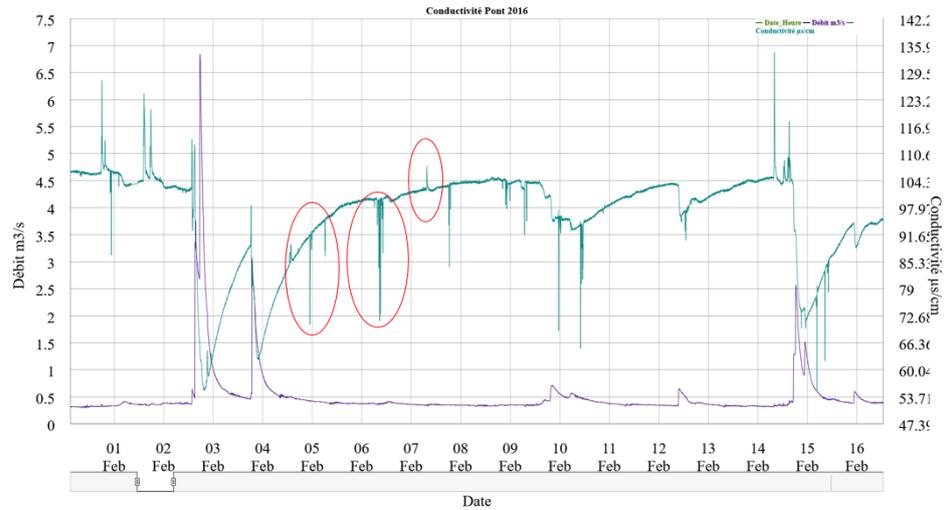
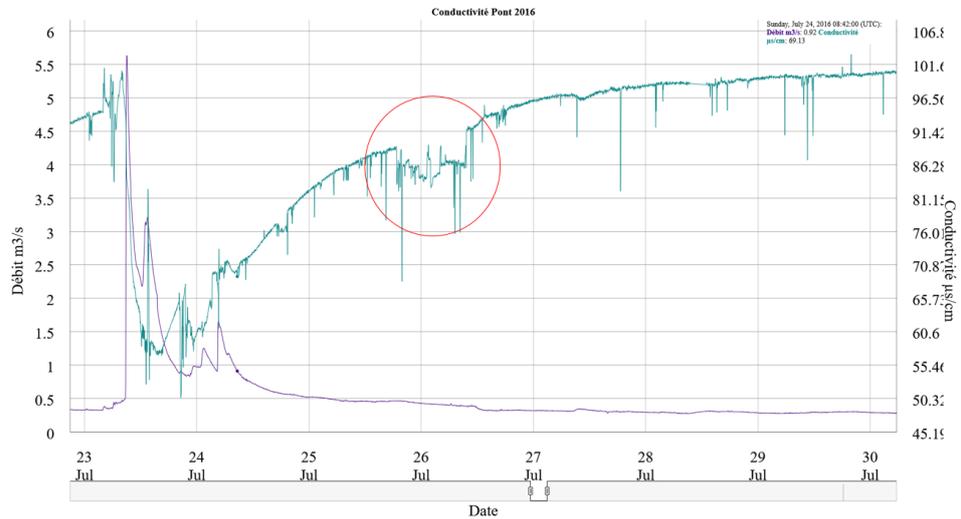


FIGURE 26 – Statistiques annuelles des débits ESO.

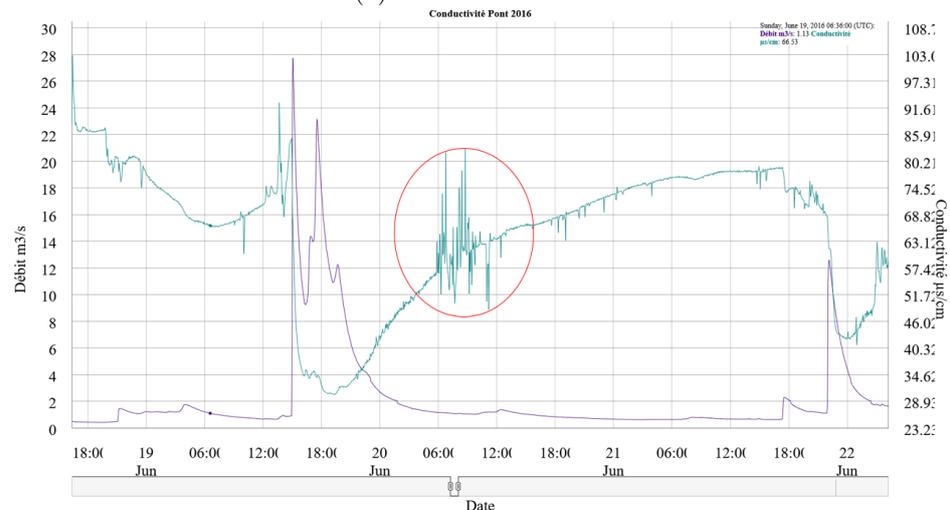
V Type d'erreur de la chronique de conductivité brute



(a)



(b)



(c)

FIGURE 27 – Chroniques de conductivité (vert) et de débit (violet) 2016 et types d'erreur : (a) Points aberrants (pics vers le haut et vers le bas); (b) Décrochage; (c) Bruit.

VI Dispersion des données brutes de conductivité

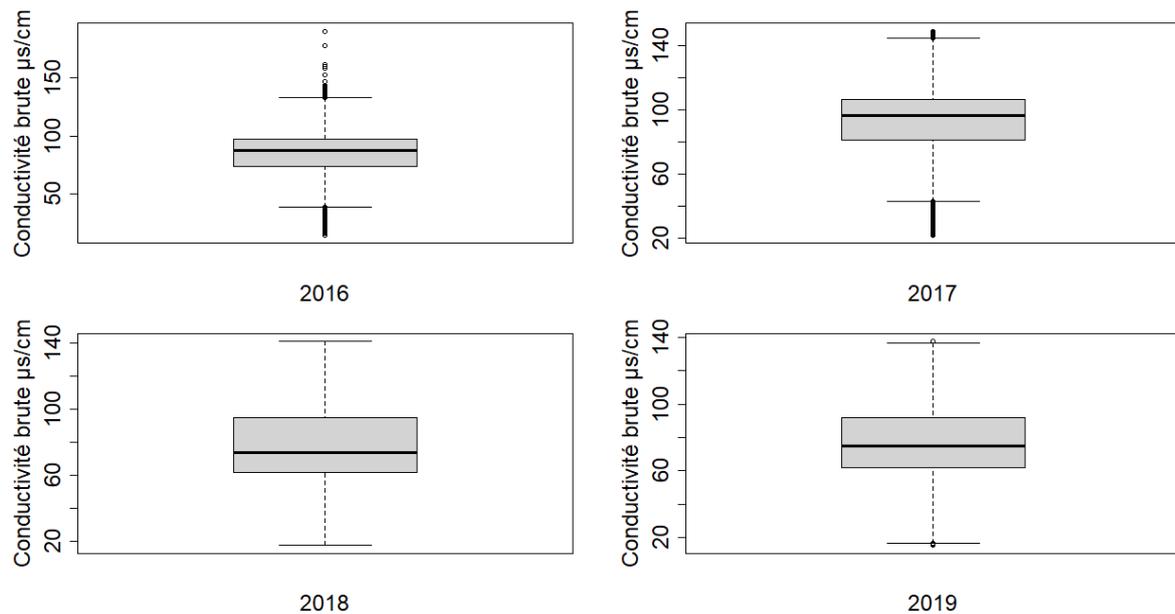


FIGURE 28 – Dispersion des données brutes de conductivité de 2016 à 2019.

VII Méthode de nettoyage de la chronique de conductivité

La méthode développée lors de ce stage se déroule en 5 étapes (Figure 31). L'inventaire des décrochages constitue la première étape (A. Étape 0). Il s'agit de déterminer les périodes de décrochages avec une date de début et une date de fin. Un offset est associé à chaque période correspondant à la différence de valeur de conductivité entre le premier point du décrochage et le dernier point avant le décrochage (Figure 30). La correction du décrochage est donc réalisée par l'addition de ce offset à la valeur de conductivité sur la période de décrochage (Figure 29).

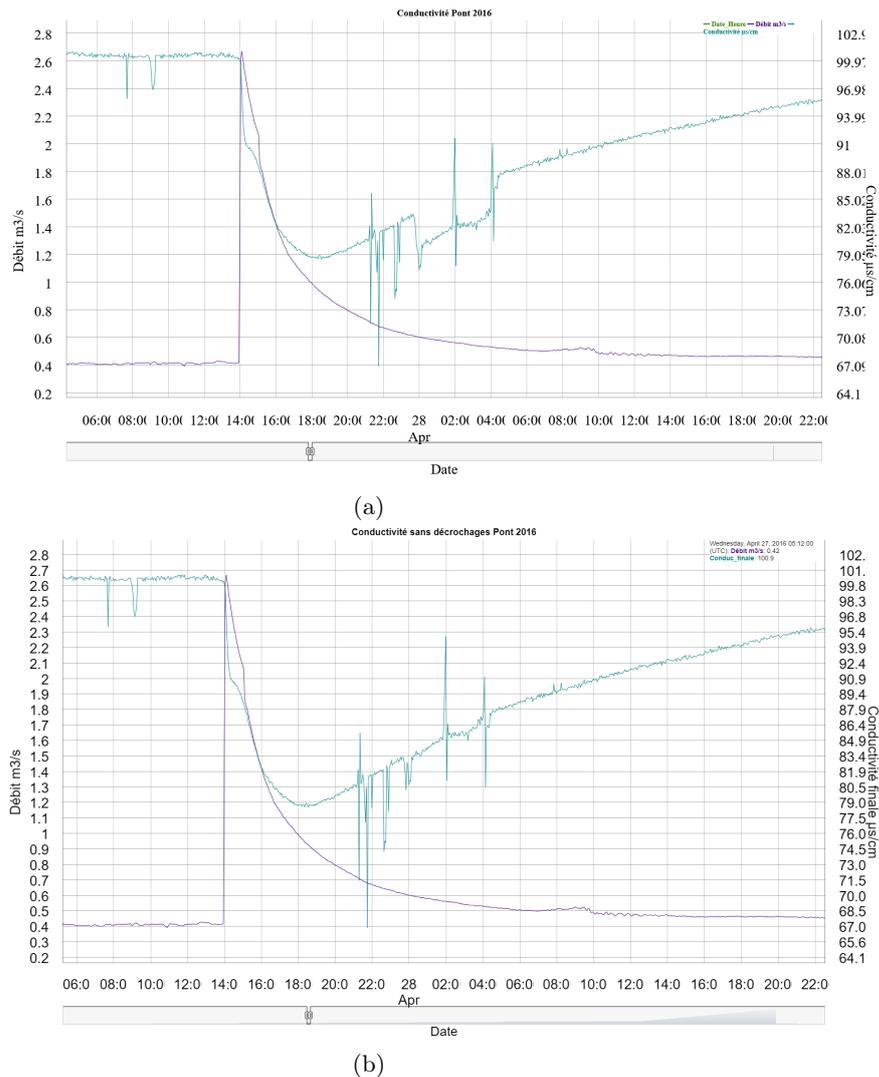


FIGURE 29 – Exemple de correction d’un décrochage (28/04/2016) (a) avant la correction ; (b) après la correction.

	Date_début	Date_fin	offset
1	2016-03-28 05:00:00	2016-03-28 07:42:00	6.27
2	2016-04-27 23:54:00	2016-04-28 04:00:00	3.30
3	2016-05-31 23:54:00	2016-06-01 04:15:00	4.84
4	2016-06-02 20:00:00	2016-06-02 22:54:00	6.10
5	2016-06-02 23:30:00	2016-06-03 07:48:00	5.60
6	2016-06-04 13:21:00	2016-06-04 14:24:00	12.24
7	2016-06-28 19:15:00	2016-06-28 21:48:00	2.63
8	2016-07-08 11:27:00	2016-07-08 13:18:00	1.80
9	2016-08-05 01:18:00	2016-08-05 02:09:00	11.97

FIGURE 30 – Extrait du tableau des périodes de décrochage et offset associés.

Les données de conductivité corrigées des décrochages sont ensuite associées aux valeurs de débit correspondantes grâce à la fonction *merge* de R (B. Étape 1).

Une médiane glissante est calculée sur deux heures afin de lisser les valeurs extrêmes (C. Étape 2).

Les étapes suivantes correspondent à une succession de conditions permettant de garder ou non un

point. Dans l'étape D. Étape 3, il s'agit de comparer la valeur du point i avec la valeur de la médiane au point i . La valeur est gardée si elle ne dépasse pas un certain seuil (Figure 31). Les seuils indiqués sur la Figure 31 ont été calés de manière empirique sur une portion de chronique présentant des valeurs aberrantes.

Les pics vers le haut font l'objet d'un traitement particulier (E. Étape 4) afin de pouvoir conserver les pics vers le haut avant une crue. Ce traitement permet de conserver seulement les pics constitués de plusieurs points (au moins cinq) et de supprimer les pics ponctuels. En effet, les pics ponctuels sont considérés comme aberrants contrairement aux pics composés de plusieurs points.

Finalement, quelques périodes n'ont pas pu être traitées par cette méthode et ont dû être supprimées. La Table 4 récapitule les périodes supprimées sur la période 2016-2019.

TABLE 4 – Périodes de données supprimées de 2016 à 2019.

Date et heure
24/06/2016 21 :45 au 25/06/2016 12 :39
25/06/2016 23 :57 au 26/06/2016 07 :12
20/08/2016 06 :39 au 22/08/2016 4 :15
19/09/2016 15 :18 au 10/11/2016 21 :48
14/03/2017 06 :33 au 14/03/2017 17 :48
04/06/2017 06 :24 au 04/06/2017 08 :06
04/06/2017 10 :21 au 04/06/2017 13 :24
19/09/2017 11 :30 au 20/09/2017 15 :45
21/09/2017 08 :09 au 21/09/2017 16 :30

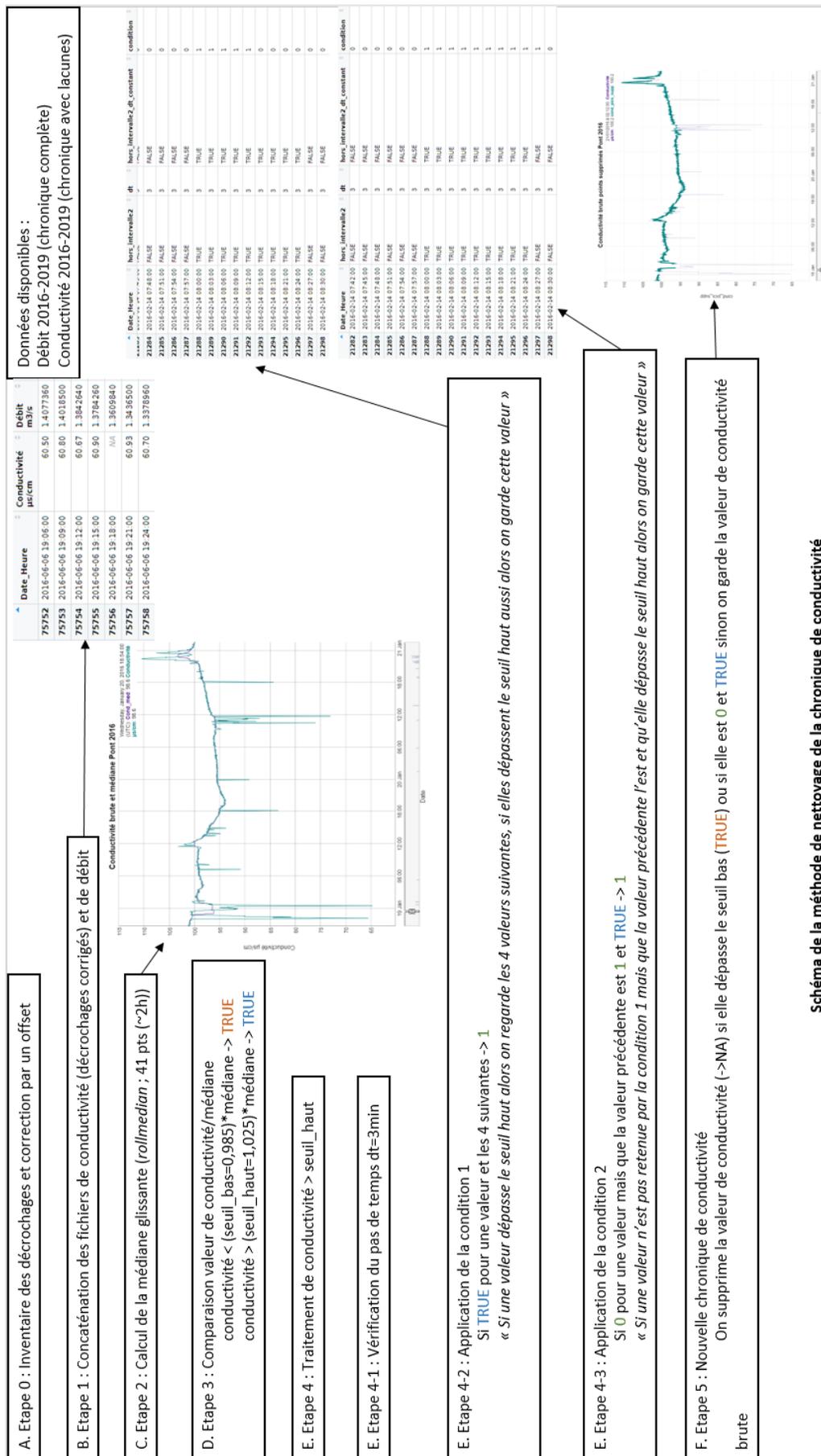


FIGURE 31 – Schéma de la méthode de nettoyage de la chronique de conductivité.

Script R utilisé pour le nettoyage de la chronique de conductivité 2016

```

require(readxl)
require(xts)
require(dygraphs)
require(tidyr)
require (dplyr)

rm(list=ls())
## Correction des décrochages 2016
#Lecture des fichiers brutes

DATA1=read.table(file ="IN/pont_conduc_2016csv.csv", sep = ";", header=TRUE)
DATA2=read.table(file ="IN/pont_debit_2016_modifcsv.csv", sep = ";", header=TRUE)

DATA1[,1] = as.POSIXct(DATA1[,1],tz = "UTC")
DATA2[,1] = as.POSIXct(DATA2[,1],tz = "UTC")
DATA1=DATA1[-c(3)]
DATA2=DATA2[-c(3)]

#Regroupement de la conductivité et du débit dans le même fichier

DATA= merge(unique(DATA1),DATA2, by.x="Date_Heure", by.y="Date.Heure", all.x= FALSE,
            all.y= TRUE, sort= TRUE)

#ajustement de la forme du fichier

colnames(DATA) [2] = "Conductivité µs/cm"
colnames(DATA) [3] = "Débit m3/s"

#lecture du excel avec les périodes de décrochages

decroch=read_excel("IN/decrochages_2016.xlsx", range="D1:F21")
decroch=decroch[!is.na(decroch$offset),]#suppression des lignes contenant un NA

#Correction de la conductivité avec le offset

for (i in 1:nrow(decroch)){
  DATA_filter=between(DATA$Date_Heure, decroch$Date_début[i],decroch$Date_fin[i])
  c<-decroch$offset[i]
  DATA[,i+3]=with(DATA, ifelse(DATA_filter==TRUE, DATA$`Conductivité µs/cm` + c,""))
}

DATA_decroch=unite(DATA,Conductivité_offset,V4, V5,V6,V7,V8,V9,V10, V11,
                  V12, V13, V14,V15,V16,V17,V18,V19, sep="")

```

```

DATA_decroch$Conduc_finale=with(DATA_decroch,ifelse(DATA_decroch$Conductivité_offset=="",
                                                    DATA_decroch$`Conductivité µs/cm`,
                                                    DATA_decroch$Conductivité_offset))

DATA_decroch$Conduc_finale=as.numeric(DATA_decroch$Conduc_finale)

DATA_final=DATA_decroch[,-c(2,4)]

#Ecriture du contenu dans un fichier csv
write.table(DATA_final, file="OUT/conductivite_2016.csv", sep=",", col.names = TRUE,
            row.names = FALSE)

## Correction de la chronique entière 2016
rm(list=ls())

#Lecture du fichier csv contenant la date et l'heure, le débit et
#la conductivité brute corrigée des décrochages

DATA=read.table(file="OUT/conductivite_2016.csv", sep=",", header=TRUE)
DATA[,1] = as.POSIXct(DATA[,1],tz = "UTC")

#ajustement de la forme du fichier

colnames(DATA)[2] = "Débit m3/s"
colnames(DATA)[3] = "Conductivité µs/cm"

#Médiane mobile
Cond_med <- rollmedian(DATA$`Conductivité µs/cm`,41, fill=NA)
DATA$Cond_med=with(DATA,Cond_med)

#Colonne qui détermine si la valeur de conductivité appartient à un intervalle
#autour de la médiane
seuil_haut=1.025
seuil_bas=0.985
DATA$hors_intervalle1=with(DATA,ifelse(DATA$`Conductivité µs/cm`<seuil_bas*DATA$Cond_med,
                                       TRUE,FALSE))

DATA$hors_intervalle2=with(DATA,ifelse(DATA$`Conductivité µs/cm`>seuil_haut*DATA$Cond_med,
                                       TRUE, FALSE))

hors_intervalle=DATA[,-c(2,3,4,5)]

#suppression des lignes contenant un NA
hors_intervalle=hors_intervalle[!is.na(hors_intervalle$hors_intervalle),]

#Verification du pas de temps de 3 min entre les TRUE de la colonne hors_intervalle2
hors_intervalle["dt"]=" "
hors_intervalle["hors_intervalle2_dt_constant"]=" "

for (i in 1:(nrow(hors_intervalle))){
  hors_intervalle$dt[i]=difftime(hors_intervalle$Date_Heure[i+1],
                                hors_intervalle$Date_Heure[i], units="mins")
}

```

```

}

hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant=with(hors_intervalle,
                                                    ifelse(hors_intervalle$dt==3 &
                                                          TRUE, FALSE))

#Elimination des points aberrants suivant 2 conditions

hors_intervalle["condition"]="
#si la valeur de conductivité est en dessous ou au dessus de la médiane et
#que les 5 valeurs suivantes aussi alors condition1=1 sinon 0

for (i in 1:nrow(hors_intervalle)){
  if (hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i]==TRUE &
      hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i+1]==TRUE &
      hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i+2]==TRUE
      & hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i+3]==TRUE &
      hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i+4]==TRUE)
    {hors_intervalle$condition[i]=1
    }
  else {hors_intervalle$condition[i]=0}
}

for (i in 2:nrow(hors_intervalle)){
  if (hors_intervalle$condition[i]==0 & hors_intervalle$condition[i-1]==1 &
      hors_intervalle$hors_intervalle2_dt_constant[i-1]==TRUE)
    {hors_intervalle$condition[i]=1}
}

DATA=merge(DATA,hors_intervalle, by.x="Date_Heure", by.y="Date_Heure", all= TRUE,
           sort= TRUE)

DATA$cond_pics_supp=with(DATA, ifelse(DATA$hors_intervalle1==TRUE |
                                       (DATA$condition==0 &
                                        DATA$hors_intervalle2_dt_constant==TRUE),
                                       NA, DATA$`Conductivité µs/cm`))

#Suppression des valeurs de conductivité sur les périodes très bruitées (pas de correction)

periodes_supp=read_excel("IN/periodes_supp_2016.xlsx")

for (i in 1:nrow(periodes_supp)){
  DATA_filter=between(DATA$Date_Heure, periodes_supp$Date_début[i],periodes_supp$Date_fin[i])
  DATA$cond_pics_supp=with(DATA, ifelse(DATA_filter==TRUE, NA,DATA$cond_pics_supp))
}

colnames(DATA)[11] = "Conductivité finale µs/cm"

##Ecriture de la conductivité finale et du débit dans un csv
write.table(DATA[,-c(3,4,5,6,7,8,9,10)], file="OUT/conductivite_debit_finale2016.csv",
           sep=",",col.names = TRUE,row.names = FALSE)

```

VIII Relation conductivité/débit

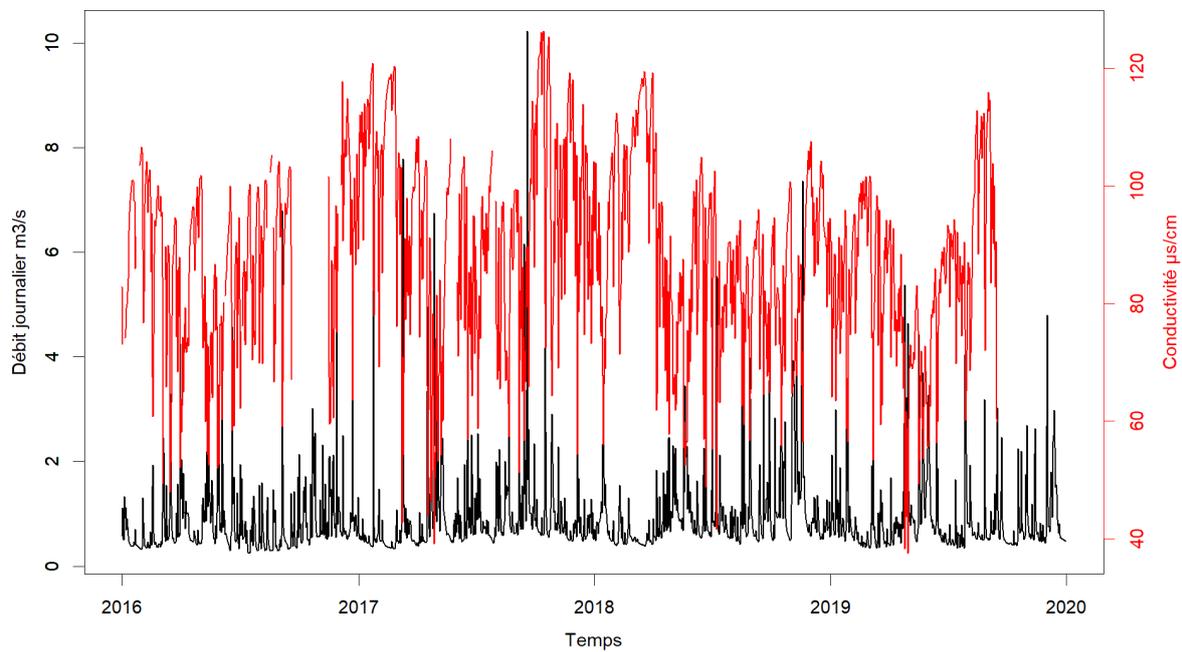


FIGURE 32 – Chroniques de conductivité corrigée et de débit à l'échelle journalière (2016-2019).

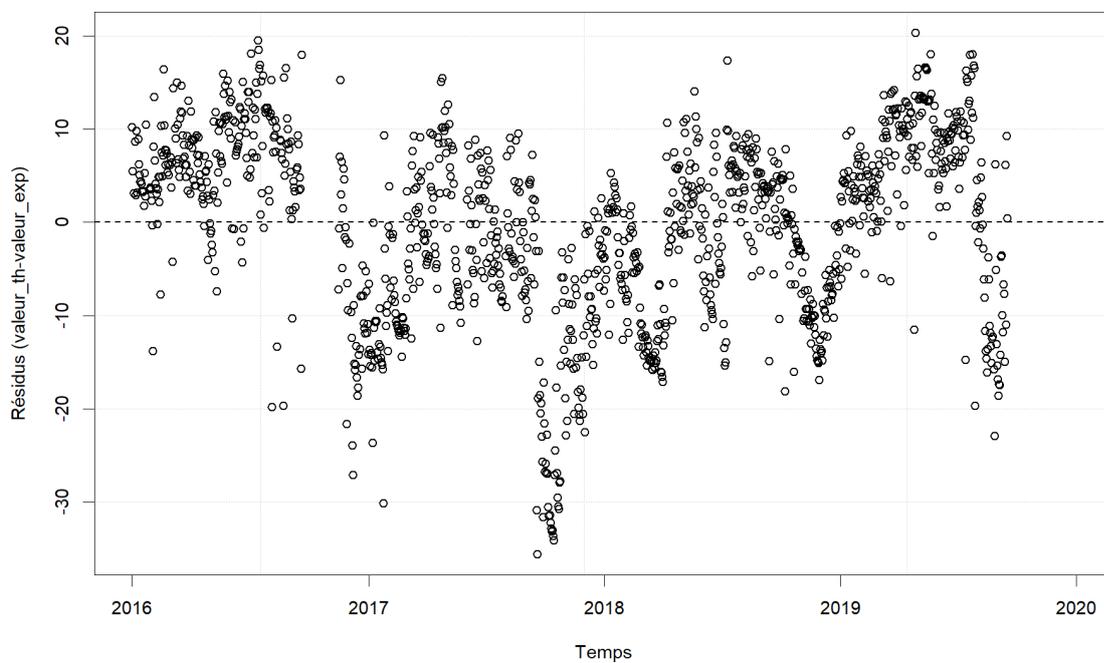


FIGURE 33 – Résidus de la relation journalière conductivité/débit en fonction du temps ($valeur_{theorique} - valeur_{experimentale}$).

IX Méthode de nettoyage de la chronique de turbidité

L'utilisation des prélèvements ponctuels (Figures 5 et 6) a permis de mettre en évidence une relation entre les paramètres SS et BS (Figure 17), entre la turbidité et le débit (Figure 36), ainsi qu'entre la turbidité et la concentration en MES (Figure 35). Les valeurs de NTU pour les prélèvements ponctuels sont les valeurs mesurées par le capteur en continu. Ces valeurs étant entachées de bruit, un nettoyage des valeurs aberrantes a été réalisé à la main.

Ces graphes montrent la gamme de valeurs de turbidité possible pour la rivière Pérou en 2017. C'est pourquoi, nous choisissons les seuils suivants pour les différents paramètres de la turbidité :

- BS < 800 NTU
- SS < 1200 NTU
- ratio < 800 NTU

TABLE 5 – Période de prélèvements ponctuels utilisés pour la relation BS/SS.

Montée de crue	Décru	Nombre de prélèvements
01/03/2017 04 :02	01/03/2017 07 :57	8
09/03/2017 01 :30	09/03/2017 18 :08	8
09/03/2017 15 :14	09/03/2017 18 :08	8
28/04/2017 05 :25	28/04/2017 07 :58	8
14/09/2017 01 :14	14/09/2017 03 :09	24
18/09/2017 21 :13	18/09/2017 22 :53	21
02/08/2017 14 :29	02/08/2017 16 :24	24
16/08/2017 14 :57	16/08/2017 16 :52	24
18/08/2017 15 :47	18/08/2017 17 :42	24

TABLE 6 – Prélèvements ponctuels utilisés pour la relation BS/SS.

Date	Statut hydrologique
09/03/2017 13 :45	Décru
10/03/2017 11 :30	Tarissement
20/04/2017 15 :00	Tarissement
27/06/2017 15 :30	Tarissement
20/07/2017 11 :10	Pic petite crue
03/08/2017 10 :53	Tarissement
23/08/2017 14 :15	Débit de base
09/05/2017 14 :00	Fin décru
06/06/2017 09 :00	Débit de base
26/06/2017 10 :00	Décru
03/07/2017 08 :45	Tarissement
07/08/2017 11 :45	Décru

De plus, la majorité des valeurs aberrantes apparaissent pour des débits inférieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 34. Après cette valeur la relation entre le BS et le débit semble linéaire. C'est pourquoi nous choisissons de supprimer les valeurs pour lesquelles BS est supérieur à 130 NTU pour un débit inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Finalement, le choix est fait de garder seulement les valeurs qui vérifient la relation BS/SS $\ln(SS) = 0.9574 \times \ln(BS) + 0.6584$ (Figure 17b) avec une marge d'erreur de 10 %.

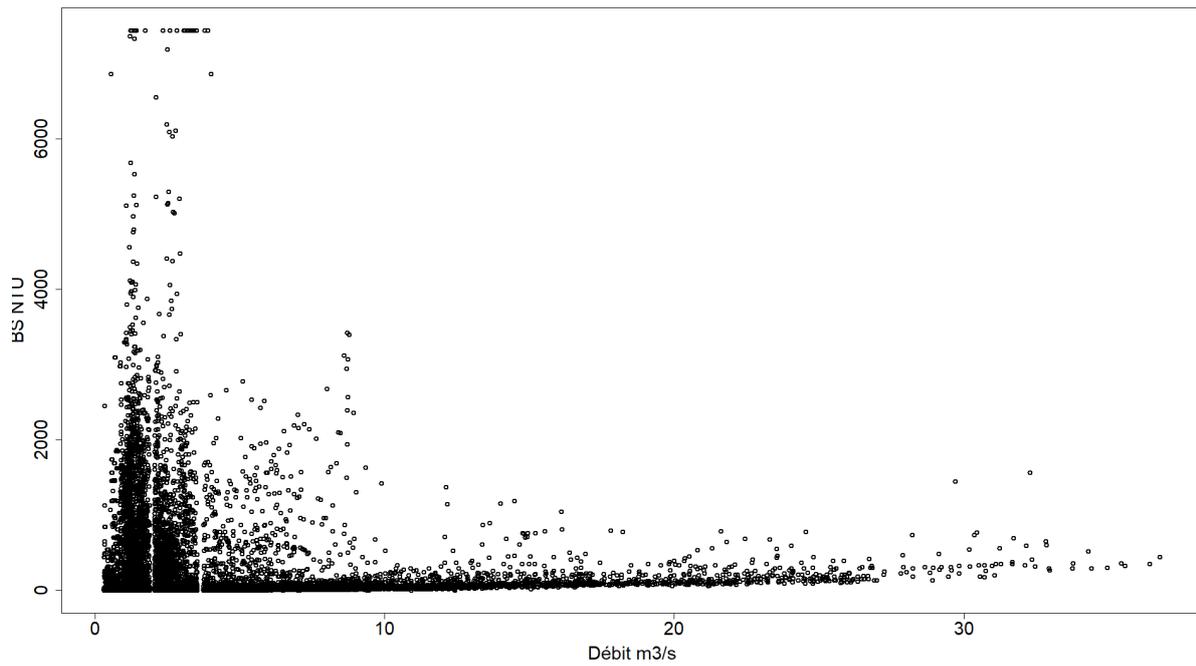


FIGURE 34 – Relation brute turbidité (BS)/débit en 2017.

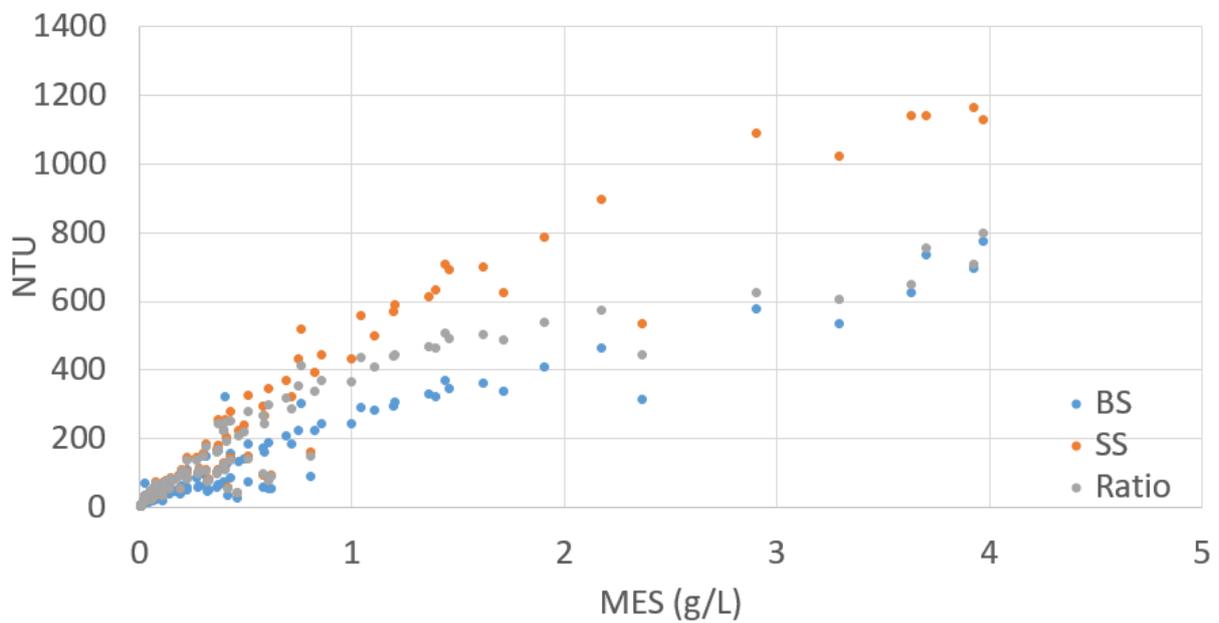


FIGURE 35 – Turbidité en fonction de la concentration en MES pour les prélèvements ponctuels corrigés.

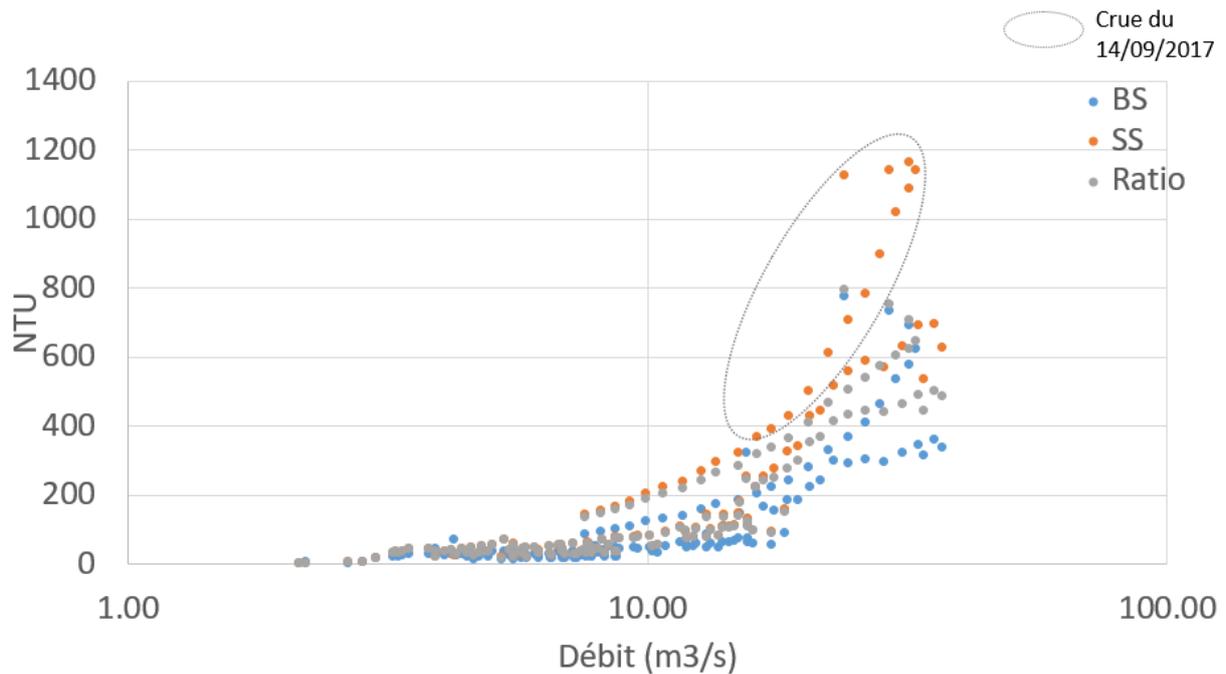


FIGURE 36 – Turbidité en fonction du débit pour les prélèvements ponctuels corrigés.

Script R utilisé pour le nettoyage de la chronique 2017

```
require(readxl)
require(xts)
require(dygraphs)
require(tidyr)
require (dplyr)

rm(list=ls())
#Lecture des fichiers brutes
DATA1 = read.table(file = "IN/turbi_2017_bis.csv", sep=";", header=TRUE)
DATA2=read.table(file = "IN/pont_debit_2017csv.csv", sep = ";", header=TRUE)

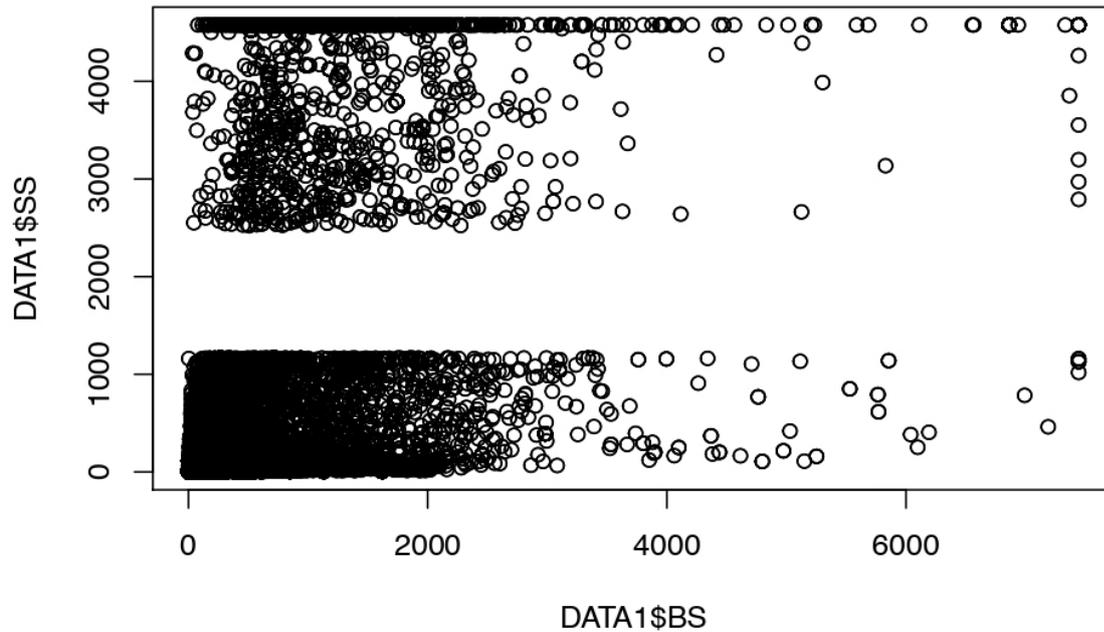
DATA1[,1] = as.POSIXct(DATA1[,1],tz = "UTC", format="%d/%m/%Y %H:%M")
colnames(DATA1)[1]="Date.Heure"
DATA2[,1] = as.POSIXct(DATA2[,1],tz = "UTC", format="%d/%m/%Y %H:%M")
DATA2=DATA2[-c(3)]

#Concaténation de la turbidité et du débit

DATA= merge(unique(DATA1),DATA2, by.x="Date.Heure", by.y="Date.Heure", all.x= TRUE,
            all.y= TRUE, sort= TRUE)

#Relation BS SS

plot(DATA1$BS, DATA1$SS)
```



```
#Calcul des SS à partir de la relation linéaire trouvée pour BS < 800 NTU
#(ln(SS) = 0.9556ln(x) + 0.6639)

DATA$log_SS_recalcule=with(DATA, ifelse(DATA$BS<1000, 0.9556*log(DATA$BS)+0.6639, FALSE))

DATA$SS_diff=with(DATA,ifelse(abs(DATA$log_SS_recalcule-log(DATA$SS))< 0.10, TRUE, FALSE))
DATA$BS_corrige = with(DATA, ifelse(DATA$BS > 130 & DATA$Q.m3.s.< 10, NA, DATA$BS))

DATA_new=filter(DATA, DATA$SS_diff)
DATA_new=DATA_new[!is.na(DATA_new$BS_corrige),]

#Relation BS SS corrigée
plot(DATA_new$BS, DATA_new$SS)
```

