

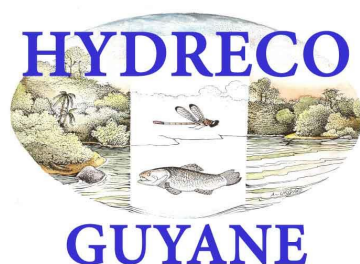
UFR Sciences et Techniques de la Côte Basque.
Université de Pau et des pays de l'Adour
Licence 3 Biologie des Organismes

ETUDE DE L'IMPACT DE L'ORPAILLAGE SUR LES COMMUNAUTES DE MACRO-INVERTEBRES BENTHIQUES DE GUYANE FRANÇAISE.



Stage effectué du 9 mars au 11 juin 2015 à HYDRECO en Guyane
française sous la direction scientifique de M. CLAVIER Simon.

*« Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun
cas engager la responsabilité de l'entreprise ou du laboratoire d'accueil »*



MARINE SAINT-MACARY

Remerciements :

Je tiens à remercier dans un premier temps les deux co-fondateurs de l'entreprise HYDRECO, VIGOUROUX Régis, ingénieur de recherche et CERDAN Philippe, ingénieur d'études pour m'avoir acceptée en tant que stagiaire au sein du laboratoire pendant trois mois.

Je remercie ensuite sincèrement mon maître de stage CLAVIER Simon, ingénieur hydrobiologiste, et son énergie débordante, de m'avoir choisie pour traiter ce sujet de stage. J'ai en effet eu la chance d'avoir à 8000km de chez moi un maître de stage qui vient aussi du Pays Basque et qui a eu le même parcours étudiant que moi !

Je remercie également BOUVIER Delphine, ingénieur d'études, pour m'avoir beaucoup aidée lorsque l'énergie débordante de mon maître de stage l'emportait ailleurs qu'au laboratoire et qu'il n'était pas là pour répondre à mes nombreuses questions.

De même pour MONCHAUX Damien, ingénieur d'études qui m'a appris beaucoup, notamment lors de la sortie terrain d'une semaine où il a su me transmettre ses connaissances en matière de pêche sans oublier les pauses café lors desquelles il a grandement contribué à ma culture cinématographique.

Je remercie de même DEDIEU Nicolas, ancien doctorant à HYDRECO, pour m'avoir conseillé quant aux tests à réaliser pour mon rapport.

Je tiens de même à exprimer ma gratitude envers les employés du pôle chimie pour m'avoir offert des moments de sérénité autour d'un vrai bon café, en particulier Cécile, présente depuis la mise en eau du barrage au sein du laboratoire, pour m'avoir aussi fait visiter le site de Petit Saut.

Et enfin je remercie, les trois logisticiens Bryan, Christophe et Roland qui m'ont permis de découvrir la Guyane, à savoir, la pêche à l'amérindienne, la construction de carbets bâches, la chasse aux caïmans, la cueillette de la noix de coco, la manipulation de la machette, le rugby et bien d'autres choses qui ont rendu mon séjour simplement inoubliable, enrichissant et motivant quant au travail à fournir.

Avant-propos HYDRECO GUYANE



Source : Hydreco

Le laboratoire indépendant et agréé par le ministère de la recherche, HYDRECO, a été créé sur le site de Petit Saut en Guyane Française en 1990 à la demande d'EDF. Ainsi, il leur a été possible d'évaluer la qualité des eaux du fleuve Sinamary avant la mise en eau du barrage et d'en suivre l'évolution encore aujourd'hui.

Il peut proposer à la demande de toutes entreprises locales ou même internationales un large éventail de travaux en rapport avec l'environnement notamment Guyanais.

Cette structure dispose d'un pôle d'analyses physico-chimiques et de deux pôles d'études en hydrobiologie.

- Invertébrés Aquatiques (IA) et terrestres : Publications d'articles scientifiques, découvertes, descriptions et publications de clés d'identification, élaboration d'indices biotiques comme le SMEG et conception de protocoles d'échantillonnages.
- Ichtyologie : Même activité que pour le pôle IA mais concernant les poissons. S'ajoute aux domaines de compétences, l'étude du mode de reproduction et d'alimentation...

Ce bureau d'étude est sollicité régulièrement par les plus grands acteurs économiques de Guyane Française comme EDF ou le Centre Spatial Guyanais (CSG). Il y a aussi un grand nombre d'administrations qui y font appel pour des questions de législations en vigueur comme la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) et l'Office de l'eau qui doivent mener à bien la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) en Guyane.

Ainsi les employés de chaque pôle contribuent à l'analyse des cours d'eau. En effet outre les relevés physico-chimiques, les spécialistes IA et ichtyologie sont capables d'évaluer la qualité des cours d'eau en utilisant les principes de bio indication selon lesquels : Le meilleur reflet de l'état de santé d'un milieu est fourni par les caractéristiques biologiques des communautés qui y vivent (Reyjol et *al.*, 2011).

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Matériel et méthodes	7
2.1. Stations échantillonnées	7
2.2. Paramètres physico-chimiques	7
2.3. Protocole PEZADA DCE	8
2.3.1. Echantillonnage	8
2.3.2. Phase de tri et de détermination	10
2.4. Analyses des données	11
2.4.1. Analyses statistiques d'ordination.	11
2.4.2. Descripteurs des communautés et indices de diversité.....	12
2.4.3. Indice biotique SMEG	13
2.4.4. Logiciels	14
3. Résultats et discussion	15
3.1. Variables environnementales.....	15
3.2. Réponse des structures des communautés de macro-invertébrés à l'orpaillage.....	17
3.2.1. Calculs des indices de diversité	21
3.2.2. Calcul du SMEG.....	25
Conclusion	27
Bibliographie.....	28
Annexes	0

1. Introduction

Le terme bioindication désigne d'après Blandin (1986) « la capacité d'organismes ou d'un ensemble d'organismes à révéler par leur présence, leur absence ou leur comportement démographique les caractéristiques et l'évolution d'un milieu ». Les macro-invertébrés aquatiques regroupent les insectes (larves, nymphes ou adultes), les crustacés, les mollusques, les vers et autres invertébrés, fixés sur un substrat ou non, dont une partie au moins du cycle de vie est aquatique. Ils sont progressivement devenus des outils majeurs de la bioindication des milieux aquatiques à travers le monde (Furse et al., 2006). Ils présentent des caractéristiques intéressantes pour la conception d'outils biologiques (large répartition géographique, colonisation de tout type de milieux, importante richesse taxonomique, grande diversité morphologique, réponse à un large spectre de perturbations, faible coût de leur analyse...). (Rosenberg et Resh, 1994).

Or, en Guyane cette méthode est utilisée depuis peu. Les premiers travaux concernant la bioindication avec les IA (Invertébrés Aquatiques) remontent à la création du barrage de Petit Saut au début des années 1990 (Horeau, 1996). En effet, il y a un retard de connaissances taxonomiques et écologiques dû à la forte diversité des insectes en milieu tropical et à la difficulté d'accès à certains sites d'échantillonnages. De plus, il est impossible d'appliquer l'indice le plus utilisé en métropole (IBGN : Indice Biologique Globale normalisé) car le territoire Guyanais possède une hydro-morphologie et des taxons différents. Il a donc été nécessaire de créer des indices propres à la Guyane qui sont au nombre de deux : le GAINi (Guyane Aquatic INvertebrate index) et le SMEG (Score Moyen des Ephéméroptères de Guyane) qui est celui utilisé pour la DCE. Cette directive demande à chacun de ses états membres d'atteindre le bon état de l'ensemble des masses d'eaux d'ici l'année 2015. C'est ainsi qu'en 2014, afin de répondre aux exigences de la DCE, HYDRECO a échantillonné 38 stations sur le RCS (Réseau de Contrôle et de Surveillance) dans le but d'étudier la qualité des cours d'eau en utilisant les IA comme bio-indicateurs.

La Guyane est un territoire dont les facteurs anthropiques, affectant l'environnement et notamment les cours d'eau, sont croissants. Parmi eux, le plus important en termes d'impacts est l'orpaillage. En effet avec plus de 500 camps d'orpaillage illégaux recensés en 2010 par le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), le cumul historique des impacts sur les cours d'eau représente un total de 2 646 km de linéaires de cours d'eau directement impactés. (SDAGE 2014 : Schémas Directeurs d'Aménagements et de Gestion des Eaux). Une telle activité engendre des modifications physico-chimiques comme l'augmentation de la turbidité. En effet, selon le rapport « Qualité des eaux des rivières de Guyane » de juin 2001, elle est, en absence de pression, en général plus faible, de l'ordre de 10 à 30 NTU alors qu'elle atteint jusqu'à 600 NTU dans des criques orpaillées. Ceci s'explique par le fait que l'extraction d'or utilise la force de l'eau pour remuer les sols afin d'en retirer les alluvions qui s'amalgament avec le mercure. Une fois les particules récupérées, le mélange d'eau et de substrats est directement rejeté dans les cours d'eaux. Ainsi il y a une forte augmentation de la matière en suspension (MES), directement en lien avec la turbidité. Par ailleurs, il a été prouvé selon une étude (Wood et Armitage, 1997) que les sédiments de moins de 2mm (sable, limon, argile) qui augmentent la turbidité, limitent la pénétration de la lumière et donc la production primaire, ce qui impacte sur la chaîne alimentaire. Dans les cas extrême, cela peut

modifier la morphologie du canal, tuant la flore aquatique, obstruant les interstices dans les habitats et ainsi réduisant les habitats disponibles pour les organismes benthiques. La perturbation des paramètres environnementaux va ainsi modifier la structure des communautés de macro-invertébrés qui y sont soumis.

Cette étude visant à révéler l'impact de l'orpaillage sur les communautés de macro-invertébrés benthiques de Guyane française, il a été comparé cinq stations de références à cinq stations impactées sur plusieurs bassins versants de Guyane. Il a été en premier lieu testé statistiquement s'il y avait des différences en termes de variables environnementales. Puis grâce à des analyses multivariées d'ordination, il a été créé des groupes en fonction des peuplements d'IA et des caractéristiques physico-chimiques. Enfin les différences ont été mesurées en termes de biodiversité à l'aide de plusieurs indices ainsi qu'en termes de qualité des cours d'eau à l'aide du SMEG.

Ainsi ce sera de plus, une étude complémentaire aux précédentes qui permettra peut-être de mieux appréhender et d'optimiser la bioindication en Guyane.

2. Matériel et méthodes

2.1. Stations échantillonnées

La DCE s'établit en Guyane Française depuis 2007. Dans le cadre donc des suivis de la qualité des eaux, il a été prélevé 38 stations définies par la DEAL et l'OEG (Office de l'Eau de Guyane) (cf. Carte des stations échantillonnées par HYDRECO en 2014 à la demande de la DCE. (Réalisation HYDRECO))

Ainsi afin d'étudier l'impact de l'orpaillage, il a été analysées cinq stations considérées comme impactées afin de les comparer à cinq stations de références, toutes définies à dire d'expert. Une superposition des cartes représentant respectivement les stations et les principales activités minières et leurs impacts en Guyane a permis de vérifier la correspondance. (cf. Carte des exploitations minières et leurs impact sur le territoire guyanais (Réalisation : AUDeG).)

Voici la liste des stations :

- Références : Saut Dalles, Para Itou, Plaque Roche, Roche Fende, Noussiri
- Impactées : Leblond, Machicou, Colonis, Saut Alexis, Saut Léopard.

2.2. Paramètres physico-chimiques

Pour chaque station il a été réalisé des mesures physico-chimiques.

Les paramètres ont été mesurés in situ lors de chaque prélèvement selon les normes AFNOR en vigueur, directement dans le cours d'eau, à l'aide de sondes de terrain WTW et de turbidimètres EUTECH.

Tableau 1 Paramètres physico-chimiques mesurés avec unité et méthodes.

Paramètres	Unité	Méthodes
Conductivité*	µS/cm	NF EN 27888
Oxygène dissous*	sat ‰	NF EN 25814
pH*	u.pH	NF T 90 008
Température*	°C	Sonde
Turbidité**	NTU	NF EN ISO 7027
*Mesuré avec des appareils portables WTW		
**Mesuré par un turbidimètre portable EUTECH		

Afin d'en évaluer l'influence de l'orpaillage, il a été testé si les moyennes de ces paramètres, entre stations impactées et de référence, étaient significativement différentes à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney pour petits effectifs (>4).

2.3. Protocole PEZADA DCE

Les stations ont été prélevées selon le protocole PEZADA DCE (Protocole d'Echantillonnage des Zones Amont ou Difficiles d'Accès) mis en place par Guillemet L. et Manchon V. en 2007.

2.3.1. Echantillonnage

Conformément au protocole, les prélèvements ont été réalisés à l'aide du filet troubleau.



Figure 1 Le troubleau

Cet outil ressemble à une épaisseur avec une maille de 200 μm et une ouverture de 600cm². Il permet de collecter les individus présents à la surface de l'eau en frottant au préalable le substrat.

Conformément aux prescriptions de la DCE, les stations sont prélevées en saison de basses eaux, soit en saison sèche (septembre-décembre) et les échantillons sont ensuite conservés dans de l'alcool à 75%.



Figure 2 Echantillons (station Noussiri)

Le protocole, PEZADA DCE, détaillé ci-après, permet un prélèvement représentatif des principaux habitats présents sur une station de façon à obtenir une image représentative du peuplement d'invertébrés.

Il est basé sur la méthodologie IBGN XP T 90-333 adaptée au contexte guyanais. Il s'applique aux cours d'eaux dont la totalité ou la quasi-totalité des habitats présents dans le lit mouillé peuvent être prospectés en période de basses eaux à pied.

A l'intérieur de la station, l'opérateur réalise :

- un groupe de 8 prélèvements élémentaires suivant l'ordre d'habitabilité et la représentativité des substrats organiques.
- un groupe de 4 prélèvements élémentaires suivant l'ordre d'habitabilité et la représentativité des substrats minéraux

Il est intéressant d'étudier ce paramètre car l'orpaillage influence l'hydro-morphologie des stations et donc les substrats. Ainsi, il a été comparé les moyennes des pourcentages de substrats présents sur les stations impactées et de référence à l'aide du test de Mann-Whitney.

Tableau 2 Différents substrats prélevés.

Substrat Organique

Système Racinaire
Tapis Racinaire
Macrophytes
Hélophytes (Moucous-moucous)
Végétation terrestre
Litière
Bryophyte
Limon/Vase
Latérite Nue

Minéral

Galet (>5cm <20cm)
Gravier (< 5cm)
Bloc
Sable
Roche/Dalle

2.3.2. Phase de tri et de détermination

Les 120 prélèvements (12 sur chacune des 10 stations) ont été triés pendant la durée du stage. Un pré-tri se fait à l'aide d'un tamis de maille 2 mm qui permet de séparer les parties les plus grossières. Un deuxième tamis de maille 500 μ m permet ensuite d'affiner le tri. Celui-ci se termine à la loupe binoculaire (grossissement maximum x40)

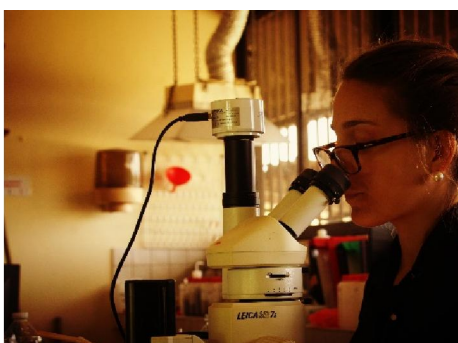


Figure 3 Tri à la loupe binoculaire

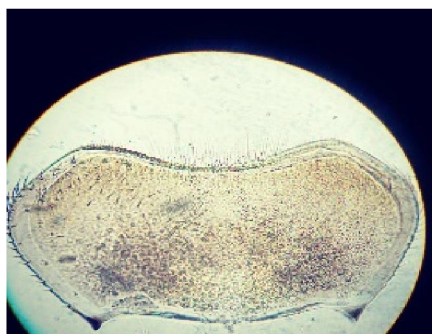


Figure 4 Labre de *Miroculis* monté sous lame et lamelle au microscope

Parfois il est nécessaire d'utiliser le microscope (grossissement maximum x100), en particulier lorsqu'il faut déterminer le genre d'un éphéméroptère car souvent il n'est possible de les identifier qu'en montant leurs pièces buccales, branchies ou encore griffes tarsales entre lame et lamelle.

Les éphéméroptères sont les seuls que l'on détermine jusqu'au genre afin de pouvoir calculer le SMEG alors que les autres sont déterminés jusqu'à la famille.

Enfin les clés de déterminations constituent des outils indispensables pour leur identifications relatives aux invertébrés aquatiques d'Amérique du Sud (Heckman, 2006 ; 2008) et d'Amérique du Nord (Meritt et al., 1988). Certains taxons à large valence écologique peuvent également être identifiés à l'aide de clés dans l'ouvrage « Invertébré d'eau douce : systématique, biologie, écologie » (Tachet et al., 2010).

2.4. Analyses des données

2.4.1. Analyses statistiques d'ordination.

Les analyses décrites ci-après permettront de voir si au regard de la composition taxonomique des stations il y a bien deux types de stations différentes. Ainsi seront réalisés une AFC (Analyse Factorielle des Correspondances) et un dendrogramme. Une RDA (Analyse canonique des redondances ou analyse sous contrainte) permettra de plus d'analyser si les structures des communautés s'expliquent par les variables environnementales.

L'AFC : C'est une méthode multivariée descriptive qui consiste à rechercher la meilleure représentation simultanée de deux ensembles constituant les lignes et les colonnes d'un tableau de contingence. Par conséquent, la distance qui sépare n'importe quelle paire d'échantillons reflète leur similarité respective. L'AFC fait de plus ressortir les points lignes et les points colonnes sur un même plan ce qui permet d'associer les deux ensembles. Les taxons dont le nombre total d'individus est inférieur ou égal à 10 individus ont été arbitrairement écartés de l'analyse réduisant ainsi le nombre de variables afin de rendre l'interprétation de l'analyse plus simple. Le jeu de données utilisé pour cette analyse est disponible en annexe. (cf. Annexe 7 Tableau représentant le nombre d'individus par taxons dans chaque station. Les familles en rouges sont considérées comme rares (≤ 10)). Ainsi, cette analyse permettra de visualiser la distance qui sépare les stations en termes de composition taxonomique sous forme de nuages de point.

Le cluster dendrogramme : Les effectifs des différents taxons ont été préalablement transformés suivant la formule de Hellinger afin de faire ressortir les tendances globales. En effet, la distance de Hellinger permet de mesurer les similitudes quantitatives entre deux peuplements et permet donc une comparaison deux à deux de la structure des peuplements. La matrice d'association obtenue a ensuite été interprétée par une méthode de groupement. Le groupement choisi est celui à lien complet car il permet de faire ressortir les groupes les plus compacts possibles. Ce type de groupement est très utile en écologie pour mettre en évidence les communautés semblables (Buttler, 2015). Le K-means partitions effectué à la suite du cluster permet de prédire combien de groupes il est préférable de former en fonction du jeu de données. De plus il donne l'affiliation de chaque station à un des groupes. Le jeu de données est le même que pour l'AFC mais en intégrant les taxons considérés comme rares. Ainsi sera faite la classification automatique et non visuelle des stations.

L'utilisation de ces deux techniques, l'une étant visuelle et l'autre classificatrice, est en effet complémentaire. (Dienst, 2015)

La RDA : Parmi les méthodes d'ordination en statistiques, la RDA est devenue l'une des plus utilisées par les écologistes. Deux tableaux seront utilisés : Le premier est celui des variables réponse donc ici celui des espèces en fonction des stations, le tout transformé en log. Le deuxième est celui contenant les variables explicatives qui sont les paramètres physico-

chimiques. Cette analyse trouve les axes d'ordination des nuages de points qui sont le plus fortement linéairement liés à l'ensemble des variables explicatives. Ainsi il sera possible d'expliquer la composition taxonomique des stations par les paramètres physico-chimique mais aussi de rendre compte des liens probable entre ces paramètres (Makarenkov et Legendre, 1999). Il aurait de même été intéressant de réaliser cette même analyse avec comme variable explicative la variable substrat. Or le nombre de substrats différents était trop élevé.

La forward selection :

L'objectif est, à l'aide d'une régression linéaire multiple, d'identifier les variables significativement explicatives (paramètres physico-chimiques) de la variable dépendante (composition taxonomique).

2.4.2. Descripteurs des communautés et indices de diversité

- **Descripteurs statistiques**

Ces descripteurs sont souvent à la base de nombreux indices de diversité dont les calculs sont plus complexes. (Grall et Coic, 2006) Ils permettent en premier lieu de déduire des tendances globales de la diversité.

- Richesse spécifique

La Richesse spécifique S est représentée par le nombre total ou moyen d'espèces recensées par unité de surface.

$$S = \text{nombre d'espèce de la zone d'étude}$$

Elle permet de détecter des secteurs faunistiques pauvres ou riches. Ici les individus n'étant pas identifiés jusqu'à l'espèce, on parlera de richesse taxonomique.

- Composition taxonomique (Profils d'abondance)

Face à une pollution, les taxons vont suivre trois types de réactions selon leur sensibilité à la pollution :

- disparaître, pour les plus sensibles.
- se maintenir, pour les indifférents.
- profiter des nouvelles conditions mises en place et se développer, pour les tolérants et les opportunistes.

Les compositions taxonomiques, sous forme pour ce rapport de secteurs en 2D des cinq taxons les plus représentés pour chaque station, seront utilisées comme indicateurs des effets du polluant. Ce choix est arbitraire et est dû au fait qu'en réduisant le nombre de taxon à cinq, les plus rares sont éliminés et rendent l'interprétation des résultats plus aisés d'autant plus qu'en Guyane, la richesse taxonomique en macro-invertébrés benthiques est grande.

- **Indices de diversité**

L'indice de Shannon-Wiener :

- Cet indice représente la diversité au sein même d'un groupe d'individus donné. Il permet de dire si un peuplement est plus ou moins diversifié. Généralement, il est considéré que si la valeur de l'indice est inférieure à 3, on considère le site peu diversifié et inversement si elle est supérieure.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln p_i$$

avec $p(i) = n_i/N$

n_i : effectif du taxon i

N : somme des effectifs des taxons

S : le nombre de taxon représentant le peuplement

Ainsi, pour gagner en pertinence, il est possible de calculer **l'indice d'équitabilité de Pielou** qui va permettre de dire si les taxons sont répartis équitablement au sein d'un échantillon. Il varie de 0 (inégalité entre les taxons) et 1 (répartition équivalente entre les taxons)

$$R = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\ln S}$$

H' : Diversité observée

H'_{max} : Logarithme du nombre total de taxon dans l'échantillon

2.4.3. Indice biotique SMEG



Figure 5 Larve d'éphéméroptère de la famille des *Leptohyphidae*

Dans cette optique, le SMEG est l'indice actuellement le plus utilisé en Guyane pour évaluer la qualité des cours d'eau. Les éphéméroptères sont des bio-indicateurs pertinents car

ils sont sensibles à un large éventail de perturbations et ils colonisent tous types d'habitats (Dédieu et al, 2014). Il se base sur la présence ou l'absence d'éphéméroptères indicateurs de bonne ou mauvaise qualité des cours d'eau. Les larves d'Ephéméroptères sont identifiées au niveau du genre. Ainsi par station triée une liste des taxons présents est établie. Pour calculer le SMEG, chaque genre, ou Unité Opérationnelle (UO), qu'il est possible de retrouver dans un échantillon est associé à un score.

Score individuel	43 U.O (42genres)	U.O
1	Très peu polluosensible	4 U.O
2	Peu polluosensible	8 U.O
3	Assez polluosensible	10 U.O
4	Polluosensible	9 U.O
5	Tres polluosensible	12 UO

Figure 6 Nombre d'Unité Opérationnelle considérée par classe de polluosensibilité selon le SMEG

Chaque Unité Opérationnelle (dont 42 genres mais 43 U.O) est affectée d'une valeur comprise entre 1 (très peu polluosensible) et 5 (très polluosensible). La différence entre le nombre d'UO et le nombre de genres s'explique par le fait que les auteurs ont considéré que le genre *Camelobaetidius* (Famille Baetidae) devait être séparé en deux groupes, avec d'un côté les espèces qui possèdent un paracerque long (PL) et celles ayant un paracerque court (PC). Les deux UO ont donc d'après les auteurs deux notes différentes l'un étant bien plus rare que l'autre et donc considéré comme plus polluosensible.

Tableau 3 Classes de notes de SMEG et états corresindants

ETAT	NOTE
TRES BON	$\geq 4,1$
BON	3,08 - 4,09
MOYEN	2,05 - 3,07
MEDIOCRE	1,03 - 2,04
MAUVAIS	$\leq 1,02$

2.4.4. Logiciels

Le recueil des données s'est fait sur EXCEL sous forme d'un tableur regroupant les données brutes. Ce logiciel a aussi permis d'effectuer des histogrammes et des secteurs.

Les analyses multivariées ont été réalisées avec le logiciel R et les package Vegan et ade4.

Enfin, les indices de diversités y compris les figures qui y sont associées, ainsi que les tests non paramétriques de comparaisons de moyennes par paires (Mann-Whitney) ont été faits avec le logiciel PAST.

3. Résultats et discussion

3.1. Variables environnementales

- Variables Physico-Chimiques

Les mesures physico-chimiques sont différentes entre les sites mais ces différences ne sont pas significatives. Ceci est certainement dû à la petite taille des effectifs analysés. En effet, sont à disposition seulement cinq échantillons de chaque et même si le minimum requis pour effectuer le test de Mann et Whitney et de quatre, cela reste faible. Le tableau recueillant les données utilisées est disponible en annexe. (cf. Tableau représentant les paramètres physico-chimiques et leur valeur en fonction des sites impactés ou de référence.)

Tableau 4 Paramètres physico-chimiques des stations de. Statistique : p-value (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, ns : pas significatif) au seuil 95%.

Station :	Référence	Impactée	
Paramètres	Moyenne $\pm$ SD	Moyenne $\pm$ SD	Statistique
Conductivité	24 $\pm$ 3,6	31,00 $\pm$ 6,40	ns
Oxygène dissout	0,86 $\pm$ 0,06	0,89 $\pm$ 0,06	ns
pH	6,10 $\pm$ 0,21	6,13 $\pm$ 0,32	ns
Température	27,78 $\pm$ 1,29	27,40 $\pm$ 1,80	ns
Turbidité	9,20 $\pm$ 10,22	9,28 $\pm$ 5,67	ns

Premièrement, comme attendu, la turbidité est en moyenne plus élevée dans les sites impactés. Cependant, cette différence n'est pas flagrante d'autant plus que les écarts-types sont élevés ce qui révèle une hétérogénéité de ce paramètre. Encore une fois, il aurait été intéressant de disposer de plus de données.

La conductivité est elle aussi en moyenne plus élevée sur les sites impactés. En effet, suite à un mélange d'eau et de substrats comme lors d'une telle activité, les matières dissoutes dans l'eau se retrouvent sous forme d'ion chargés électriquement. La conductivité permet donc de traduire la quantité de sels dissous et mettrait donc en évidence des pollutions et des zones de mélange.

En ce qui concerne le pH, il est observé en moyenne une légère hausse pour les sites orpaillés. En effet, le pH mesure la concentration en ions H⁺ qui peut éventuellement traduire l'augmentation d'ion dans l'eau comme pour la conductivité. Or, ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Ce paramètre ne peut donc à lui seul caractériser un site d'orpaillage même si les résultats sont en accord.

Enfin pour la quantité d'O₂ dissoute, il est noté une légère baisse pour les sites de références. Un certain taux d'oxygène dissout est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie des organismes aquatiques, des phénomènes de dégradation de la matière organique mais aussi de la photosynthèse. Ainsi, il traduit le caractère biogène d'un habitat mais peut aussi varier en fonction du type de celui-ci. Une eau de surface régulièrement aérée, comme après un saut (un saut est comparable à une chute d'eau ou à des rapides communément nommé comme tel en Guyane), est en sursaturation alors qu'une eau chargée en matière organique dégradée par les micro-organismes est sous saturée de par le fait que les micro-organismes s'y développent en consommant l'O₂ présent. De plus, la dégradation de la matière organique elle-même consomme de l'O₂. Ainsi, ce paramètre dépend du type d'habitat et non pas dans le cadre de cette étude de l'orpaillage car comme précisé dans le « matériels et méthodes », chaque station a été prélevée douze fois avec un maximum d'habitats afin que la totalité constitue un échantillon représentatif de la globalité du site, tous types d'habitats confondus. La faible variabilité de ce paramètre peut donc s'expliquer ainsi.

- Variables substrats

Les tests statistiques ont été réalisés à partir d'un tableau disponible en annexe. (cf. Tableau représentant les substrats prélevés ainsi que leur pourcentage (‰) par station en fonction des sites impactés et de référence.)

Tableau 5 Pourcentages de substrats dans les stations de références et dans les impactées Statistique : p-value (* p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001, ns : pas significatif) au seuil 95%.

Substrat ‰	Station :	Référence	Impactée	Statistique
		Moyenne±S	Moyenne±SD	
Organique		0,11±0,15	0,08±0,16	ns
Systèmes racinaires		0,15±0,14	0,15±0,13	ns
Tapis racinaires		0,22±0,27	0,10±0,24	ns
Macrophytes		0,01±0,02	0,01±0,02	ns
Hélophytes		0,05±0,07	0,06±0,11	ns
Végétation terrestre		0,17±0,13	0,05±0,09	ns
Litière		0,22±0,19	0,13±0,17	ns
Bryophytes		0,00±0,00	0,00±0,00	ns
Limon/Vase		0,06±0,06	0,00±0,00	ns
Latérite nue		0,00±0,00	0,00±0,00	ns
Minéral		0,17±0,26	0,21±0,02	ns
Galets		0,02±0,04	0,04±0,05	ns
Gravier		0,26±0,25	0,00±0,00	ns
Blocs		0,12±0,22	0,06±0,013	ns
Sable		0,42±0,39	0,54±0,42	ns
Roche/Dalle		0,14±0,22	0,16±0,23	ns

D'une manière générale, les stations de références sont constituées de plus de substrats organiques et inversement pour les stations impactées qui elles se composent de plus de substrats minéraux ce qui est en accord avec un article scientifique (Dédieu et al, 2014). Les tests ne sont pas significatifs ce qui s'explique encore une fois par les petits effectifs.

La conclusion de la simple analyse des paramètres environnementaux en fonction des deux types de stations est que globalement les stations considérées comme impactées constituent des sites moins biogènes. Les résultats auraient pu cependant être plus représentatifs avec plus de données.

Ou peut-être que les stations initialement désignées comme orpaillées ne sont que très peu impactées car comme vu précédemment, la turbidité d'une crique orpaillée peut aller jusqu'à 600 NTU alors que pour cette étude, elle ne dépasse pas 27,3 NTU.

3.2. Réponse des structures des communautés de macro-invertébrés à l'orpaillage.

- Analyse factorielle des structures des correspondances.

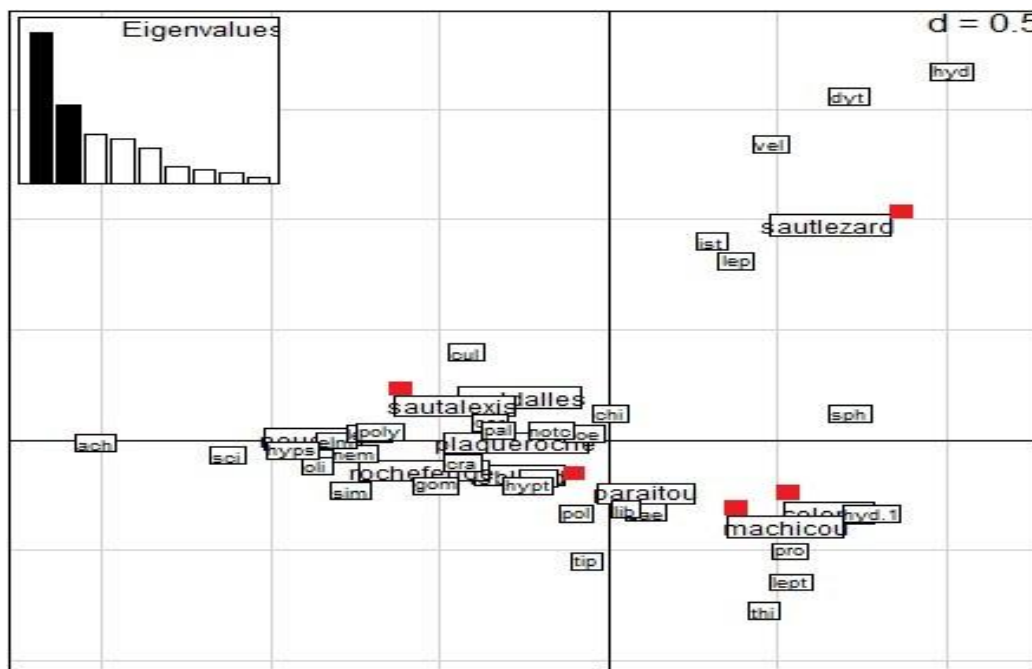


Figure 7 AFC représentant les stations en fonction de leur composition taxonomique. (Les stations précédées d'un carré rouge sont les impactées)

D'après cette AFC, l'AXE F1 explique de 30% la variabilité totale et l'AXE F2 de 15% ce qui revient à un total cumulé de 45%. L'analyse n'a donc été réalisée qu'avec ces deux axes. Elle sépare dans la partie positive de F1 Saut-Lézard, Machicou et Colonis qui sont des stations impactées.

Les taxons associés à Saut Lézard sont les familles : **Hydracarien**, **Dytiscidae**, **Veliidae**, **Isotomidae** et **Leptoceridae**. Pour Machicou et Colonis qui semblent être en corrélation avec les **Hydrobiidae**, **Protoneuriidae**, **Leptohyphiidae** et les **Thiaridae**. Ces associations concordent car les taxons recensés précédemment donc sur des sites impactés sont caractérisés par une polluosensibilité moyenne à forte. De plus, la forte proximité de Colonis

et Machicou s'explique par le fait qu'elles se situent à quelques kilomètres sur le même fleuve alors que les autres stations sont issues de bassins versants différents. Les noms de codes associés aux différents taxons sont disponibles en annexe. (cf. Tableau représentant le nom de code attribué à chaque famille pour les analyses. Les noms entre parenthèses sont des taxons non identifiés jusqu'à la famille.)

Mais outre ces liens décrits précédemment il ne semble pas y avoir d'autres liens qui s'expliqueraient directement par la structure des communautés. Les modalités au centre sont en effet toutes aussi proches des stations impactées que des stations de références. De plus malgré l'élimination des espèces rares, le nombre de modalité reste élevé ce qui rend l'interprétation du graphique toujours difficile. Enfin, même si trois stations impactées sortent du lot, il est rare que tous les liens entre modalités puissent être représentés par seulement deux axes, donc deux dimensions.

Enfin après avoir suggéré quelques tendances globales, il est possible d'affiner la division de nos stations toujours expliquée par leurs différences en termes de communautés de macro-invertébrés à l'aide d'un dendrogramme.

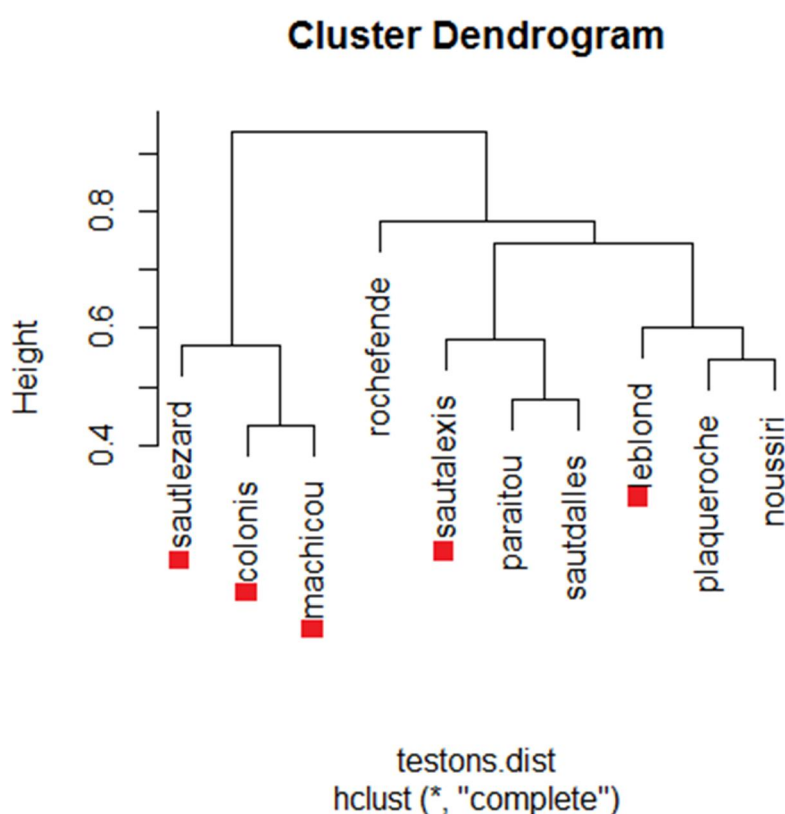


Figure 11 Groupement à lien complet (distance de Hellinger) des stations d'échantillonnage. Les stations précédées d'un carré rouge sont les stations impactées.

Ce dendrogramme a classé les stations en fonction des familles qui y sont échantillonnées. Ainsi il montre les degrés de similarité entre les stations. Plus le nœud est bas, plus le degré de similarité est élevé. Il semblerait que l'ensemble des stations se divise en deux groupes : les impactées à gauche dont le degré de similarité semble être élevé et l'autre

partie à droite dont les trois-quarts sont représentées par les stations de références. Parmi elles, se trouvent Saut Alexis et Leblond qui devraient être regroupées parmi les impactées.

Comme pour l'AFC, il y a association de Saut-Lézard, Colonis et Machicou qui sont séparée des autres stations. On peut ainsi émettre l'hypothèse que ces trois stations sont les plus impactées.

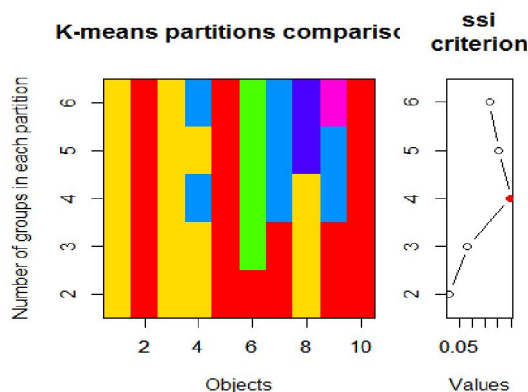


Figure 8 K-Means partitions comparison montrant le nombre de groupe le plus probable par rapport au dendrogramme

Le K-means partitions indique que, par rapport au cluster dendrogramme effectué au préalable, séparer les stations en quatre groupes est la solution la plus optimale.

Ainsi voici l'affiliation de chaque station à un des quatre groupes :

Tableau 6 L'affiliation de chaque station à un des quatre groupes selon la K-means partitions.

Bassin versant	Station	Groupe
Approuague	Colonis	1
	Machicou	1
Mana	Saut Lézard	1
Sinnamary	Saut-Dalles	2
Oyapock	Para Itou	2
	Saut Alexis	2
Mahury	Roche Fende	3
Sinnamary	Leblond	4
Iracoubo	Plaque Roche	4
Oyapock	Noussiri	4

Colonis, Machicou et Saut Lézard qui sont impactées toutes les trois sont donc affiliées au même groupe 1.

En ce qui concerne la présence de Saut Alexis et Leblond parmi des groupes constitués de stations de référence il est possible d'émettre l'hypothèse d'une baisse de l'activité de l'orpaillage. En effet une autre étude menée en 2015 avec d'autres échantillons prélevés, à la demande d'EDF par HYDRECO montre aussi que parmi les stations impactées, la station Leblond diffère au niveau de sa structure de communautés de macro-invertébrés benthiques se rapprochant d'avantage des stations de références.

Enfin, la séparation des stations de références peut s'expliquer en partie par le fait qu'elles ne sont pas toutes issues du même bassin versant. En effet chaque rivière est différente en termes d'habitats et donc forcément composée des taxons qui y sont spécifiques. (Wood, 1997). Ainsi il est logique de trouver regroupées les stations issues du même bassin versant. Or ce n'est pas le cas pour Noussiri qui, étant une station de référence et issue de bassin versant de l'Oyapock, devrait être associée à Para Itou. En effet, le long d'un fleuve, il existe un gradient amont/aval qui dépend de nombreux paramètres. La zone aval d'un fleuve est plus soumise au marnage et voit donc un assèchement régulier de ses habitats, une inversion des courants...ce qui induit la présence de taxons adaptés aux zones aval.

Ainsi après avoir laissé, lors de cette première étape d'analyse, la matrice « famille » s'exprimer il est par la suite intéressant de voir s'il est possible de différencier nos stations par les structures des communautés elles-mêmes expliquée par une autre matrice de variable comme les environnementales.

- Analyse des communautés de macro-invertébrés sous contrainte des variables physico-chimiques : RDA (Analyse canonique de redondance)

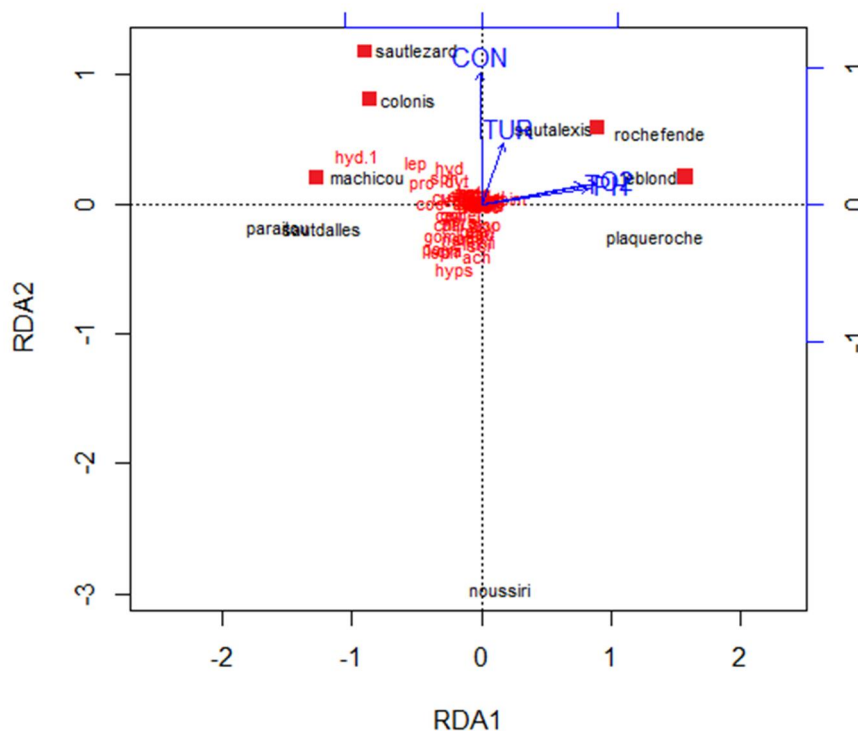


Figure 9 RDA représentant les stations en fonction de leur composition taxonomique expliquée par les variables physico-chimiques.

L'inertie de cette RDA, qui équivaut à la variabilité expliquée est ici de 12% ce qui est peu mais elle reste statistiquement significative (p -valeur=0.03*). Les proportions de cette variabilité sont expliquées à 40% par l'axe F1, et 30% par l'axe F2. Le total cumulé est de 70% de la variabilité expliquée par les deux premiers axes. Ainsi a été fait le choix de ne représenter cette RDA qu'en fonction des deux premiers axes, les autres n'étant que très peu explicatifs.

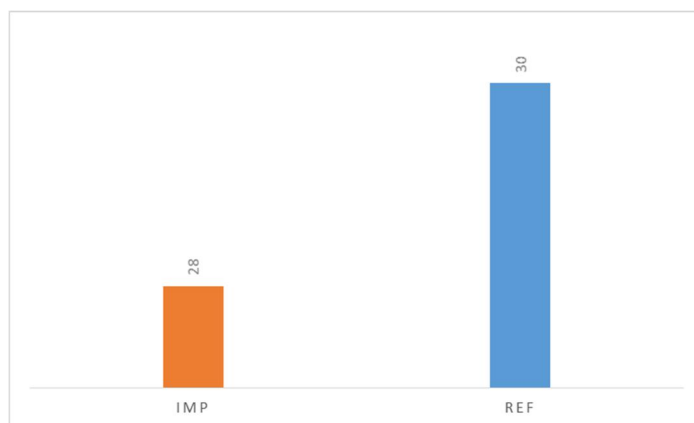
Les résultats montrent que toutes les stations impactées se trouvent dans la partie positive de l'axe F2 et à l'inverse les stations de références sont situées dans la partie négative de ce même axe F2 à l'exception de Roche Fende. On peut en déduire un gradient d'orpaillage le long de cet axe expliqué par la conductivité et la turbidité, ce qui est en accord avec les résultats obtenues dans la partie d'analyse des paramètres physico-chimiques. Ainsi, la présence de Roche Fende parmi les stations impactées pourrait éventuellement révéler des activités d'orpaillage clandestin sur cette station ce qui expliquerait pourquoi elle était séparée des stations de références dans l'analyse précédente.

Or, suite à une forward selection, il se trouve que les variables significativement explicatives sont l'O₂, pH et la conductivité (p-valeur respectives : 0.01**, 0.06* et 0.03*). Le gradient d'orpaillage en fonction de la conductivité est ainsi conforté mais en ce qui concerne l'O₂ et le pH, elles sont peut-être révélatrices d'un autre type de pollution puisqu'elles expliquent deux stations de référence et une impactée, leur lien avec l'orpaillage n'étant de plus pas encore été démontrés.

L'orpaillage entraîne ainsi des perturbations environnementales comme l'augmentation de la turbidité ce qui modifie les habitats et donc les structures de communautés de macro-invertébrés benthiques. Seulement les différences observées ne sont pas toujours dues à cette pression mais parfois simplement dues au fait qu'elles ne présentent pas les mêmes caractéristiques physico-chimiques n'étant pas issues du même bassin versant.

3.2.1. Calculs des indices de diversité

- Descripteurs statistiques
 - Richesse spécifique



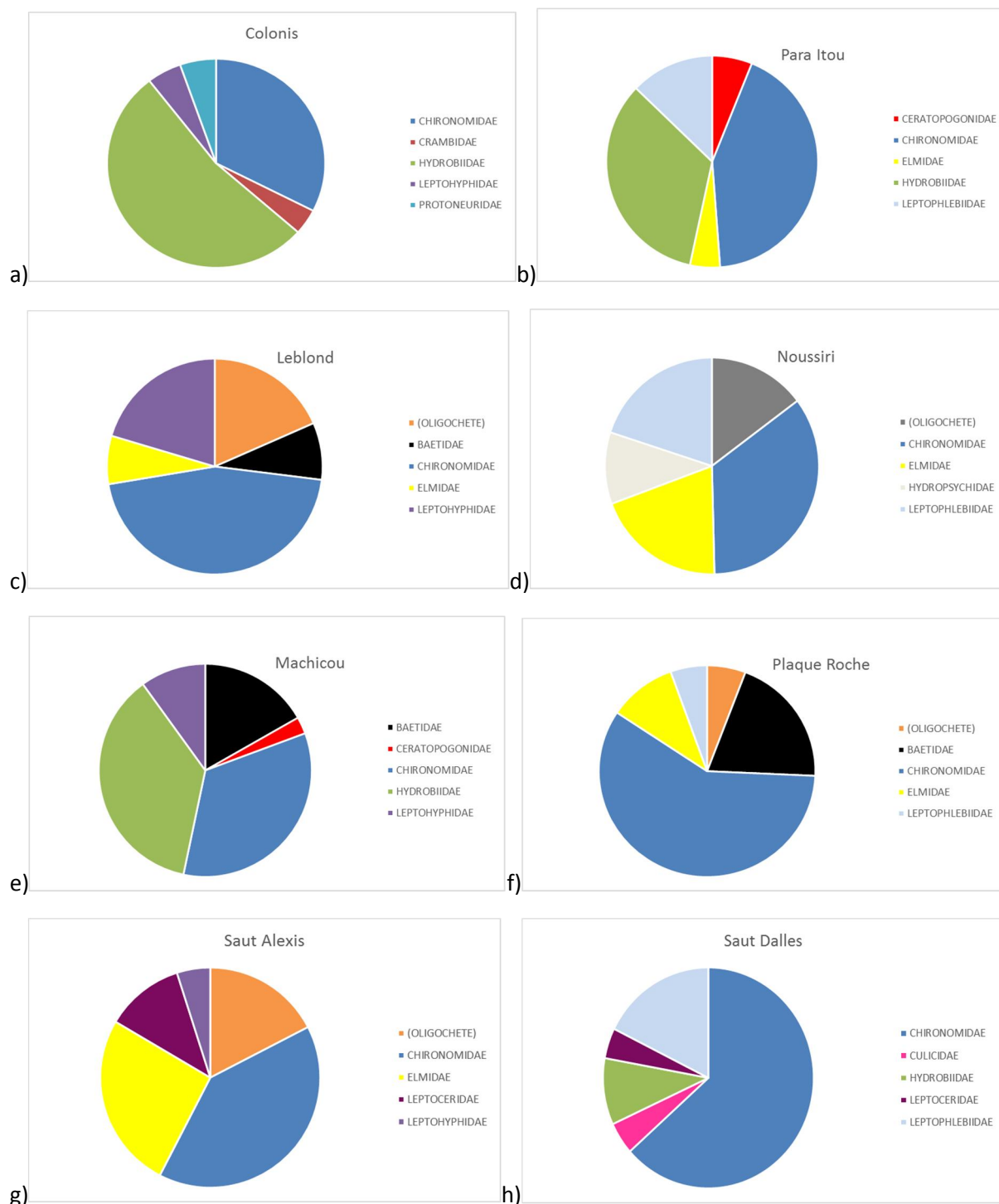
Les stations de référence toutes confondues présentent au total une richesse taxonomique de 62 contre 48 pour les stations impactées.

De plus, avec en moyenne, une richesse taxonomique égale à 28 pour les stations impactées contre 30 pour les références, cela signifie qu'en moyenne lors de cette étude on

trouve deux taxons en moins dans les stations impactées. En effet, ceci semble logique en admettant comme vu précédemment que l'orpaillage réduise les habitats disponibles, et donc les niches écologiques, et que de ce fait certains taxons disparaissent.

○ Structure des communautés.

Sont représentés ci-dessous les profils d'abondance pour chacune des stations en prenant en compte seulement les cinq taxons les plus abondants.



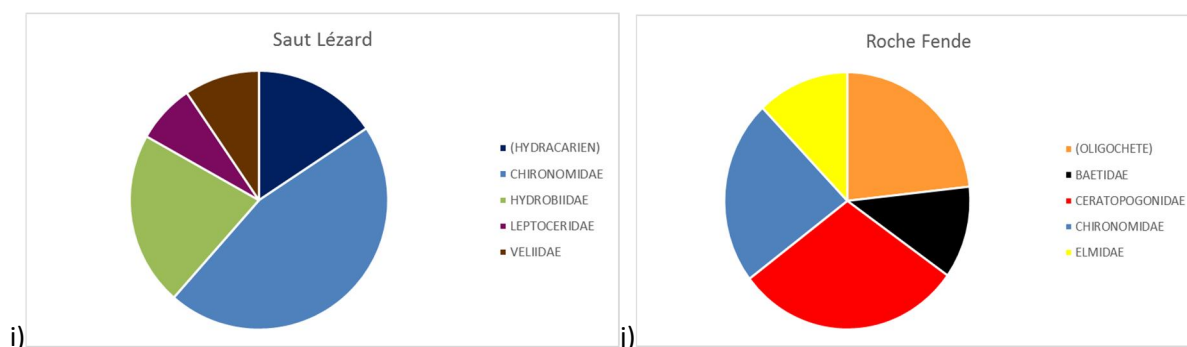


Figure 10 Secteurs représentant la proportion de chaque taxon parmi les cinq plus abondants dans chaque station. a) Colonis ; b) Para Itou ; c) Leblond ; d) Noussiri ; e) Machicou ; f) Plaque Roche ; g) Saut Alexis ; h) Saut Dalles ; i) Saut léopard ; j) Roche Fende.

Ce tableau regroupant les notes de sensibilité de chaque taxon à la pollution aidera à interpréter les résultats.

Tableau 7 Taxons retrouvés en abondance et note de polluosensibilité

Taxons les plus abondants	Polluosensibilité (10=le moins sensible)
Oligochete	8
Chironomidae	7
Hydrobiidae	6
Protoneuridae	6
Ceratopogonidae	6
Elmidae	4
Leptohyphidae	4
Baetidae	4
Hydracarien	4
Leptophlebiidae	2

De manière générale, on constate que les **Chironomidae** font partie des cinq taxons les plus abondants sur chaque station, qu'elle soit impactée ou non. On peut en déduire que ce taxon n'est nullement affecté par l'orpaillage, ce qui se confirme par sa note de polluosensibilité élevée. De plus parmi les taxons dominants, il y a les **Hydrobiidae** qui peuvent être témoins de cette activité. En effet, une augmentation du nombre de mollusque comme les **Hydrobiidae** peut être reliée à un développement d'algues qu'ils broutent et qui ont pu s'établir fortement de par le milieu plus ouvert suite à la déforestation nécessaire sur les camps d'orpaillage. Ainsi, il semble logique que Saut Léopard, Machicou et Colonis comportent toutes les trois un grand nombre de ce mollusque. Cela conforte l'hypothèse émise suite aux analyses d'ordination selon laquelle ces trois stations seraient les plus impactées. En revanche ce taxon est aussi présent sur Saut Dalles et Para Itou mais comme dit précédemment cela peut être dû à une déforestation ce qui n'est pas nécessairement liée à l'orpaillage.

Par ailleurs, il faut remarquer que les **Leptophlebiidae** dont la note de polluosensibilité est la plus basse n'est présent exclusivement que sur les stations de référence mis à part sur Roche Fende. En effet il semble logique de ne pas retrouver un taxon polluosensible dans une zone polluée. L'isolation, encore une fois de Roche Fende par rapport aux autres confirme l'hypothèse émise suite à la RDA qui disait que l'on pouvait suspecter une activité d'orpaillage à proximité de Roche Fende.

Enfin il est possible d'avoir le même raisonnement avec l'apparition de certains taxons dont la note de polluosensibilité est élevée comme les **Protoneuriidae** sur Colonis. La note de polluosensibilité de ce taxon, étant de 6, permet de supposer qu'il peut subsister dans un environnement pollué. Comme il n'est présent en abondance dans aucun site de référence, on peut penser que dans les habitats non pollués, il se retrouve en compétition face à des taxons certes polluosensibles mais peut-être plus compétiteurs

Ainsi, comme attendu, lors d'une pollution il y a trois types de profils d'abondance qui apparaissent : Les plus polluosensibles disparaissent, les indifférents restent tels quel et les polluo-résistants profitent de la disparition des polluosensibles parfois plus compétiteurs pour s'établir.

Le choix de n'avoir représenté que les cinq taxons les plus abondants a permis de rendre les graphiques exploitables visuellement. Cependant peut-être que certains taxons ne se retrouvent jamais en abondance et ne peuvent ainsi pas être pris en compte dans ce genre d'analyse bien que leur présence puisse être explicative comme les plécoptères qui indiquent une bonne qualité des eaux.

- Indices de diversité

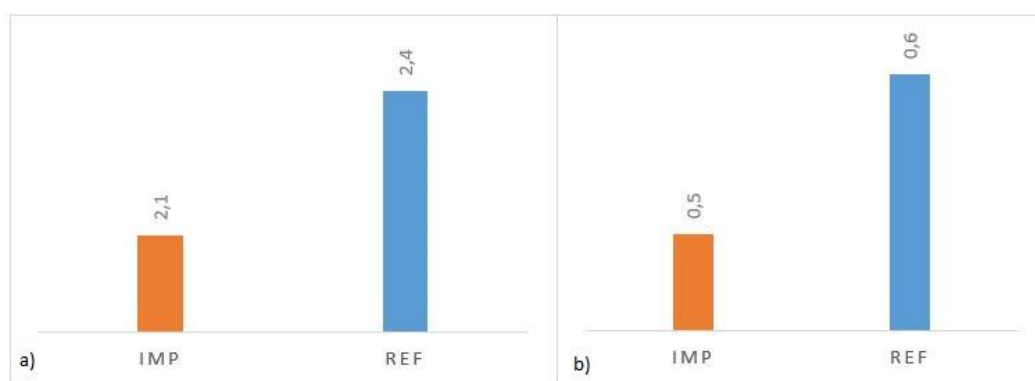


Figure 11 a) Histogramme représentant les valeurs moyennes des indices de Shannon pour chaque type de station; b) Histogramme représentant la valeur moyenne de l'indice d'équitabilité de Pielou

Les indices de Shannon étant tous deux inférieurs à 3, les deux types de stations sont donc considérées comme peu diversifiées. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'il s'agisse d'un chiffre seuil considéré pour les milieux tempérés et non pour des milieux tropicaux.

Mais étant tout de même supérieur dans les stations de références il y traduit une plus grande diversité même si elle est moindre.

De plus, la répartition des espèces est moins équitable dans les stations impactées ce qui pourrait être dû aux taxons opportunistes qui apparaissent en abondance une fois les taxons plus sensibles éliminés.

Les descripteurs et indices de diversité montrent ainsi une tendance pour les stations impactées à être moins diversifiées car en effet un site de référence est potentiellement biogène pour tous les taxons alors qu'un site pollué non.

3.2.2. Calcul du SMEG

	<i>Bassin versant</i>	<i>Station</i>	<i>Note SMEG</i>	<i>Etat</i>
Référence	<i>Sinnamary</i>	Saut Dalles	4,18	Très bon
	<i>Iracoubo</i>	Plaquer Roche	4,3	Très bon
	<i>Oyapock</i>	Noussiri	3,34	Bon
		Para Itou	4,63	Très bon
	<i>Mahury</i>	Roche Fende	3,55	Bon
Impactée	<i>Approuague</i>	Colonis	3,27	Bon
		Machicou	3,9	Bon
	<i>Mana</i>	Leblond	3,23	Bon
		Saut Léopard	3,37	Bon
	<i>Oyapock</i>	Saut Alexis	3,3	Moyen

Le tableau ci-dessus représente les notes de SMEG obtenues pour chaque station ainsi que les classes qui y sont attribuées. En premier lieu, pour les stations de référence, la qualité des cours d'eau peut varier d'un «Très bon» état à un «Bon». En revanche, pour les stations impactées cela varie de «Bon» état à état «Moyen». Ceci indique d'une manière générale que selon cet indice la qualité des cours d'eau des sites impactés est moindre en comparaison avec celle des stations de référence.

Cependant, selon le SMEG, aucun cours d'eau des stations impactées n'est considéré en «Mauvais» ou «Médiocre» état. En effet, ils sont tous en «Bon» état sauf Saut Alexis dont l'état s'avère être «Moyen». Ceci peut laisser présumer que les stations ne sont pas assez proches des camps d'orpaillage. En effet, plus la station se trouve loin de la perturbation, plus la pollution est diluée. Ainsi il serait intéressant d'échantillonner des stations toujours plus proches des camps d'orpaillage. Or ceux-ci étant des camps illégaux, il est difficile de s'en approcher, les orpailleurs n'appréciant guère la venue des scientifiques sur leur site.

De plus, les différences de classes obtenues aussi bien pour les impactées que pour les références ne peuvent s'expliquer que par l'orpaillage. Par exemple, Noussiri et Para Itou sont deux stations issues du même bassin versant qu'est l'Oyapock. Or Para Itou obtient une meilleure note de SMEG et en regardant la carte des stations fournie précédemment on remarque qu'elle se situe plus en amont du fleuve. En effet, comme précisé précédemment dans l'étude il existe un gradient amont/aval qui n'est pas pris en compte par l'indice. Ce

gradient qui induit l'établissement de taxons spécifiquement adaptés (plus résistants pour les zones avales soumises au marnage) et qui n'est en effet pas pris en compte dans l'indice. (Audureau, 2014)

Enfin, cet indice se base sur la présence/absence de certains genres d'éphémères considérant les plus rares comme les plus polluosensibles. Or, la bioindication n'étant utilisée que depuis peu en Guyane et considérant la grande variabilité générique en éphéméroptères d'eau douce dans cette région, il va de soi que certains genres n'ont été échantillonnés que très peu. Ainsi certains sont classés comme polluosensibles alors que c'est l'effort d'échantillonnage qui est moindre. De plus, certains viennent tout juste d'être découverts et ne sont par conséquent pas pris en compte dans l'indice n'ayant pas encore été affectés à une note de polluosensibilité. Pour l'exemple, lors de mon identification j'ai eu l'occasion de tomber sur un individu que j'aurais selon les clés d' identifications pu définir comme faisant partie du genre **Ulmeritus** théoriquement présent en Guyane mais encore jamais trouvé dans les échantillons. Mais l'incertitude des ingénieurs spécialisés en IA ainsi que le manque de documentation n'ont pas permis de l'affirmer. Ainsi cet individu n'a pas pu être pris en compte dans le calcul.

Par ailleurs, certains taxons sont rares car inféodés à des habitats spéciaux et non pas à cause de leur polluosensibilité. Ainsi, la note de SMEG calculée pour une station peut énormément dépendre de l'habitat sur lequel l'échantillon a été prélevé.

D'une manière générale, malgré les défauts de cet indice il montre tout de même la tendance des stations impactées à être définies comme étant en plus mauvais état que les stations de référence.

Conclusion

Cette étude préliminaire a permis de définir d'une manière générale les impacts de l'orpaillage sur les communautés de macro-invertébrés benthiques. L'étude des effets sur les variables environnementales a été indispensable afin de déterminer les effets de cette pression sur les communautés qui sont principalement l'augmentation du taux de matières en suspension. En effet il a été démontré que lors d'un tel stress, les habitats les plus biogènes chargés en matières organiques disparaissent modifiant ainsi quantitativement et qualitativement les communautés étudiées.

Cependant les différences observées ne sont pas toujours explicables par l'orpaillage, voilà pourquoi il est nécessaire d'être documenté sur les cours d'eaux étudiés (comme la provenance de bassin versant différents) ainsi que sur les pressions anthropiques autres que l'orpaillage.

Par ailleurs cette étude montre bien que malgré les résultats en corrélations il subsiste des imperfections dans le domaine de la bioindication en Guyane de par la méconnaissance des milieux tropicaux et le peu de documentations disponibles en comparaison avec les milieux tempérés.

De plus, il aurait été préférable pour cette étude de disposer de plus de données mais le temps imparti qui était de trois mois ne le permettait pas. Ceci montre bien que ce genre d'étude doit se faire à grande échelle et que la progression dans ce domaine se fera avec du temps.

De même outre l'étude de la structure des communautés et des variables environnementales, il est possible de déterminer un impact en fonction des traits biologiques. En effet un article scientifique (Dédieu et al, 2014) affirme que parfois l'étude des traits biologiques s'avère être parfois plus satisfaisante en terme d'études d'impacts. En effet la Guyane présente une grande un grand nombre de taxons avec des morphes et des modes de vie très variés. Ces traits biologiques comme le taille, la forme, le mode d'alimentation...déterminent le mode de vie d'un individu et sa capacité à s'adapter aux modifications liées à des pressions. N'ayant pas disposé d'assez de temps pour étudier ce point de vue, il serait ainsi intéressant pour des études similaires futures de rendre complémentaires les deux points de vue.

Bibliographie

Sources documentaires

Audureau M., 2014. *Caractérisation de la dynamique structurelle des communautés d'éphéméroptères en fonction des paramètres du milieu, en terrain guyanais*. Rapport de stage de fin d'études 2014. 16p.

Buttler A., 2015. *Notes du cours écologie numérique*. Master SIE. **3**, 3p.

Dédieu N., Rhone M., Vigouroux R., Céréghino R., 2014. *Assessing the impact of gold mining in headwater streams of Eastern Amazonia using Ephemeroptera assemblages and biological traits*.

Dienst E., 2015. *Pour un usage synthétique des techniques numériques*. Mémoire de la société Vaudoise des Sciences naturelles. 109p.

Furse M., Hering D., Moog O., 2006. *The STAR project : context, objectives and approaches*.

Grall J. et Coic N., 2005. *Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier*. Institut Universitaire Européen de la Mer – Université de Bretagne Occidentale. 10p.

Henley W.F., Patterson M.A., Neves R.J., Dennis Lemly A., 2000. *Effects of Sedimentation and Turbidity on Lotic Food Webs : A Concise Review for Natural Resource Managers*. 2p.

Horeau V., 1996. *La qualité de l'eau et son incidence sur la biodiversité : l'exemple de la retenue de Petit Saut (Guyane française)*. 54p.

Makarenkov V., Legendre P., 1999. *Une méthode d'analyse canonique non linéaire et son application à des données biologiques*. 135p.

Reyjol Y., Spyrtatos V., Basilico L., 2011. *Bioindication des outils pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques*. 6p.

Rosenberg D.M., Resh V.H., 1994. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. 488p.

Wood P.J., Armitage P.D., 1997. *Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment*. 1p.

Clés de déterminations

Heckman C.W., 2006, *Encyclopedia of South American Aquatic Insects : Odonata - Anisoptera*, Kluwer Academic Publishers.

Heckman C.W., 2008. *Encyclopedia of South American Aquatic Insects : Odonata - Zygoptera*, Kluwer Academic Publishers.

Merritt R.W., Cummins K.W., Berg M.B., 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*, Fourth Edition

Tachet H., Richoux P., Bournaud M., Usseglio-Polatera P., 2010. *Invertébré d'eau douce : systématique, biologie, écologie*, CNRS Edition, Paris.

Sources Internet

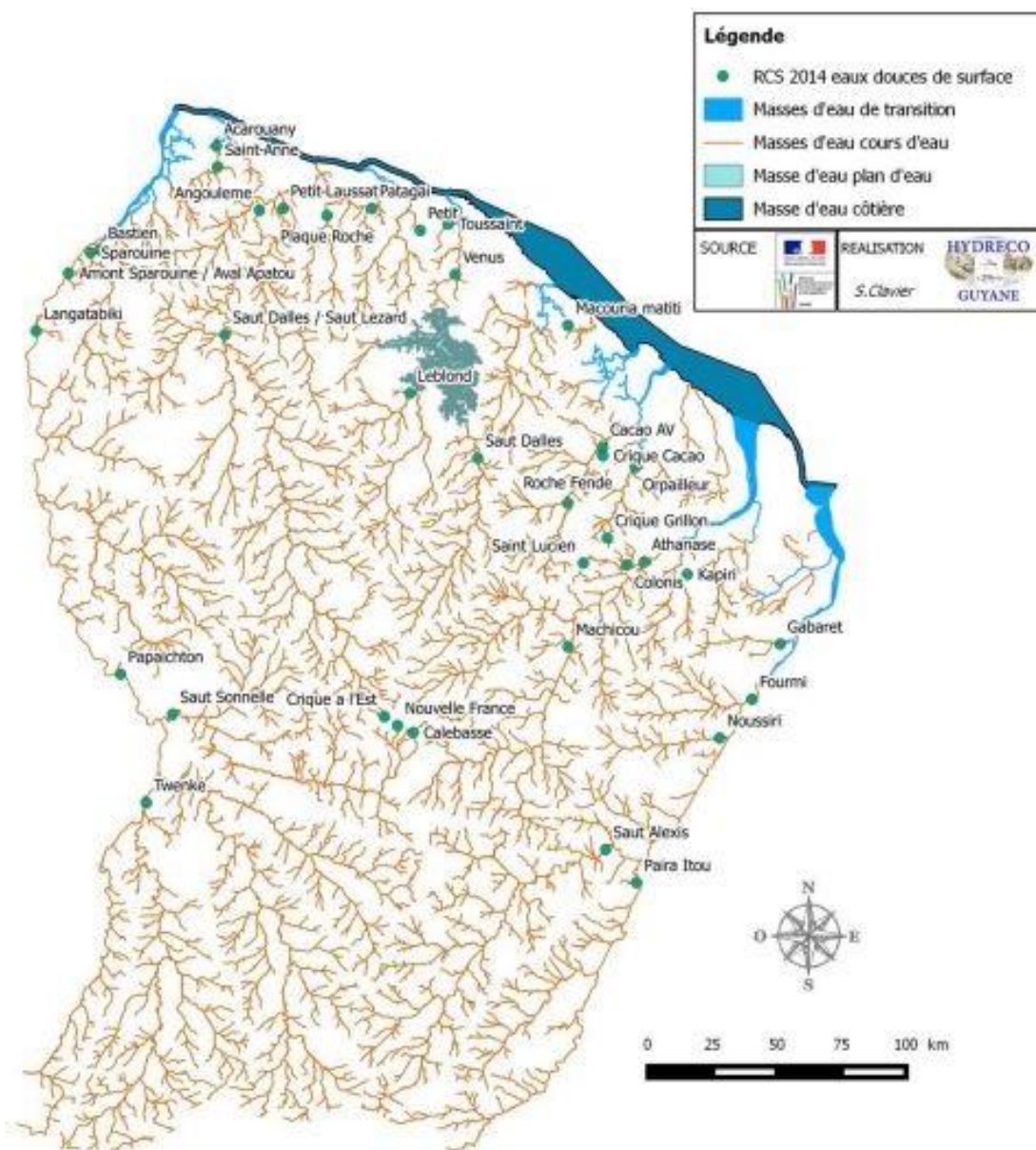
DEAL GUYANE - Les outils de bioindication [en ligne]. Disponible sur :
www.guyane.developpement-durable.gouv.fr/les-outils-de-bioindication-a823.html.
(11/05/15)

OIEAU - Analyse physico-chimique [en ligne]. Disponible sur :
[www.oieau.fr/ReFEA/fiches/AnalyseEau/Physico chimie PresGen.html](http://www.oieau.fr/ReFEA/fiches/AnalyseEau/Physico_chimie_PresGen.html). (13/06/15)

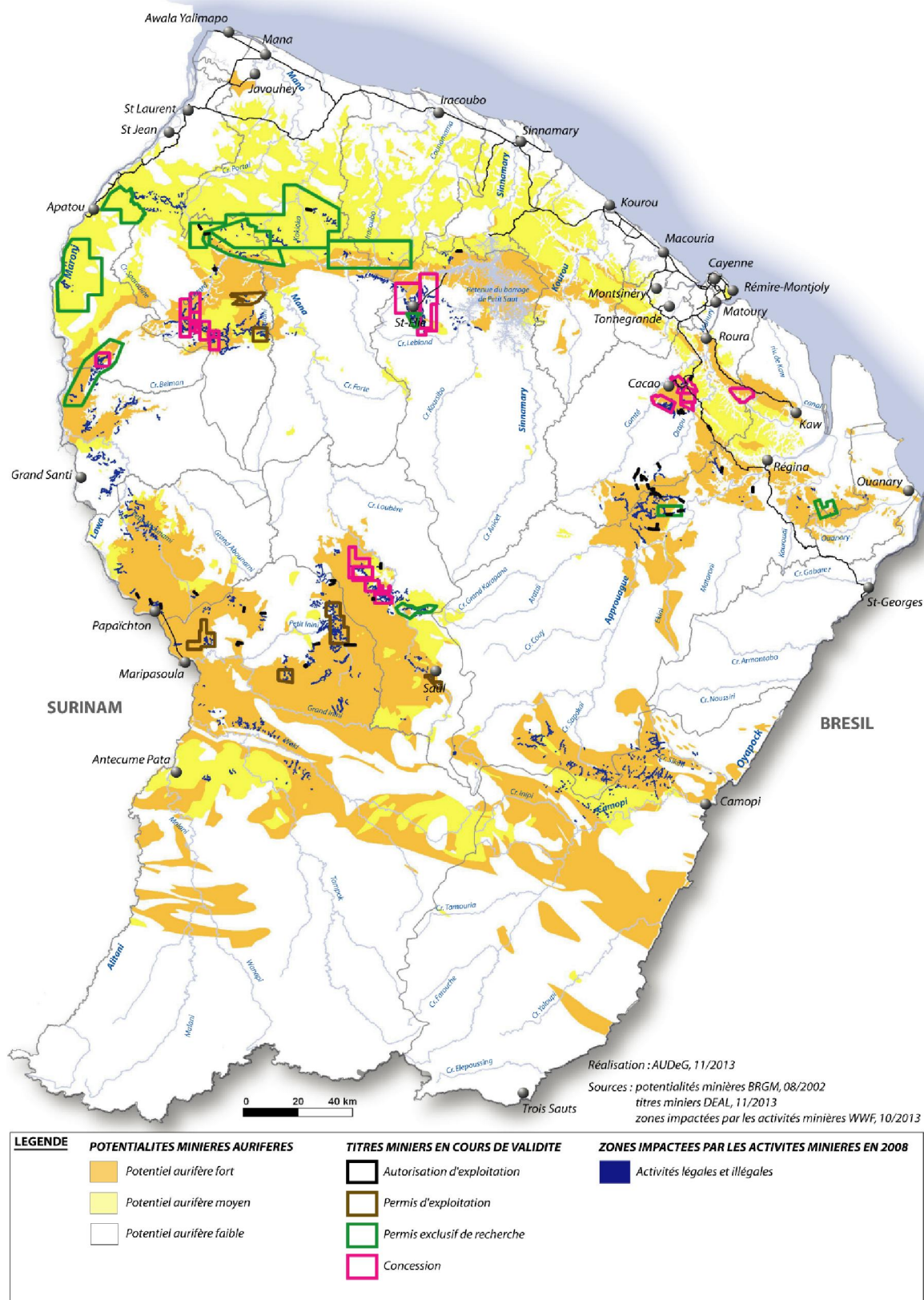
HYDRECO GUYANE - SARL HYDRECO GUYANE [en ligne]. Disponible sur :
http://hydrecolab.com/site_web (10/04/15)

Annexes

Annexe 1 Carte des stations échantillonnées par HYDRECO en 2014 à la demande de la DCE. (Réalisation HYDRECO)



Annexe 2 Carte des exploitations minières et leurs impact sur le territoire guyanais (Réalisation : AUDeG).



Annexe 3 Tableau représentant les paramètres physico-chimiques et leur valeur en fonction des sites impactés ou de référence.

t	ref	imp	pH	ref	imp	con	imp	ref	O2	imp	ref	tur	ref	imp
27.1	26.5		6.06	6.03		30	18		0.87	0.81		7.00	4.29	
29.8	29.0		6.51	6.50		42	23		0.99	0.88		4.49	27.30	
28.3	24.7		6.24	5.64		30	26		0.84	0.96		19.00	6.30	
26.6	28.7		5.96	6.20		25	27		0.85	0.81		6.76	6.50	
27.1	28.3		6.05	6.28		28	29		0.90	0.87		9.15	2.07	

Annexe 4 Tableau représentant les substrats prélevés ainsi que leur pourcentage (%) par station en fonction des sites impactés et de référence.

Substrat	SR	ref	imp	TP	ref	imp	MAC	ref	imp	HEL	ref	imp	VT	ref	imp	LIT	ref	imp	BRY	ref	imp
Organique		0.12	0.20		0.12	0.8		0,1	0,1		0,0	0,0		0.12	0,0		0.52	0.2		0,0	0,0
		0.3	0.15		0.4	0.4		0,0	0,0		0,0	0,0		0.15	0.05		0.15	0.05		0,0	0,0
		0.3	0,0		0,0	0.25		0,0	0,0		0.1	0.05		0.3	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0
		0.05	0.05		0.6	0.2		0,0	0,0		0.15	0,0		0,0	0.2		0.2	0.4		0,0	0,0
		0,0	0.35		0.3	0.35		0,0	0,0		0,0	0.25		0.3	0,0		0.25	0,0		0,0	0,0
LV	ref	imp	LAT	ref	imp		GAL	ref	imp	GRA	ref	imp	BLO	ref	imp	SAB	ref	imp	RD	ref	imp
	0.12	0,0		0,0	0,0			0,1	0,1		0.5	0,0		0,0	0.3		0,0	0.3		0.5	0.3
	0,0	0,0		0,0	0,0			0,0	0,1		0.5	0,0		0.5	0,0		0,0	0.5		0,0	0.5
	0.1	0,0		0,0	0,0	Minéral		0,0	0,0		0.3	0,0		0,0	0,0		0.7	0,0		0,0	0,0
	0,0	0,0		0,0	0,0			0,0	0,0		0,0	0,0		0.1	0,0		0.6	0.9		0,0	0,0
	0.1	0,0		0,0	0,0			0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0		0.8	1,0		0.2	0,0

Annexe 5 Tableau représentant les noms de code attribués à chaque substrat pour les analyses.

Organique	Systèmes racinaires	Tapis racinaires	Macrophytes	Hélophytes	Latérite nue
	SR	TP	MAC	HEL	LAT
	Végétation terrestre	Litière	Bryophytes	Limon/Vase	
	VT	LIT	BRY	LV	
Minéral	Galets	Gravier	Blocs	Sable	Roche/Dalle
	GAL	GRA	BLO	SAB	RD

Annexe 6 Tableau représentant le nom de code attribué à chaque famille pour les analyses. Les noms entre parenthèses sont des taxons non identifiés jusqu'à la famille.

(ACHETE)	(GLOSSIPHONIIDA)	(HYDRACARIEN)	(ISOPODE)	(NEMATHELMIN)	(OLIGOCHETE)
ach	glo	hyd	iso	nem	oli
AESHNIDAE	AMPULLARIIDAE	BAETIDAE	BELOSTOMATID	CAENIDAE	CALOPTERYGIDAE
aes	amp	bae	bel	cae	cal
CHIRONOMIDAE	COENAGRIONIDAE	CORDULIDAE	CORIXIDAE	CORYDALIDAE	CORYPHORIDAE
chi	coe	cor	cox	coy	cop
CULICIDAE	DRYOPIDAE	DYTISCIDAE	ELMIDAE	EMPIDIDAE	EPHYDRIDAE
cul	dry	dyt	elm	emp	eph
GERRIDAE	GOMPHIDAE	GYRINIDAE	HELICOPSYCHID	HELIOCHARITID	HELOTREPHIDAE
ger	gom	gyr	hel	hec	het
HYDROPHILIDAE	HYDROPSYCHIDAE	HYDROPTILIDAE	ISOTOMIDAE	LEPTOCERIDAE	LEPTOHYPHIDAE
hyph	hyps	hypt	ist	lep	lept
LIBELLULIDAE	MEGAPODAGRION	MESOVELIIDAE	NAUCORIDAE	NOTERIDAE	NOTONECTIDAE
lib	meg	mes	nau	not	notc
PALAEMONIDAE	PERILESTIDAE	PERLIDAE	PHILOPOTAMIDAE	PLANORBIDAE	PLATYSTICTIDAE
pal	per	perl	phi	pla	plat
POLYMITARCYIDAE	PROTONEURIDAE	PTILODACTYLID	RHAGIONIDAE	SCIRTIDAE	SIMULIIDAE
poly	pro	pti	rha	sci	sim
SPHAERIIDAE	TABANIDAE	THIARIDAE	TIPULIDAE	VELIIDAE	ODONTOCERIDAE
sph	tab	thi	tip	vel	odo
(OSTRACODE)	CERATOPOGONID	CRAMBIDAE	EUTHYPLOCIDAE	HYDROBIIDAE	LEPTOPHLEBIIDAE
ost	cer	cra	eut	hyd	leph
POLYCENTROPODIID	SISYRIDAE				
pol	sis				

Annexe 7 Tableau représentant le nombre d'individus par taxons dans chaque station. Les familles en rouges sont considérées comme rares (≤ 10)

	ach	glo	hyd	iso	nem	oli	ost	aes	amp	bae	bel	cae	cal	cer	chi
colonis	0	0	3	0	2	12	0	0	0	22	0	0	0	13	279
leblond	0	0	4	0	4	28	0	0	0	13	0	0	0	6	69
machicou	0	0	35	0	5	26	1	0	0	333	0	0	5	51	674
sautlezard	0	0	174	0	0	3	0	0	1	46	0	0	0	19	510
sautalexis	0	0	0	0	1	39	0	0	0	1	1	0	0	6	90
paraitou	1	2	3	0	7	54	4	0	3	34	0	0	0	64	447
noussiri	26	0	0	0	29	231	0	0	0	127	0	0	0	48	547
plaqueroche	0	0	0	0	0	39	0	2	0	135	0	0	3	3	397
rochefende	0	0	2	2	3	46	0	0	0	23	0	0	0	59	46
sautdalles	0	0	10	1	18	29	0	0	0	39	0	2	0	42	897
	coe	cor	cox	coy	cop	cra	cul	dry	dyl	elm	emp	eph	eut	ger	gom
colonis	2	2	0	0	0	34	2	0	0	27	1	0	0	2	1
leblond	0	3	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	1	0
machicou	4	4	0	0	0	4	0	0	0	37	7	0	0	0	11
sautlezard	1	2	0	0	0	10	0	0	28	7	1	0	0	0	1
sautalexis	0	10	6	0	0	1	0	0	1	58	0	0	0	0	12
paraitou	11	14	0	1	0	10	2	0	7	48	1	0	1	0	26
noussiri	1	8	0	0	3	70	0	3	0	309	0	0	0	0	32
plaqueroche	0	4	0	0	1	0	0	0	0	69	0	0	0	0	1
rochefende	0	0	0	0	0	3	1	0	2	24	0	1	0	0	0
sautdalles	23	26	2	0	0	0	67	0	4	125	0	0	2	0	4
	gyr	hel	hec	het	hyd	hyph	hyps	hypt	ist	lep	lept	leph	lib	meg	mes
colonis	0	0	0	0	455	0	6	0	1	24	44	1	1	0	0
leblond	1	1	0	0	0	0	5	0	0	0	31	5	1	0	0
machicou	0	2	0	0	729	0	8	3	0	13	198	42	2	0	0
sautlezard	0	0	0	0	242	0	3	0	5	82	6	9	3	0	0
sautalexis	0	4	1	0	15	0	0	1	0	26	11	17	1	5	0
paraitou	0	0	0	3	354	0	39	2	0	24	38	134	37	0	0
noussiri	0	0	0	1	1	0	168	0	0	0	6	313	5	0	0
plaqueroche	0	2	0	0	0	0	29	15	5	4	23	37	2	0	1
rochefende	0	0	0	0	3	2	0	0	1	0	0	4	0	0	0
sautdalles	0	0	0	0	138	0	36	0	0	63	17	250	2	2	0
	nau	not	notc	odo	pal	per	perl	phi	pla	plat	pol	poly	pro	pti	rha
colonis	0	0	8	0	11	0	1	3	0	0	1	3	46	0	0
leblond	0	0	4	0	2	0	0	0	0	0	3	5	2	0	0
machicou	0	0	0	0	1	0	3	1	2	0	0	12	4	0	1
sautlezard	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0
sautalexis	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
paraitou	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	9	14	68	1	0
noussiri	8	0	0	0	20	6	0	0	5	0	0	57	0	0	0
plaqueroche	0	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
rochefende	0	1	3	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	4	4
sautdalles	0	1	23	0	23	3	0	0	0	1	3	59	8	1	0
	sci	sim	sis	sph	tab	thi	tip	vel							
colonis	0	0	0	19	0	0	0	15							
leblond	3	1	0	2	0	0	0	2							
machicou	2	0	0	9	0	9	0	3							
sautlezard	0	0	1	19	0	0	0	105							
sautalexis	6	0	0	4	0	0	0	5							
paraitou	4	0	0	22	1	6	28	3							
noussiri	29	0	0	0	0	0	0	26							
plaqueroche	0	5	0	0	0	0	0	7							
rochefende	0	7	0	0	0	2	8	4							
sautdalles	0	0	0	0	0	0	0	11							

Résumé :

Cette étude vise à étudier l'impact de l'orpaillage sur les communautés de macro-invertébrés benthiques.

Il a été utilisé des stations impactées afin de les comparer à des stations de références. Il a été analysé statistiquement si cette activité modifiait les paramètres environnementaux de façon à pouvoir expliquer en partie les différences observées au niveau des structures des communautés. Ensuite les stations ont été classées à l'aide d'analyses statistiques d'ordination en fonction de leur composition taxonomiques et des paramètres environnementaux. Enfin les stations ont été comparées d'un point de vue diversité mais aussi qualité des cours d'eaux.

Enfin les résultats ont révélés des modifications des paramètres environnementaux sur les sites impactés modifiant ainsi les structures des communautés et affectant la qualité des eaux.

Mots clés : Guyane - Macro-invertébrés – Bioindication – SMEG – Turbidité – Orpaillage – Structure des communautés – Ecosystème tropical