

Caractérisation de l'impact de la pression d'orpillage sur les masses d'eau de surface de Guyane

Rapport final

BRGM/RP-68552-FR

Décembre 2018

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

V. Laperche, J. Hellal, J. Schäfer, N. Brisset, L. Dutruch, B. Joseph, L. Bechelen

Vérificateur :

Nom : Christopher Bryan
Fonction : Responsable d'unité
Date : 16/04/19

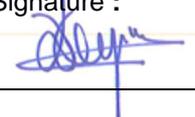
Signature :



Approbateur :

Nom : Laure Verneyre
Fonction : Directrice régionale
Date : 25/04/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT



Mots-clés : Mercure, Méthylmercure, MES, Turbidité, Eau, Guyane, Orpaillage, Activité minière.

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

Laperche V, Hellal, J. Schäfer J., N. Brisset, L. Dutruch, B. Joseph, L. Bechelen (2019) – Caractérisation de l'impact de la pression d'orpaillage sur les masses d'eau de surface de Guyane. Rapport final. BRGM/RP-68552-FR, 107 p., 36 ill., 4 ann.

Synthèse

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux ont essayé d'identifier l'origine des sources de mercure dans les sédiments de rivières que ce soit anthropique ou naturelle (Malm, 1998 ; Roulet *et al.*, 1998 ; Grimaldi *et al.*, 2008 ; Laperche *et al.*, 2014). Les travaux de Roulet *et al.* (2000) et Farella *et al.* (2006) ont montré que toute activité perturbant le sol comme la déforestation et les activités agricoles accélèrent l'érosion des sols. Récemment, les travaux de Béliveau (2017) ont même quantifié une perte de 24 % des particules fines des sols en l'absence de couverture forestière et de la mise en place d'activité agricole après le brûlis des arbres.

Cette étude, commencée en 2016, donne suite à des travaux préliminaires visant les mêmes objectifs de caractérisation de l'impact de l'activité d'orpaillage, dont elle complète les résultats (impact de l'ouverture des pistes, de la déforestation, de la construction des barranques, des canaux de dérivation, de l'exploitation et de la remise en état du site) et plus particulièrement sur la charge en matières en suspension (MES), en mercure associé à ces MES ainsi qu'à la présence de méthylmercure (MMHg).

En 16 mois (durée initiale du projet), il n'a pas été possible de suivre l'ensemble de ces activités sur un même site, du fait des aléas sur les chantiers d'exploitation et de l'impact de la saison des pluies sur les travaux. Dès lors il a été nécessaire de trouver plusieurs sites à différentes étapes d'exploitation (déforestation, extraction et régilage) et de les suivre de front. Trois sites ont été identifiés : une zone de déforestation agricole (Montsinéry), une AEX (Autorisation d'EXploitation) qui doit débuter et être en activité pendant la durée du projet (Crique Eddie) et enfin une concession à l'arrêt en attendant sa remise en état (Crique Espérance). L'objectif sur ces sites était de suivre, à différents moments (démarrage, activité et régilage), l'état des cours d'eau. Le site forestier pouvait montrer un impact de la déforestation sur l'état des eaux (hors zone minière). L'AEX celui de l'ouverture et l'exploitation d'un site et la concession l'impact de son arrêt et sa revégétalisation sur le retour non pas à un état initial mais à un état où la qualité des eaux est acceptable au niveau de la turbidité des eaux.

Sur le site agricole de Montsinéry, la déforestation a été suivie par un brûlis. Cette étape est interdite dans le cas des exploitations minières mais il a semblé intéressant de continuer à suivre ce site pour mesurer l'impact du brûlis. Les teneurs en HgII dans les eaux augmentent au moment du brûlis et inversement elles sont très faibles dans les MES. Ce n'est que pendant la saison des pluies que la turbidité augmente fortement. S'en suit une augmentation du MMHg dans les eaux puis dans les MES. Après 6 mois, la turbidité est revenue à la normale (< 10 NTU) mais malgré le manque de données pendant les grandes saisons des pluies, il semble bien que le brûlis a un impact important mais limité dans le temps. Si les effets visibles sont limités, il semble que la production de MMHg se poursuit même après que la turbidité soit revenue à la normale.

La crique Eddie, après une caractérisation initiale qui a mis en évidence un historique d'exploitation avec de fortes teneurs en Hg dans les sédiments et des % de MMHg dans les eaux élevées, n'a pas été suivie puisque son exploitation a été interrompue par l'exploitant. Ce type d'exploitation dans des zones anciennement orpaillées est donc à surveiller car susceptible de relarguer des quantités importantes de Hg dans les cours d'eau.

Enfin, le site sur la concession Boulanger de la crique Espérance n'a pas été régalé et réhabilité dans le calendrier initial mais a permis de suivre l'effet d'une revégétalisation spontanée sur les charges en MES et en Hg puis de regarder l'effet du régalage sur ce site en fin de projet. Les résultats montrent qu'à chaque saison des pluies, la turbidité augmente fortement mais il n'a pas été possible d'expliquer les variations des teneurs en HgII et MMHg dans les eaux et les MES en fonction des saisons et de l'activité sur le site. Les prélèvements ont été faits dans le canal de dérivation de la crique Espérance. Lors des saisons pluvieuses, il a été difficile de toujours prélever dans les mêmes conditions sans qu'il y ait une forte averse au cours de la journée. Pendant la 1^{ère} campagne où il a beaucoup plu, un barranque s'est déversé dans le canal augmentant fortement la turbidité dans une partie du canal. Il a été possible de refaire dans les mêmes conditions tous les prélèvements le surlendemain. Cela n'a pas été possible lors des autres campagnes. Il est donc difficile d'expliquer les variations mesurées. De plus, l'installation d'orpailleurs illégaux au moment de la revégétalisation du site et l'augmentation de la turbidité due à la reprise de l'activité n'a pas permis de mesurer les effets positifs de cette dernière.

Le calcul des flux de MES n'a pas pu être réalisé comme lors du précédent projet (Laperche *et al.*, 2013) car les débits des criques sont très faibles. De plus, le régime hydrique des criques rend difficile l'exploitation des données car suivant l'état des nappes, il suffit de quelques heures pour que l'effet d'un épisode pluvieux ne se remarque plus. Il est donc difficile d'extrapoler ces données ponctuelles et de faire des calculs d'exportations de MES.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Avant-propos : le mercure sous ses différentes formes | 11 |
| 2. Contexte et cadre du projet | 13 |
| 3. Description du projet | 15 |
| 3.1. OBJECTIF | 15 |
| 4. Présentation des sites d'études | 17 |
| 4.1. MISSION PRÉALABLE POUR LA RECHERCHE DE SITES | 17 |
| 4.2. L'EXPLOITATION FORESTIÈRE (DEFRICHE AGRICOLE) | 18 |
| 4.2.1. Description du site de l'exploitation forestière de Montsinéry | 18 |
| 4.2.2. Intérêt de ce site pour l'étude | 19 |
| 4.3. L'AEX DE LA CRIQUE EDDIE | 20 |
| 4.3.1. Description du site de la crique Eddie | 20 |
| 4.3.2. Intérêt de ce site pour l'étude | 21 |
| 4.4. LA CONCESSION MINIÈRE DE CMB | 21 |
| 4.4.1. Description du site de la crique Espérance | 21 |
| 4.4.2. Intérêt de ce site pour l'étude | 22 |
| 5. Matériels et méthodes | 23 |
| 5.1. LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS | 23 |
| 5.1.1. Les sédiments/vases | 23 |
| 5.1.2. Les MES | 23 |
| 5.1.3. Les eaux | 24 |
| 5.2. MÉTHODES D'ANALYSE | 24 |
| 5.2.1. Mesures des paramètres physico-chimiques | 24 |
| 5.2.2. Techniques pour l'analyse du mercure total sur les sédiments - HYDRECO | 25 |
| 5.2.3. Analyses des Matières en Suspension (masse et concentration en Hg) – Université de Bordeaux | 25 |
| 5.2.4. Analyses des eaux - Université de Bordeaux | 26 |
| 5.2.5. Mesure de la turbidité | 27 |
| 5.2.6. Estimation des débits | 27 |
| 6. Résultats | 29 |
| 6.1. CHRONOGRAMME DES MISSIONS | 29 |
| 6.2. L'EXPLOITATION FORESTIÈRE (DEFRICHE AGRICOLE) | 30 |
| 6.2.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2.2. Résultats..... | 33 |
| 6.3. L'AEX DE LA CRIQUE EDDIE | 39 |
| 6.3.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés..... | 39 |
| 6.3.2. Résultats..... | 41 |
| 6.4. LA CONCESSION MINIÈRE DE CMB | 42 |
| 6.4.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés..... | 42 |
| 6.4.2. Résultats..... | 43 |
| 7. Conclusions et perspectives | 51 |
| 8. Bibliographie | 53 |

Liste des illustrations

| | | |
|-------------------|---|----|
| Illustration 1 : | Cycle du mercure dans l'environnement (inspiré de Barkay <i>et al</i> 2003)..... | 12 |
| Illustration 2 : | Emplacements des trois sites de l'étude..... | 18 |
| Illustration 3 : | Emplacement de la défriche agricole..... | 19 |
| Illustration 4 : | Zone de la défriche agricole, en vert hachuré la zone d'extraction du bois pour la biomasse énergie et en jaune hachuré pour le brûlis. En vert les zones à préserver autour des criques Prapra et Brûlis. | 19 |
| Illustration 5 : | Emplacement de l'AEX de la crique Eddie (et de la crique Timon). | 20 |
| Illustration 6 : | Les différentes phases de l'exploitation de l'AEX..... | 21 |
| Illustration 7 : | Emplacement de la zone d'étude de la crique Espérance (ou crique Patagai)..... | 22 |
| Illustration 8 : | Prélèvement des échantillons de « crème de vase » à l'aide d'une spatule. | 23 |
| Illustration 9 : | Filtration des échantillons d'eau pour récupérer les MES. | 23 |
| Illustration 10 : | Filtration des échantillons d'eau. | 24 |
| Illustration 11 : | Mesures des paramètres physico-chimiques..... | 25 |
| illustration 12 : | Tableau des missions ; Saisons : GSP : grande saison des pluies, SS : saison sèche, PSP : petite saison des pluies et PEM : petit été de mars. | 29 |
| Illustration 13 : | Position des points échantillonnés sur les criques Prapra et Brûlis. En vert hachuré la zone d'extraction du bois pour la biomasse énergie et en jaune hachuré pour le brûlis. EN vert les zones à préserver autour des criques Prapra et Brûlis..... | 31 |
| Illustration 14 : | Photographies des différentes zones du site de Montsinéry. (a) point B amont en juin 2016, (b) point B amont en décembre 2017, (c) point B aval2 en juin 2016, (d) point B aval2 en décembre 2017, (e) Piste d'accès à la zone de brûlis entre les point B amont et B milieu et (f) Zone de brûlis en décembre 2016. | 32 |
| Illustration 15 : | Résultats des paramètres physico-chimiques de la défriche agricole sur la crique « Brûlis » (NM : non mesuré et ES : eau « stagnante »). La numérotation des campagnes commence à 2 car la 1 ^{ère} campagne n'a concerné que la crique Prapra..... | 33 |
| Illustration 16 : | Résultats des concentrations en mercure dans les sédiments, les MES et les eaux de la défriche agricole sur la crique « Brûlis ». | 34 |
| Illustration 17 : | Variation de la concentration en Hg total dans les sédiments de la crique « Brûlis ». | 35 |
| Illustration 18 : | Évolution de la turbidité le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons..... | 36 |
| Illustration 19 : | Évolution de la concentration en MES long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons..... | 36 |
| Illustration 20 : | Évolution de la concentration en HgII dans les eaux le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons..... | 37 |
| Illustration 21 : | Évolution de la concentration en MMHg dans les eaux le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Illustration 22 : Évolution de la concentration en HgII dans les MES le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons. | 38 |
| Illustration 23 : Évolution de la concentration en MMHg dans les MES le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons. | 39 |
| Illustration 24 : Position des points échantillonnés sur les criques Eddie et Timon. | 40 |
| Illustration 25 : (a) Appareil pour le traitement, (b) zone amont, (c) zone centre et (d) zone aval. | 40 |
| Illustration 26 : Résultats des paramètres physico-chimiques et des concentrations en mercure dans les sédiments et les eaux de la crique Eddie ; NA : les échantillons n'ont pas été analysés à cause de l'arrêt de l'exploitation. | 41 |
| Illustration 27 : Position des points échantillonnés le long du canal de dérivation de la crique Espérance. | 43 |
| Illustration 28 : Concentrations en Hg total dans les sédiments ($\mu\text{g/g}$) ; NP : Non Prélevé. . | 43 |
| Illustration 29 : Variation de la concentration en Hg total dans les sédiments de la crique Espérance. | 44 |
| Illustration 30 : Corrélation entre les mesures de turbidité (NTU) et les masses (g/L) de MES dans les eaux. | 45 |
| Illustration 31 : Évolution de la turbidité le long de la crique Espérance du 14/04/2016 au 26/07/2018. | 46 |
| Illustration 32 : Photographies de la présence des orpailleurs (a et b : grille et lance en amont du point 1) ; (c : entrée de galerie sur la rive droite de la crique, entre les points 2 et 3) et des modifications du site (d : canal d'orientation, en amont du point 2). | 47 |
| Illustration 33 : Teneurs en HgII ($\mu\text{g/g}$) dans les MES lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. Les valeurs marquées d'une étoile rouge correspondent à des échantillons de très faibles masses d'où de fortes incertitudes sur les concentrations déterminées. | 48 |
| Illustration 34 : Teneurs en MMHg (ng/g) dans les MES lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. Les valeurs marquées d'une étoile rouge correspondent à des échantillons de très faibles masses d'où de fortes incertitudes sur les concentrations déterminées. | 48 |
| Illustration 35 : Teneurs en HgII (ng/L) dissous dans les eaux lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. | 49 |
| Illustration 36 : Teneur en MMHg (pg/L) dissous dans les eaux lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. | 49 |

Liste des annexes

| | |
|---|-----|
| Annexe 1 : Résultats des mesures de débit pour le site de la défriche agricole (Montsinéry) | 57 |
| Annexe 2 : Résultats des paramètres physico-chimiques de la crique Espérance (CMB).... | 93 |
| Annexe 3 : Résultats des concentrations en mercure dans les sédiments, les MES et les eaux de la crique Espérance..... | 97 |
| Annexe 4 : Photographies montrant les variations de la turbidité de la crique Espérance (CMB) | 101 |

1. Avant-propos : le mercure sous ses différentes formes

Dans l'environnement, le mercure existe sous différentes formes de spéciation, dont trois formes principales :

- Hg^0 , mercure élémentaire, volatile ;
- Hg^{2+} , divalent, qui peut être dissout (ion libre), adsorbé de manière non spécifique, adsorbé de façon spécifique, chélaté (lié à des molécules organiques) ou précipité (carbonate, hydroxyde, sulfate) ;
- CH_3Hg^+ ou MMHg, formes méthyles du mercure.

Cette diversité de formes chimiques fait que le cycle biogéochimique du mercure est particulièrement complexe.

À cause de sa volatilité le mercure est présent dans tous les compartiments de la biosphère et son cycle est susceptible de s'y dérouler (Illustration 1). Dans l'atmosphère, le mercure se trouve principalement sous forme élémentaire (Hg^0). Son temps de résidence est relativement long et est d'environ un an à cause de sa ré-oxydation progressive et lente vers la forme Hg^{2+} (Fitzgerald et Mason, 1997). D'autres formes peuvent transiter dans l'atmosphère, telles que le méthyl-mercure et la forme ionique Hg^{2+} . Leurs faibles volatilité d'une part, et grande solubilité dans l'eau, font qu'ils retombent rapidement sous forme de retombées humides (précipitations). Le temps de séjour d'un an pour les formes volatile est largement suffisant pour une distribution du mercure sur l'ensemble de la planète, atteignant même les régions les plus isolées (Morel *et al.*, 1998).

Les sources de mercure dans l'atmosphère sont variées et peuvent être naturelles ou anthropiques. Les sources naturelles sont principalement l'évaporation/émission des sols, des plans d'eau, de la végétation, des feux, des volcans et des sources géothermiques. Les sources anthropiques sont l'industrie, l'utilisation des sources de carbone fossiles (charbon, pétrole), l'incinération et le traitement des déchets, le déboisement et la manufacture des métaux (dont l'orpaillage). À l'échelle mondiale, on estime que les émissions annuelles naturelles représentent 3 000 tonnes alors que celles d'origine anthropique représentent 3 500 tonnes (Nriagu, 1989). D'autres études estiment qu'au cours du dernier siècle, les émissions de mercure d'origine anthropique ont triplé et que deux tiers des flux de mercure actuels sont directement ou indirectement d'origine anthropique (Mason *et al.*, 1994).

La forme oxydée du mercure (Hg^{2+}) retombe sur les surfaces du globe principalement via des dépôts humides (précipitations). Soixante pourcent retombent sur les continents et 40 % sur les surfaces océaniques. Dans l'océan, après un ensemble de réactions chimiques et biologiques, la majeure partie du mercure est de nouveau réduite sous la forme Hg^0 et est réémise dans l'atmosphère (Illustration 1). Seule une faible fraction s'accumule dans les sédiments (Mason *et al.*, 1994). Dans les lacs, les pertes en mercure se font soit par exportation des sédiments (sous forme particulaire), soit par réémission. Dans les sols on observe des processus similaires avec cependant un plus faible retour dans l'atmosphère par rapport au stockage.

Dans la colonne d'eau et les sols, et dans des conditions physico-chimiques réductrices en absence d'oxygène, le mercure peut être méthylé par voie abiotique et/ou biotique. La méthylation biotique fait intervenir des bactéries sulfato-réductrices et ferri-réductrices (Gadd, 1993; Fleming *et al.*, 2006; Kerin *et al.*, 2006). Cette forme organique du mercure est la plus toxique et s'accumule au sein des chaînes trophiques intoxicant la faune naturelle et les populations environnantes dépendantes de ces chaînes alimentaires (Veiga *et al.*, 1999).

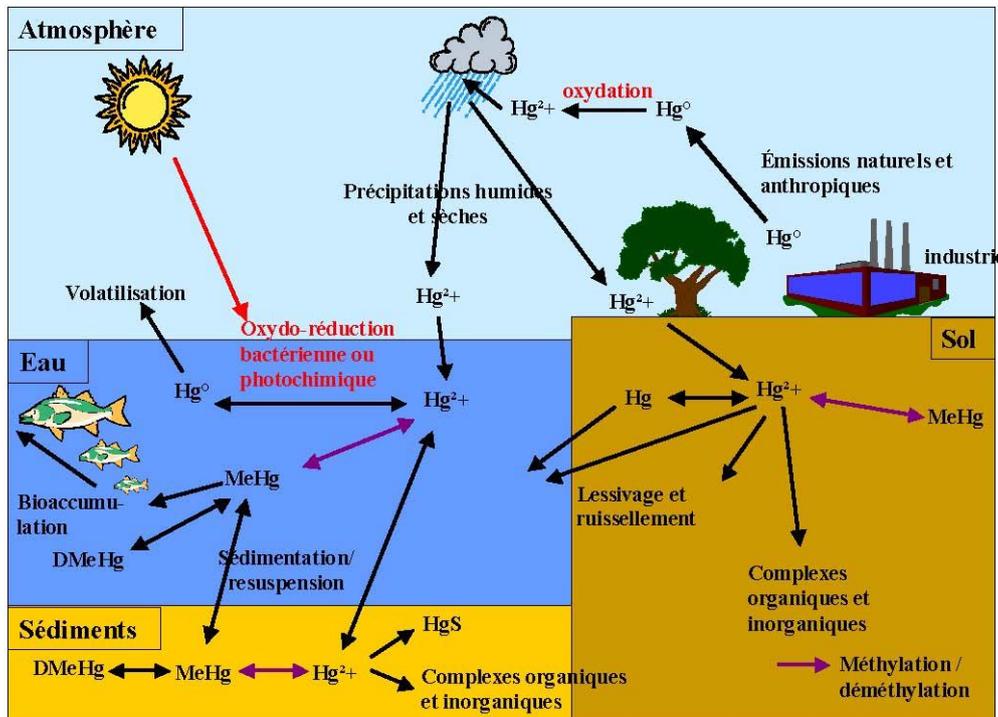


Illustration 1 : Cycle du mercure dans l'environnement (inspiré de Barkay *et al* 2003).

2. Contexte et cadre du projet

Une des principales pressions subies par les masses d'eau de surface de Guyane est l'orpaillage et en particulier l'orpaillage illégal. Les impacts sont principalement une augmentation des teneurs en mercure dans les sédiments et sur les matières en suspension (MES) ainsi qu'une augmentation du méthyl-mercure, très toxique et s'accumulant dans la chaîne trophique. L'impact de l'orpaillage illégal se traduit également par une augmentation importante et anormale de la turbidité de l'eau avec des conséquences importantes sur l'équilibre écologique des rivières.

Au vu de l'étendue du territoire, du caractère isolé et mouvant de l'activité, et du nombre de masses d'eau impactées, il n'est pas possible de mettre en place un réseau de contrôles opérationnels (RCO) systématique sur l'ensemble de ces masses d'eau. Il est ainsi très difficile lors de l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau d'extrapoler les résultats issus du réseau de contrôle de surveillance (RCS) à l'échelle de la masse d'eau et plus précisément, d'estimer le linéaire de cours d'eau impacté par les activités minières en tenant compte des deux situations d'extractions légales d'une part, illégales d'autre part. La révision de l'état des lieux du district hydrographique Guyane a confirmé cette lacune (Comité de Bassin, 2014).

Il convient donc aujourd'hui de développer de nouveaux outils de suivi de la pression à grande échelle et des impacts. En Guyane, le mercure a été très largement utilisé pour l'extraction aurifère dans les alluvions de rivière puisqu'il forme avec l'or un amalgame. Son utilisation est interdite depuis 2006.

Sur les sites miniers actuels, le mercure provient donc soit de résidus de l'amalgamation passée lors de la ré-exploitation de sites anciens, soit des matériaux des profils d'altération latéritique. Ce mercure va migrer dans les dépôts alluviaux, se dispersant progressivement vers l'aval dans les bassins hydrographiques et contaminer les différents compartiments du milieu aquatique. Le contrôle des eaux rejetées par les sites d'orpaillage légaux actuels se base sur la turbidité de l'eau rejetée. En effet, outre l'impact d'une eau trop turbide sur les écosystèmes aquatiques due au manque de lumière, il a été montré (Guédron *et al.*, 2006) que le mercure est majoritairement associé à la fraction fine et colloïdale en suspension. Cependant, malgré ces connaissances et ces contrôles, nous ne disposons pas à ce jour de données sur la quantité réelle de mercure rejeté par les sites miniers que ce soit des sols vierges d'exploitation ou des sols ré-exploités. Nous ne connaissons pas également sur quel linéaire l'impact de l'activité va pouvoir avoir des conséquences.

Il convient donc de caractériser les flux de mercure à l'aval de sites miniers et l'évolution de la turbidité. Une étude complémentaire à celle de 2012-2013 (Laperche *et al.*, 2013) permettra également d'approfondir les données sur la détermination des linéaires impactés à l'aval d'un site et ainsi de mieux cibler les masses d'eau impactées à l'aval d'une activité donnée. Il sera également envisagé de suivre, à proximité d'un des sites miniers étudiés, le relargage du mercure lié à la déforestation d'autres activités humaines ainsi que, dans le cas du choix d'un site minier jamais « orpaillé », faire le suivi de l'impact de la déforestation du site sur les milieux aquatiques.

3. Description du projet

3.1. OBJECTIF

L'objectif initial du projet était de travailler sur plusieurs sites aux cas de figure différents afin d'évaluer les quantités de mercure relargué au cours du temps et selon la saison. Au début du projet, trois sites ont ainsi été identifiés ; la crique Espérance, située dans la concession de la mine Boulanger, dont l'exploitation était terminée en 2016 et qui était en attente du régalage des sols (remise en état du cours d'eau) suivi d'une restauration écologique du site ; la crique Eddie, AEX d'un km² qui devait démarrer en 2016 avec une approche d'exploitation innovante puisqu'il était prévu de restaurer les berges au fur et à mesure ; et enfin un site agricole (Montsinéry) avec différentes approches d'ouverture des sites (i.e. brûlis avec différents essais de mulching) pour comparer cet impact agricole sur une éventuelle mobilité du mercure dans les cours d'eau.

Les suivies de ces sites devaient permettre de disposer d'une chronique plus complète des teneurs en Hg présents dans les cours d'eau de ces sites au cours du temps afin de mieux appréhender les niveaux de pression et d'aller vers une caractérisation plus fine de la pression orpillage à travers les indicateurs d'impact comme le mercure, la turbidité ou les MES.

Pour atteindre cet objectif, un travail de mise en place et de suivi de la qualité des eaux et des transferts dans un bassin hydrographique devait permettre, dans le meilleur des cas, d'approcher un bilan des flux en transit et donc des quantités de mercure migrant d'amont vers l'aval.

Ces objectifs étaient dépendants du programme de réhabilitation et/ou d'exploitation des sites identifiés. Cependant, plusieurs imprévus nous ont amené à revoir les plans d'échantillonnage et ont affecté les conclusions apportées par ce travail. Le premier imprévu a été le délai très long pour la livraison de l'appareil pour l'exploitation du site de la crique Eddie suivi par des problèmes de vol et de maintenance qui ont mené à l'arrêt de l'exploitation. Ce site a donc été échantillonné plusieurs fois avant l'exploitation mais ni pendant, ni après et a finalement été abandonné dans le cadre de ce projet. Les quelques analyses initiales sont cependant présentées dans ce rapport. Le second imprévu concerne le site de la crique Espérance qui a finalement été régalé en 2018 au lieu de 2016 comme prévu initialement. Ainsi les deux premières années de suivi correspondent davantage à l'impact d'une végétalisation spontanée sur les flux de MES et de Hg que l'impact post régalage et restauration. Enfin sur le site agricole tout s'est déroulé comme prévu sauf pour une étape de mulching qui a finalement été supprimée et la difficulté d'échantillonner le cours d'eau à l'amont pendant la saison sèche.

4. Présentation des sites d'études

4.1. MISSION PRÉALABLE POUR LA RECHERCHE DE SITES

Lors de la réunion du 01/02/2016, plusieurs points importants sont apparus au cours de la discussion :

- trouver d'autres sites que la CMB (Concession Minière de Boulanger) ;
- le projet étant court (16 mois), il fallait trouver des sites caractéristiques d'un moment donné de la mine :
 - avant la mise en exploitation : effet de la déforestation,
 - pendant la mise en exploitation,
 - fin d'exploitation et régalage (voire la revégétalisation du site).

En 16 mois (durée initiale du projet), il n'est pas possible de suivre l'ensemble de ces situations sur un même site.

Dès lors il est nécessaire de trouver plusieurs sites à différentes étapes d'exploitation (déforestation, extraction et régalage) et de les suivre de front.

Avec l'aide de la DEAL, de l'ONF et des contacts avec les mineurs, 3 sites ont été identifiés pour la poursuite de l'étude (Illustration 2) :

- la crique Espérance sur la concession CMB (fin de l'activité en avril 2016),
- la crique Eddie qui débute son activité en avril-mai 2016,
- une zone de déforestation agricole à Montsinéry.

Ces sites ont pour but de suivre, à différents moments (démarrage, activité et régalage), l'état des cours d'eau. Le 3^{ème} site doit montrer l'impact de la déforestation sur l'état des eaux (hors zone minière).



Illustration 2 : Emplacements des trois sites de l'étude.

4.2. L'EXPLOITATION FORESTIÈRE (DEFRICHE AGRICOLE)

4.2.1. Description du site de l'exploitation forestière de Montsinéry

Ce site se situe sur la commune de Montsinéry-Tonnegrandé (Illustration 3), il est suivi par la société H2e dans le cadre d'un projet sur le « défrichement innovant biomasse énergie ».

Dans le cadre de ce projet deux techniques sont comparées sur deux parcelles juxtaposées. Sur la première parcelle nommée « Brûlis » (jaune hachuré, Illustration 4) : celle-ci est défrichée puis les arbres sont brûlés. La zone est plus ou moins retravaillée sans retirer les troncs d'arbres partiellement brûlés pour permettre la plantation de bananiers; l'ensemble des travaux est programmé de juillet 2016 à février 2017. Sur la seconde parcelle nommée « Prapra » (vert hachuré, Illustration 4) : celle-ci est défrichée (pour la biomasse à vocation énergétique) puis le reste des arbres est « composté » (mulchage) avant la mise en place d'une couverture végétale ; l'ensemble des travaux est programmé de septembre 2017 à janvier 2018.

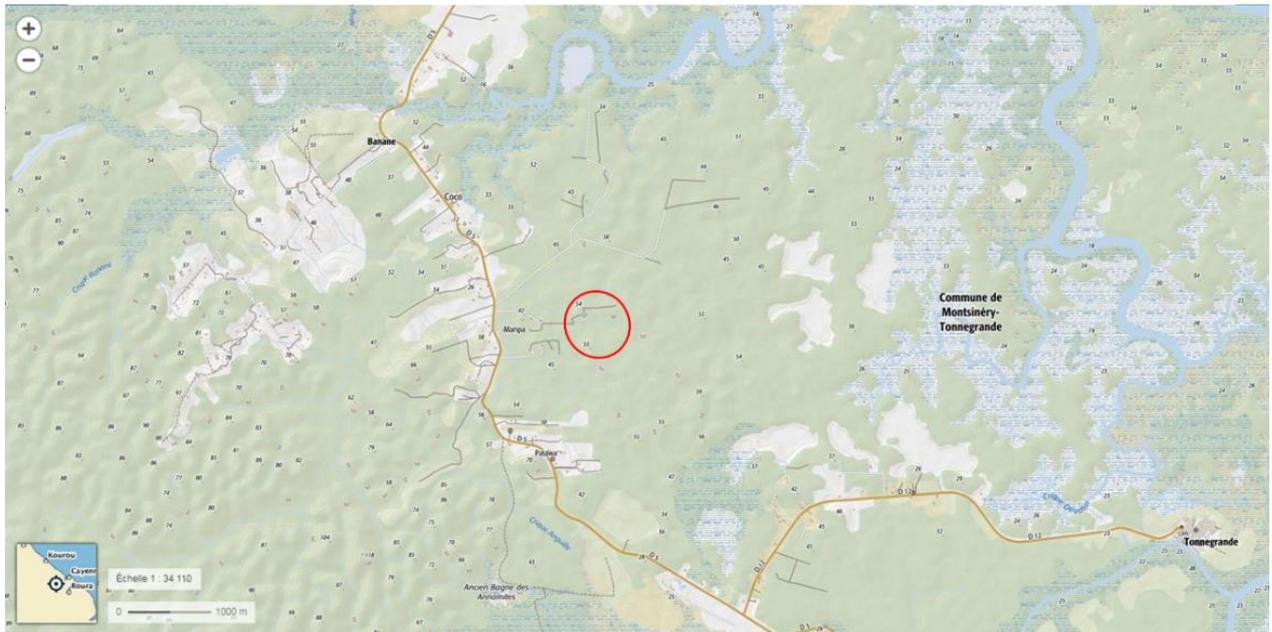


Illustration 3 : Emplacement de la défriche agricole.



Illustration 4 : Zone de la défriche agricole, en vert hachuré la zone d'extraction du bois pour la biomasse énergie et en jaune hachuré pour le brûlis. En vert les zones à préserver autour des criques Prapra et Brûlis.

4.2.2. Intérêt de ce site pour l'étude

Le choix de ce site est double, le premier étant de montrer que toute « manipulation » du sol engendre des conséquences sur la qualité des eaux et le second que même en dehors des zones aurifères, il est possible de mesurer des concentrations en mercure dans les eaux et en particulier du MMHg en quantité non négligeable.

Au final, seule la parcelle « Brûlis » a été menée à bout et des prélèvements ont été faits à chaque étape ; l'état initial a été réalisé sur le site « Prapra » mais vu l'abandon du suivi de cette parcelle, il n'y a plus eu de prélèvements et d'analyses après l'état initial.

4.3. L'AEX DE LA CRIQUE EDDIE

4.3.1. Description du site de la crique Eddie

Le site minier (AEX) de la crique Eddie est situé en pleine forêt sur la commune de Régina. Cette zone a plus ou moins été exploitée artisanalement depuis longtemps. L'AEX inclut deux criques : Eddie et Timon. L'exploitation se décompose en trois phases, les deux premières concernent la crique Eddie alors que la phase 3 concerne la crique Timon. Ces deux criques se jettent dans l'Orapu, Timon se jetant dans l'Orapu un peu un amont de la crique Eddie (Illustration 5).

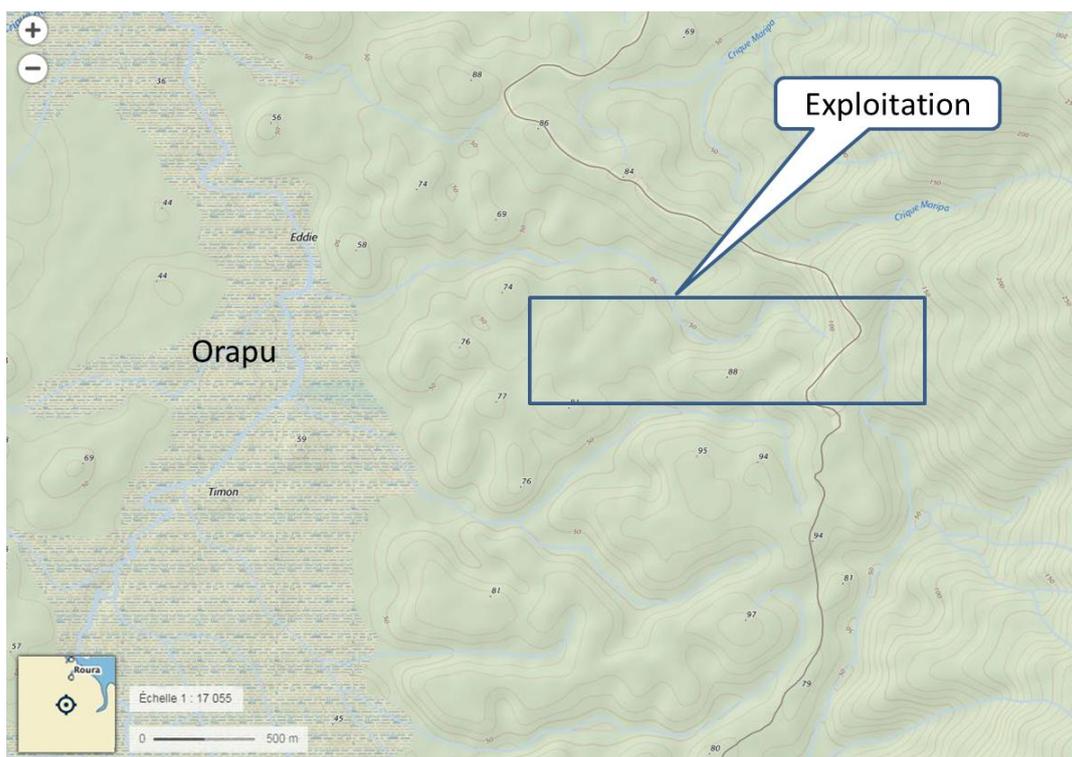


Illustration 5 : Emplacement de l'AEX de la crique Eddie (et de la crique Timon).

Les travaux sont réalisés de manière séquentielle et devaient commencer en avril 2016 par la phase 1 (Illustration 6). Le réaménagement est coordonné à l'avancement des travaux. À partir de la mise en chantier de la phase 2, les travaux de réaménagement de la phase 1 sont réalisés. De même lors de la mise en chantier de la phase 3, les travaux de réaménagement de la phase 2 sont réalisés. L'échantillonnage du site concerne la phase 2.

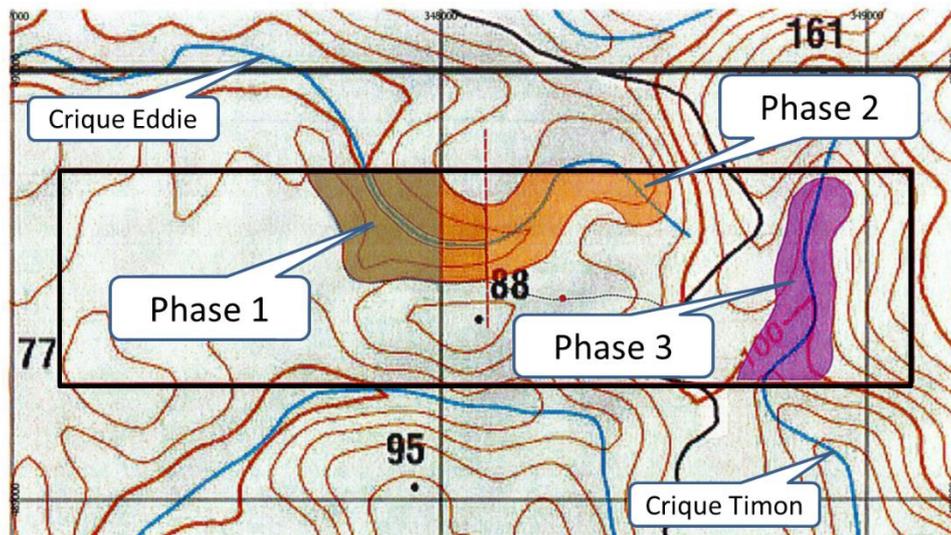


Illustration 6 : Les différentes phases de l'exploitation de l'AEX.

4.3.2. Intérêt de ce site pour l'étude

Comme pour le premier site, l'extraction aurifère même sur de petites criques génère beaucoup de « nuisances » lors de leur exploitation. L'intérêt de cette étude est de pouvoir suivre dans un délai relativement court la totalité de l'exploitation (démarrage, exploitation et remise en état). De plus, la technique utilisée pour l'extraction étant très différente de celle de la crique Espérance, il est intéressant de voir l'impact de cette technique. En effet, un seul barranque est creusé pour l'exploitation et la remise en état du lit majeur se fait au fur et à mesure de l'avancée des travaux. Il n'y a pas de travaux en lit mineur avec cette méthode.

Le but est donc de suivre plusieurs paramètres (turbidité, concentrations en Hg total, en MMHg) représentatifs de l'état des cours d'eau, avant le début de l'exploitation du site jusqu'à sa remise en état, et ce pendant au moins 1 an.

L'exploitation de ce site a finalement été abandonné courant 2017 et n'avait plus d'intérêt à être échantillonné dans le cadre de ce projet.

4.4. LA CONCESSION MINIÈRE DE CMB

4.4.1. Description du site de la crique Espérance

Le site minier de la crique Espérance (Illustration 7, ou crique Patagai sur la carte IGN ; il a été choisi de prendre l'ancien nom de la crique pour la distinguer des autres criques Patagai) appartient à la Concession Minière de Boulanger (CMB). L'exploitation de cette crique s'est arrêtée en début d'année 2016. Le site est resté en l'état (présences de barranques) durant l'année 2016 pour être régalé à partir du mois de décembre de la même année, les travaux de réhabilitation devant suivre. La crique Espérance se jette dans la crique Saint Michel qui va jusqu'à la Comté.

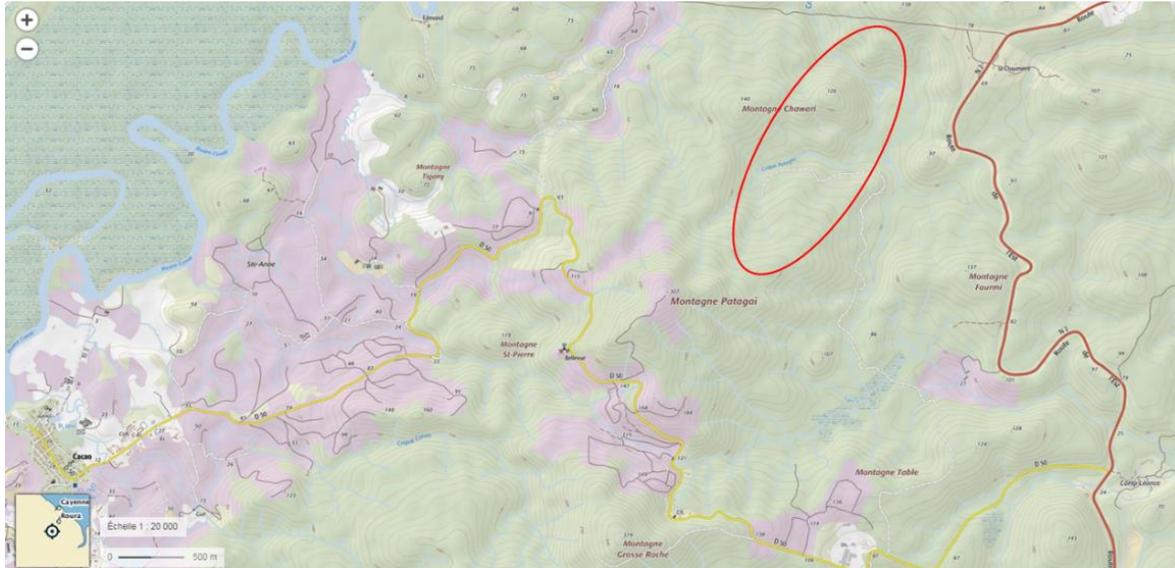


Illustration 7 : Emplacement de la zone d'étude de la crique Espérance (ou crique Patagai).

4.4.2. Intérêt de ce site pour l'étude

L'extraction aurifère des placers alluvionnaires génère beaucoup de « nuisances » lors de l'exploitation des sites (turbidité très élevée, relargage de mercure...). L'étude du suivi de la remise en état d'un site peut démontrer qu'il est possible de revenir à un état des masses d'eau compatible avec un bon niveau de la biodiversité.

Le but était donc de suivre plusieurs paramètres (turbidité, concentrations en Hg total, en MMHg en autre) représentatifs de l'état des cours d'eau, à partir de l'arrêt de l'exploitation du site jusqu'à sa remise en état, et ce pendant au moins 1 an. Cependant, comme mentionné dans les objectifs, il aura finalement fallu attendre 2018 pour le régalage complet du site. Le suivi correspond ainsi davantage au suivi de l'impact d'une revégétalisation naturelle du site sur la mobilité des MES et du Hg associé, puis de l'impact du régalage lui-même que de la restauration écologique qui vient juste de commencer.

5. Matériels et méthodes

5.1. LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS

5.1.1. Les sédiments/vases

Au niveau de chaque point de mesure, un échantillon de sédiment est prélevé. Celui-ci est souvent composite plutôt que ponctuel car il a été préféré de prélever la fraction fine des sédiments ou « crème de vase » afin d'obtenir un échantillon le moins sableux possible et donc susceptible de retenir le mercure. Entre 50 et 100 g d'échantillon sont ainsi prélevés avec une spatule pour être conservés dans un tube stocké dans une glacière jusqu'à son analyse au laboratoire (Illustration 8).



Illustration 8 : Prélèvement des échantillons de « crème de vase » à l'aide d'une spatule.

5.1.2. Les MES

Suivant la turbidité des eaux, 250 mL à 2 L d'eau sont filtrés sur un filtre Millipore de 45 µm. La filtration est effectuée sur les berges à l'aide d'une pompe électrique fonctionnant sur batterie. Les prélèvements ont été faits en double pour la détermination de la concentration en MES dans l'eau mais aussi de la teneur en Hg total dans les MES (Illustration 9). Les filtres sont reconditionnés dans deux sachets plastiques avant d'être stockés dans la glacière.



Illustration 9 : Filtration des échantillons d'eau pour récupérer les MES.

5.1.3. Les eaux

Les échantillons d'eau sont prélevés à l'aide d'une seringue puis filtrés à 0,45 µm (Millipore® ; Téflon hydrophilisé) pour l'analyse du Hg dissous dans l'eau (Illustration 10). L'ensemble du matériel utilisé (seringues et flaconnage en Téflon) ont préalablement été lavé plusieurs fois à l'acide puis mis en sachet individuellement. Après remplissage des flacons, avec l'eau filtrée, celui-ci est reconditionné dans deux sachets plastiques puis stockés dans la glacière.



Illustration 10 : Filtration des échantillons d'eau.

5.2. METHODES D'ANALYSE

5.2.1. Mesures des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques des eaux sont mesurés à chaque point de prélèvement à l'aide de deux appareils de mesure portables « Multiparamètre numérique 2 voies MULTILINE MULTI 3420 – WTW » (Illustration 11). Le premier permet la mesure du pH et du potentiel rédox (mV) ainsi que la température (°C) et le second permet la mesure de la concentration en oxygène (O₂ en % ou mg/L) de l'eau et de la conductivité (µS) ainsi que la température (°C).



Illustration 11 : Mesures des paramètres physico-chimiques.

5.2.2. Techniques pour l'analyse du mercure total sur les sédiments - HYDRECO

Les sédiments ont été séchés à 40 °C et tamisés. L'analyse a été réalisée sur la fraction < 2 mm pour éliminer principalement les débris organiques.

Le dosage du mercure est effectué par absorption atomique (spectrophotomètre AMA 254). Dans l'appareil, l'échantillon est tout d'abord séché puis décomposé thermiquement ou brûlé. Les produits de décomposition sont poussés par un flux d'oxygène dans un tube catalytique plein qui piège les résidus calcinés, les halogènes, les oxydes d'azote et de soufre. Les produits de décomposition sont ensuite poussés jusqu'à l'amalgame (or) pour un piégeage sélectif du mercure. Après la décomposition de l'échantillon et la stabilisation de la température, le mercure piégé dans l'amalgame est désorbé par chauffage et mesuré.

5.2.3. Analyses des Matières en Suspension (masse et concentration en Hg) – Université de Bordeaux

La détermination de la teneur en mercure particulaire est faite par filtration (filtres pré-pesés, nitrate de cellulose, porosité 0,45 µm, 47 mm, Sarthorius®) d'un volume de 250 mL à 2 L d'eau brute selon la concentration en MES. Le filtre est ensuite séché à 50 °C jusqu'à l'atteinte d'un poids constant (typiquement 36 h) puis repesé pour déterminer la quantité de particules présentes à sa surface. La précision de la balance utilisée est de 0,01 mg. Ces filtres sont conservés dans des boîtes en polypropylène sous double poche scellée jusqu'à analyse chimique.

La technique utilisée pour l'analyse consiste à l'introduction de l'échantillon (ici, le filtre) dans un premier four dans lequel va avoir lieu le séchage et la combustion de l'échantillon à 160 °C sous flux d'O₂, puis un deuxième four à 850 °C contenant un tube catalytique permettant la décomposition des gaz résultant de la combustion ainsi que la réduction de mercure en Hg⁰. Les vapeurs de Hg⁰ entraînées par le flux d'oxygène sont fixées et ainsi préconcentrées sur un piège d'or. Celui-ci est alors chauffé très rapidement et les vapeurs de Hg⁰ sont envoyées vers le détecteur. Les différentes étapes de calcination, séchage, fixation et détection sont gérées de façon automatique par un même appareil (MILESTONE, Direct Mercury Analyzer 80) équipé d'un passeur automatique d'échantillons.

La justesse de la mesure est quotidiennement vérifiée par mesure de matériaux certifiés de référence provenant de différents milieux (sédiments estuariens, marins, fluviaux) et de concentrations contrastées (de 30 à 1600 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; NCS DC 70317, IAEA-433, BCR-320R, BCR-280R). La justesse est évaluée à ~90 % et la précision est de 5 %.

5.2.4. Analyses des eaux - Université de Bordeaux

Le dosage du mercure divalent dissous et du mono-méthylmercure (MMHg) dissous se fait par couplage chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse à plasma couplé induit (GC-ICP-MS) par dilution isotopique. Le tout se fait en ligne automatisée couplant un chromatographe en phase gazeuse (Thermo Finnigan, Trace 1310) à un ICP-MS quadropolaire (Thermo Electron, X7). Ce couplage permet une analyse rapide quantitative et hautement sensible (de l'ordre de quelques pg/L) notamment du fait des hauts rapports signal/bruit de fond que fournit l'ICP-MS.

La séparation des composés par chromatographie en phase gazeuse nécessite des propriétés volatiles pour ces mêmes composés ainsi qu'une affinité pour les phases organiques. Pour cela une dérivatisation des formes chimiques est effectuée au préalable, afin d'obtenir uniquement des formes alkylées de Hg plus stables à forte température et plus volatiles. Cette dérivatisation se fait par propylation des composés, c'est-à-dire que les radicaux anioniques que possèdent les composés (Cl^- , OH^- , Br^- ...) sont remplacés par des groupements propyl provenant du tetrapropylborate de sodium (NaBPr_4). Les composés dérivatisés sont alors extraits de la solution aqueuse (échantillon d'eau filtrée) dans de l'isooctane par extraction liquide-liquide.

Environ 30 à 40 mL d'eau sont placés dans des flacons en verre borosilicaté, le milieu est tamponné par un tampon acétate de sodium/acide acétique puis le pH est ajusté à 3,9 par ajout de NH_4OH ou de HCl . Entre 100 et 200 μL d'isooctane sont ajoutés selon la préconcentration désirée. Enfin 0,5 mL de NaBPr_4 (1% m/v, Galab) sont ajoutés avant agitation pendant 5 minutes, séparation des phases organique et aqueuse par centrifugation (10 min à 2000 tr/min), puis récupération de la phase organique. Jusqu'à 15 μL de solvant peut être injecté dans le GC-ICP-MS selon la concentration initiale des échantillons. Le volume de la prise d'essai diminué pour des eaux plus chargées.

La calibration par dilution isotopique constitue la méthode de prédilection en ce qui concerne l'analyse de spéciation de Hg par GC-ICP-MS. Le principe de la dilution isotopique est basé sur le dopage de l'échantillon par une quantité connue de l'élément à analyser (ou d'une espèce de cet élément) enrichi isotopiquement. L'espèce mono-isotopique ajoutée constitue alors un étalon interne idéal car après équilibration il sera soumis exactement aux mêmes transformations physico-chimiques, inhérentes au protocole d'extraction-dérivatisation, que l'analyte naturellement présent dans l'échantillon.

La méthode s'affranchit des pertes inhérentes au protocole d'extraction (dilution, évaporation, dégradation, transformation) et du rendement d'extraction, ce qui augmente justesse et précision. De plus elle permet un gain de temps considérable par rapport à l'étalonnage interne classique par ajouts dosés. Pour la spéciation du Hg nous utilisons une solution mono isotopique de ^{199}Hg (ISC Science) et une solution de ^{201}Hg (ISC Science), que nous ajoutons directement à l'échantillon en début de procédure d'extraction. Il est important d'imposer un temps suffisant pour atteindre l'équilibre pour que les espèces marquées et naturelles soient dans les mêmes conditions avant l'application du traitement chimique. Pour retrouver la concentration de l'analyte dans l'échantillon il est nécessaire de choisir deux isotopes : l'isotope « traceur » et un isotope qui présente une abondance naturelle suffisante pour être bien détecté.

Il n'existe pas dans le commerce d'eau certifiée en MMHgD.

5.2.5. Mesure de la turbidité

La turbidité désigne la réduction de la transparence de l'eau due à la présence de matières non dissoutes, elle exprime donc la concentration en MES. Les mesures de turbidités ont été réalisées in situ à partir d'un turbidimètre de type néphélomètre. Cet appareil (HANNA TN 100) mesure l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90° par rapport au trajet de la lumière incidente. Les résultats sont exprimés en NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*).

Le signal délivré par les turbidimètres optiques dépend du type de MES (organique ou minérale), de la taille des particules et de la coloration des eaux.

5.2.6. Estimation des débits

Compte-tenu des difficultés d'utilisation des courantomètres magnétiques dans les très petites masses d'eau (TPME), les mesures de terrain peuvent s'effectuer par des mesures-interpolations de profils horizontaux de vitesse de surface et par extrapolation des paraboles verticales de vitesse et ce en fonction des caractéristiques des criques (répartition des frottements et lignes de courant) avec de fortes incertitudes sur les résultats compte tenu des très faibles débits (Annexe 1). Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un flotteur qui se déplace sur une distance définie plus ou moins homogène (largeur et hauteur). Les mesures de débit dans des cours d'eau avec une hauteur < 5 cm n'ont pas pu être réalisées.

6. Résultats

6.1. CHRONOGRAMME DES MISSIONS

| Date | Site | Numéro Campagne | Commentaires | Saison | Météorologie du jour - Station de Matoury (Conditions, ensoleillement (h) et pluviométrie (mm)) |
|----------------|------------|-----------------|--|--------|---|
| 12 au 14/04/16 | Espérance | Camp-1 | Etat initial après l'arrêt de l'exploitation (saison des pluies) | GSP | Très nuageux, bruine ; 2 à 7 h ; 0 à 10,7 mm |
| 28/09/16 | Espérance | Camp-2 | Etat initial juste avant le régalage | SS | Beau temps ; 10 h ; 0 mm |
| 18/11/16 | Espérance | Camp-3 | Prélèvement réduit (3 au lieu de 5) car le régalage n'a pas eu lieu | SS | Beau temps ; 10 h ; 0 mm |
| 19/07/17 | Espérance | Camp-4 | Prélèvement à 1 an après l'arrêt de l'exploitation - régalage en aval sur la crique Saint Michel | SS | Très nuageux ; 9 h ; 0,2 mm |
| 01/12/17 | Espérance | Camp-5 | Début du régalage de la crique Espérance entre les points 2 et 3 | PSPS | Très nuageux à éclaircies ; 5 h ; 15,4 mm |
| 21/03/18 | Espérance | Camp-6 | Début de revégétalisation | PEM | Très nuageux à éclaircies ; 3,5 h ; 3,8 mm |
| 26/07/18 | Espérance | Camp-7 | Prélèvement à 2 ans après l'arrêt de l'exploitation et 1 mois après la revégétalisation du site | SS | Nuageux à éclaircies ; bcp plu avant (2 à 5) et petite pluie (1) |
| 22/08/16 | Eddie | Camp-1 | Etat initial sur la crique Eddie | SS | Très nuageux à éclaircies, 5 h ; 0 mm |
| 15/02/17 | Eddie | Camp-2 | Etat initial sur la crique Timon (Eddie 2) | PSP | Très nuageux, bruine ; 1 h ; 4 mm |
| 12/04/17 | Eddie | Arrêt | Arrêt de l'exploitation | GSP | Très nuageux, bruine ; 4 h ; 5,5 mm |
| 15/04/16 | Montsinéry | Camp-1 | Etat initial réduit | GSP | Très nuageux ; 7 h ; 0,6 mm |
| 16 et 17/06/16 | Montsinéry | Camp-2 | Etat initial avant début de défrichage | SS | Très nuageux, rares averses ; 2 à 5 h ; 32,8 à 56,2 mm |
| 13/07/16 | Montsinéry | Camp-3 | Après abattage des arbres | SS | 7 h ; 2,2 mm |
| 19/12/16 | Montsinéry | Camp-4 | Après brûlage des arbres | PSP | Très nuageux, bruine ; 0 h ; 12,3 mm |
| 05/05/17 | Montsinéry | Camp-5 | Après régalage du site et plantation | GSP | Bruine ; 3 h ; 18,6 mm |
| 18/07/17 | Montsinéry | Camp-6 | Après régalage du site et plantation à 2 mois | SS | Très nuageux ; 8 h ; 17,2 mm |
| 30/11/17 | Montsinéry | Camp-7 | Après régalage du site et plantation à 6 mois | PSP | Nuageux ; 6 h ; 19,2 mm |

Illustration 12 : Tableau des missions ; Saisons : GSP : grande saison des pluies, SS : saison sèche, PSP : petite saison des pluies et PEM : petit été de mars.

Lors de la réunion de février 2016, il a été décidé de lancer la campagne de mesure pour l'état initial des trois sites en avril 2016 puisque l'arrêt de l'exploitation de la crique Espérance se terminait début avril et que l'exploitation de l'AEX Eddie devait débuter en avril-mai. Les autres campagnes ont été programmées en fonction de l'avancée des travaux sur chacun des sites (illustration).

6.2. L'EXPLOITATION FORESTIÈRE (DEFRICHE AGRICOLE)

6.2.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés

Une pré-campagne a été organisée en avril 2016 pour découvrir le site. Deux prélèvements ont alors été effectués sur la crique « Prapra » (Illustration 13) ; l'autre crique « Brûlis » n'a pas été échantillonnée car la piste d'accès n'était pas encore terminée.

La première campagne de prélèvement a eu lieu en avril mais elle n'a concerné que 3 points car certaines zones n'étaient toujours pas accessibles.

La deuxième campagne de prélèvement a eu lieu en juin et a permis de faire un état des lieux avant l'exploitation du site (abattage des arbres). Trois échantillons sur chaque crique ont été prélevés (Amont et 2 Avals).

L'abattage des arbres a commencé le 7 juin, à un rythme de 1 ha tous les 2 jours, les 10 ha de forêt ont été abattus pour le 10 juillet.

La troisième campagne a eu lieu en juillet 2016 après l'abattage des arbres et n'a concerné que la crique « Brûlis » car seuls les arbres sur la parcelle traversée par la crique « Brûlis » seront brûlés d'ici la fin de l'année.

La quatrième campagne a eu lieu après le brûlage des arbres en décembre 2016 (Illustration 14) et ne concerne que les 3 prélèvements de la crique « Brûlis ».

De même pour la cinquième campagne qui a eu lieu en mai 2017 après la plantation des bananiers sur le site.

Lors de la sixième campagne, 2 mois après la plantation des bananiers (les fûts issus de l'abattage et non consommés par le brûlage ont été laissés sur place au sol), 4 prélèvements ont été faits, un point intermédiaire a été ajouté le long de la crique (Milieu crique Brûlis) (Illustration 14).

La septième campagne fin novembre 2017 a eu lieu un an après le brûlis et 6 mois après la plantation des bananiers. Cette campagne a été réduite par manque d'eau en amont, seuls les 2 points en aval ont pu être échantillonnés.

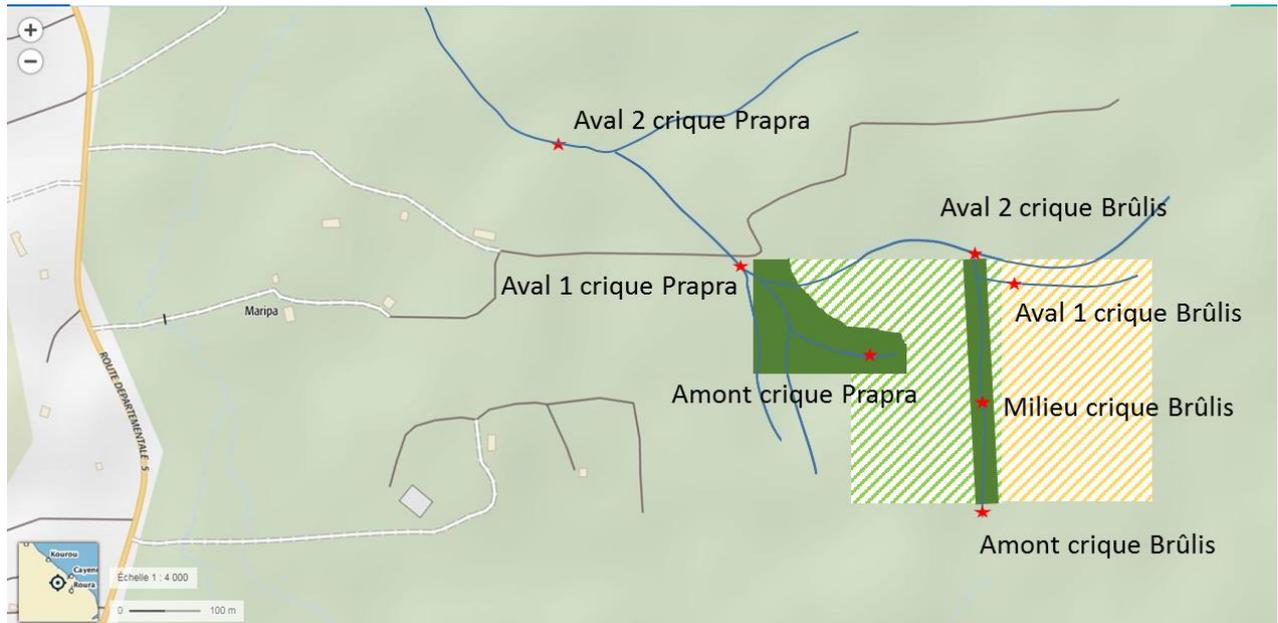


Illustration 13 : Position des points échantillonnés sur les criques Prapra et Brûlis. En vert hachuré la zone d'extraction du bois pour la biomasse énergie et en jaune hachuré pour le brûlis. EN vert les zones à préserver autour des criques Prapra et Brûlis.



Illustration 14 : Photographies des différentes zones du site de Montsinéry. (a) point B amont en juin 2016, (b) point B amont en décembre 2017, (c) point B aval2 en juin 2016, (d) point B aval2 en décembre 2017, (e) Piste d'accès à la zone de brûlis entre les point B amont et B milieu et (f) Zone de brûlis en décembre 2016.

6.2.2. Résultats

L'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain est rassemblé dans le tableau ci-après (Illustration 15), de même que les analyses de Hg et MMHg (Illustration 16).

L'évolution des paramètres physico-chimiques est difficilement interprétable. Le faible débit (et hauteur d'eau) de la crique « Brûlis » rend difficile la prise des paramètres.

La turbidité de l'eau est faible lors des campagnes 2 et 3 (1,2 à 2,5 NTU) malgré l'abattage des arbres entre les deux campagnes. Ces travaux ne semblent pas avoir d'impact sur la turbidité. Lors de la campagne 4, la turbidité augmente pour les points en aval (10,6 et 11,5 NTU), cela peut être dû soit à l'impact de la petite saison des pluies soit au brûlage des arbres ou les deux à la fois. Lors de la campagne 5 qui a lieu pendant la grande saison des pluies, la turbidité augmente fortement en aval (46,6 et 90,6 NTU). Cette augmentation est due aux intempéries qui entraînent les particules du sol juste régalié. Deux mois plus tard et toujours pendant une saison des pluies (petite), les valeurs de turbidité baissent fortement (2,2 à 4,5 NTU). Lors de la campagne 7, il n'a pas été possible de faire des mesures en amont et au centre car il n'y avait pas d'eau. Le très faible débit en aval a rendu difficile la mesure des paramètres physico-chimiques, les valeurs de turbidité comparables à celles prises pendant les petites saisons des pluies (7,7 et 8,9 NTU) ne sont peut-être pas représentatives.

| Campagne/Point | X | Y | Conductivité (µS) | taux O ₂ (mg/L) | Temp. (°C) | pH | Rédox (mV) | Turbidité (NTU) | Débit (L/s) |
|----------------|--------|--------|-------------------|----------------------------|------------|------|------------|-----------------|-------------|
| Camp1-P-Aval1 | 332509 | 536668 | 30,6 | 4,70 | 25,1 | 5,6 | 220 | 2,2 | 7,4 |
| Camp1-P-Aval2 | 332084 | 537266 | 22,3 | 6,06 | 24,9 | 5,4 | 196 | 2,0 | 21,1 |
| Camp2-P-Amont | 332718 | 536520 | 21,4 | 5,47 | 25,2 | 5,6 | 197 | 1,2 | NM |
| Camp2-P-Aval1 | 332509 | 536668 | 26,6 | 4,58 | 24,4 | 5,6 | 138 | 2,2 | NM |
| Camp2-P-Aval2 | 332084 | 537266 | 20,0 | 6,27 | 24,3 | 5,4 | 176 | 2,5 | 41,8 |
| Camp2-B-Amont | 332928 | 536262 | 21,9 | 4,68 | 24,7 | 4,7 | 170 | 2,5 | 1,3 |
| Camp2-B-Aval1 | 332975 | 536623 | 21,8 | 3,88 | 24,8 | 4,7 | 244 | 2,4 | 3,5 |
| Camp2-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 20,0 | 5,26 | 24,9 | 5,5 | 150 | 1,8 | 13,4 |
| Camp3-B-Amont | 332928 | 536262 | 20,5 | 4,90 | 24,8 | 5,0 | 260 | 1,3 | 1,1 |
| Camp3-B-Aval1 | 332975 | 536623 | 22,6 | 3,70 | 25,1 | 4,9 | 206 | 1,7 | 2,7 |
| Camp3-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 23,0 | 5,01 | 25,1 | 5,3 | 210 | 1,2 | 10,7 |
| Camp4-B-Amont | 332928 | 536262 | 40,1 | 4,04 | 24,9 | 5,8 | 292 | 2,3 | 0,8 |
| Camp4-B-Aval1 | 332975 | 536623 | 115,1 | 4,18 | 25,1 | 5,9 | 249 | 11,5 | 2,7 |
| Camp4-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 75,0 | 3,21 | 24,9 | 5,59 | 233 | 10,6 | 5,1 |
| Camp5-B-Amont | 332928 | 536262 | 16,0 | 1,43 | 24,9 | 5,2 | 361 | 12,0 | 11,0 |
| Camp5-B-Aval1 | 332975 | 536623 | NM | 2,15 | 25,8 | 5,4 | 372 | 90,6 | 19,7 |
| Camp5-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 8,0 | 1,97 | 25,4 | 5,1 | 370 | 46,6 | 49,4 |
| Camp6-B-Amont | 332928 | 536262 | 20,1 | 4,34 | 24,8 | 4,9 | 305 | 2,2 | NM |
| Camp6-B-Milieu | 332883 | 536367 | 21,6 | 3,72 | 25,9 | 5,0 | 166 | 2,2 | NM |
| Camp6-B-Aval1 | 332975 | 536623 | 31,8 | 3,92 | 26,2 | 5,6 | 221 | 4,5 | NM |
| Camp6-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 24,9 | 3,78 | 25,4 | 5,2 | 235 | 4,1 | NM |
| Camp7-B-Aval1 | 332975 | 536623 | 47,1 | 1,77 | 25,9 | NM | NM | 8,9 | ES |
| Camp7-B-Aval2 | 332875 | 536680 | 44,7 | 1,97 | 25,3 | NM | NM | 7,7 | ES |

Illustration 15 : Résultats des paramètres physico-chimiques de la défriche agricole sur la crique « Brûlis » (NM : non mesuré et ES : eau « stagnante »). La numérotation des campagnes commence à 2 car la 1^{ère} campagne n'a concerné que la crique Prapra.

La mesure des débits a été rendu difficile du fait que les criques coulent lentement, il y a peu de hauteur d'eau et la crique a une largeur de l'ordre de 1 m. Il y a parfois, en saison des pluies, plusieurs « criquots » parallèle qui s'écoulent. Il a fallu rechercher des zones où la crique se resserre pour voir apparaître des vitesses mesurables mais cela n'a pas toujours été le cas. Lors des 2 dernières campagnes, cela n'a pas été possible car l'écoulement était trop lent. De plus, certaines mesures sont influencées au niveau des berges par de nombreuses racinelles. Les débits les plus forts sont de l'ordre de 40 à 50 L/s mais ne sont pas forcément mesurés pendant la grande saison des pluies. Cela est probablement lié à la répartition des pluies les jours précédents les interventions, même si la camp2 correspond à une saison sèche il y a eu plusieurs averses qui ont influencé les mesures de débits. On note aussi que malgré des précipitations très intenses pendant une semaine (camp4 en décembre 2016), le débit de la crique est très faible. La réponse hydrologique de la crique étant très rapide, il suffit de quelques heures pour que l'effet d'un épisode pluvieux ne se remarque plus. Lors de la camp5 pendant la grande saison des pluies, il a beaucoup plu (mois d'avril excédentaire et forte pluie lors des prélèvements) gonflant quasi-instantanément le débit des criques (jusqu'à ~50 L/s). Cette augmentation de débit momentanée principalement due au ruissellement est probablement accrue par l'abattis. Elle est de plus évidemment très peu compensée par la plantation de bananiers petits et épars, tant concernant l'évapotranspiration que la limitation du ruissellement qu'elle engendre. La faible couverture végétale ne protège pas le sol de l'érosion due à ces ruissellements et cela se voit avec l'augmentation de la turbidité (~90 NTU au point B Aval 1 qui reçoit les eaux de la parcelle « Brûlis »). La réponse hydrologique rapide de cette crique, rend difficile, un calcul de flux de MES car le débit varie très rapidement. La mesure ponctuelle n'est pas adaptée à ce type de régime hydrologique.

Les concentrations en Hg total dans les sédiments sont comprises entre 0,01 et 0,09 µg/g quel que soit le point et la saison (Illustration 16). Même s'il y a des variations, toutes ces valeurs sont inférieures au fond géochimique de 0,10±0,05 µg/g dans les sédiments de rivières (Laperche *et al.*, 2014). Lors du projet sur la répartition régionale du mercure (Laperche *et al.*, 2007), la zone de Montsinéry n'a pas été échantillonnée mais, il a été montré que sur les zones plus près de la côte, les teneurs en Hg dans les sédiments étaient plus proches de 0,06 µg/g que du fond géochimique de 0,10±0,05 µg/g. Les teneurs mesurées sont donc compatibles avec ce qui peut être attendu dans cette zone.

| Point | [Hg] séd. (mg/kg) | Masse MES (g/L) | [HgII] MES (µg/g) | [MMHg] MES (ng/g) | [HgII] eau (ng/L) | [MMHg] eau (pg/L) | [MMHg]/[HgII] (%) |
|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Camp2-B-Amont | 0,03 | 0,0014 | 1,31 | 10,6 | 0,60 | 28 | 4,8 |
| Camp2-B-Aval1 | 0,06 | 0,0033 | 0,92 | 18,7 | 0,85 | 29 | 3,4 |
| Camp2-B-Aval2 | 0,05 | 0,0026 | 1,85 | 46,4 | 1,00 | 40 | 3,9 |
| Camp3-B-Amont | 0,01 | 0,0015 | 1,13 | 28,3 | 1,73 | 19,6 | 1,1 |
| Camp3-B-Aval1 | 0,03 | 0,0028 | 1,64 | 15,2 | 1,72 | 72 | 4,2 |
| Camp3-B-Aval2 | 0,02 | 0,0042 | 2,68 | 4,1 | 1,28 | 9,0 | 0,7 |
| Camp4-B-Amont | 0,03 | 0,0038 | 1,20 | 1,9 | 2,58 | 18,1 | 0,7 |
| Camp4-B-Aval1 | 0,07 | 0,0114 | 0,32 | 3,0 | 8,64 | 36,7 | 0,4 |
| Camp4-B-Aval2 | 0,09 | 0,0076 | 0,91 | 0,7 | 8,30 | 23,6 | 0,3 |
| Camp5-B-Amont | 0,09 | 0,0195 | 0,55 | 1,0 | 1,20 | 60 | 5,0 |
| Camp5-B-Aval1 | 0,05 | 0,0688 | 0,28 | 4,0 | 2,80 | 143 | 5,1 |
| Camp5-B-Aval2 | 0,07 | 0,0452 | 0,32 | 2,6 | 3,50 | 166 | 4,7 |
| Camp6-B-Amont | 0,06 | 0,0027 | 1,02 | 7,1 | 3,15 | 33,2 | 1,1 |
| Camp6-B-Milieu | 0,09 | 0,0024 | 0,68 | 11,5 | 5,32 | 460 | 8,8 |
| Camp6-B-Aval1 | 0,07 | 0,0048 | 1,05 | 11,5 | 2,40 | 280 | 11,7 |
| Camp6-B-Aval2 | 0,07 | 0,0048 | 1,14 | 29,7 | 2,95 | 180 | 6,1 |
| Camp7-B-Aval1 | 0,06 | 0,0088 | 0,79 | 23,1 | NA | NA | NA |
| Camp7-B-Aval2 | 0,04 | 0,0156 | 0,35 | 25,0 | NA | NA | NA |

Illustration 16 : Résultats des concentrations en mercure dans les sédiments, les MES et les eaux de la défriche agricole sur la crique « Brûlis ».

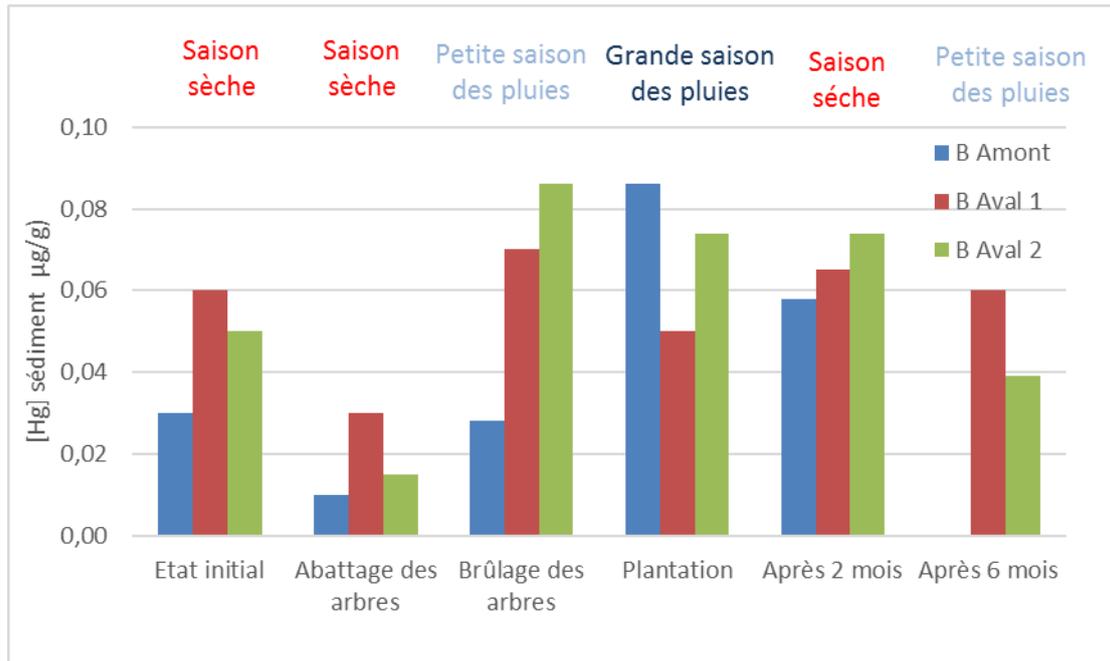


Illustration 17 : Variation de la concentration en Hg total dans les sédiments de la crique « Brûlis ».

Il y a une bonne corrélation entre la turbidité et les MES ($y = 0,852 * x$, $r^2 = 0,93$) même si sur les 18 mesures effectuées, 16 sont entre 1,2 et 12 NTU et qu'il n'y a que 2 valeurs fortes à 46,6 et 90,6 NTU (Illustration 18 et Illustration 19).

Les valeurs de turbidité (et de MES) n'augmentent pas après l'abattage des arbres. Il faut attendre l'étape du brûlage pendant la petite saison des pluies pour que la turbidité augmente. Il n'y a eu qu'une seule campagne pendant une grande saison des pluies sur la zone de « Brûlis », mais il y a eu des mesures de faites sur la zone « Prapra » lors de la 1^{ère} campagne en avril 2016 (Grande saison des pluies). En avril 2016, les mesures de turbidité sur la crique Prapra étaient de 2 NTU (P aval 1 et P aval 2 qui sont en aval de B aval 2). Il est donc possible de dire que la forte augmentation de la turbidité (90 NTU) est due à l'impact du brûlage des arbres. De nombreux travaux ont montré l'impact de la modification des sols forestiers en sols agricoles par la technique du slash-and-burn, cette technique cause des modifications par l'érosion des sols et l'entraînement des particules fines vers les rivières (Souza-Fihlo *et al.*, 2016 ; Sternberg, 1987 et Béliveau *et al.*, 2017).

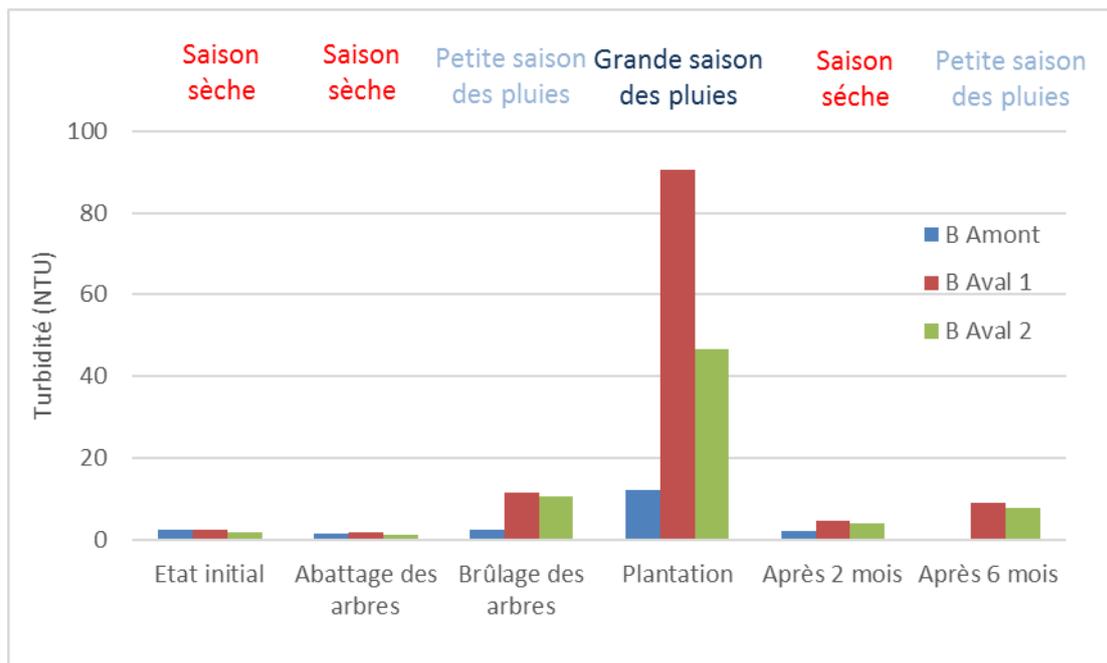


Illustration 18 : Évolution de la turbidité le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

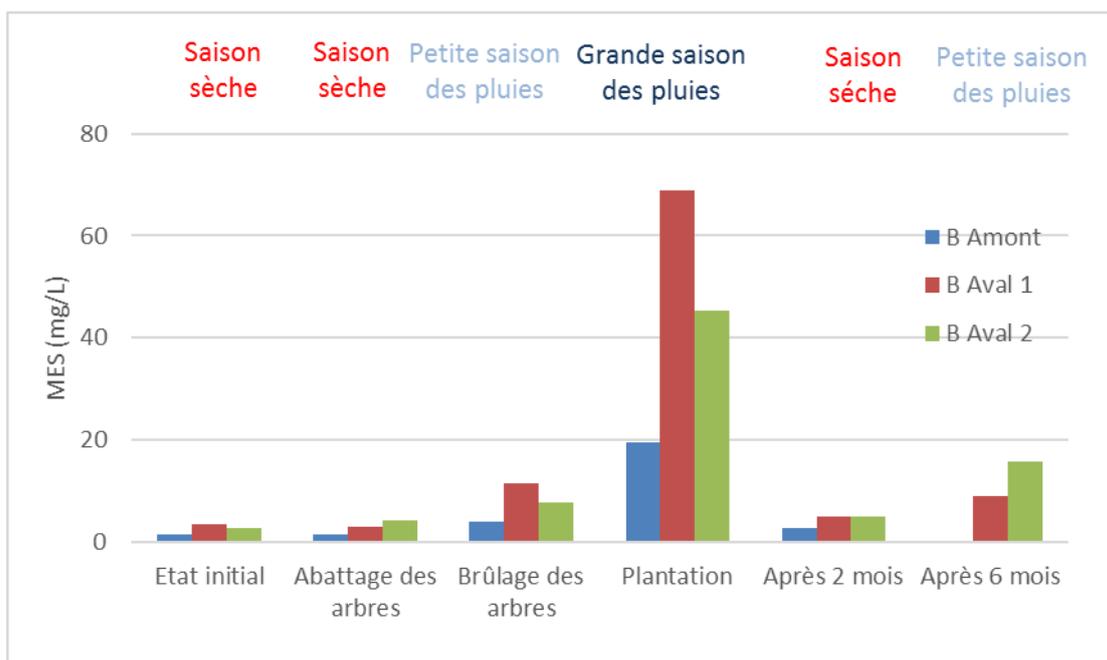


Illustration 19 : Évolution de la concentration en MES long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

Le brûlage semble avoir eu un impact sur la méthylation du mercure le long de la crique avec des augmentations des teneurs mais également des % MMHg/Hg (jusqu'à 12 % lors de la campagne 6). Au moment du brûlage, les concentrations en HgII augmentent fortement (de < 2 ng/L à > 8 ng/L (Illustration 20)). Ce résultat est cohérent avec les résultats de Farella (2006) qui indiquent que les niveaux de Hg dans les sols varient davantage dans la période suivant le brûlis que dans les stages ultérieurs d'utilisation des sols. En effet, dans les sols tropicaux, le pouvoir d'accumulation et l'oxydation de mercure, émis par le brûlage soit des amalgames pour récupérer l'or, soit de la végétation contenant également du mercure, dépend essentiellement de la nature du sol et notamment de son contenu en matière organique

(Soares *et al.* 2015). L'horizon de surface, le niveau le plus riche en matière organique, joue un rôle particulièrement important dans la rétention et l'oxydation de mercure. Ainsi, un cycle de déforestation et replantation modifie les propriétés de cet horizon, affectant le pouvoir de rétention de mercure dans les sols directement (qualité du sol) et indirectement (érodabilité). La majorité de la perte de Hg serait donc plutôt liée au brûlis en-soi qu'aux différents usages de la terre (Farella, 2005; Farella *et al.*, 2006). Le travail de Béliveau (2009) confirme les travaux de Farella (2006). De plus, on observe une augmentation du MMHg dissous de même que le pourcentage de MMHg par rapport au HgT, surtout à l'aval et avec un décalage dans le temps qui semble persister (Illustration 21). Ceci est tout à fait cohérent avec le fait qu'au moment du brûlage, du mercure soit libéré puis au cours du temps que ce mercure soit méthylé. Il est difficile de prédire une éventuelle pérennité de cette méthylation augmentée.

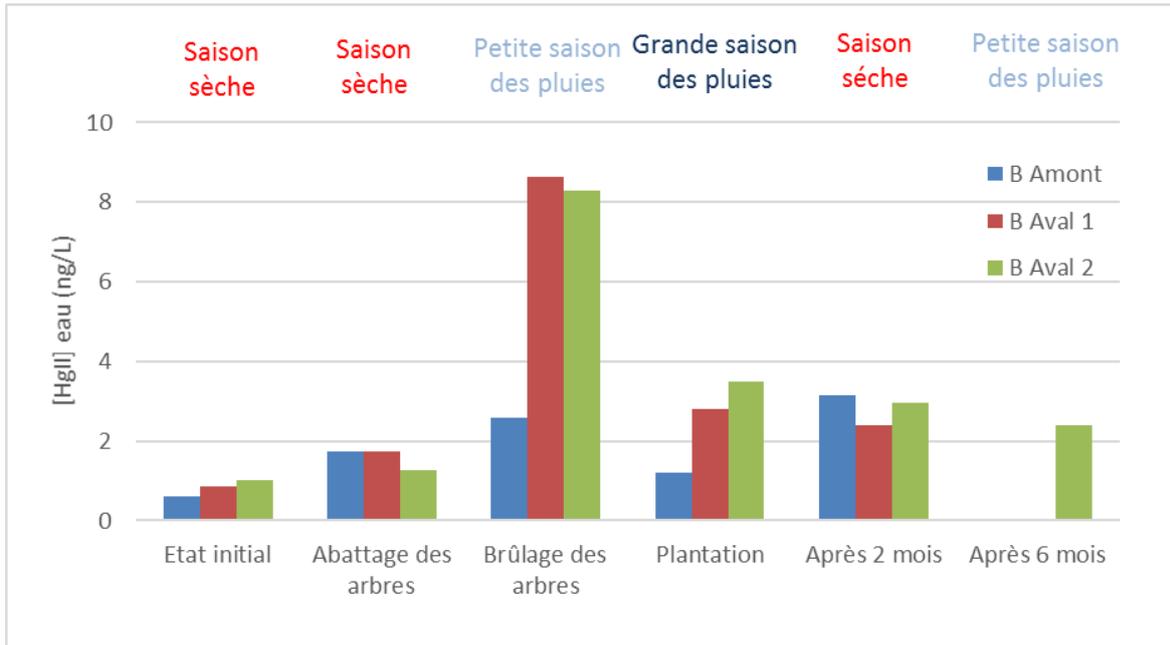


Illustration 20 : Évolution de la concentration en HgII dans les eaux le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

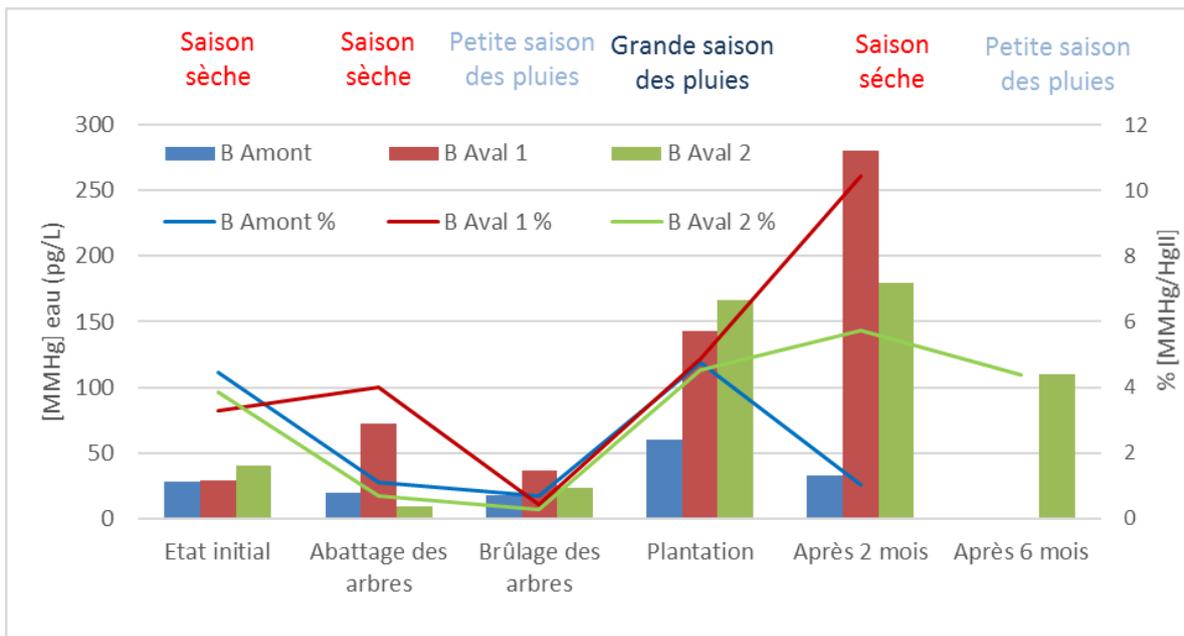


Illustration 21 : Évolution de la concentration en MMHg dans les eaux le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

Les teneurs en HgII dans les MES (Illustration 22) sont comparables par rapport aux résultats obtenus sur la concession CMB. Comme évoqué précédemment, la matière organique joue un rôle très important dans la rétention du Hg, ceci combiné aux très faibles débits et à la presque stagnation de l'eau peut favoriser l'accumulation du Hg sur les MES. Lors des 1^{ères} campagnes, pendant des saisons sèches, le HgII est « stocké » sur les MES et les teneurs en HgII dans les eaux sont faibles, cette tendance semble s'inverser lors du brûlage et de la saison des pluies. Ces deux conditions favorisent l'érosion des sols ce qui provoque des turbidités fortes dans les rivières avec des particules contenant davantage de HgII que de MMHg. De plus, une forte turbidité entraîne la présence d'une importante fraction colloïdale (des particules de tailles submicrométriques) qui traversent les membranes de filtration (0,2 µm) et s'ajoutent à la fraction « dissoute ». Ceci peut expliquer des valeurs en HgII ponctuellement assez fortes en condition de forte turbidité. Dans le cas du MMHg dans les MES (Illustration 23), les teneurs sont très faibles pendant les saisons des pluies, ce qui est cohérent avec la composition de la matière érodée, pour revenir à des teneurs comparables avant le brûlage. On n'observe pas la même tendance que dans les eaux où les teneurs en MMHg sont beaucoup plus élevées après le brûlage des arbres.

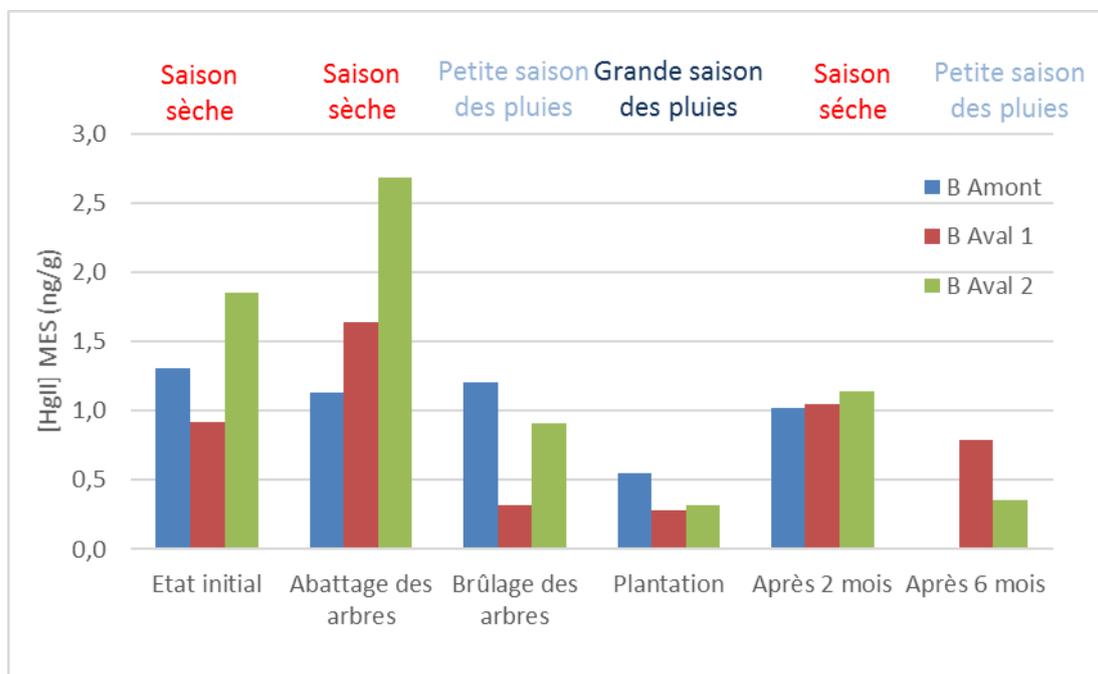


Illustration 22 : Évolution de la concentration en HgII dans les MES le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

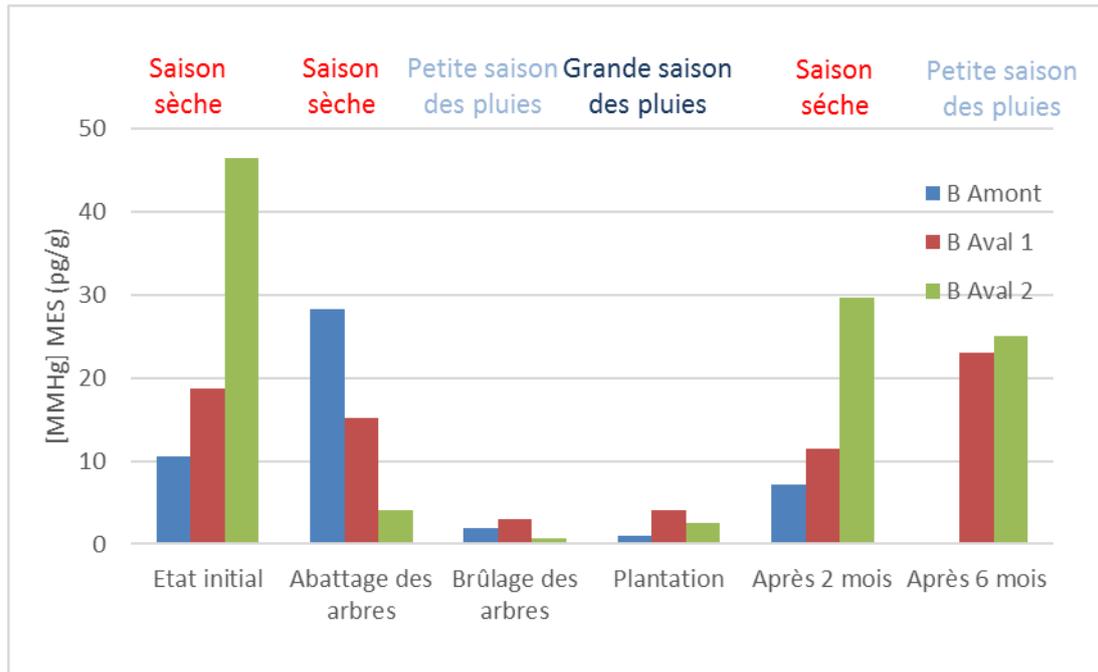


Illustration 23 : Évolution de la concentration en MMHg dans les MES le long de la crique « Brûlis » en fonction de l'activité sur la parcelle et des saisons.

6.3. L'AEX DE LA CRIQUE EDDIE

6.3.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés

Contrairement aux prévisions de démarrage de l'exploitation de la crique Eddie prévues en avril-mai 2016, celles-ci ont été repoussées en août-septembre car le matériel pour l'exploitation n'a pas été livré en Guyane.

La première campagne avant le début de l'exploitation a donc eu lieu le 22 août 2016 au niveau de la phase 2. Le « point-1 Amont » a été prélevé plus bas que prévu par rapport à la limite amont de la phase 2 car il n'y avait pas d'eau en amont de ce point. Le « point-1 Aval » a été prélevé à la limite entre la phase 1 et la phase 2 (Illustration 24).

L'exploitant ayant changé de « stratégie », il a fallu refaire une campagne avant le début de l'exploitation car il a décidé de commencer le chantier par la phase 3 (crique Timon). La campagne a eu lieu en février 2017. Trois prélèvements ont été faits le long de la crique (Illustration 24 et Illustration 25).

Il n'y a pas eu d'autre campagne pour le suivi car l'exploitation s'est arrêtée en avril 2017 suite en partie à des problèmes logistiques, de vols et de sécurité.

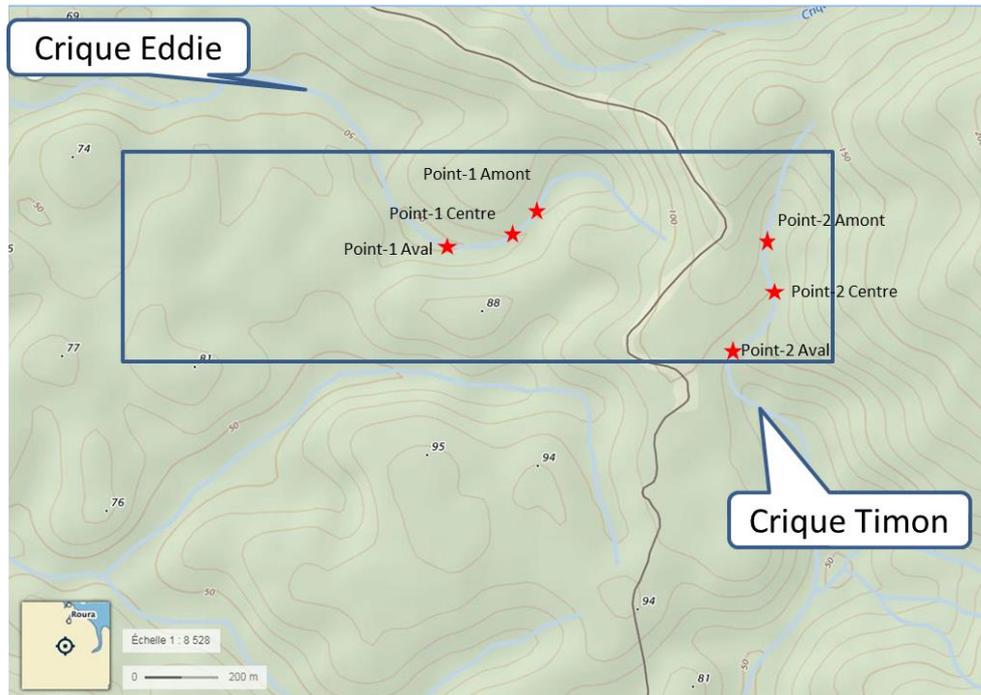


Illustration 24 : Position des points échantillonnés sur les criques Eddie et Timon.



Illustration 25 : (a) Appareil pour le traitement, (b) zone amont, (c) zone centre et (d) zone aval.

6.3.2. Résultats

L'arrêt de l'exploitation avant même son démarrage, a stoppé les analyses des échantillons. Seules certaines analyses de la 1^{ère} campagne sont présentées.

La concentration en mercure dans les sédiments du point « centre » de la crique Eddie est très élevée (14,8 mg/kg) et semble indiquer que ce site a jadis été orpaillé (Illustration 26).

Bien que les valeurs absolues de Hg et MMHg dissous ne soient pas particulièrement élevées, le MMHg atteint tout de même jusqu'à 22 % du Hg total dissous alors qu'à l'équilibre on attendrait moins de 2 %. Ceci indique des conditions potentiellement stagnantes et anaérobies propices à une méthylation bactérienne du mercure par des communautés sulfato ou ferri-réductrices.

Lors de la seconde campagne sur la crique Timon, les débits étaient du même ordre de grandeur sur le tronçon d'amont à aval (~30 L/s) même si le débit d'aval a été estimé car le régime était trop turbulent pour faire la méthode du bouchon (entre 30 à 50 L/s). La turbidité est faible (< 2,4 NTU) en amont et au centre comme lors de la 1^{ère} campagne sur la crique Eddie. Par contre, la turbidité est forte en aval (150 NTU) mais cela est probablement due au régime turbulent de la crique dans cette zone.

| Point | X | Y | Conductivité (µS) | taux O ₂ (mg/L) | Température (°C) | pH | Rédox (mV) | Turbidité (NTU) | Débit (L/s) |
|---------------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| Camp-1 Amont | 348243 | 489660 | 17,2 | 5,88 | 25,1 | 5,6 | 203 | 1,2 | NM |
| Camp-1 Centre | 348181 | 489586 | 17,4 | 6,11 | 25,3 | 5,8 | 170 | 0,8 | NM |
| Camp-1 Aval | 347980 | 489594 | 17,4 | 6,57 | 26,1 | 5,8 | 151 | 1,1 | NM |
| Camp-2 Amont | 348840 | 489555 | 20,2 | 7,09 | 24,5 | 5,9 | 223 | 2,4 | 34 |
| Camp-2 Centre | 348881 | 489485 | 20,3 | 6,10 | 24,6 | 6,3 | 207 | 2,4 | 32 |
| Camp-2 Aval | 348749 | 489247 | 19,5 | 7,95 | 24,7 | 6,6 | 248 | 150 | 30 à 50 |
| Point | [Hg] séd. (mg/kg) | Masse MES (g/L) | [HgII] MES (µg/g) | [MMHg] MES (ng/g) | [HgII] eau (ng/L) | [MMHg] eau (pg/L) | [MMHg]/[HgII] (%) | | |
| Camp-1 Amont | 0,68 | 0,0035 | NA | NA | 1,2 | 45 | 3,8 | | |
| Camp-1 Centre | 14,80 | 0,0028 | NA | NA | 1,3 | 150 | 11,0 | | |
| Camp-1 Aval | 0,75 | 0,0033 | NA | NA | 1,7 | 370 | 22,0 | | |
| Camp-2 Amont | 0,28 | 0,0023 | NA | NA | NA | NA | NA | | |
| Camp-2 Centre | 0,46 | 0,0037 | NA | NA | NA | NA | NA | | |
| Camp-2 Aval | < 0,2 | 0,0462 | NA | NA | NA | NA | NA | | |

Illustration 26 : Résultats des paramètres physico-chimiques et des concentrations en mercure dans les sédiments et les eaux de la crique Eddie ; NA : les échantillons n'ont pas été analysés à cause de l'arrêt de l'exploitation.

6.4. LA CONCESSION MINIÈRE DE CMB

6.4.1. Déroulé des missions et problèmes rencontrés

L'objectif sur ce site était de pouvoir suivre la remise en état d'un site de l'arrêt de l'exploitation jusqu'à la restauration d'une couverture végétale.

Lors de la première mission du 12 au 14 avril 2016, suite à l'arrêt de l'exploitation, il a été possible d'accéder au canal de dérivation de la crique Espérance par une piste de l'amont jusqu'au bout de la zone exploitée avant la confluence avec la crique Saint Michel (Illustration 27). Le point 1 a été prélevé dans la crique Espérance en amont de l'exploitation dans une zone non « exploitée » (au cours de la dernière exploitation). Les autres points ont été prélevés dans le canal de dérivation tous les 400-500 m les uns des autres. Le dernier point (point 4) est à ~150 m avant la fin de l'exploitation. Les prélèvements ont presque tous été faits sous la pluie dense ou bruine. Au total 4 points ont été échantillonnés le 12/04 et un dernier (point 5) le lendemain.

Il n'a pas été possible d'atteindre la confluence de la crique Espérance avec la crique St Michel, ces deux criques se rejoignent en effet plus bas dans la forêt. La crique St Michel n'a pas été échantillonnée du fait de la présence d'orpilleurs clandestins et la non représentativité des eaux à une situation d'arrêt d'exploitation. En effet, la crique Saint Michel était plus turbide que la crique Espérance. Il a été possible de ré-échantillonner les 5 points le surlendemain (14/04) sous un temps sec et ensoleillé.

La deuxième campagne a eu lieu le 28 septembre juste avant le régalage du site prévu en octobre avant la fin de la saison sèche, les 5 points ont été échantillonnés. Tous les points ont été échantillonnés dans les mêmes conditions.

La troisième campagne a été réduite du fait que le régalage n'avait pas été fait (problème de disponibilité du matériel car plusieurs pelleteuses en panne), seuls les points 1, 3 et 4 ont été échantillonnés en novembre 2016.

La quatrième campagne a eu lieu le 18 juillet, les 5 points ont été échantillonnés.

La cinquième campagne a eu lieu le 1^{er} décembre, tous les points ont été échantillonnés même si le régalage a commencé le 29 novembre entre les points 2 et 3.

La sixième campagne a eu lieu le 21 mars 2018, tous les points ont été échantillonnés, le régalage est terminé et les différentes espèces qui vont être implantées sur le site ont été apportées mais pas encore plantées. Le choix des plantes (Pois Sucré et Clitoria) et la revégétalisation du site sont assurés par la société de conseil en ingénierie écologique SOLICAZ.

La septième campagne a eu lieu le 26 juillet 2018, tous les points ont été échantillonnés. La végétation du site a été faite depuis un mois. Des signes d'exploitation par des orpilleurs clandestins sont visibles (puits, lance, moquettes...).

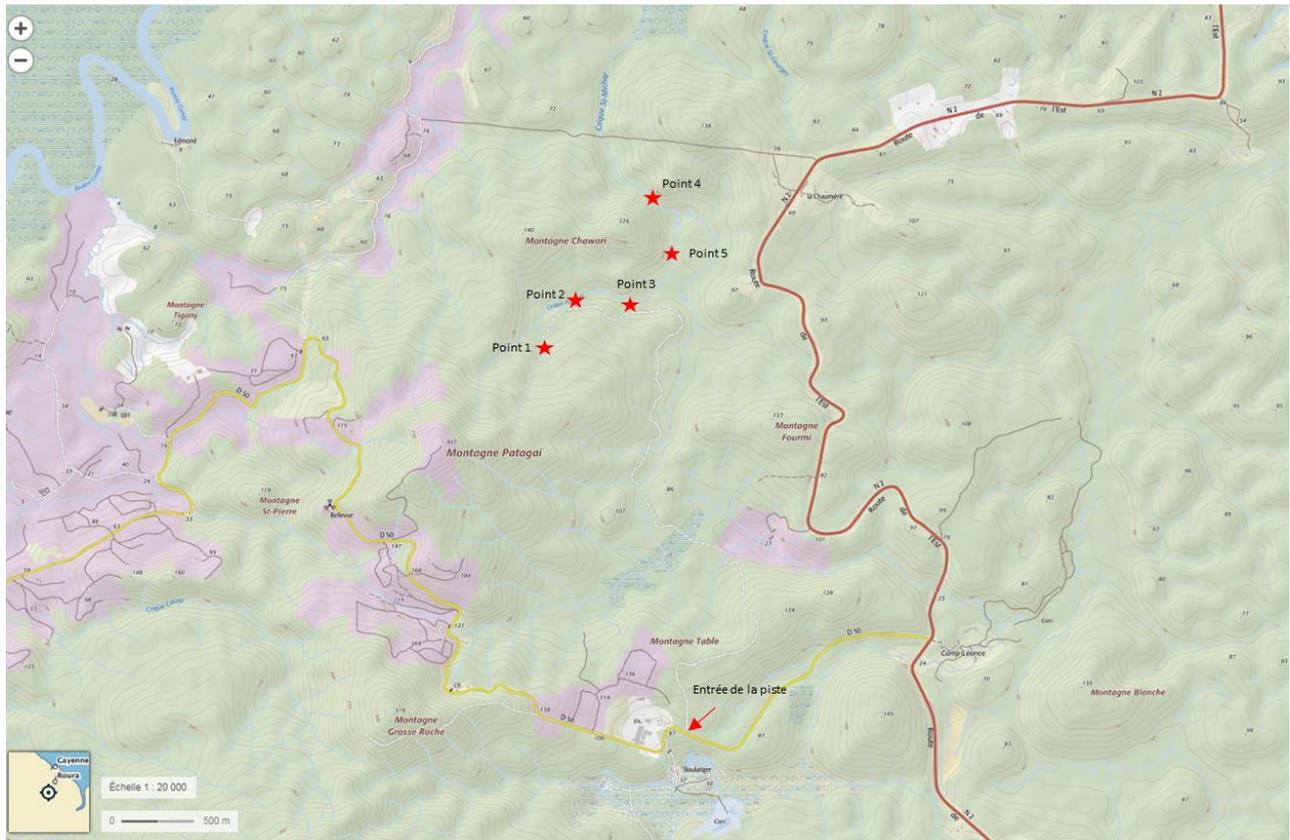


Illustration 27 : Position des points échantillonnés le long du canal de dérivation de la crique Espérance.

6.4.2. Résultats

Lors de chaque campagne, les sédiments (crème de vase) ont été prélevés pour analyser le Hg total, les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous (Illustration 28).

| Campagne | Camp1 | Camp1 | Camp2 | Camp3 | Camp4 | Camp5 | Camp6 | Camp7 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Point | 12/04/2016 | 14/04/2016 | 28/09/2016 | 18/11/2016 | 19/07/2017 | 01/12/2017 | 21/03/2018 | 26/07/2018 |
| Point 1 | 6,800 | 2,180 | 0,144 | 0,129 | 0,017 | 0,013 | 0,047 | 0,116 |
| Point 2 | 0,025 | 0,030 | 0,054 | NP | 0,024 | 0,057 | 0,053 | 0,036 |
| Point 3 | 0,040 | 0,035 | 0,087 | 0,054 | 0,035 | 0,169 | 0,102 | 0,108 |
| Point 5 | 0,040 | 0,040 | 0,075 | NP | 0,078 | 0,269 | 0,250 | 0,092 |
| Point 4 | 0,090 | 0,085 | 0,042 | 0,081 | 0,099 | 0,262 | 0,195 | 0,128 |

Illustration 28 : Concentrations en Hg total dans les sédiments ($\mu\text{g/g}$) ; NP : Non Prélevé.

Entre les campagnes 1 et 2, le point 1 (amont) a été décalé car non « représentatif » d'une zone non impactée par le mercure. En effet, le point 1 de la 1^{ère} campagne présente une concentration en mercure élevée dans la crème de vase (6,8 et 2,18 $\mu\text{g/g}$) et dans les MES (2,35 $\mu\text{g/g}$). Même si lors des campagnes suivantes (Illustration 29), le point 1 est toujours plus élevé, il est du même ordre de grandeur que les autres points (0,14 $\mu\text{g/g}$ pour le point 1 et entre 0,04 et 0,09 $\mu\text{g/g}$ pour les 4 autres points dans la crème de vase) jusqu'au régalage du site. Les concentrations en Hg sont 2 à 3 fois plus élevées dans les zones de régalage. La remise en état du site et le réaménagement du canal de dérivation a certainement apporté ou mis à jour des sédiments plus impactés par les anciennes méthodes utilisant du mercure. Cela semble temporaire puisque les concentrations ont diminué lors de la dernière campagne et sont du même ordre de grandeur que les 0,10 \pm 0,05 $\mu\text{g/g}$ du fond géochimique des sédiments de rivière (Laperche *et al.*, 2014).



Illustration 29 : Variation de la concentration en Hg total dans les sédiments de la crique Espérance.

L'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain est rassemblé en annexe 1. L'analyse des paramètres physico-chimiques est difficilement interprétable dans son ensemble. Pour certains paramètres, il n'y a pas de corrélation d'une campagne à l'autre ou lors d'une même campagne. La conductivité du point amont en fin de zone forestière (point 1) est toujours supérieure aux résultats de conductivité des points de la zone exploitée (points 2 à 5) quelle que soit la saison. Pour le pH, même s'il est un peu plus élevé pour le point 1, les différences entre les points au cours du temps ne sont pas aussi marquées que pour la conductivité. Le taux d'O₂ varie peu au cours du temps (Annexe 1).

Les résultats des analyses de Hg²⁺ (ou HgII) et du MMHg des MES et des eaux sont rassemblés en annexe 2.

Quel que soit le point échantillonné et la saison, il existe bien une corrélation entre la turbidité mesurée sur site et la teneur en MES après filtration des eaux (Illustration 30). Quelques photographies montrant les variations de la turbidité de la crique Espérance sont rassemblées en annexe 3.

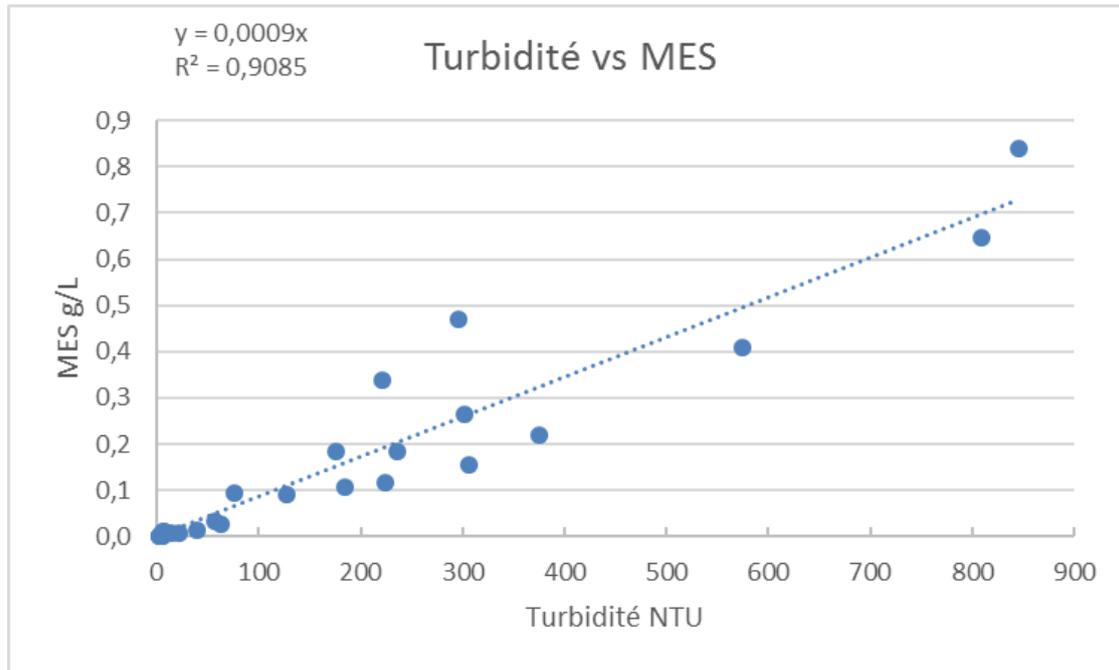


Illustration 30 : Corrélation entre les mesures de turbidité (NTU) et les masses (g/L) de MES dans les eaux.

Celle-ci est faible en amont (point 1) et stable de la campagne 1 à 6 (Illustration 31). Lors de la campagne 1 (fin de l'exploitation et pendant la saison des pluies), tous les points présentent des turbidités élevées (128 à 845 NTU) ; il en est de même lors de la campagne 5 qui a été faite pendant la petite saison des pluies. Au vu des résultats de turbidité du point 2 (6,1 NTU), il semble que ce n'est pas l'impact seul des pluies qui augmente la turbidité mais aussi le fait que le régalage a commencé entre les points 2 et 3 impactant l'aval. Lors des autres campagnes (2, 3, 4 et 6) effectuées durant des saisons sèches, les valeurs de turbidité sont beaucoup plus faibles. Lors de la campagne 2 où il n'y a aucun travail sur le site, les turbidités sont comprises entre 3,2 et 5,3 NTU. Idem pour la campagne 6 où les turbidités (même si elles sont supérieures à celles de la campagne 2) sont comprises entre 4,5 et 14,2 NTU. Il n'y a que lors de la campagne 4 où des travaux de régalage ont commencé en aval du site que les turbidités augmentent mais sans atteindre les valeurs de turbidité des saisons des pluies (57,5 et 62,6 NTU) Lors de la dernière campagne les valeurs de turbidité augmentent même au niveau du point 1. Cette augmentation est due à la présence d'orpailleurs sur le site. Celui-ci étant « sans surveillance », les orpailleurs sont installés pour réexploiter le site (Illustration 32). L'augmentation de la turbidité lors de la dernière campagne combine à la fois les effets de la saison des pluies et de la reprise d'activité sur le site.

Ces résultats sont cohérents avec ce que l'on peut s'attendre :

- augmentation de la turbidité lors des saisons des pluies ;
- augmentation de la turbidité lors de travaux d'aménagement du site et de reprise d'activité.

La mesure de la vitesse de l'eau avec la méthode du bouchon a été rendue difficile par plusieurs facteurs concomitants ou non :

- faible profondeur ;
- canal non linéaire ;
- largeur du canal très variable ;
- encombrement du canal (branches, troncs d'arbres...) ;
- ...

Ces difficultés, les mesures ponctuelles et la présence d'orpailleurs en aval du site, ne rendent pas pertinentes, le calcul de flux de MES. Il est très difficile d'estimer l'impact réel de l'exploitation sur la rivière en aval. Dans l'étude précédente (Laperche *et al.*, 2013), les mesures ont été faites sur des criques et des rivières ayant une profondeur suffisante pour mesurer les débits quelle que soit la saison. Pour éviter les problèmes de faibles débits, soit on construit un exutoire à la sortie de l'exploitation pour mesurer ce qui sort soit on ne fait que des mesures dans des criques ayant un débit suffisant pour mesurer ce qui provient du « bassin versant ».

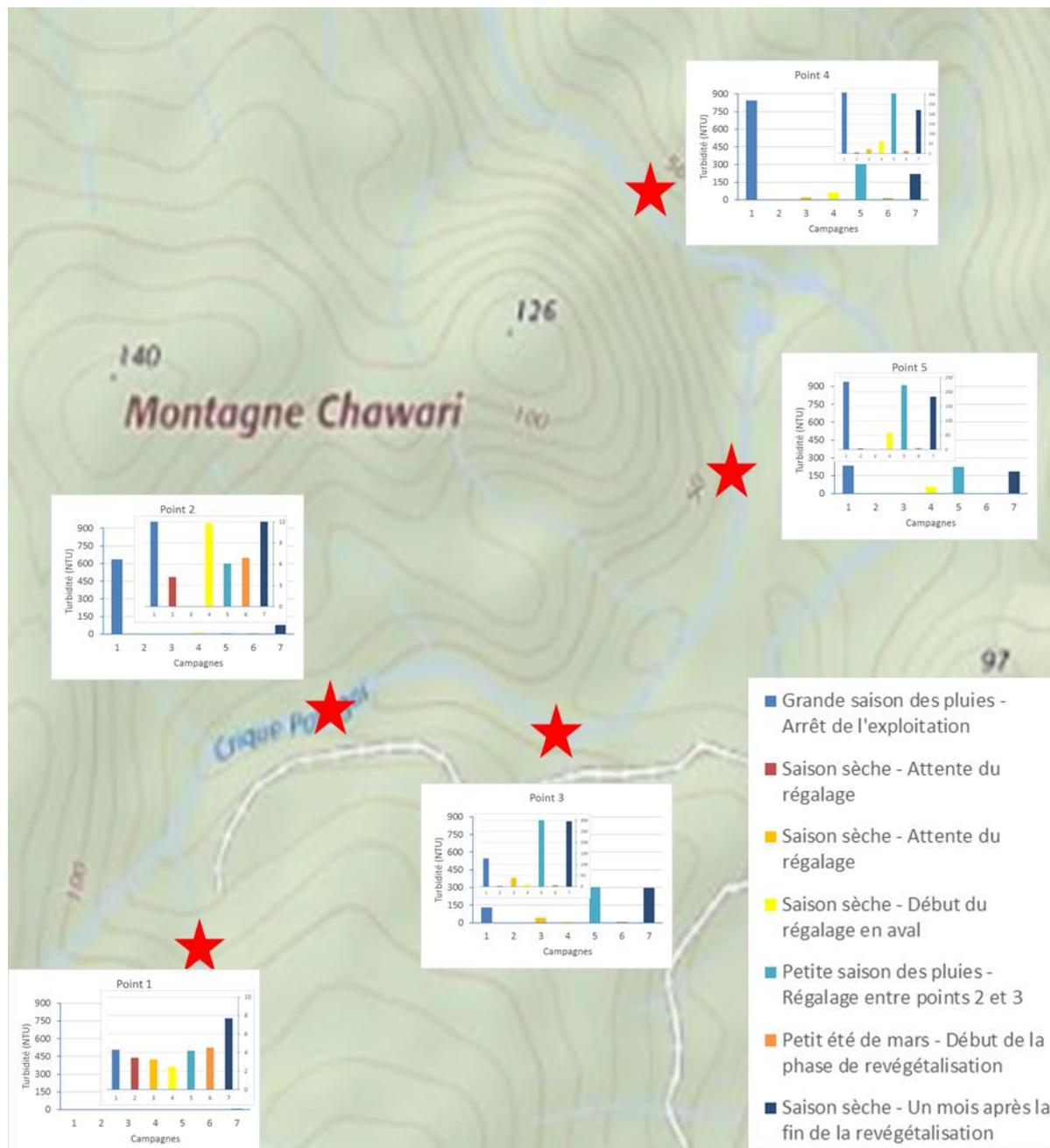


Illustration 31 : Évolution de la turbidité le long de la crique Espérance du 14/04/2016 au 26/07/2018.



Illustration 32 : Photographies de la présence des orpailleurs (a et b : grille et lance en amont du point 1) ; (c : entrée de galerie sur la rive droite de la crique, entre les points 2 et 3) et des modifications du site (d : canal d'orientation, en amont du point 2).

Comme discuté ci-dessus, les teneurs les plus élevées en MES sont observées pendant la première saison des pluies après l'arrêt de l'exploitation de la crique. Les secondes valeurs les plus élevées sont aussi mesurées durant les campagne 5 et 7 (petite saison des pluies). Durant la période d'intervalle, une végétation spontanée s'est développée et a pu contribuer à stabiliser partiellement les sols même si sans données supplémentaires pendant une grande saison des pluies il n'est pas possible de conclure. Ce qui est très intéressant sur ce site est que nous avons maintenant des données sur une durée assez longue, par contre nous pensons que les turbidités et en conséquence les teneurs en MES peuvent fluctuer rapidement lors d'épisodes pluvieux ponctuels surtout si les orpailleurs continuent à travailler sur le site, empêchant de mesurer les effets de la revégétalisation du site sur la qualité des eaux.

Les teneurs en mercure et méthylmercure par gramme de MES sec sont présentées sur l'illustration 33 et l'illustration 34. Les teneurs en Hg fluctuent entre 0,6 µg/g et 6 µg/g. À titre de comparaison les valeurs maximales mesurées dans les MES de la crique Boulanger en 2012-2013 étaient de 0,5 µg/g, les teneurs trouvés ici sont donc particulièrement élevées et mis à part le point 1 de la première campagne, ces valeurs ne correspondent pas aux teneurs

mesurées dans les sédiments qui tournent plus autour de 0,1 µg/g. Les teneurs en MMHg sont par contre plus proches des valeurs trouvées par Guédron *et al.* (2011) sur la crique Combat et sa confluence avec la crique Boulanger où les valeurs oscillaient entre 0,75 et 9,6 ng/g de MES.

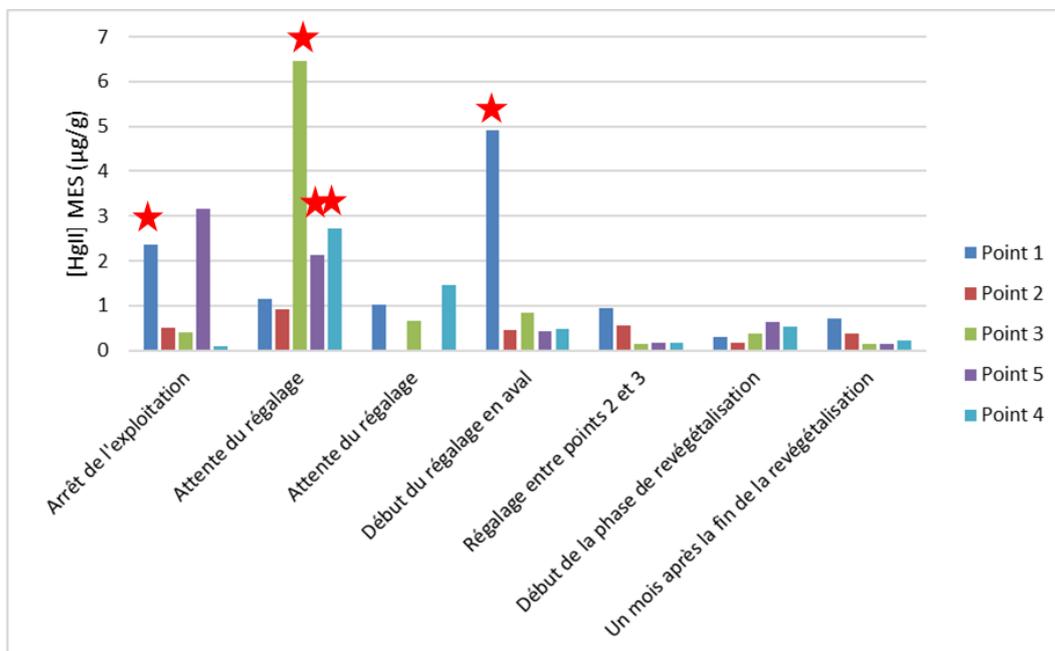


Illustration 33 : Teneurs en HgII (µg/g) dans les MES lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. Les valeurs marquées d'une étoile rouge correspondent à des échantillons de très faibles masses d'où de fortes incertitudes sur les concentrations déterminées.

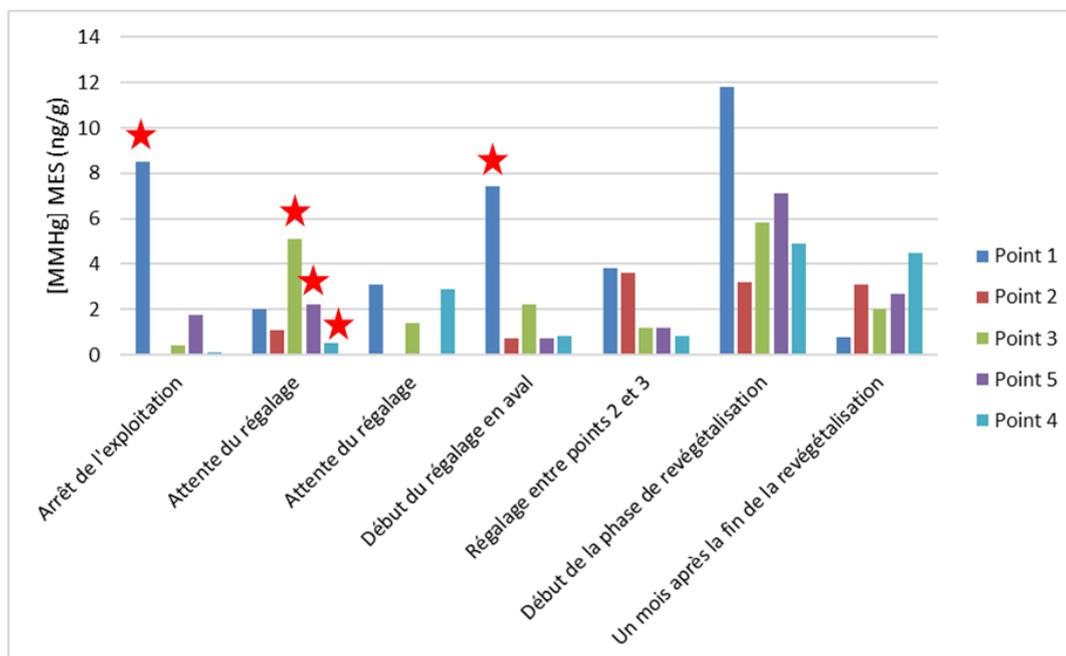


Illustration 34 : Teneurs en MMHg (ng/g) dans les MES lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance. Les valeurs marquées d'une étoile rouge correspondent à des échantillons de très faibles masses d'où de fortes incertitudes sur les concentrations déterminées.

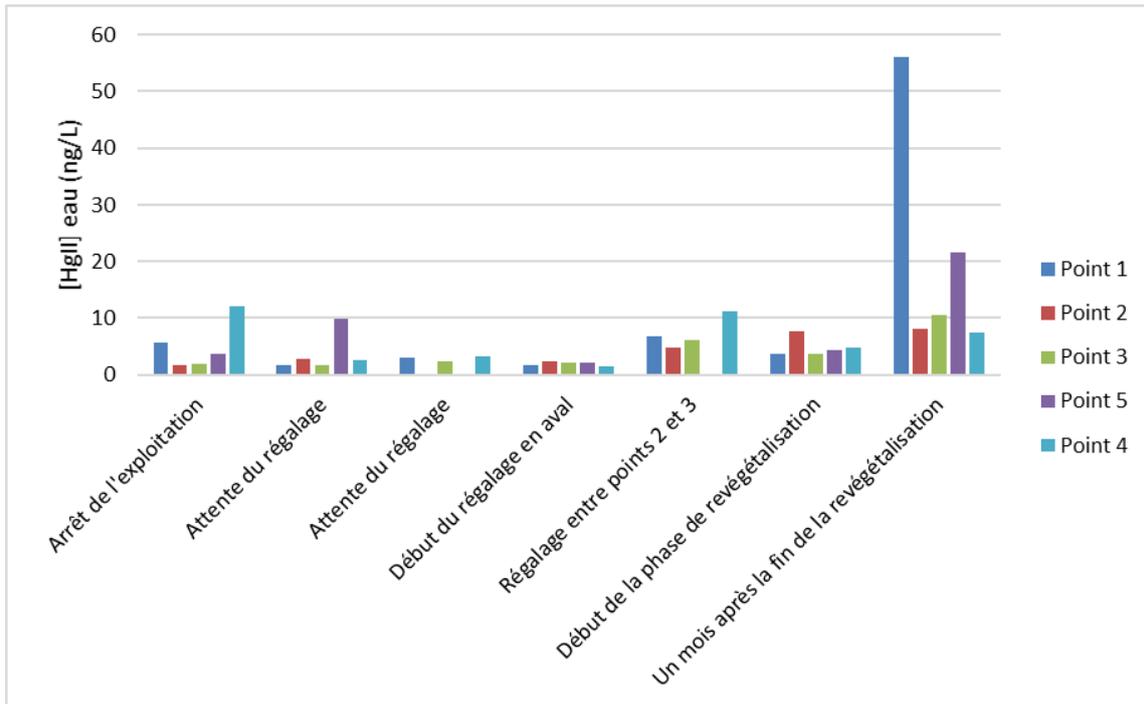


Illustration 35 : Teneurs en HgII (ng/L) dissous dans les eaux lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance.

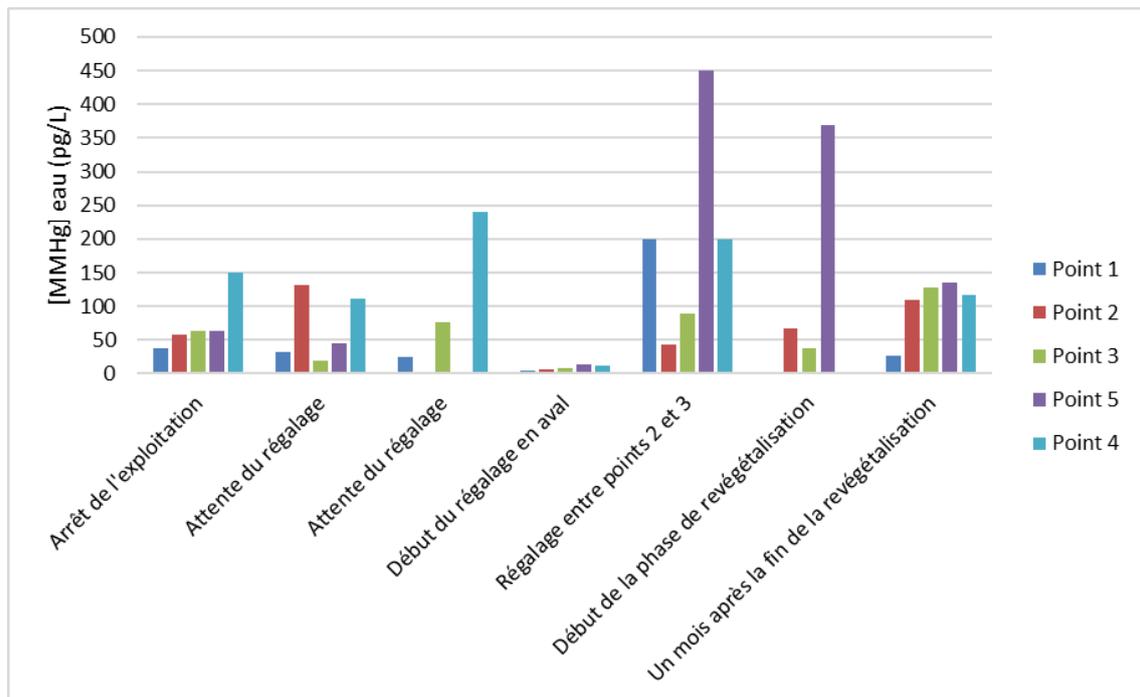


Illustration 36 : Teneur en MMHg (pg/L) dissous dans les eaux lors des campagnes 1 à 7 depuis l'amont (point 1) jusqu'à l'aval (point 4) de la crique Espérance.

Les teneurs en HgII dissous affichent des valeurs globalement similaires à celles observées le long de la crique Combat en 2012-2013, lors de cette précédente étude nous avons trouvé des valeurs 4 fois plus élevées pendant la saison des pluies alors qu'aucune tendance spécifique n'apparaît ici. De même pour les concentrations en MMHg qui ponctuellement affichent des valeurs plus élevées que la moyenne sans que ce soit exceptionnel. En effet, les teneurs en MMHg dans des eaux de rivières sont généralement de l'ordre de quelques pourcents comme dans la présente étude (Morvay *et al*, 2017 ; Viara *et al* 2018).

7. Conclusions et perspectives

Cette étude renforce les connaissances sur les quantités de mercure et méthylmercure présentes dans les eaux et les MES dans différents contextes de perturbations des sols guyanais. Elle met en évidence la grande difficulté de pouvoir conclure sur des tendances sur des délais courts, en effet deux mesures pendant chaque saison sèche/humide sembleraient être un minimum à respecter lors de futures études pour mettre en évidence des effets autres que saisonnières. Dans le contexte agricole, après le brûlis, les augmentations de méthylmercure qui pourraient être liées à un apport significatif de matière organique dans les eaux, favorisant les conditions de méthylation, appelle à une évaluation plus large des impacts agricoles (pratiques, apport d'amendements) sur la qualité des eaux de surface guyanaises.

Sur les sites miniers anciennement orpaillés, on a un stock potentiellement plus important de mercure qu'en contexte agricole. Ce surplus de mercure est principalement dû aux anciennes pratiques minières qui utilisaient du mercure. Ce stock potentiel est plutôt sous la forme de Hg métal qu'il faut d'abord mettre en conditions oxydantes pour qu'il se retrouve sous la forme de HgII qui, à son tour, peut être méthylé en conditions réductrices. Les pratiques minières sont différentes d'un site à un autre. Sur la crique Eddie, les teneurs en MMHg étaient importantes mais seul l'état initial a été fait, il n'est donc pas possible de savoir si les conditions qui devaient être mises en place allaient ou non favoriser la méthylation. Les pratiques sur la concession CMB sont de décaper complètement le sol, il n'y a donc plus d'horizon de surface riche en matière organique susceptible de favoriser la méthylation. Le risque viendrait plutôt des barranques comme montré par Guédron *et al.* (2006) où des conditions anoxiques apparaissent au fond. La fermeture des barranques au fur et à mesure de l'avancée du chantier permettrait de limiter les risques de formation de conditions anoxiques.

Dans le contexte minier, l'impact certain du réglage sur l'érosion et la charge en MES ponctuellement dans le cours d'eau appelle à encourager ce réglage le plus rapidement possible après l'arrêt de l'exploitation afin de ne pas devoir perturber un écosystème qui s'est en partie spontanément revégétalisé.

Dans les deux contextes, agricole et minier, de futurs travaux pour mieux comprendre le rôle de la matière organique dans la répartition du Hg dans les MES et les sédiments pourraient expliquer les tendances observées dans cette étude. De même des essais pour évaluer l'impact de la présence des MES (anoxie, limitations de la pénétration des UV) sur la méthylation/déméthylation du mercure, en particulier en contexte agricole où l'apport de matière organique labile avec une érosion ponctuelle forte des sols peut favoriser la méthylation du mercure, mais la réduction du couvert végétal peut également favoriser l'ensoleillement et la déméthylation chimique par les UV. Des essais couplant terrain et laboratoire avec utilisation des isotopes stables du Hg pour évaluer ces potentiels de méthylation/déméthylation dans différentes conditions sont envisageables.

Il semble important d'ajouter le Hg total mais aussi le méthylmercure sur la liste des substances à suivre spécifiquement en Guyane dans le cadre de la DCE. Cela permettrait déterminer la « ligne de base de ces teneurs en Hg » pour pouvoir facilement repérer une anomalie.

8. Bibliographie

Barkay, T., Miller, S. and Summers, A. (2003) - Bacterial mercury resistance from atoms to ecosystems. *FEMS Microbiol Rev* 27(2-3): 355-384.

Béliveau A., Lucotte M., Davidson R., Otavio do Canto Lopes L., Paquet S. (2009) - Early Hg mobility in cultivated tropical soils one year after slash-and-burn of the primary forest in the Brazilian Amazon. *Science of the Total Environment*, 407, 4480-4489.

Béliveaux A., Lucotte M., Davidson R., Paquet S., Mertens F., Passos C. J., Romana C. A. (2017) - Reduction of soil erosion and mercury losses in agroforestry systems compared to forests and cultivated fields in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 203, 522-532.

Farella, N. (2005) - « Les fermes des régions frontières d'Amazonie brésilienne: relations entre les origines familiales, les pratiques agricoles, les impacts sur les sols et le déboisement ». Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Montréal, Université du Québec à Montréal, 185 p.

Farella, N, R. Davidson, M. Lucotte et S. Daigle. (2006) - Mercury release from deforested soils triggered by cation enrichment. *Science of the Total Environment*, no 368, p. 19-29.

Fitzgerald, W. F. and Mason, R. P. (1997) - Biogeochemical cycling of mercury in the marine environment. *Metal Ions Biol. Syst.* 34: 53-111.

Fleming, E. J., Mack, E. E., Green, P. G. and Nelson, D. C. (2006) - Mercury Methylation from Unexpected Sources: Molybdate-Inhibited Freshwater Sediments and an Iron-Reducing Bacterium. *Appl. Environ. Microbiol.* 72(1): 457-464.

Gadd, G. M. (1993) - Microbial formation and transformation of organometallic and organometalloid compounds. *FEMS Microbiology Reviews* 11(4): 297-316.

Grimaldi C., Grimaldi M., Guedron S. (2008) - Mercury distribution in tropical soil profiles related to origin of mercury and soil processes. *Science of the Total Environment* 401(1-3):121-129.

Guédron S., Grimaldi C., Chauvel C, Spadini L, Grimaldi, M. (2006) - Weathering versus atmospheric contributions to mercury concentrations in French Guiana soils. *Applied Geochemistry*, 21, 2010–2022.

Guédron S., Cossa D., Grimaldi M. Charlet L. (2011) - Methylmercury in tailings ponds of Amazonian gold mines (French Guiana): Field observations and an experimental flocculation method for in situ remediation. *Applied Geochemistry* 26 (2011) 222–229.

Kerin, E. J., Gilmour, C. C., Roden, E., Suzuki, M. T., Coates, J. D. and Mason, R. P. (2006) - Mercury Methylation by Dissimilatory Iron-Reducing Bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.:* AEM.01602-06.

Laperche V., Maury-Brachet R., Blanchard F., Dominique Y., Durrieu G., Massabuau J.C., Bouillard H., Joseph B., Laporte P., Mesmer-Dudons N., Duflo V., Callier L. (2007) - Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane. *Rapport BRGM/RP-55965-FR*, 201 p., 72 ill., 15, tableaux, 2 ann.

Laperche V., Harris-Hellal J., Moisan M., Joseph B., Bossy B., Dutruch L., Reynouard C., Lanceleur L., Schäfer J., Vigouroux R. et Blum A. (2013) - Bilan des flux de mercure sur un bassin versant guyanais : de la rivière Boulanger au fleuve Oyack. Rapport final BRGM/RP-62732X-FR, 63 p.

Laperche V., Hellal J., Maury-Brachet R., Joseph B., Laporte P., Breeze D., Blanchard F. (2014) - Regional distribution of mercury in sediments of the rivers of French Guiana (Amazonian basin), SpringerPlus, 3:322 (doi:101186/2193-1801-3-322).

Malm O. (1998) - Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon Environmental Research, 77(2):73–78.

Mason, R. P., Morel, F. M. M. and Fitzgerald, W. F. (1994) - The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(15): Pages: 3191-3198.

Morel, F. M. M., Kraepiel, A. M. L. and Amyot, M. (1998) - The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annual review of ecology and systematics* 29: 543-566.

Morway, E.D., Thodal, C.E., Marvin-DiPasquale, M. (2017) - Long-term trends of surface-water mercury and methylmercury concentrations downstream of historic mining within the Carson River watershed. *Environmental Pollution*, **229**, 1006-1018.

Nriagu, J. O. (1989) - A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. 338 (6210): 47-49. Nriagu, J. O. 1994. Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas. *The Science of The Total Environment* 149(3): 167-181.

Roulet M., M. Lucotte, A. Saint-Aubin, S. Tran, Rheault, N. Farella, E. de Jesus da Silva, J. Dezencourt, C., Sousa Passos, G. Santos Soares, J.-R. D. Guimaraes, D. Mergler et M. Amorim. (1998) - The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chao formation of the lower Tapajós River Valley, Para state, Brazil». *The Science of the Total Environment*, vol. 223, p. 1-24.

Roulet, M., M. Lucotte, N. Farella, G. Serique, H. Coelho, C. J. Sousa Passos, E. de Jesus da Silva, P. Scavone de Andrade, D. Mergler et M. Arnorim. (1999) - «Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems». *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 112, p. 297-313.

Roulet, M., M. Lucotte, R. Canuel, N. Farella, M. Courcelles, J.-R. Guimaraes, D. Mergler et M. Arnorim. (2000) - «Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon». *Chemical Geology*, vol. 165, p. 243-266.

Soares L.C., Egreha Filho F.B., Linhares L.A., Windmoller C.C., Yoshida M.I., (2015) - Accumulation and oxidation of elemental mercury in tropical soils. *Chemosphere* 134, 181-191.

Souza-Filho, W.M., de Souza, E.B., Silva Jr., R.O., Nascimento Jr., W.R., Versiani de Mendonça, B.R., Guimar~aes, J.T.F., Dall'Agnol, R., Siqueira, J.O., (2016) - Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management* 167 (1), 175-184.

Sternberg, H.O., (1987) - Aggravation of floods in the Amazon River as a consequence of deforestation? *Geogr. Ann. Ser. A, Phys. Geogr.* 69 (1), 201-219.

Veiga, M. M., Hinton, J. and Lilly, C. (1999) - Mercury in the Amazon: A comprehensive Review with special Emphasis on Bioaccumulation and Bioindicators. Forum'99, Minamata, Japan, Proc NIMD (National Institute for Minamata Disease).

Vieira, M., Bernardi, J.V.E., Dórea, J.G., Rocha, B.C.P., Ribeiro, R., Zara, L.F. (2018) - Distribution and availability of mercury and methylmercury in different waters from the Rio Madeira Basin, Amazon. Environmental Pollution, **235**, 771-779.

Annexe 1

Résultats des mesures de débit pour le site de la défriche agricole (Montsinéry)

Rapport H2e, 2016



FLUX DE MERCURE ET DE MEST : STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE EN ZONE AGRICOLE ET MESURES DE DÉBITS



22/12/2016

Objectif de distinction
des différentes sources de mercure :
anciennes défriches, brûlis et
Défrichement Innovant Biomasse Énergie

H2E
Hydrologie Études Environnement

Appt 5, 8 rue Barrat,
97300, Cayenne
h2eguyane@orange.fr
06.94.43.33.25

N° SIRET : 50528293900022

Maître d'Ouvrage :



SOMMAIRE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ENJEUX..... | 3 |
| 2 | OBJECTIFS | 3 |
| 3 | STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE..... | 4 |
| 3.1 | POSITIONNEMENT SIMPLIFIÉ DES ÉCHANTILLONS POUR DIFFÉRENCIATION DES SOURCES D'IMPACTS | 4 |
| 3.2 | ÉCHANTILLONS RÉALISÉS ET ÉCHANTILLONS PRÉVUS | 4 |
| 4 | MESURES ET CALCULS DE DÉBITS..... | 5 |
| 4.1 | MÉTHODE SIMPLIFIÉE | 5 |
| 4.2 | MESURES INITIALES (AVRIL ET JUIN 2016) | 6 |
| 4.2.1 | Application au point P aval 1 (avril et juin) | 6 |
| 4.2.2 | Application au point P aval 2 (avril) | 8 |
| 4.2.3 | Application au point P aval 2 en (juin) | 9 |
| 4.2.4 | Application au point B amont en (juin) | 11 |
| 4.2.5 | Application au point B aval 1 en (juin) | 15 |
| 4.2.6 | Application au point B aval 2 en (juin) | 16 |
| 4.3 | MESURES APRÈS ABATTAGE DE LA ZONE EST VOUÉE AU BRÛLIS (JUILLET 2016) | 19 |
| 4.3.1 | Application au point B amont | 19 |
| 4.3.2 | Application au point B aval 1 | 20 |
| 4.3.3 | Application au point B aval 2 | 23 |
| 4.4 | MESURES APRÈS BRÛLAGE DE LA ZONE EST (DÉCEMBRE 2016) | 25 |
| 4.4.1 | Analyse préliminaire et hypothèses | 25 |
| 4.4.2 | Application au point B amont | 26 |
| 4.4.3 | Application au point B aval 1 | 28 |
| 4.4.4 | Application au point B aval 2 | 31 |
| 4.4.5 | Discussion des résultats obtenus en décembre | 33 |

FLUX DE MERCURE ET DE MEST : STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE EN ZONE AGRICOLE ET MESURES DE DÉBITS

1 ENJEUX

L'enjeu principal est de débiter une phase de mesures en milieu agricole, en état initial, puis impacté par le défrichement, puis « réhabilité ». Les mesures et extrapolations de débits, jointes aux mesures précises de MEST et de concentrations de mercure dans l'eau et dans les MEST, permettent d'atteindre un ordre de grandeur des flux massiques pour :

- des comparaisons inter-sites proches, entre zones non défrichées, anciennement défrichées, bientôt défrichées par brûlis et bientôt défrichées pour la biomasse à vocation énergétique,
- Des comparaisons temporelles état initial-impact-état impacté « réhabilité » par type de défrichement.

L'enjeu final est d'améliorer la stratégie et les méthodes d'échantillonnage.

2 OBJECTIFS

→ **Solution palliative, mesures simplifiées temporaires de débits :**

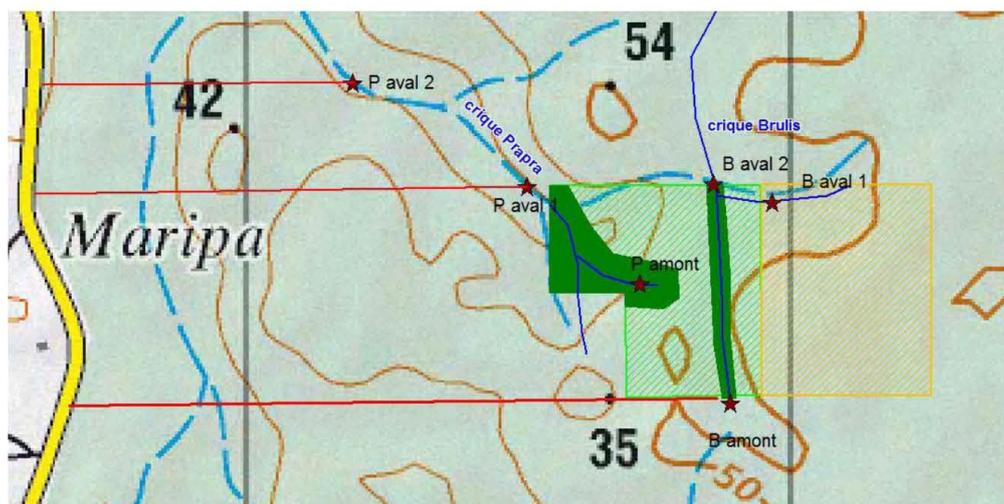
Compte tenu des difficultés d'utilisation des courantomètres magnétiques dans les très petites masses d'eau (TPME), et en absence temporaire de ce matériel, les mesures de terrain peuvent s'effectuer :

1o par des mesures-interpolations de profils horizontaux de vitesses de surfaces et par extrapolation des paraboles verticales types de vitesses et ce en fonction des caractéristiques des criques (répartition des frottements et lignes de courant) avec de fortes incertitudes sur les résultats compte tenu des très faibles débits ;

2o par des systèmes de déversoir adaptés aux caractéristiques prévisibles des cours d'eau en saison sèche (notamment en cas de très faibles vitesses ou de TPME avec une hauteur probable < 5cm en saison sèche et une impossibilité d'utiliser le courantomètre magnétique)

3 STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

3.1 Positionnement simplifié des échantillons pour différenciation des sources d'impacts



Zones vert foncé : zones tampons à préserver autour des cours d'eau.

Zone hachurée vertes : zone vouée à l'extraction de bois pour la biomasse énergie.

Zone hachurée orange : zone vouée au brûlis.

Étoiles marron : points d'échantillonnage souhaitables.

Lignes rouges : pistes d'accès potentielles vers les zones d'échantillonnage sous réserve d'accord préalable d'H2E avec les agriculteurs.

3.2 Échantillons réalisés et échantillons prévus

| Crique | Mesures | État initial | Effet abattage | Effet brûlage | Effet brûlage + agri + plantes couvertures | Effet extraction Biomasse | Effet mulchage | Effet mulchage + agri + plantes couvertures |
|--------|----------|-------------------|----------------|---------------|--|---------------------------|----------------|---|
| | | Avril - Juin 2016 | Juillet 2016 | Décembre 2016 | Février 2017 | Septembre 2017 | Novembre 2017 | Janvier 2018 |
| Prapra | P amont | 1 | | | | 1 | 1 | 1 |
| | P aval 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 |
| | P aval 2 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 |
| Brûlis | B amont | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | B aval 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | |
| | B aval 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tableau du nombre d'échantillons souhaitables pour différencier les défriches

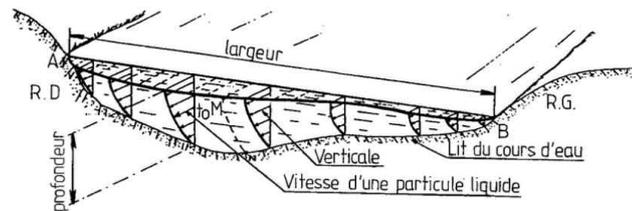
4 MESURES ET CALCULS DE DÉBITS

4.1 Méthode simplifiée

Les mesures d'avril à décembre 2016 étaient les plus simples qu'il soit possible de faire :

- Mesurer simplement la vitesse maximale de surface en 3 mesures,
- Observer les lignes de courant en surface pour interpoler le profil horizontal des vitesses maximales,
- Observer les frottements (charges de fond, herbiers,...) pour l'extrapolation des profils paraboliques de vitesses et la détermination des vitesses moyennes,
- Double Intégration.

Les calculs qui suivent utilisent la méthode de double intégration représentée dans « *Hydrologie de Surface* » de ROCHE:



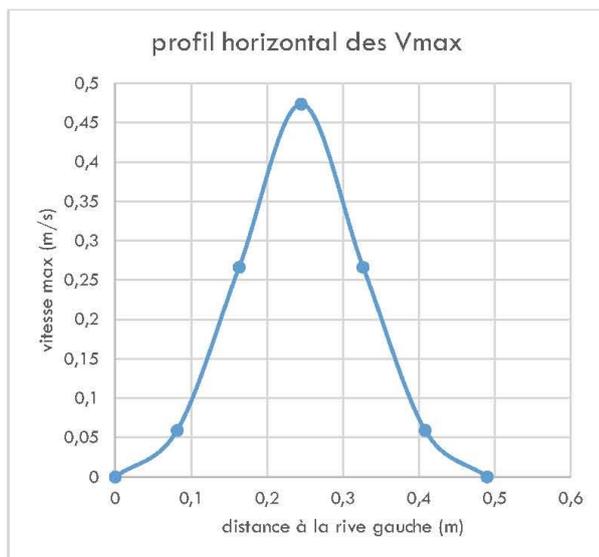
Il s'agit, en commençant par les verticales pour calculer les vitesses moyennes par verticales V_j (avec P_j : profondeur totale de la verticale) que l'on intègre ensuite sur toute la largeur L de la section; c'est la méthode dite des paraboles de vitesses qui s'écrit:

$$V = \frac{1}{P_j} \int_0^{P_j} v \cdot dp \quad \text{et} \quad U = \frac{1}{L} \int_0^L V_j \cdot dL$$

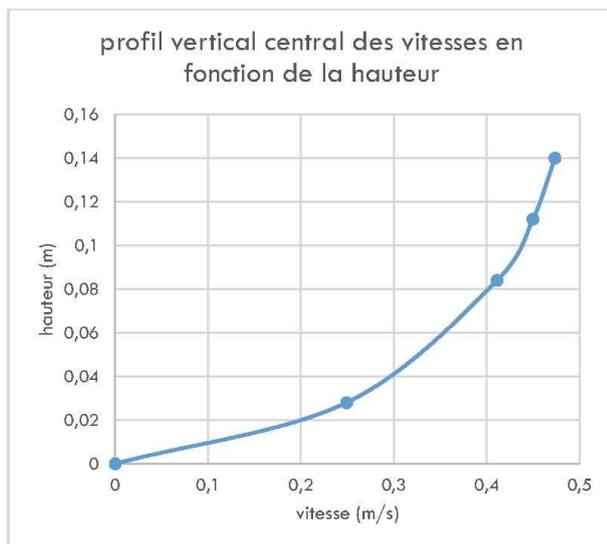
4.2 Mesures initiales (avril et juin 2016)

4.2.1 Application au point P aval 1 (avril et juin)

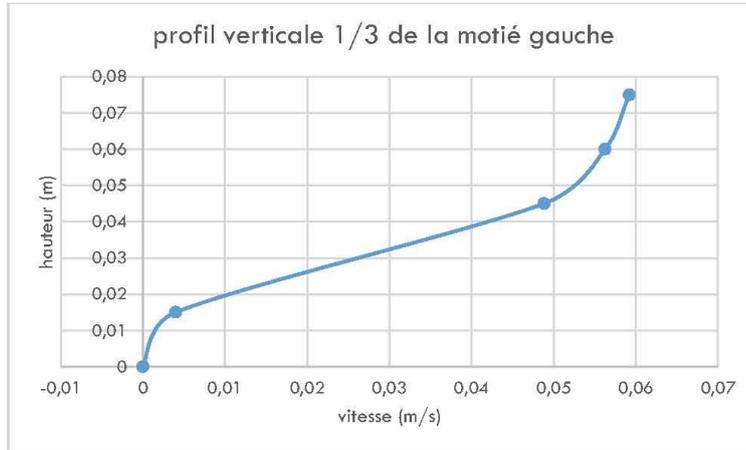
Les mesures de vitesses et de sections pour ce point sont étonnamment les mêmes, en avril et en juin alors que plus en aval, la vitesse double. Cela est probablement lié à la répartition des pluies les jours précédents sur les sous-bassins versants.



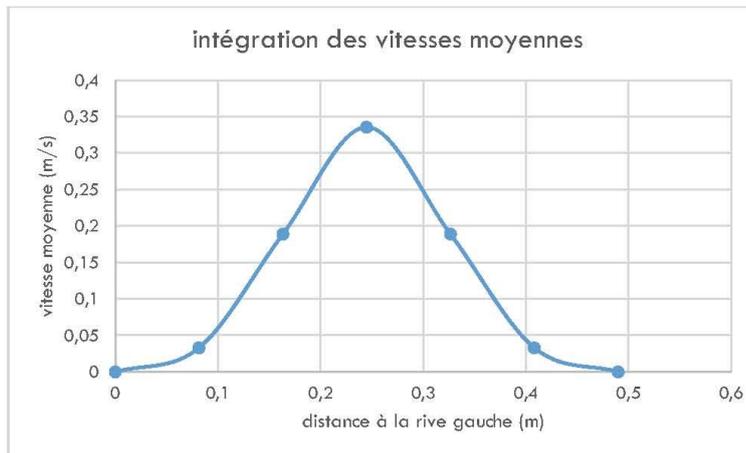
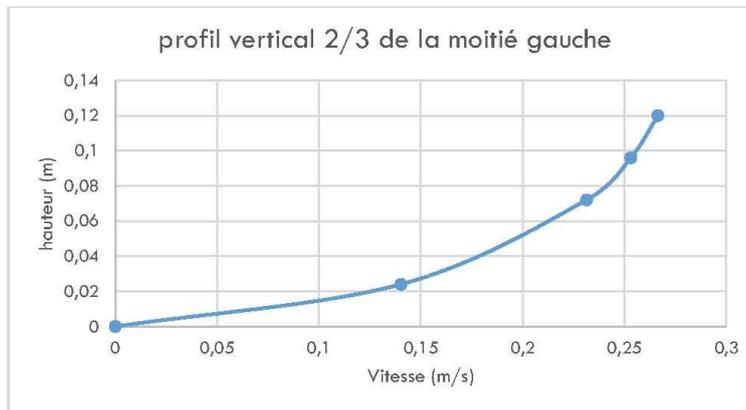
L'interpolation des Vmax par convexité des portions extrêmes du profil et la forme relativement en pointe de la portion centrale sont liées à l'influence des herbiers résiduels



Le profil vertical central est extrapolé à sur un modèle classique



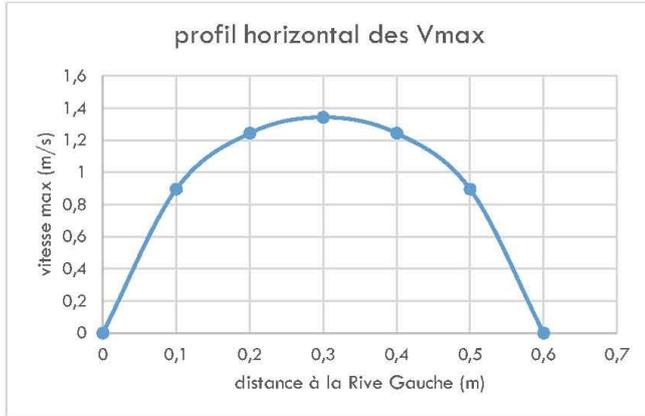
Le profil vertical au 1/3 de la moitié gauche est influencé en profondeur par les herbiers résiduels



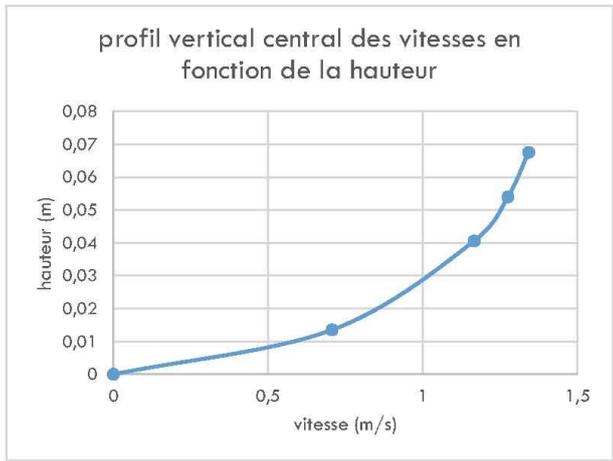
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 7,4 L.s⁻¹

$$Q_{\text{prapra aval 1 avril}} = 7.4 \text{ L.s}^{-1}$$

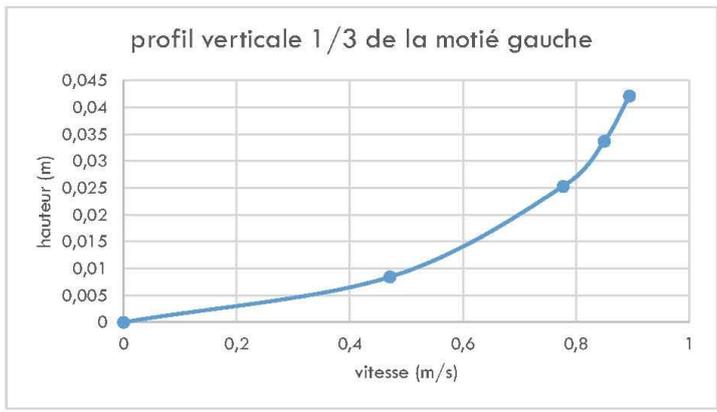
4.2.2 Application au point P aval 2 (avril)



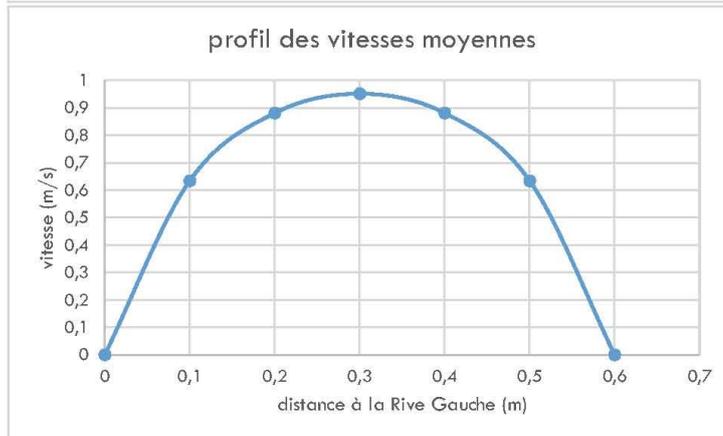
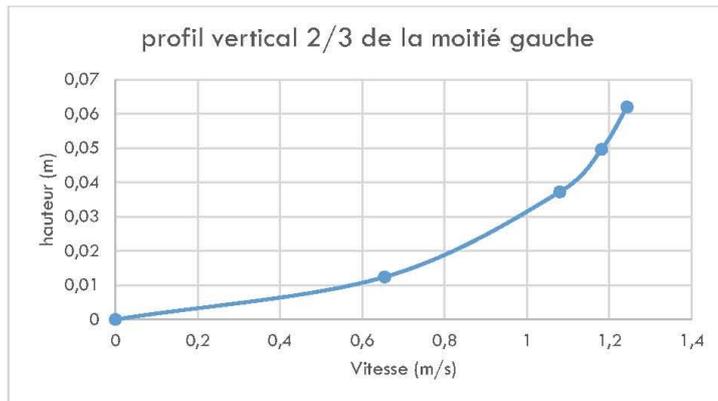
L'interpolation concave des Vmax est de type classique dans un tuyau



L'extrapolation des paraboles de vitesses est aussi de type classique



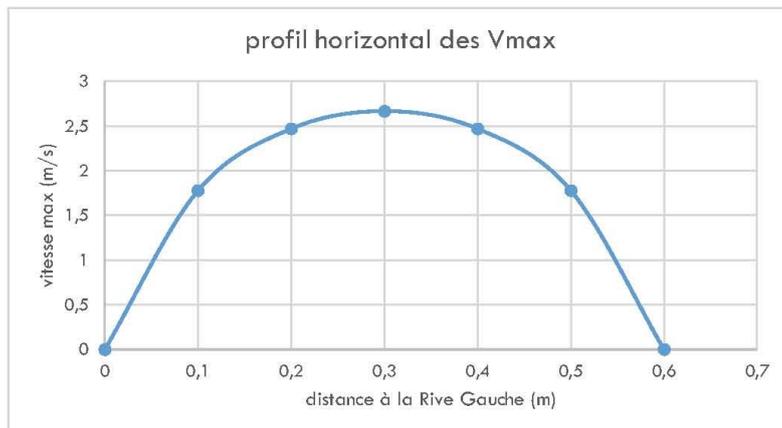
FLUX DE MERCURE ET DE MEST

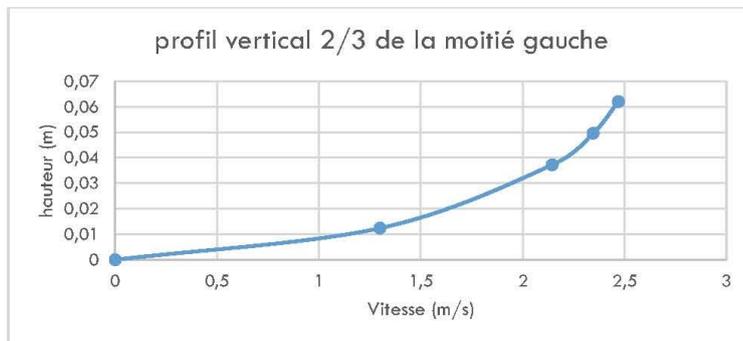
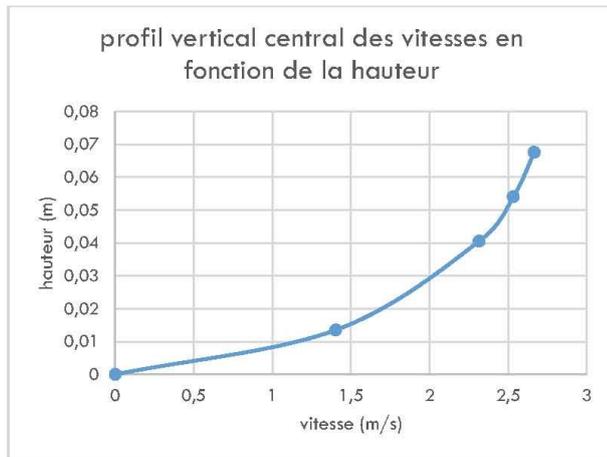


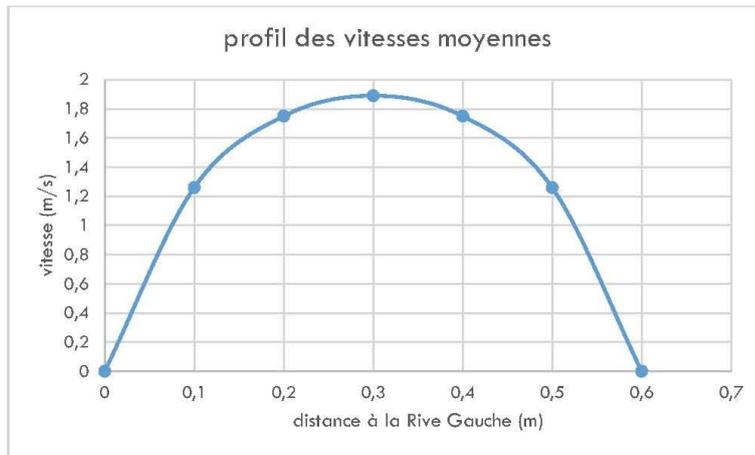
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 21,1 L.s⁻¹

$$Q_{\text{prapra aval 2 avril}} = 21,1 \text{ L.s}^{-1}$$

4.2.3 Application au point P aval 2 en (juin)







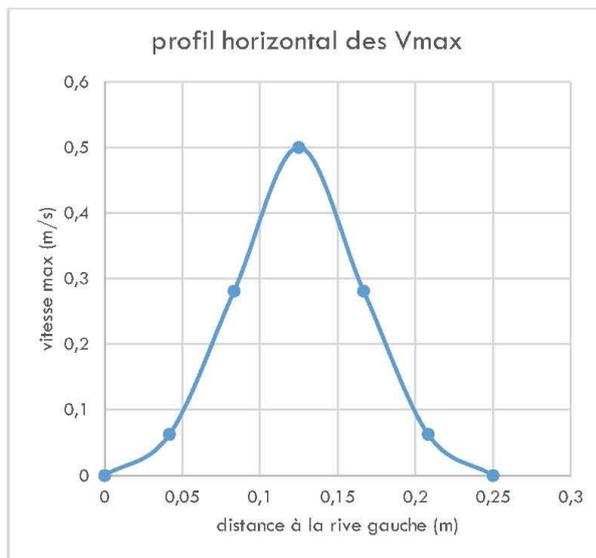
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 41.8 L.s^{-1}

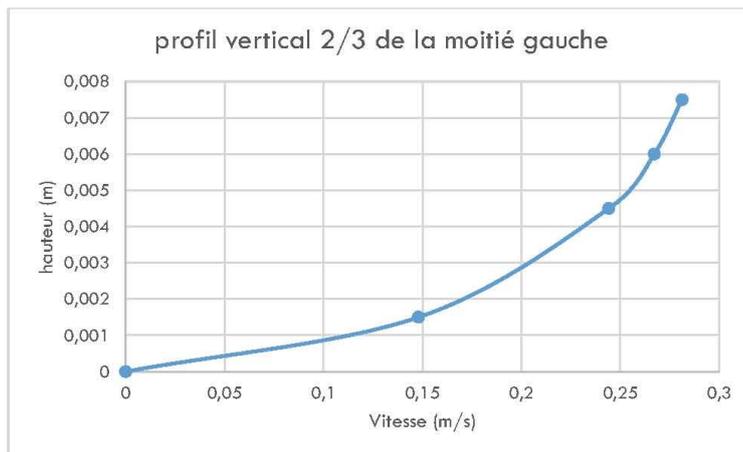
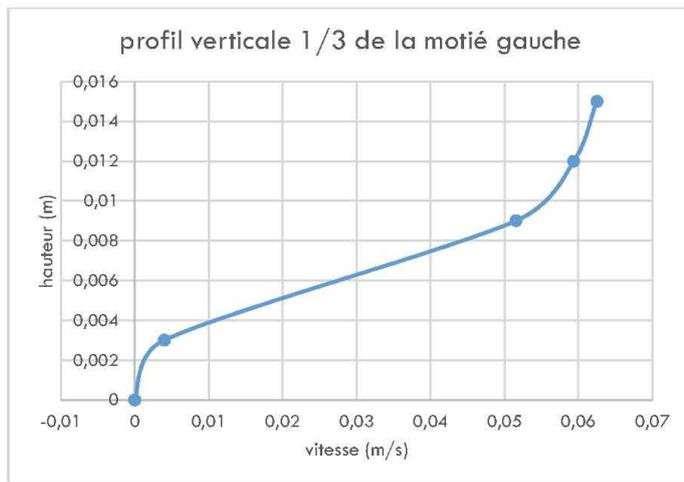
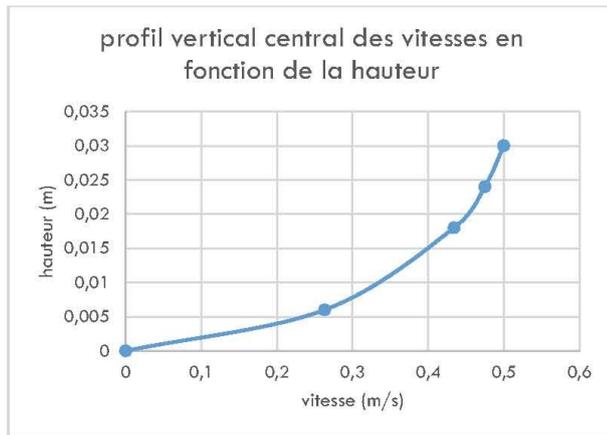
$$Q_{\text{prapra aval 2 juin}} = 41.8 \text{ L.s}^{-1}$$

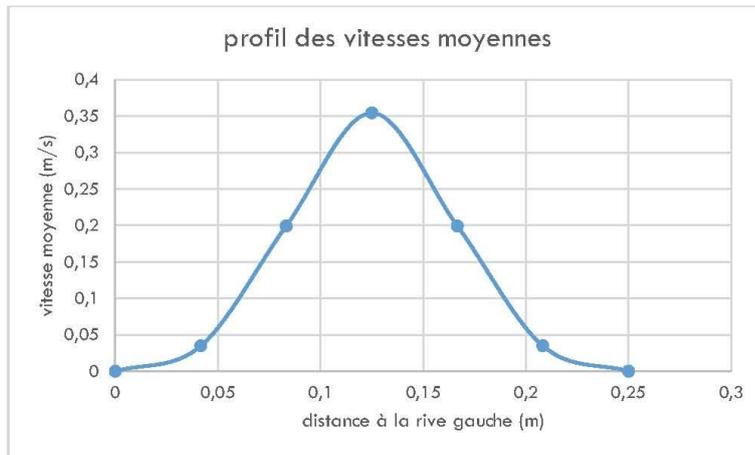
4.2.4 Application au point B amont en (juin)

La crique à ce niveau coule très lentement, la majorité de son linéaire présente une largeur de l'ordre de 1m. Il a été nécessaire de chercher un resserrement pour voir apparaître des vitesses mesurables. La mesure a été faite après une diffuence en deux petits bras à plus fortes vitesses.

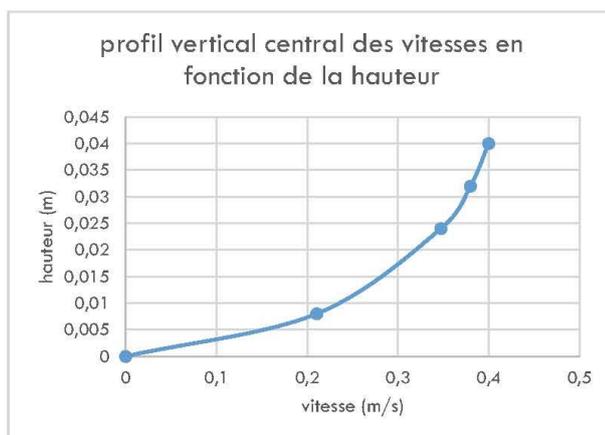
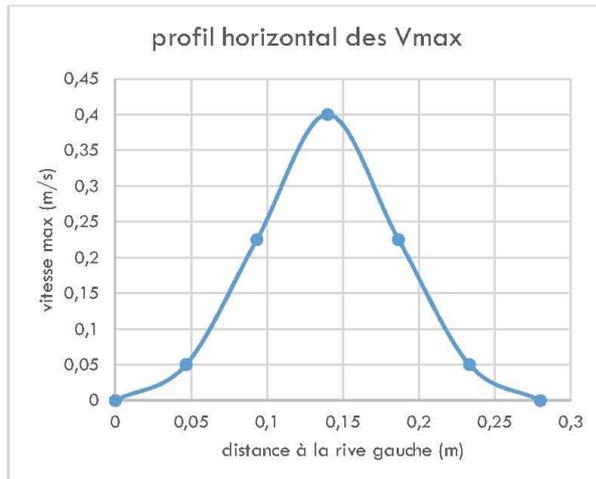
a) Application au point B amont, bras gauche, en juin

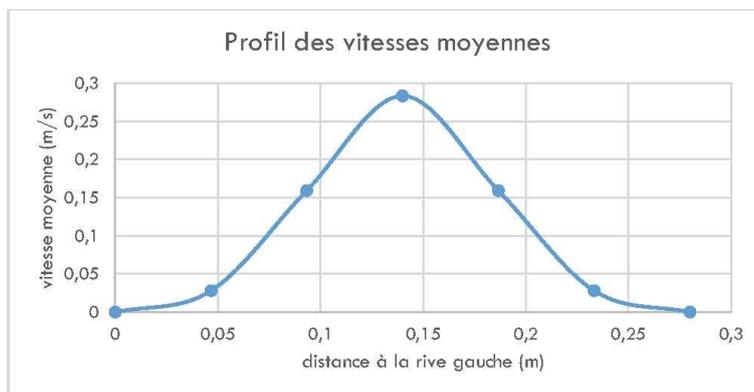
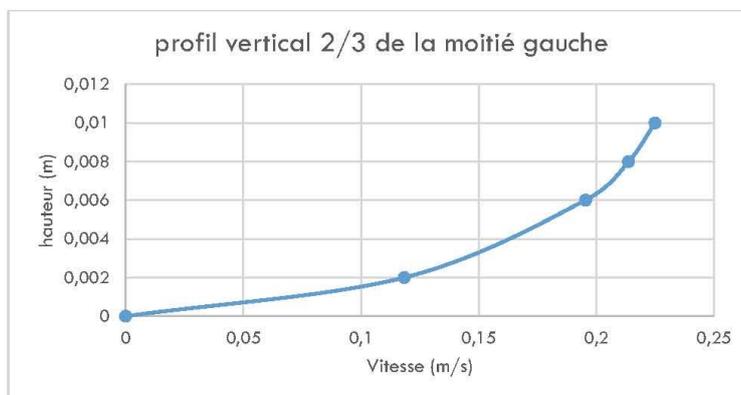
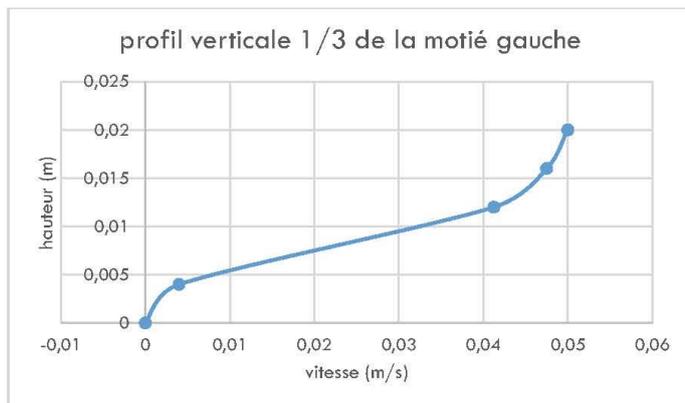






b) Application au point B amont, bras droit, en juin



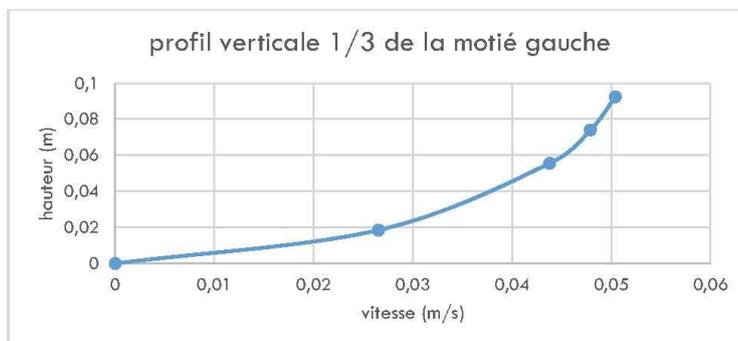
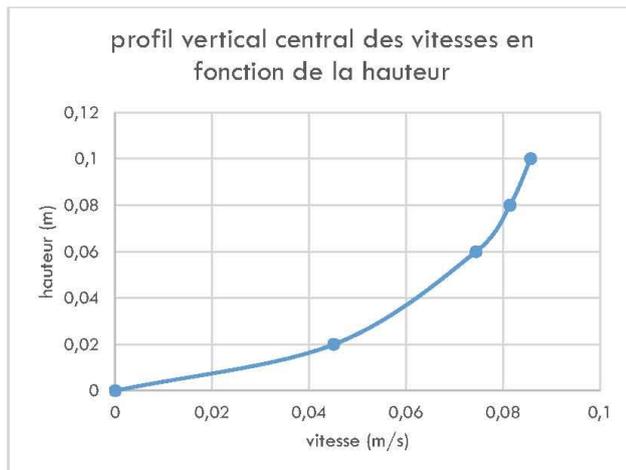
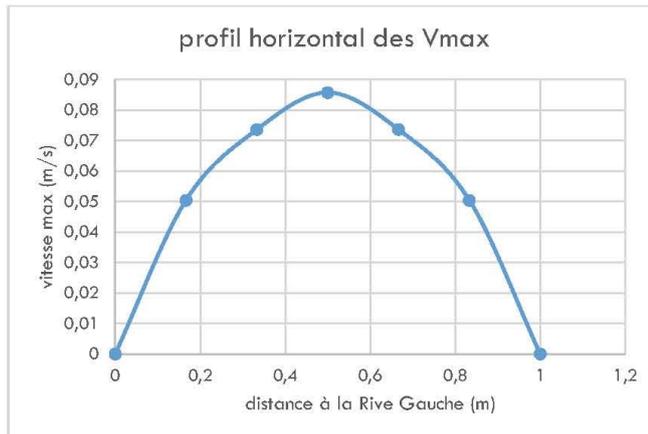


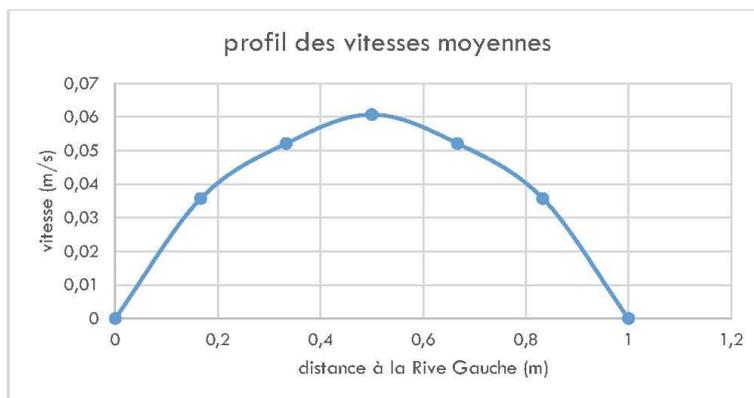
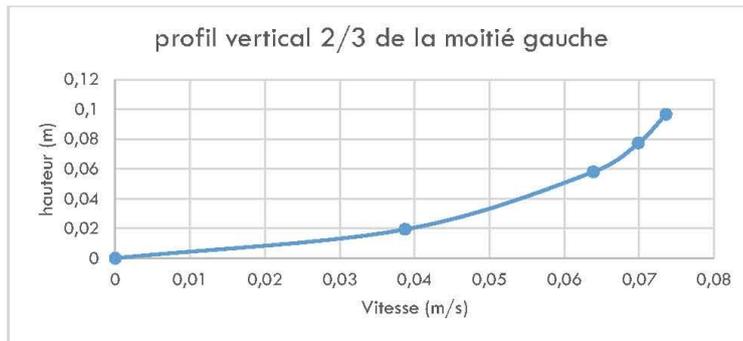
Les deux intégrations donnent des résultats de débit de 0.7 L.s^{-1} pour le bras droit et 0.6 L.s^{-1} pour le bras gauche.

$$Q_{\text{brûlis amont juin}} = 1.3 \text{ L.s}^{-1}$$

4.2.5 Application au point B aval 1 en (juin)

Le point de mesure présente un profil quasiment en U. Ce criquot reçoit l'écoulement d'une petite zone humide presque parallèle, plus au sud, qui recevra la majorité des matières issus de l'érosion. A 10,20m plus au nord coule en parallèle un autre criquot mais ne recevant pas les matières issus de l'érosion de la parcelle brûlis plus au sud.



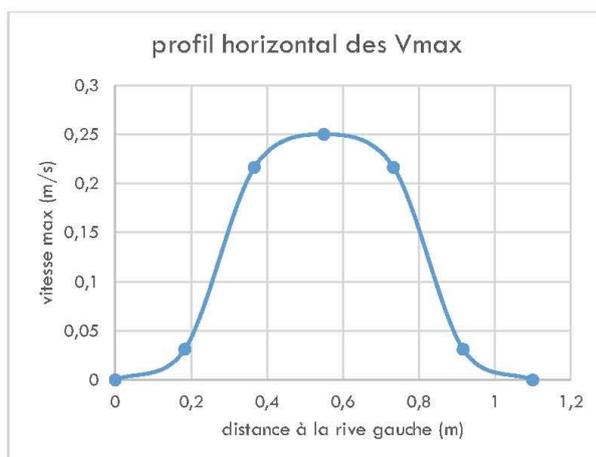


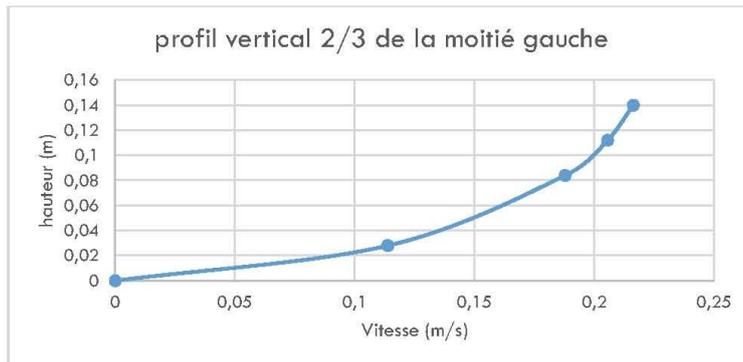
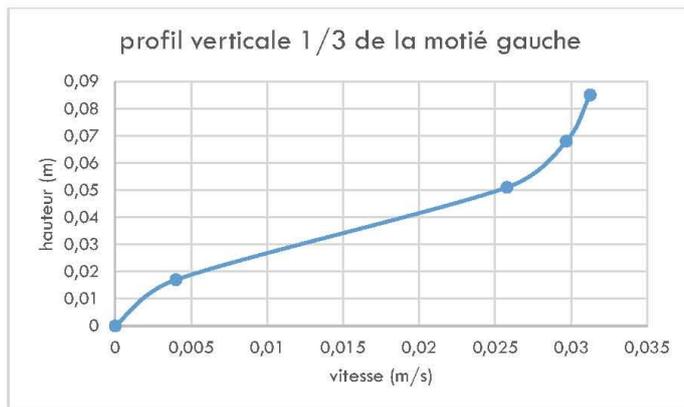
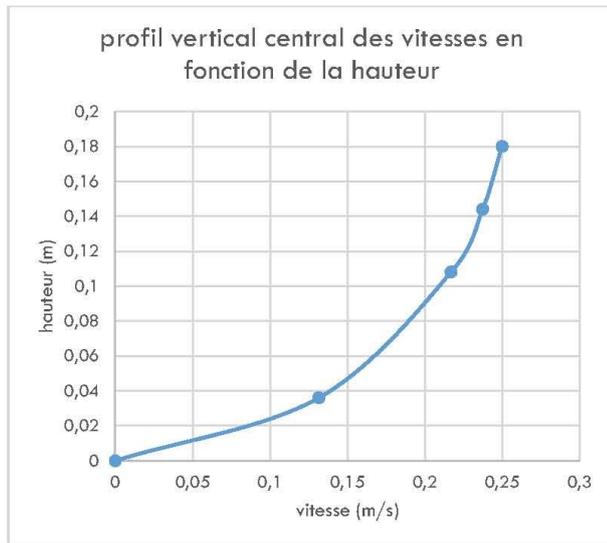
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 3.5 L.s⁻¹

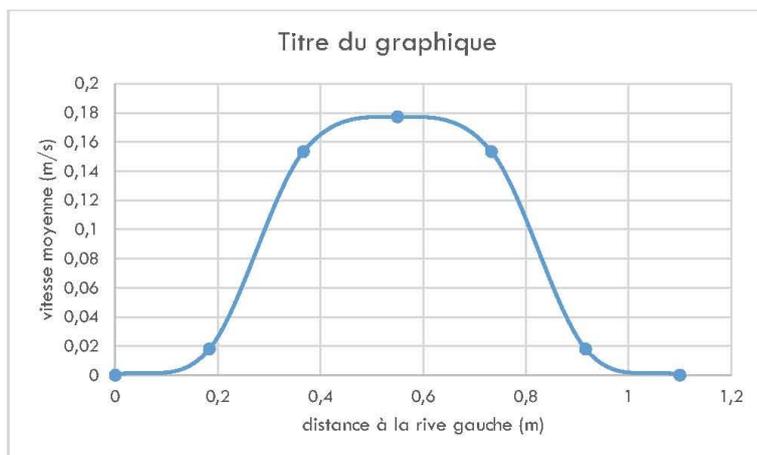
$$Q_{\text{brûlis aval 1 juin}} = 3.5 \text{ L.s}^{-1}$$

4.2.6 Application au point B aval 2 en (juin)

Le point de mesure est influencé au niveau des berges par de nombreuses racicelles.







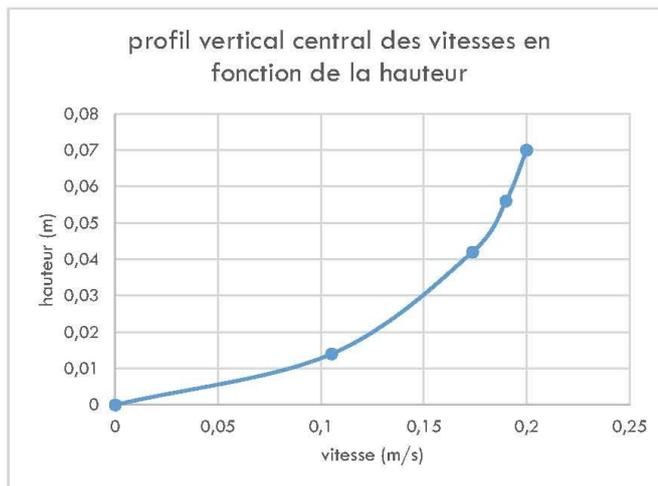
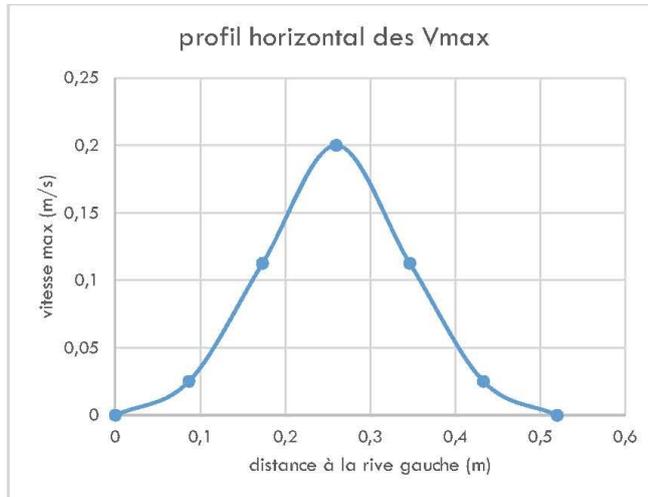
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 3.5 L.s^{-1}

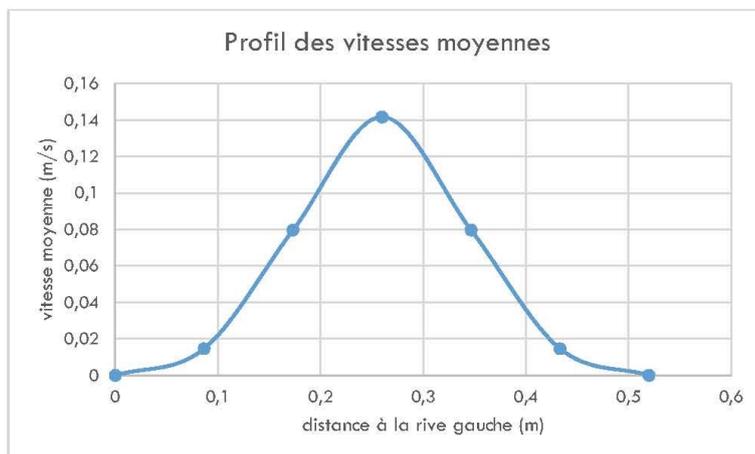
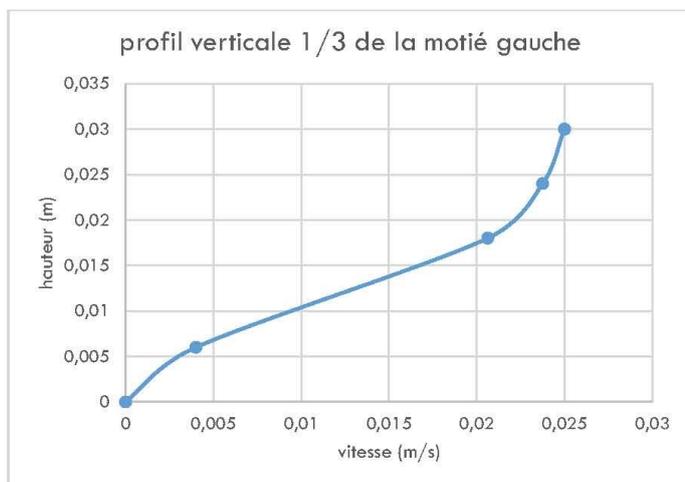
$$Q_{\text{brûlis aval 2 juin}} = 13.4 \text{ L.s}^{-1}$$

4.3 Mesures après abattage de la zone est vouée au brûlis (juillet 2016)

4.3.1 Application au point B amont

La crique à ce niveau coule très lentement, la majorité de son linéaire présente une largeur de l'ordre de 1m. Il a été nécessaire de chercher un resserrement pour voir apparaître des vitesses mesurables. La mesure a été faite légèrement plus en aval qu'en juin (à 40 m), mais sans confluence, apport de débit supplémentaire entre les deux points très proches, ce qui implique un débit comparable.



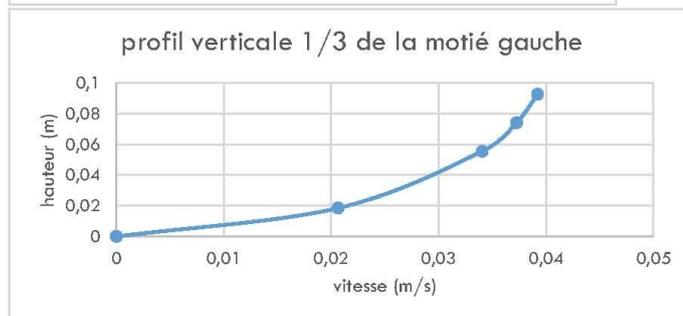
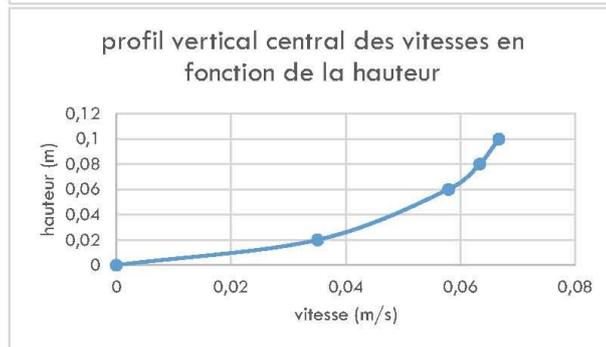
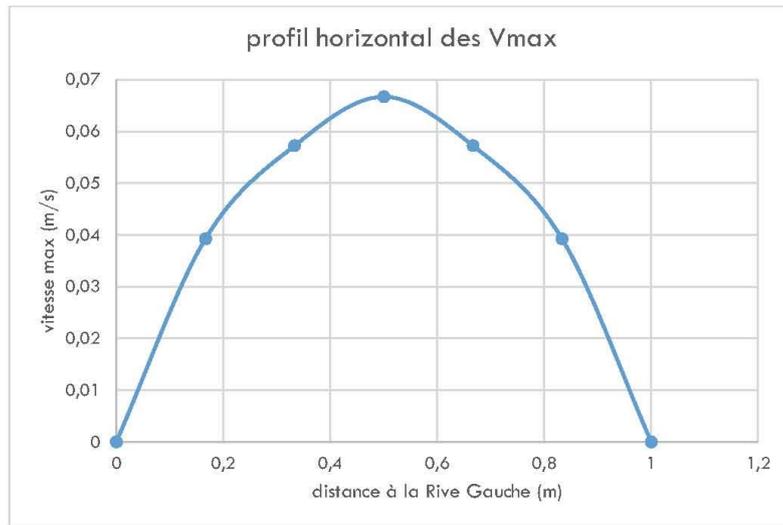


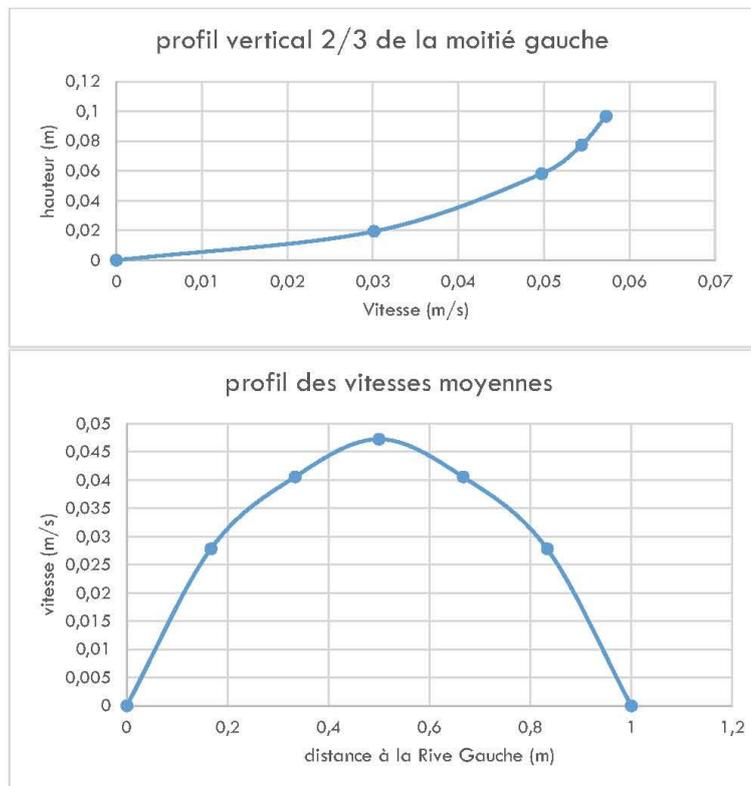
$Q_{\text{brûlis amont juillet}} = 1.08 \text{ L.s}^{-1}$

Cela fait une diminution de seulement 17 % entre juin et juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode et l'absence de pluviomètre ne permettant de connaître les pluies des jours précédents.

4.3.2 Application au point B aval 1

Le point de mesure présente un profil quasiment en U. Ce criquot reçoit l'écoulement d'une petite zone humide presque parallèle, plus au sud, qui recevra la majorité des matières issues de l'érosion. À 15m plus au nord coule en parallèle un autre criquot mais ne recevant pas les matières issues de l'érosion de la parcelle brûlis plus au sud. Le prélèvement a été fait après une période de plusieurs jours sans pluie. La représentativité de l'effet de l'abattage sur les flux de mercure au niveau des MEST est donc particulièrement faible.





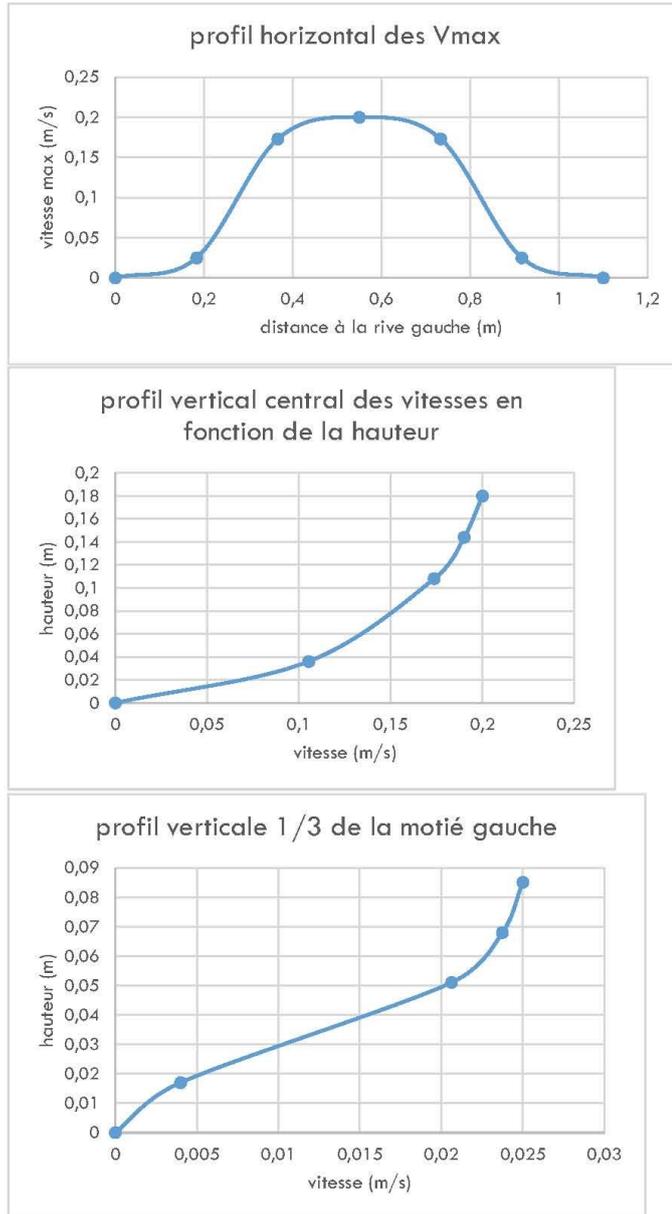
La deuxième intégration donne un résultat de débit de 2.7 L.s⁻¹.

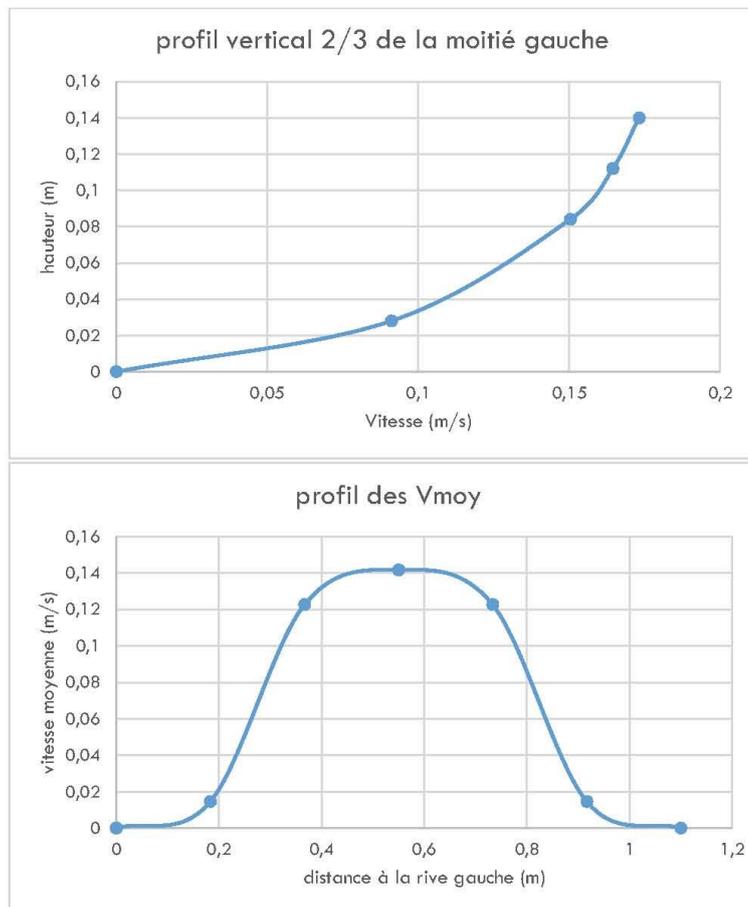
$$Q_{\text{Brûlis aval 1 juillet}} = 2.7 \text{ L.s}^{-1}$$

Cela fait une diminution de 34 % entre juin et juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode et l'absence de pluviomètre ne permettant de connaître les pluies des jours précédents.

4.3.3 Application au point B aval 2

Le point de mesure est influencé au niveau des berges par de nombreuses radicelles.





La deuxième intégration donne un résultat de débit de 10.7 L.s⁻¹.

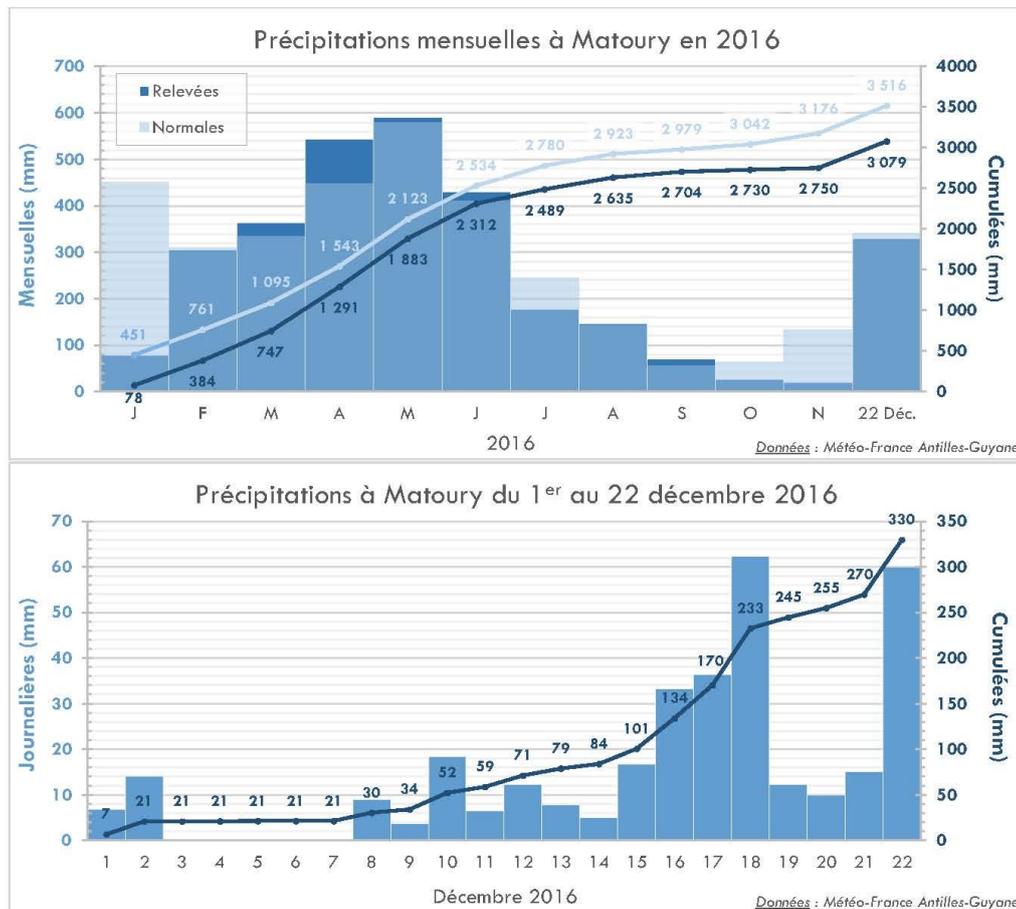
$$Q_{\text{brûlis aval 2 juillet}} = 10.7 \text{ L.s}^{-1}$$

Cela fait une diminution de 20 % entre juin et juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode et l'absence de pluviomètre ne permettant de connaître les pluies des jours précédents.

4.4 Mesures après brûlage de la zone est (décembre 2016)

4.4.1 Analyse préliminaire et hypothèses

Les mesures de décembre ont été effectuées le 22 au matin, après une période de précipitations intenses et une nuit presque continue (du 21 au 22). Bien que l'on ne dispose pas de données pluviométriques à forte proximité du secteur d'étude, les données de Météo-France établies sur l'aéroport Félix Éboué peuvent donner un ordre de grandeur des précipitations qui ont pu tomber. En effet celui-ci est situé à environ 17 km du secteur, et les deux sont à une distance comparable de la côte atlantique.



Ainsi, à Matoury l'on observe que depuis le mois de juillet, la saison sèche s'est montrée plutôt marquée, surtout lors des deux derniers mois, ainsi qu'en début décembre. En revanche, les sept jours précédant les mesures ont cumulé 230 mm de précipitations, et 60 mm pour la seule deuxième partie de la nuit du 21 au 22. Cet épisode fait d'ailleurs que, dès le 22 décembre, la normale mensuelle de 340 mm est atteinte.

D'un point de vue hydrologique, si l'on considère que le secteur d'étude a reçu des précipitations du même ordre de grandeur, on peut se permettre d'émettre quelques suppositions. Notamment, la saison sèche passée a dû voir les nappes se décharger de manière conséquente. Concernant la parcelle abattue et brûlée, même en quasi-absence d'évapotranspiration, il est peu probable que l'abattement de sa nappe soit significativement réduit. En effet, cette parcelle est située sur un mont et est drainée par deux criques (au nord et à l'est) ainsi que par la forêt environnante. Cela conduit à l'hypothèse que le débit de base des criques est susceptible d'être relativement bas à la mi-décembre, voire même au jour des mesures. De même, les premières pluies de la saison humides risquent d'être fortement « absorbées » par infiltration.

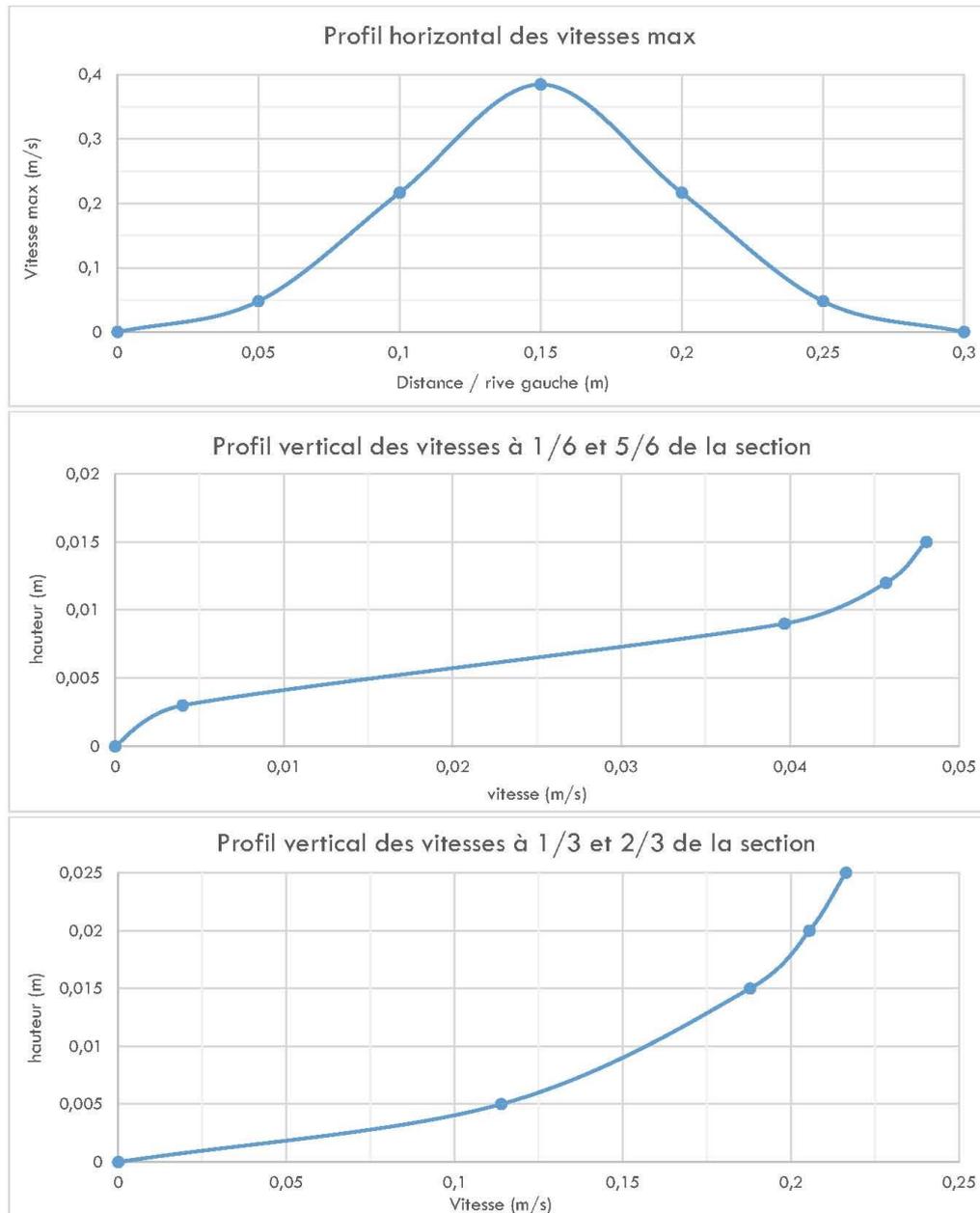
Par ailleurs, les précipitations quasi-nulles d'octobre à début décembre ont pu avoir mis la végétation en léger état de stress, pouvant engendrer une augmentation d'évapotranspiration au début de la saison humide. À noter que la parcelle abattue et brûlée est quant à elle désormais presque dépourvue d'évapotranspiration. Contrairement au débit de base, la réponse hydrologique de la parcelle doit s'en trouver affectée, et probablement de manière significative. De plus, l'absence de couvert végétal et le tassement relatif du sol suite à l'abattage entraînent une forte augmentation du ruissellement, composante « rapide » de la réponse hydrologique. On peut donc s'attendre à ce que la réponse hydrologique des bassins versants soit réduite en quantité, sauf pour la parcelle abattue dont la réduction concernerait plutôt le temps de réponse.

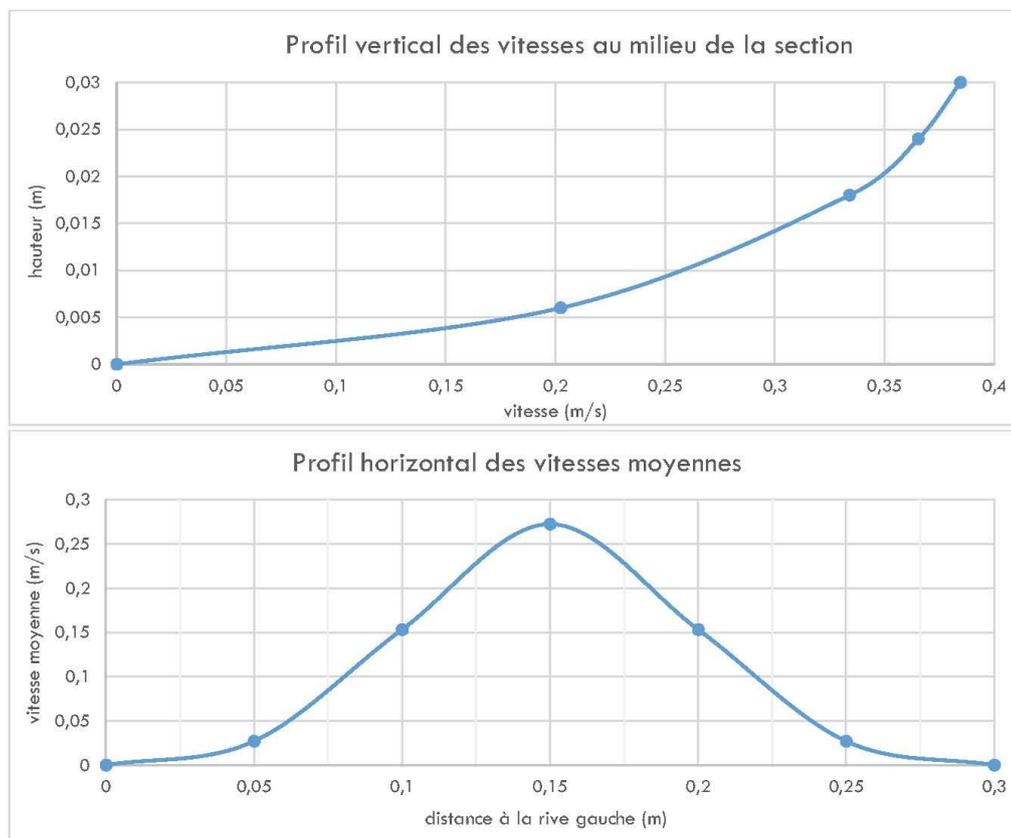
4.4.2 Application au point B amont

Cette fois encore, la crique à ce niveau ayant un débit très faible et une section mouillée conséquente (la majorité de son linéaire présente une largeur de l'ordre de 1m), les vitesses en étaient difficilement mesurables. Il fut nécessaire de chercher un resserrement du chenal pour voir apparaître des vitesses mesurables. Le point de mesure est alors situé légèrement plus en aval (à 40 m) que celui de juin et de la carte de positionnement, mais : 1° il n'est en aval d'aucune confluence qui ferait augmenter le débit ; 2° la partie de bassin versant ajoutée est restreinte par rapport à la totalité du bassin drainé par ce point ; donc la variation de débit est négligeable.

Malgré l'intensité des précipitations depuis plus d'une semaine et de la nuit précédente, les criques présentaient des débits visiblement bas ; à l'instar des dates de mesure précédentes, la réponse hydrologique des criques étant très rapide, en quelques heures un épisode pluvieux ne se remarque déjà plus.

FLUX DE MERCURE ET DE MEST





L'intégration des vitesses moyennes sur la section transversale donne le débit suivant :

$$Q_{\text{Brûlis amont, décembre 16}} = 0.776 \text{ L/s}$$

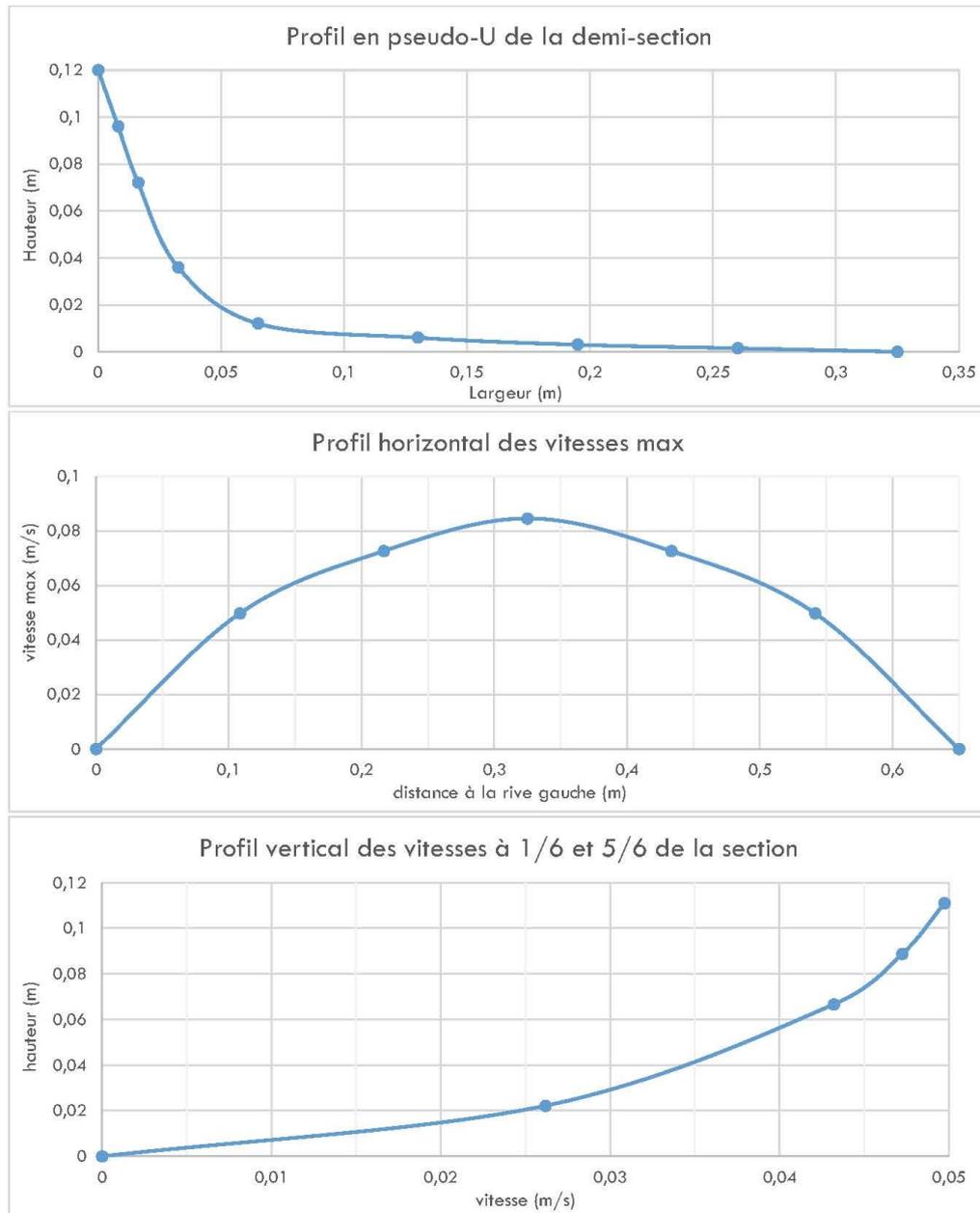
Cela fait une diminution de 28 % par rapport aux mesures de juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode, et la méconnaissance pas la pluviométrie des derniers jours et des dernières heures.

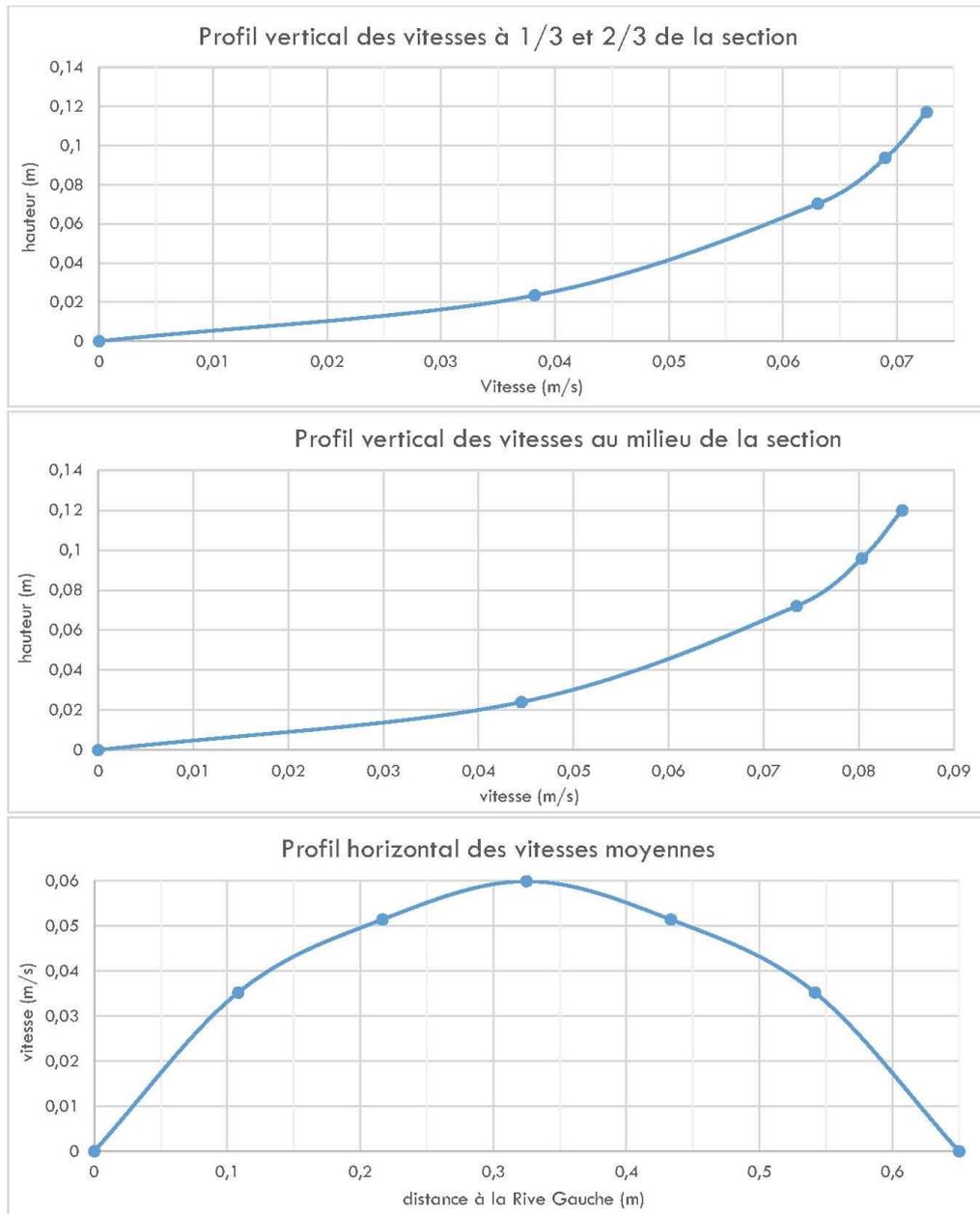
4.4.3 Application au point B aval 1

Le point de mesure présente un profil quasiment en U. Ce criquet reçoit l'écoulement d'une petite zone humide presque parallèle, plus au sud, qui recevra la majorité des matières issus de l'érosion.

Sachant que les mesures se situent en début de saison des pluies post-brûlage, l'intensité des pluies depuis plus d'une semaine et une nuit entière laisse à penser que, même si les débits calculés quelques heures après l'épisode pluvieux ne sont pas remarquables, les flux de MEST provenant du brûlis sont susceptibles d'être significatifs.

FLUX DE MERCURE ET DE MEST





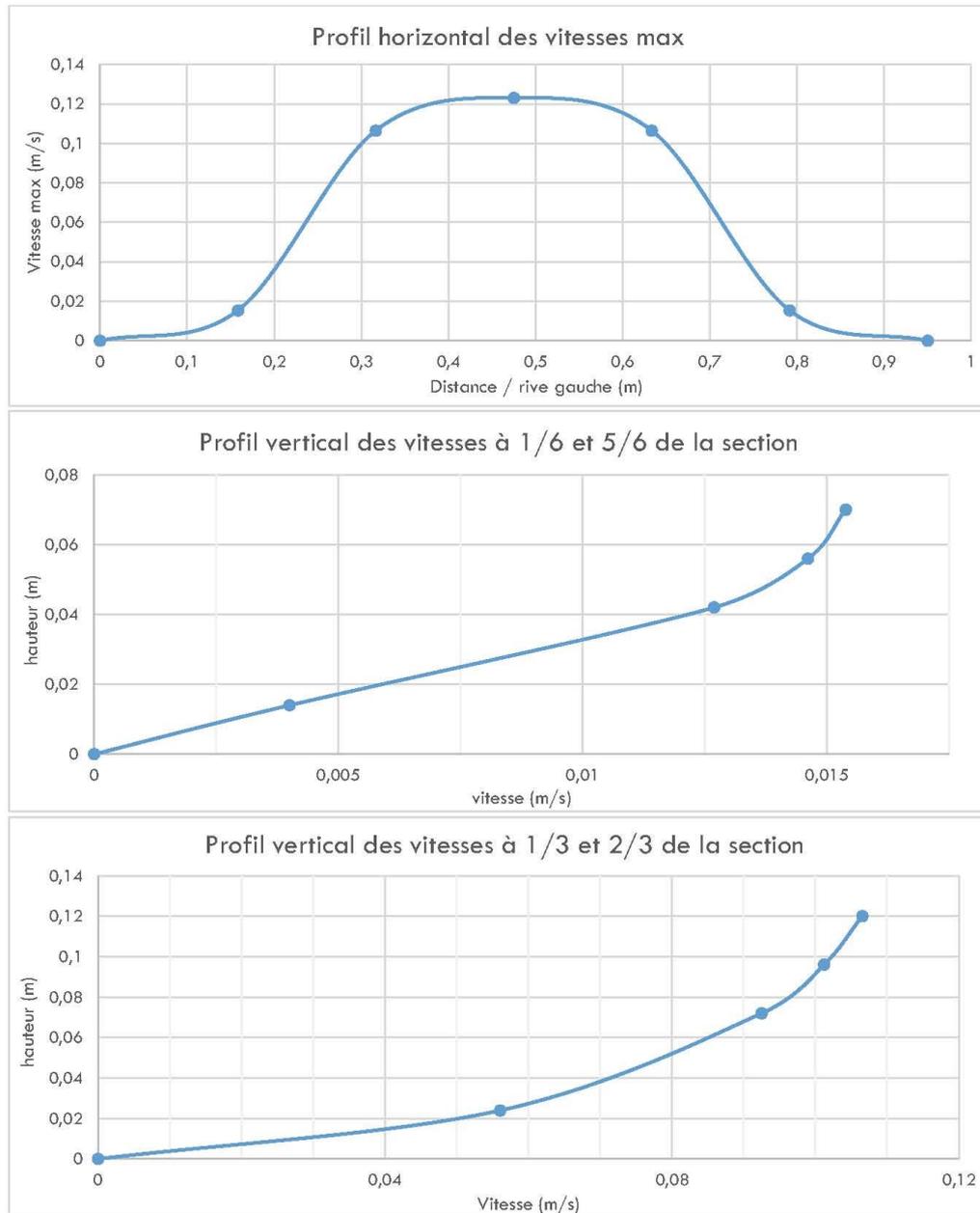
L'intégration des vitesses moyennes sur la section transversale donne le débit suivant :

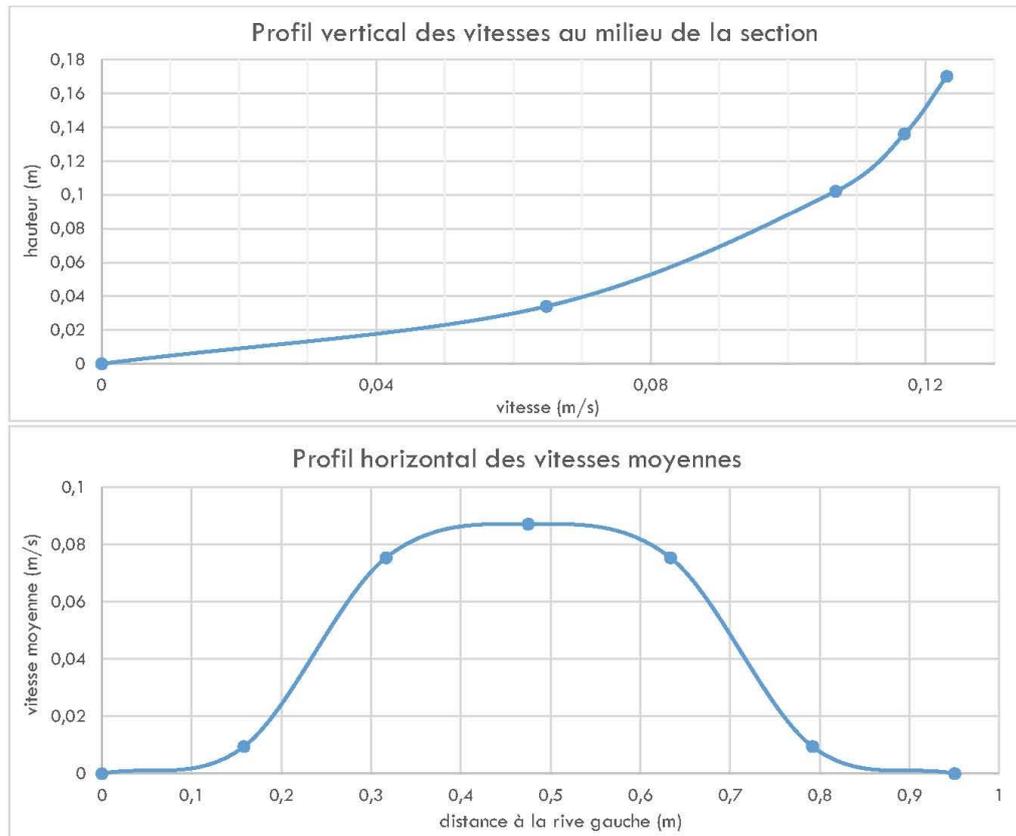
$$Q_{\text{Brûlis aval 1, décembre 16}} = 2.71 \text{ L/s}$$

Cela fait une diminution de 1 % par rapport aux mesures de juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode, et la méconnaissance pas la pluviométrie des derniers jours et des dernières heures.

4.4.4 Application au point B aval 2

Le point de mesure est influencé au niveau des berges par de nombreuses racicelles.





L'intégration des vitesses moyennes sur la section transversale donne le débit suivant :

$$Q_{\text{Brûlis aval 2, décembre 16}} = 5.06 \text{ L/s}$$

Cela fait une diminution de 53 % par rapport aux mesures de juillet. Rappelons l'incertitude de la méthode, et la méconnaissance pas la pluviométrie des derniers jours et des dernières heures.

4.4.5 Discussion des résultats obtenus en décembre

Dans l'ensemble, les ordres de grandeur des débits calculés d'après les mesures de décembre sont les mêmes que ceux de juillet. Cependant, dans tous les cas on remarque une diminution du débit entre juillet et décembre, pour rappel : B_{amont} , -28 % ; $B_{\text{aval 1}}$, -1 % ; $B_{\text{aval 2}}$, -53 %.

Cette tendance va dans le sens des hypothèses émises en analyse préliminaire (partie 4.4.1) à propos du niveau des nappes, du débit de base et de l'évapotranspiration suite à la saison sèche. D'autant plus, que juillet fait *a contrario* suite à une saison des pluies ayant rechargé les nappes.

D'autre part, la diminution de débit n'est pas la même d'un point à l'autre. En outre, c'est au point $B_{\text{aval 1}}$ que celle-ci est la moins marquée. L'hypothèse concernant l'effet hydrologique de l'abattage va également dans ce sens, car le point $B_{\text{aval 1}}$ reçoit la presque totalité des écoulements provenant de la parcelle abattue et brûlée.

Le point B_{amont} présente des débits tellement faibles depuis le début des mesures que les incertitudes sont probablement comparables aux valeurs elles-mêmes ; une comparaison quantitative approfondie des résultats serait hasardeuse.

Enfin, le point $B_{\text{aval 2}}$ présente la diminution la plus drastique. Celle-ci est en effet beaucoup plus élevée que celles de ses affluents représentés par les deux autres points et cela est difficilement interprétable. Cela dit, les valeurs entre les points paraissent désormais davantage cohérentes, car le débit en $B_{\text{aval 2}}$ est moins démesuré par rapport à la somme celui de ses affluents.

Annexe 2

Résultats des paramètres physico-chimiques de la crique Espérance (CMB)

| Campagne/Point | X | Y | Conductivité (µS) | taux O ₂ (mg/L) | Temp. (°C) | pH | Rédox (mV) | Turbidité (NTU) |
|----------------|--------|--------|-------------------|----------------------------|------------|------|------------|-----------------|
| Camp-1/Point 1 | 342315 | 507374 | 47,0 | 7,86 | 24,3 | 6,93 | 149,0 | 4,4 |
| Camp-1/Point 2 | 342526 | 507682 | 28,8 | 7,77 | 26,2 | 6,24 | 109,0 | 176,0 |
| Camp-1/Point 3 | 342933 | 507670 | 26,5 | 7,50 | 27,2 | 5,90 | 135,9 | 128,0 |
| Camp-1/Point 4 | 343073 | 508368 | 26,1 | 7,25 | 29,5 | 6,18 | 114,8 | 845,0 |
| Camp-1/Point 5 | 343264 | 508026 | 25,3 | 7,06 | 29,4 | 5,94 | 91,1 | 235,5 |
| Camp-2/Point 1 | 342331 | 507433 | 64,0 | 7,39 | 25,1 | 7,14 | 100 | 3,5 |
| Camp-2/Point 2 | 342526 | 507682 | 48,6 | 7,07 | 33,1 | 6,81 | 61 | 4,2 |
| Camp-2/Point 3 | 342933 | 507670 | 48,4 | 6,78 | 35,1 | 6,57 | 47 | 3,2 |
| Camp-2/Point 4 | 343073 | 508368 | 43,8 | 7,23 | 35,8 | 6,56 | 81 | 5,3 |
| Camp-2/Point 5 | 343264 | 508026 | 44,8 | 6,74 | 38,2 | 6,62 | 82 | 3,9 |
| Camp-3/Point 1 | 342331 | 507433 | 68,9 | 8,11 | 27,5 | 7,24 | 82 | 3,3 |
| Camp-3/Point 3 | 342933 | 507670 | 50,0 | 7,29 | 32,7 | 7,08 | 134 | 39,8 |
| Camp-3/Point 4 | 343073 | 508368 | 47,4 | 7,52 | 33,6 | 6,92 | 64 | 22,5 |
| Camp-4/Point 1 | 342331 | 507433 | 53,1 | 7,05 | 25,3 | 6,88 | 205 | 2,5 |
| Camp-4/Point 2 | 342526 | 507682 | 33,5 | 7,25 | 29,6 | 6,35 | 167 | 11,8 |
| Camp-4/Point 3 | 342933 | 507670 | 29,5 | 7,31 | 28,7 | 6,36 | 189 | 8,8 |
| Camp-4/Point 4 | 343073 | 508368 | 29,9 | 7,56 | 27,7 | 6,58 | 148 | 62,6 |
| Camp-4/Point 5 | 343264 | 508026 | 29,9 | 7,38 | 29,2 | 6,51 | 145 | 57,5 |
| Camp-5/Point 1 | 342331 | 507433 | 59,2 | 7,48 | 25,0 | 6,56 | 149 | 4,2 |
| Camp-5/Point 2 | 342526 | 507682 | 41,7 | 7,32 | 29,9 | 6,87 | 194 | 6,1 |
| Camp-5/Point 3 | 342933 | 507670 | 37,2 | 7,17 | 28,7 | 6,05 | 185 | 302,0 |
| Camp-5/Point 4 | 343073 | 508368 | 37,3 | 7,44 | 30,5 | 6,54 | 158 | 306,0 |
| Camp-5/Point 5 | 343264 | 508026 | 37,9 | 7,59 | 27,3 | 6,51 | 130 | 224,0 |
| Camp-6/Point 1 | 342320 | 507369 | 58,3 | 7,70 | 24,9 | 6,20 | 155,7 | 4,5 |
| Camp-6/Point 2 | 342483 | 507669 | 42,1 | 7,47 | 27,9 | 6,00 | 114,0 | 6,9 |
| Camp-6/Point 3 | 343947 | 507665 | 38,3 | 7,31 | 28,7 | 5,60 | 127,0 | 7,5 |
| Camp-6/Point 4 | 343069 | 508377 | 39,9 | 7,57 | 26,6 | 6,30 | 70,4 | 14,2 |
| Camp-6/Point 5 | 343254 | 508004 | 39,0 | 7,40 | 28,1 | 5,60 | 881,0 | 5,2 |
| Camp-7/Point 1 | 342320 | 507369 | 51,4 | 7,83 | 24,6 | 6,51 | 340,6 | 7,7 |
| Camp-7/Point 2 | 342483 | 507669 | 31,1 | 7,74 | 25,6 | 6,03 | 125,8 | 76,7 |
| Camp-7/Point 3 | 343947 | 507665 | 25,8 | 7,55 | 26,1 | 5,02 | 151 | 296 |
| Camp-7/Point 4 | 343069 | 508377 | 27,3 | 7,58 | 26,9 | 6,47 | 102 | 184 |
| Camp-7/Point 5 | 343254 | 508004 | 25,7 | 7,43 | 27,8 | 4,98 | 148 | 221 |

Annexe 3

Résultats des concentrations en mercure dans les sédiments, les MES et les eaux de la crique Espérance

| Point | [Hg] séd. (µg/g) | Masse MES (g/L) | [HgII] MES (µg/g) | [MMHg] MES (ng/g) | [HgII] eau (ng/L) | [MMHg] eau (pg/L) | [MMHg]/ [HgII] (%) |
|----------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Camp-1/Point 1 | 6,80 | 0,0023 | 2,35 | 8,49 | 5,6 | 38 | 0,6 |
| Camp-1/Point 2 | 0,03 | 0,2536 | 0,50 | 0,06 | 1,8 | 57 | 2,8 |
| Camp-1/Point 3 | 0,04 | 0,4076 | 0,40 | 0,41 | 1,9 | 63 | 3,6 |
| Camp-1/Point 4 | 0,09 | 0,6482 | 0,09 | 0,10 | 12 | 150 | 1,1 |
| Camp-1/Point 5 | 0,04 | 0,2206 | 3,15 | 1,74 | 3,8 | 64 | 1,5 |
| Camp-2/Point 1 | 0,14 | 0,0015 | 1,14 | 2,00 | 1,7 | 32 | 1,9 |
| Camp-2/Point 2 | 0,05 | 0,0035 | 0,91 | 1,10 | 2,8 | 132 | 4,8 |
| Camp-2/Point 3 | 0,09 | 0,0007 | 6,47 | 5,10 | 1,8 | 20 | 1,1 |
| Camp-2/Point 4 | 0,08 | 0,0025 | 2,73 | 0,50 | 2,6 | 111 | 4,2 |
| Camp-2/Point 5 | 0,04 | 0,0016 | 2,14 | 2,20 | 9,9 | 45 | 0,5 |
| Camp-3/Point 1 | 0,13 | 0,0011 | 1,01 | 3,10 | 3,1 | 24 | 0,8 |
| Camp-3/Point 3 | 0,05 | 0,0142 | 0,66 | 1,40 | 2,3 | 77 | 3,4 |
| Camp-3/Point 4 | 0,08 | 0,0068 | 1,46 | 2,90 | 3,2 | 241 | 7,6 |
| Camp-4/Point 1 | 0,02 | 0,0014 | 4,90 | 7,4 | 1,7 | 5,2 | 0,3 |
| Camp-4/Point 2 | 0,02 | 0,0085 | 0,46 | 0,7 | 2,5 | 5,7 | 0,2 |
| Camp-4/Point 3 | 0,040 | 0,0066 | 0,84 | 2,2 | 2,1 | 7,6 | 0,4 |
| Camp-4/Point 4 | 0,10 | 0,0322 | 0,42 | 0,7 | 1,6 | 11,0 | 0,7 |
| Camp-4/Point 5 | 0,08 | 0,0266 | 0,47 | 0,8 | 2,1 | 12,8 | 0,6 |
| Camp-5/Point 1 | 0,01 | 0,0028 | 0,93 | 3,80 | 6,7 | AV | AV |
| Camp-5/Point 2 | 0,06 | 0,0046 | 0,55 | 3,60 | 4,8 | AV | AV |
| Camp-5/Point 3 | 0,17 | 0,2652 | 0,13 | 1,20 | 6,2 | AV | AV |
| Camp-5/Point 4 | 0,26 | 0,1212 | 0,17 | 0,80 | 11,1 | AV | AV |
| Camp-5/Point 5 | 0,27 | 0,1556 | 0,16 | 1,20 | 2200 | AV | AV |
| Camp-6/Point 1 | 0,05 | 0,0016 | NA | NA | 3,6 | AV | AV |
| Camp-6/Point 2 | 0,05 | 0,0113 | NA | NA | 7,6 | 67 | 0,9 |
| Camp-6/Point 3 | 0,10 | 0,0079 | NA | NA | 3,8 | 38 | 1,0 |
| Camp-6/Point 4 | 0,20 | 0,0101 | NA | NA | 4,9 | 369 | 7,5 |
| Camp-6/Point 5 | 0,25 | 0,0061 | NA | NA | 4,4 | AV | AV |
| Camp-7/Point 1 | 0,12 | 0,0121 | 0,72 | 0,75 | 56,0 | 27 | 0,0 |
| Camp-7/Point 2 | 0,04 | 0,0953 | 0,38 | 3,10 | 8,1 | 109 | 1,3 |
| Camp-7/Point 3 | 0,11 | 0,4685 | 0,15 | 2,00 | 10,5 | 128 | 1,2 |
| Camp-7/Point 4 | 0,13 | 0,1068 | 0,23 | 4,50 | 7,5 | 136 | 1,8 |
| Camp-7/Point 5 | 0,09 | 0,3388 | 0,15 | 2,70 | 21,5 | 116 | 0,5 |

L'échantillon Camp5/point 5 a une concentration en HgII dans les eaux extrêmement élevée par rapport aux autres échantillons mais c'est une valeur isolée. Une des explications possibles de cette forte valeur est : qu'une forte turbidité entraîne la présence d'une importante fraction colloïdale (des particules de tailles submicrométriques) qui traversent les membranes de filtration (0,2 µm) et s'ajoutent à la fraction « dissoute ». Ceci peut expliquer des valeurs en HgII ponctuellement assez fortes en condition de forte turbidité.

NA : échantillons non analysés

AV : échantillons analysés mais les résultats doivent être vérifiés

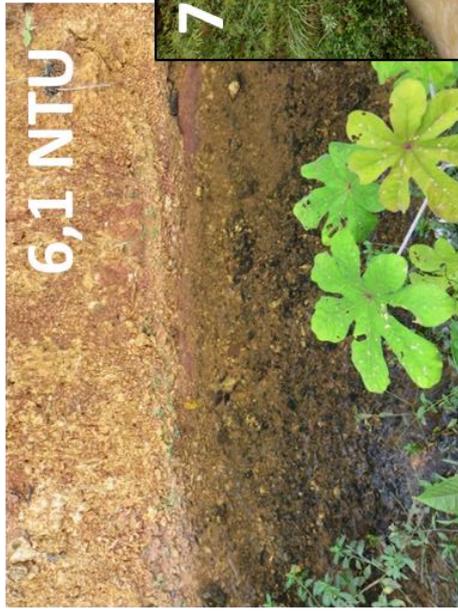
Annexe 4

Photographies montrant les variations de la turbidité de la crique Espérance (CMB)

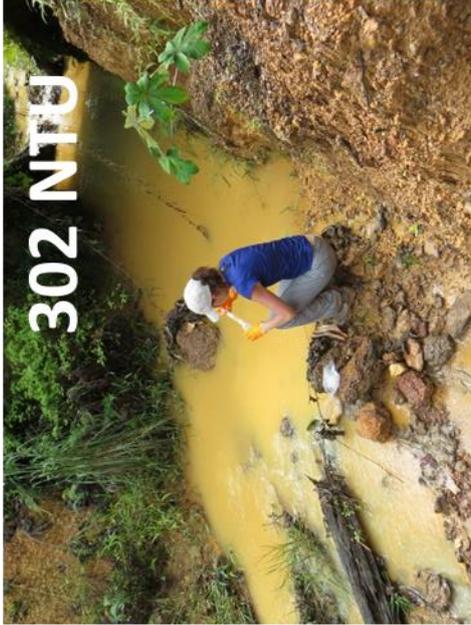
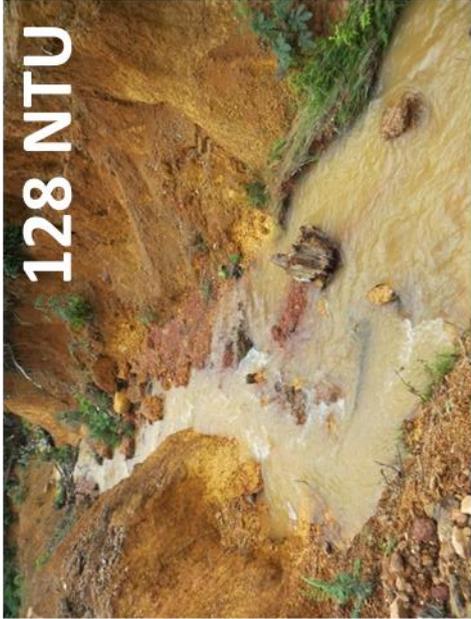
Point 1 : Comparaison entre le 14/04/16, le 01/12/2017 et le 26/07/2018



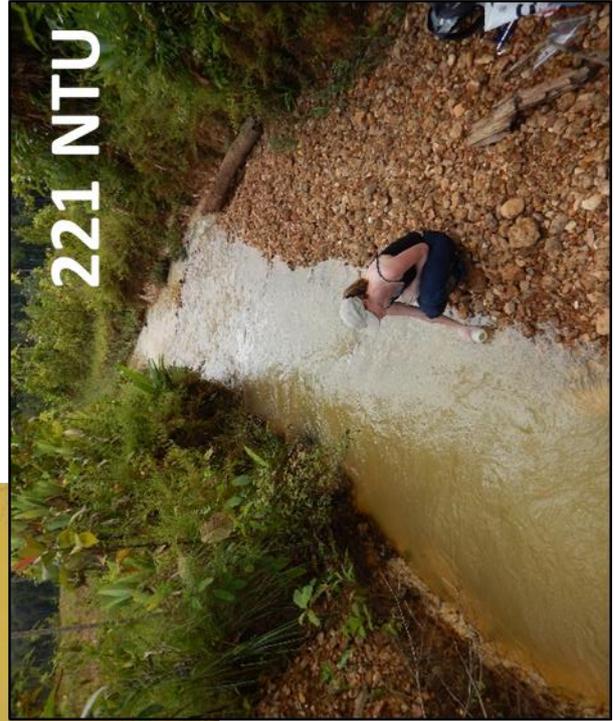
Point 2 : Comparaison entre le 14/04/16, le 01/12/2017 et le 26/07/2018



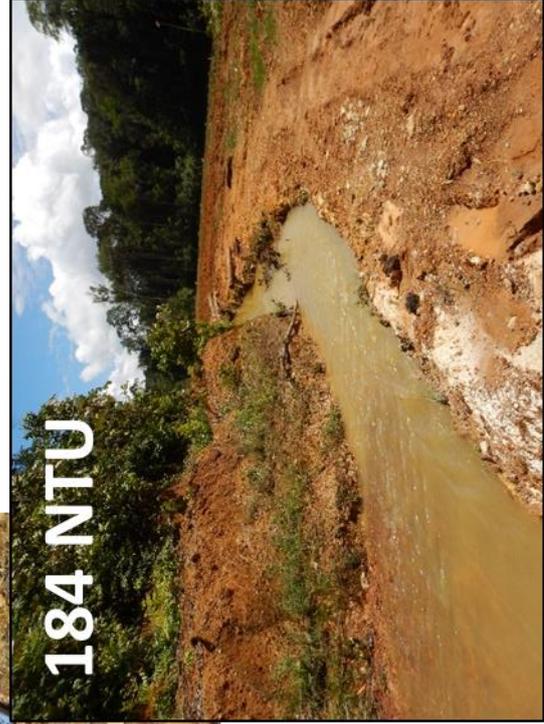
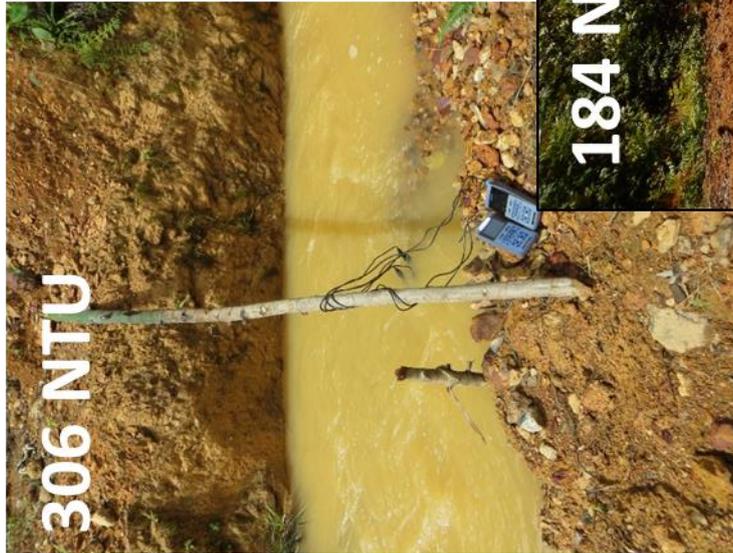
Point 3 : Comparaison entre le 14/04/16, le 01/12/2017 et le 26/07/2018



Point 5 : Comparaison entre le 14/04/16, le 01/12/2017 et le 26/07/2018



Point 4 : Comparaison entre le 14/04/16, le 01/12/2017 et le 26/07/2018





Centre scientifique et technique
Direction des Actions Territoriales
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr