



HAL
open science

Evaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane: Un nouvel indice diatomique pour la Guyane Française (l'IDGF): Rapport final (V1 du 30-04-2019)

D. Carayon, François Delmas, A. Eulin Garrigue, R. Vigouroux

► To cite this version:

D. Carayon, François Delmas, A. Eulin Garrigue, R. Vigouroux. Evaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane: Un nouvel indice diatomique pour la Guyane Française (l'IDGF): Rapport final (V1 du 30-04-2019). [Rapport de recherche] irstea. 2019, pp.123. hal-02609634

HAL Id: hal-02609634

<https://hal.inrae.fr/hal-02609634>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Évaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane

Un nouvel indice diatomique pour la Guyane Française
(l'IDGF)



Indice Diatomique de Guyane Française

Rapport final (V1) – 30 Avril 2019

Co-Auteurs :

David Carayon & François Delmas

Irstea, Centre de Bordeaux

Unité de Recherche EABX / Équipe ECOVEA

50, Avenue de Verdun, Gazinet, 33 612 CESTAS Cedex

Anne Eulin-Garrigue, Régis Vigouroux

HYDRECO Guyane

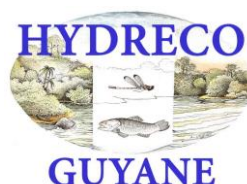
Laboratoire Environnement de Petit Saut

BP 823 - 97388 KOUROU Cedex



**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement



- **Auteurs**

David CARAYON, Ingénieur d'Etude (Irstea Bordeaux)

E-mail: david.carayon@irstea.fr

François DELMAS, Ingénieur-Chercheur IPEF (Irstea Bordeaux)

E-mail: francois.delmas@irstea.fr

Anne EULIN-GARRIGUE, Chef de projet (Hydreco Guyane)

E-mail: anne.eulin-garrigue@hydrecolab.com

Régis VIGOUROUX, Directeur (Hydreco Guyane)

E-mail: regis.vigouroux@hydrecolab.com

- **Correspondants**

AFB : Olivier MONNIER E-mail: olivier.monnier@afbiodiversite.fr

AFB : Stéphanie COUPRIE E-mail: stephanie.couprie@afbiodiversite.fr

- **Autres contributeurs**

Stéphanie REY (DEAL Guyane)

E-mail: stephanie.rey@developpement-durable.gouv.fr

Mathieu RHONE (Office de l'eau Guyane)

E-mail: mathieu.rhone@office-eauguyane.fr

Franck CHOW-TOUN (Office de l'eau Guyane)

E-mail: franck.chow-toun@office-eauguyane.fr

Référence bibliographique à citer :

CARAYON, D. & DELMAS, F., EULIN-GARRIGUE, A, VIGOUROUX, R. – 2019. Programme 2016-2018 AFB-Irstea / Fiche-Action n° 87. Evaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane : Un nouvel indice diatomique pour la Guyane Française (l'IDGF) : Rapport final (V₁ du 30-04-2019). *Irstea Eds.*, 82 p. + annexes.

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : Guyane

Niveau de lecture : Experts, professionnels et gestionnaires dans le domaine de l'évaluation écologique des hydrosystèmes (cours d'eau)



RESUME

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) impose aux états membres de l'Union Européenne un suivi de la qualité écologique de leurs masses d'eau via l'étude de compartiments biologiques clés du milieu aquatique. La Guyane Française est un Département d'Outre-Mer (DOM) situé dans la partie Amazonienne de l'Amérique du sud. Ce département, malgré son éloignement, est un territoire européen comme tous les autres DOM et est donc soumis aux prescriptions de la DCE. Les travaux de la dernière décennie, notamment sur le compartiment diatomique, ont mené à l'élaboration de plusieurs nouveaux indices biologiques spécifiquement adaptés aux conditions biogéographiques (substrats géologiques, climat, faune et flore locale) de chacun de ces territoires ultramarins.

Cependant, la conception d'un indice diatomique spécifique à la Guyane a connu une progression plus lente, du fait des conditions naturelles particulières qui mènent à des cortèges diatomiques très spécifiques et encore fortement méconnus. En l'absence d'un dispositif plus adapté, un système réglementaire d'évaluation basé sur une adaptation locale de l'IPS a été mis en place pour mesurer l'État Écologique des cours d'eau de Guyane (cf. Arrêté Évaluation du 27 Juillet 2015), malgré des faiblesses évidentes liées au décalage biogéographique du profil de beaucoup de taxons de l'IPS, établis à partir de données mondiales. Cependant, l'augmentation progressive des référentiels capitalisés dans le cadre des réseaux de suivi Guyanais sur ces 9 dernières années, ainsi que les progrès réalisés sur la taxonomie, ont rendu possible la réalisation de la présente étude 2017-2018 visant à l'élaboration d'un nouvel Indice Diatomique pour la Guyane Française (IDGF).

En tirant les enseignements adéquats des précédents indices diatomiques élaborés dans d'autres DOM-COM, une méthodologie adaptée au contexte Guyanais a été développée en se basant (i) sur une réduction du nombre de taxons pris en compte dans les assemblages et (ii) sur la recherche de taxons d'alerte dans une optique multimétrique. Cette approche a permis la conception d'un indice qui présentant une évaluation écologique compatible avec les préconisations de la DCE (notion d'écart à une référence régionale) et donnant des résultats pertinents, selon l'avis des experts locaux, et cohérents par rapport au contexte naturel et aux activités anthropiques rencontrés en Guyane.

L'indice Diatomique de Guyane Française ainsi produit est une première version stabilisée dans sa conception mais perfectible dans les années à venir, notamment par l'acquisition de plus de données : 1) en conditions d'altération intermédiaires (où très peu d'informations ont pu être mobilisées dans cette première étude), 2) en zones lenticques fluviales, ainsi que 3) par la poursuite de travaux de calibration pour l'évaluation pertinente des sites subissant des influences halines intermittentes. L'amélioration de la stabilité de réponse de l'indice et la résolution de ses aspects perfectibles sont directement liés à l'incrémentation de nouvelles données issues des futurs réseaux de suivis DCE, mais aussi à l'acquisition de données complémentaires spécifiquement acquises pour mieux illustrer des situations environnementales particulières précitées.

• Mots clés :

Diatomées ; Bioindication ; DCE ; Guyane ; France ; Amazonie ; Indice Diatomique de Guyane Française ; IDGF



ABSTRACT

The Water Framework Directive (WFD) requires European Union Member States to monitor the ecological quality of their water bodies through the study of key biological compartments in the aquatic environment. French Guiana is an Overseas Department (DOM) located in the Amazonian part of South America. Despite its geographical remoteness, this department is a European territory like all the other French overseas departments and is therefore subject to the requirements of the WFD. Previous works over the past decade, notably on the diatom compartment, have led to the development of several new biological indexes specifically adapted to the biogeographic conditions (geological substrates, climate, local fauna and flora) of each of these overseas territories.

However, work progressed at a slower rate on the diatoms of French Guiana, due to the particular natural conditions that lead to very specific and still largely unknown diatomic communities. Since no more appropriate system was available, an evaluation system based on a local adaptation of the Specific Polluosensitivity Index (SPI) has been previously set up to access the ecological state of French Guiana's watercourses (see the French Evaluation Decree of 27 July 2015), despite obvious weaknesses linked to the biogeographical mismatch of the ecological profiles of many taxa (based on the worldwide scale) inside this index.

However, the regular increase in the quantity of data gathered through Guianese monitoring networks over the past 9 years, as well as the progress made on diatom taxonomy, allowed the development of the 2017-2018 present study leading to the development of the new French Guiana Diatom Index (FGDI or IDGF in French).

Inspired by the experience of previous diatomic indices developed in other French overseas departments, a methodology adapted to the Guianese context has been developed based on (i) a reduction in the number of taxa taken into account in diatom communities and on (ii) the search for warning taxa in a multimetric approach. This approach leads to a WFD-compatible index (which integrates deviation from regional references) providing results that are relevant, according to the opinion of local experts, and consistent with the natural context and anthropogenic activities encountered in French Guiana.

The French Guiana Diatom Index thus produced is a first version, stabilized in its conception but perfectible in the years to come, notably by the acquisition of more data: 1) under intermediate anthropogenic impact (where little information was available in this first study); 2) in fluvial lentic zones; 3) as well as by the continuation of calibration works for the relevant evaluation of the sites under intermittent haline influence. The improvement of the index's response stability and the resolution of its perfectible aspects are directly linked to the incrementation of new data coming from the future WFD monitoring networks, but also to the acquisition of additional data specifically acquired for a better illustration of the above described.

- **Key words :**

Diatom; Bioassessment; WFD; Guiana; France; Amazonia; FGDI; French Guiana Diatom Index



SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) impose aux états membres de l'Union Européenne un suivi de la qualité écologique de leurs masses d'eau via l'étude de compartiments biologiques clés du milieu aquatique.

La DCE doit être mise en application en Guyane, mais ce DOM présente des cortèges diatomiques originaux et encore peu connus jusqu'à un passé récent. Afin de permettre la publication de l'Arrêté Évaluation du 27 juillet 2015, et en l'absence d'un indice diatomique local préexistant, un dispositif d'évaluation diatomique des cours d'eau basé sur l'IPS a été proposé. Cependant, durant l'étude ayant conduit à la mise en place de ce premier système d'évaluation, il était déjà clair que cet indice diatomique généraliste (*i.e.* s'appuyant sur des profils spécifiques mondiaux) présentait des décalages écologiques, et ne donnait donc pas des résultats optimaux dans le contexte biogéographique local de la Guyane.

Le présent engagement contractuel a donc été mis en place dans le cadre de la convention de travail 2016-2018 entre l'AFB et l'Irstea (Avenant 2017 / Fiche-Action n°87), avec pour objectif d'élaborer et de proposer un nouvel indice diatomique construit à partir des données abiotiques et diatomiques locales acquises en Guyane depuis une dizaine d'années. Ces données sont issues de programmes locaux de recherche ou de campagnes de surveillance réalisées par des bureaux d'étude privés, dans le cadre des réseaux et via des marchés publics, au rythme d'une seule campagne de prélèvements par an.

Le démarrage de cette action a été soumis à 2 aléas durant l'année 2017 :

- Le recrutement du CDD biomathématique (David Carayon) dont l'implication était prévue sur cette action, mais aussi sur plusieurs autres, n'est devenu effectif qu'au 1er Juillet 2017 (soit 6 mois après le départ de son prédécesseur), dans un contexte de retard général conduisant à réaliser le principal effort de travail sur les actions les plus urgentes du moment (aspects conjoncturels),
- La mise en redressement judiciaire puis finalement en liquidation judiciaire, entre 2017 et février 2018, d'ASCONIT Consultants, Bureau d'Étude avec lequel le partenariat Guyane s'était principalement mis en place depuis près de 10 ans. De ce fait, notre correspondante thématique pour cette action, Anne Eulin-Garrigue (Docteur en Diatomologie) a connu une période professionnelle chaotique. Antérieurement basée au Pôle « Antilles » d'ASCONIT à Ducos (Martinique), elle a retrouvé récemment un emploi dans un autre Bureau d'Étude notamment implanté en Guyane (HYDRECO), et est elle-même basée en France métropolitaine dans la région de Perpignan.

Ce nouveau contexte professionnel a nécessité l'établissement d'un document contractuel entre HYDRECO et Irstea, dont la mise en place effective date de Juillet 2018, afin que la réalisation de cette action puisse reprendre dans ce nouveau cadre partenarial.

D'autre part, la réalisation des déterminations taxonomiques et comptages sur assemblages diatomiques a été retardée de plus d'un an, compte-tenu de la reprise par Hydreco Guyane de Marchés Publics antérieurement contractualisés par Asconit sur le maillon diatomique.

Dans ce contexte évolutif, qui ne s'est stabilisé que tardivement (jonction 2^{ème} – 3^{ème} trimestre 2018), le présent travail n'a pu dépasser le cadre des réflexions méthodologiques qu'à partir de la réception des premières données abiotiques précompilées par Hydreco le 05 juillet 2018. De premières études exploratoires sur la structuration des gradients environnementaux ont été entreprises dès réception de ces données.

Les travaux plus définitifs sur ces données abiotiques n'ont cependant pu intervenir qu'après la réalisation d'une mission en Guyane de D. Carayon, accueilli dans les locaux d'Hydreco à Petit Saut du 21 septembre 2018 au 13 octobre 2018. Au cours de cette mission, qui a aussi inclu des missions de terrain et des contacts locaux (dont réunion avec les partenaires locaux), la base de données abiotique a pu être complétée et consolidée après consultation des bases de données internes à Hydreco et expertise des agents de terrain.

Pour leur part, les données diatomiques complètes n'ont été reçues que le 26 novembre 2018, et ce n'est qu'à partir de cette date que le travail concret d'élaboration de l'indice a pu être réellement entrepris.

La première version de l'IDGF et le présent rapport ont donc été élaborés dans un contexte temporel particulièrement tendu. Néanmoins, l'indice développé a bénéficié de l'expérience préalable de notre équipe de recherche dans l'élaboration d'indices diatomiques d'autres DOM-COM, dont certains principes méthodologiques de construction ont pu être transposés. D'autre part, nous avons pu bénéficier d'un appui efficace et d'une réactivité particulièrement appréciable de nos correspondants-experts d'Hydreco. Ce cadre partenarial performant a permis l'élaboration rapide de ce nouvel indice qui procure déjà, malgré le temps imparti, une réponse jugée très satisfaisante dans le contexte local.

Similairement à l'Indice Diatomique de Nouvelle-Calédonie (IDNC), l'IDGF est basé sur la prise en compte d'une fraction seulement des assemblages diatomiques, en cherchant des taxons dont la présence signe de manière fiable et spécifique l'impact d'une pression anthropique donnée. La recherche de taxons d'alerte est basée sur un algorithme publié sous le nom de TITAN (pour Threshold Indicator Taxa ANalysis). Cet outil fait appel à de nombreuses techniques reconnues en écologie numérique (nCPA, IndVal, etc.) et introduit des notions de fiabilité et de pureté de la réponse biologique via des permutations aléatoires. L'utilisation de cette démarche et de cet outil s'est aussi avérée pertinente dans le contexte particulier de la Guyane, et l'indice qui en est issu présente une réponse satisfaisante qui, d'après les experts locaux et dans certains cas, a même pu être jugée plus fine que celle d'autres maillons tels que les invertébrés.

Enfin, cet indice a été construit sur une base multi-métrique. Il est donc possible de ré-accéder au score individuel de chaque métrique élémentaire d'altération anthropique et d'appuyer l'expertise accompagnant le calcul de l'indice via, tel que proposé ici, un diagramme radar synthétique.

Il est cependant important de rappeler que l'indice diatomique de Guyane n'en est qu'à sa première version, élaborée à partir d'un jeu de données encore limité : 308 couples chimie/biologie dénombrant 1648 taxons (dont 446 indiciels) provenant de 68 genres (dont une large majorité du genre *Eunotia*) et dont 80% correspondent à des codes numérotés provisoirement. Ces codes sont numérotés au niveau spécifique dans leur genre d'appartenance. Ils correspondent à des espèces reconnaissables, identifiées et dénombrées dans les inventaires, mais pour lesquels le niveau spécifique n'a pas encore pu trouver de correspondance satisfaisante dans la bibliographie taxinomique mondiale (certaines espèces sont très certainement endémiques à l'Amazonie).

Cette version de l'indice présente peut-être quelques faiblesses, qui seront mieux cernées à l'usage et qu'il sera possible de conforter avec plus de recul à partir de l'augmentation dans le temps de l'assise de données capitalisées. Par exemple, il a pu être repéré que la réponse indicielle reste entachée d'une part de réponse liée à des **forçages naturels**, notamment en zones lentiques fluviales enrichies en carbone organique et un peu sous-oxygénées ; la rareté de ce type de situation dans le jeu de données initial ne permettant cependant pas d'adopter un zonage permettant une évaluation plus adaptée pour ce type de situation (qui reste pour l'instant du ressort de l'exception typologique).

D'autre part, l'illustration d'un nombre accru de situations particulières, responsables d'un **impact anthropique donné sur le compartiment diatomique**, reste également à améliorer.

Enfin, même s'il existe des propositions concrètes permettant d'envisager une progression intéressante dans ce domaine, l'IDGF n'est pas encore suffisamment calibré pour une évaluation pertinente des sites potentiellement sous influence haline, qui correspondent précisément à des zones littorales subissant les plus fortes pressions de pollution qu'il est possible de rencontrer en Guyane.

Un renforcement de la capacité de l'outil dans cette optique, sur des sites susceptibles de subir une telle influence et jusqu'à une certaine limite restant à préciser, est possible. Cependant, elle passe obligatoirement par une augmentation de la pression d'observation-comptage à réaliser sur les inventaires issus de tels sites ; ceci afin d'asseoir le message de bio-indication sur une proportion suffisante de taxons originaires du domaine d'eau douce.

Au bilan, la stabilité de réponse de l'indice, ainsi que les principaux points faibles qu'il est ou qu'il sera possible d'identifier, pourront être améliorés ultérieurement par l'addition de nouvelles données issues de stations permettant l'illustration de gradients environnementaux plus complets, notamment sur les conditions d'altération intermédiaires pour lesquelles encore peu d'informations ont pu être mobilisées dans cette première étude.

Dans la suite logique de ces travaux, l'année 2019 sera dédiée au transfert opérationnel des résultats de ce programme dans le cadre d'une nouvelle fiche action AFB / IRSTEA 2019-2020. Ces travaux de transfert ont déjà débuté dans le sens de la production d'un paquetage R construit en cohérence et s'appuyant sur différentes tables de référence (transcodage, valeurs des références par HER...), ainsi que sur l'algorithme de calcul de l'indice. Cet outil serait utilisable dans l'état par un utilisateur initié à R.

Afin de faciliter le transfert vers des utilisateurs plus novices sous R, dans l'attente d'une intégration future au SEEE par l'AFB, un dossier contenant un projet R à utilisation facilitée, limitant au strict minimum le nombre d'entrées utilisateur et accompagné d'un guide d'utilisation, sera proposé à la diffusion et mis en ligne avant la fin du 1^{er} semestre 2019.

Toujours dans le cadre de cette phase de transfert, l'élaboration de différents documents de cadrage et d'appui à la mise en œuvre de la nouvelle méthode IDGF sont prévus, en collaboration étroite avec Hydreco.

Parmi ces documents, la production d'un **guide méthodologique** est envisagée pour guider le prélèvement, le comptage et l'analyse des résultats produits dans le cadre de l'évaluation d'état diatomique obtenu à partir de l'IDGF. Cependant, si, comme antérieurement, Irstea est engagé à participer autant que possible à la fourniture de contenus et à la relecture - reformulation de parties du document (qui, dans les précédentes actions DOM, a été édité sous charte graphique AFB, dans la collection « Guides et Protocoles »), le travail d'élaboration-maquettage d'un tel document de transfert est plus du ressort du Bureau d'Étude-partenaire compétent sur ce dossier. Irstea peut s'engager à assumer le travail de son ressort sur ce document, cependant l'implication contractuelle d'Hydreco à ce niveau reste à prévoir et à mettre en place.

Il en est de même au sujet de la production d'un **guide taxinomique**. Irstea a également prévu, dans les 2 années qui viennent, de produire un travail visant à la formalisation sous une forme appropriée des éléments participant à la signalétique de chaque taxon indiciel de l'IDGF, notamment une illustration résumée de leur autoécologie (réponse aux différents paramètres abiotiques), ainsi que de leur chorologie (*i.e.* leur répartition géographique dans les inventaires ayant participé à l'étude). Un tel document est très précieux pour faciliter la mise en œuvre future de la nouvelle méthode indicielle, sachant qu'il résume en français des informations publiées à l'échelle mondiale, donc dans différents pays et en différents langages, cette synthèse étant directement utilisable ensuite au service de l'application opérationnelle de l'IDGF en Guyane. Comme, de plus, un nombre conséquent de taxons participant au calcul indiciel est toujours sous numéro, ces nouvelles espèces, ainsi que les seules acquisitions iconographiques permettant de les décrire, ont été acquises dans le cadre des partenariats en place et ne sont pas disponibles ailleurs dans les sources bibliographiques. Il serait donc important de couvrir, via le niveau national ou plus local de Guyane, l'implication en maîtrise d'œuvre d'Hydreco pour la production et le maquettage d'un tel document, qui représente encore un volume de travail assez conséquent.

Toujours dans le cadre de cette nouvelle Fiche-Action, Irstea assurera aussi le contact avec l'AFB pour l'incorporation dès que possible de ce nouveau module de calcul IDGF au module DOM de l'outil S3E, qui est l'outil national de référence pour la réalisation des calculs indiciels.

Enfin, en liaison avec la Direction de l'Eau du Ministère en charge de l'Écologie, il proposera le contenu *ad hoc* d'un modificatif d'Arrêté Évaluation en temps voulu pour la préparation de sa parution, à l'initiative de la DEB, au Journal Officiel de la République Française (JORF).

SOMMAIRE

RESUME	1
ABSTRACT	2
SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE	3
SOMMAIRE	1
INTRODUCTION	1
1. Contexte local de la Guyane.....	4
1.1. Éléments généraux	4
1.2. Géologie et relief	5
1.3. Climat et hydrologie.....	5
1.4. Zonation hydroécologique	7
1.5. Présence et impacts humains sur les milieux aquatiques	8
2. Réseaux de surveillance et acquisition des données	10
2.1. Structure des réseaux de surveillance hydrobiologiques	10
2.2. Les suivis physico-chimiques	12
2.3. Les suivis biologiques	14
2.4. Compilation et constitution de la base de données	15
3. Démarche biomathématique globale	17
4. Description des données par des analyses exploratoires.....	19
4.1. Analyses exploratoires des données physico-chimiques	19
4.2. Analyses exploratoires des données biologiques.....	26
4.3. Couplage biotique/abiotique	35
5. Préalables à la construction de l'indice.....	36
5.1. Réflexion méthodologique sur la stratégie indicielle à mettre en place	36
5.2. Choix et présentation de la procédure TITAN	38
6. Construction de l'IDGF	44
6.1. Processus global	44
6.2. Phase A : Sélection des paramètres d'anthropisation	45
6.3. Phase B : Identification des 11 listes de taxons d'alerte.....	46
6.4. Phase C : Calcul des métriques élémentaires et agrégation.....	49
6.5. Phase D : Transformation en EQR.....	50

6.6. Phase E : Agrégation finale par moyenne et normalisation	51
6.7. Robustesse de l'indice	53
7. Évaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane par l'IDGF et comparaison avec l'IPS.....	55
7.1. Cartographies et statistiques globales.....	55
7.2. Stabilité et fiabilité de l'indice.....	60
7.3. Appui au diagnostic	61
7.4. Comparaison avec l'IPS	62
8. Discussion & Conclusion	68
9. Transfert et valorisation	76
Remerciements	78
Bibliographie.....	80

Table des Figures :

Figure 1 : Cartographie générale de la Guyane avec position géographique vis à vis de la métropole (cartographies : DEAL Guyane)	4
Figure 2 : Profils d'altitude retrouvés en Guyane (Chandesris et al., 2005).....	5
Figure 3 : Répartition de la pluviométrie annuelle sur le territoire guyanais	6
Figure 4 : Réseau hydrographique global de la Guyane (source BD CARTHAGE). Les étiquettes correspondent aux noms des principaux fleuves.	7
Figure 5 : Représentation des HER de niveau 2. Les HER vertes correspondent au niveau 1 "Bouclier Guyanais" tandis que les HER bleues correspondent à au niveau 1 "Plaine littorale du Nord". Des photos illustratives de la diversité de situations rencontrées en Guyane sont localisées dans ces différentes régions (photos D. Carayon)	8
Figure 6 : Population par commune en 2010 et tendance d'évolution entre 1999 et 2010 sur le territoire guyanais (Source : Schéma d'aménagement régional de la Guyane, 2016)	9
Figure 7 : Photographies (à gauche) d'une ancienne zone d'orpillage en cours de renaturation et (à droite) d'une situation aval d'un ancien site d'orpillage où le substrat est colmaté par du sédiment fin (photos D. Carayon)	10
Figure 8 : Localisation des 189 stations de suivis identifiées lors de cette étude et distinction de leur réseau d'appartenance. Les délimitations noires correspondent aux différents bassins versants.	11
Figure 9 : Photographies du principal moyen de locomotion pour les prélèvements en Guyane, une pirogue (gauche) et exemple de sauts à franchir lors des prélèvements (droite) (Crédits photos D. Carayon)	12
Figure 10 : Partie gauche : Photographie d'un support artificiel immergé pour la récolte de diatomées (cerclé en rouge) et d'un support artificiel utilisé pour la collecte de macro-invertébrés aquatiques. Partie droite : Photographie d'une diatomée d'un genre typique de Guyane, Eunotia trigibba (photo A. Eulin-Garrigue).....	14

Figure 11 : Schéma de structure de la base de données relationnelle compilée dans le cadre de cette étude	17
Figure 12 : Stratégie biomathématique globale développée au cours de cette étude	18
Figure 13 : Distributions boxplot des gradients environnementaux observés dans les réseaux de suivi physico-chimiques en Guyane	20
Figure 14 : Visualisation des données manquantes sur la matrice abiotique.	22
Figure 15 : Visualisation des données manquantes sur la matrice abiotique déclinée par réseau de suivi	22
Figure 16 : Matrice des corrélations de Spearman permettant d'identifier les variables fortement corrélées entre elles et/ou redondantes	23
Figure 17 : ACP réalisée après imputation sur une sélection restreinte de paramètres	25
Figure 18 : Richesse taxonomique par genre de diatomées. La taille de chaque compartiment correspondant à un des 68 genres est relative au nombre de taxons appartenant à ce genre.	28
Figure 19 : (a) Nombre d'occurrences et (b) Abondance relative moyenne pour chaque taxon (présentation en ordre décroissant).....	29
Figure 20 : Démarche de sélection des taxons indiciaires mêlant seuillage numérique et expertise	30
Figure 21 : (gauche) Résultats de la NMDS et (droite) cartographie des sites avec superposition des groupes issus de (a) la CAH (b) la méthode Kmeans et (c) la SOM.....	33
Figure 22 : Positionnement temporel des relevés biologiques et physico-chimiques sur les 189 sites de relevés identifiés.....	36
Figure 23 : Exemple de profils renseignés pour 6 taxons participant à l'IBD sur le gradient composite d'altération identifié en métropole	37
Figure 24 : (gauche) Fonctionnement schématique de l'algorithme TITAN en prenant l'exemple d'une espèce x et (droite) Exemple de profils observés pour les 3 affiliations possibles (z-, aucune et z+) (Schéma © S. Boutry)	40
Figure 25 : Exemple de résultats issus de TITAN à l'échelle de la communauté pour les MES, présentant la fréquence cumulée des taxons z+ et z- le long des gradients environnementaux et permettant d'identifier les seuils responsables du basculement des communautés.	42
Figure 26 : Exemple de résultats obtenus via TITAN pour les MES à l'échelle infra-communautaire. Les taxons z- sont figurés en noir à gauche et les taxons z+ sont figurés en blanc à droite. La taille des cercles correspond à l'abondance relative moyenne du taxon et les traits/pointillés (selon l'affiliation) à son amplitude écologique.	43
Figure 27 : Démarche globale de construction de l'indice IDGF	44
Figure 28 : ACP réalisée sur la matrice de données abiotique résultante après couplage avec la biologie. ...	45
Figure 29 : Agrégation des 11 métriques élémentaires en 7 métriques plus globales par sélection de la valeur minimale, ou "One Out All Out"	49
Figure 30 : Distribution boxplot de chacune des métriques globales d'anthropisation dans chaque HER. La valeur de référence pour la métrique correspond à la médiane (trait noir à l'intérieur de chaque boîte) et est répertoriée dans le tableau récapitulatif en dessous.	51
Figure 31 : Re-normalisation de la moyenne des 7 EQR sur [0;1] pour les 327 relevés diatomiques considérés et superposition des seuils de classes de qualité écologique	51
Figure 32 : Nombre de valves indiciaires dénombrées dans chacun des 327 relevés mobilisés pour l'élaboration de l'indice, avec superposition des recommandations basées sur différents seuils numériques	54

Figure 33 : Résultats globaux de la classification d'état écologique issue de l'IDGF sur les 319 relevés diatomiques mobilisés entre 2008 et 2017	55
Figure 34 : Cartographie des classifications écologiques issues de l'IDGF pour chacune des 9 années de données mobilisées.	57
Figure 35 : Détail des proportions des classifications écologiques issues de l'IDGF pour chacune des 9 années de données mobilisées.	58
Figure 36 : Exemple de chronique IDGF pour 6 stations. Les couleurs de chaque point correspondent à la classe de qualité correspondante	60
Figure 37 : Exemple de diagramme diagnostique obtenu pour 4 relevés diatomiques. L'échelle des polygones est inverse (1 - EQR de la métrique) afin de mieux mettre en lumière les métriques signant une altération, mais la couleur est bien fidèle à l'échelle d'EQR indiquée sur le côté.	61
Figure 38 : Diagramme de Sankey représentant les flux de changement de classification entre l'IPS (à gauche) et l'IDGF (à droite). L'épaisseur de chaque flux est proportionnelle au nombre de relevés concernés par chaque changement.	63
Figure 39 : a) Comparaison des statistiques globales de classification écologique entre l'IDGF et l'IPS sur la période 2008-2017. b) Ventilation en classes de qualité déterminées par l'IDGF pour chaque classe de qualité initialement déterminée par l'IPS.	64
Figure 40 : Cartographie des classes de qualités données à gauche par l'IDGF et à droite par l'IPS pour chaque année	66

Table des Tables :

Table 1 : Liste des paramètres physico-chimiques considérés dans cette étude	13
Table 2 : Nombre de taxons dénombrés dans les 10 genres les plus représentés. Le genre "indeterminé" correspond aux taxons pour lesquels la diagnose n'a pas pu être poussée jusqu'au genre.	27
Table 3 : Listes de taxons d'alerte issus de TITAN correspondant à chaque paramètre	48
Table 4 : Grille définissant la classe de qualité d'eau selon la note de l'IDGF selon l'HER	52

INTRODUCTION

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE) du Parlement Européen adoptée le 23 octobre 2000 et transcrite en droit français par la Loi n° 2004-338 du 21 avril 2004 établit le cadre de la politique communautaire dans les domaines de l'eau et définit les objectifs environnementaux à atteindre pour l'ensemble des eaux. Par cette directive, la biologie est devenue un volet essentiel pour le suivi de l'état des hydrosystèmes (notion d'État Écologique) et prescrit l'utilisation de compartiments biologiques-clés pertinents. Ces bioindicateurs contribuent désormais au diagnostic de l'État Écologique au même titre que l'État Physico-Chimique et l'État Chimique.

La DCE doit être mise en application dans les DOM et nécessite, comme en métropole, la réalisation régulière d'opérations de surveillance de la qualité des eaux, ainsi que la mise en application d'indices biologiques permettant d'évaluer l'état écologique intégré de leurs milieux aquatiques. Ces opérations soumises à rapportage vers l'Union Européenne sont réalisées dans le cadre des réseaux institutionnels de surveillance, tels que le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS).

Jusqu'à un passé récent, il n'existait pas d'outils biologiques adaptés pour le contexte des DOM. En effet, les indices biologiques mis en place pour diagnostiquer l'état des hydrosystèmes de l'espace européen continental, dont la France métropolitaine, sont entachés d'un décalage biogéographique beaucoup trop important pour pouvoir s'y appliquer et donner des résultats corrects.

Dans ce contexte, une série de programmes spécifiques aux hydrosystèmes de DOM a été initiée sur la dernière décennie afin de développer de nouveaux indices biologiques adaptés aux conditions biogéographiques locales et aux cortèges biologiques spécifiques que l'on y trouve.

La Guyane Française est un DOM situé en Amérique du Sud (frontalier du Brésil et du Suriname) et faisant partie, avec les départements antillais (Guadeloupe et Martinique), des départements français d'Amérique (DFA). La DCE devant être appliquée sur ce territoire amazonien, des acquisitions régulières de données ont lieu depuis 2007, notamment dans le cadre des réseaux de surveillance et d'autres études (ex : Etude PME). Elles ont permis le développement de différents indices biologiques, notamment sur les poissons ([Allard, 2014](#)) et les invertébrés aquatiques ([Dedieu et al., 2016](#)) pour l'évaluation des **petits cours d'eau**.

Le compartiment des diatomées constitue un compartiment biologique largement utilisé en Europe et reconnu pour sa diversité et son aptitude à la bioindication. De nombreuses avancées ont été faites sur ce compartiment en DOM sur la dernière décennie, menant à l'élaboration de 4 indices diatomiques : IDR pour la Réunion ([Boutry et al., 2013](#)), IDA pour les Antilles ([Gueguen et al., 2015](#)), IDNC pour la Nouvelle-Calédonie ([Marqué et al., 2017](#)) et un indice diatomique pour Mayotte en cours d'élaboration par l'INRA. Les diatomées avaient en revanche fait l'objet de peu de développements antérieurs sur le territoire guyanais, du fait de conditions naturelles très particulières conduisant à des cortèges très spécifiques et encore méconnus.

La bonne prise de connaissance des flores locales implique un lourd travail couplant observation microscopique d'inventaires diatomiques et analyse bibliographique faisant appel aux centaines de références recensées pour l'Amérique du Sud et, plus généralement, dans la bibliographie mondiale.

Deux études scientifiques antérieures impliquant le Cemagref (devenu depuis Irstea), en liaison avec les organismes de recherche et les autres partenaires locaux, avaient déjà été réalisées dans le but de commencer à décrypter les flores locales de Guyane et de prospecter la faisabilité de la démarche de mise en place d'un indice diatomique local :

- Une première étude 1997-2000, dont la partie diatomique a été réalisée sous maîtrise d'œuvre Cemagref en collaboration avec l'IRD, la Direction de l'Environnement de Guyane et le Bureau d'Etude Hydreco Guyane, a consisté en la détermination-comptage de 54 inventaires prélevés sur 31 sites de terrain différents à l'occasion de 3 campagnes de prélèvement 1997, 1998 et 1999, conduisant, dans un contexte de flores méconnues au départ, à la reconnaissance de **431 taxons différents**. Dans le cadre de ce programme (Coste, 2000), dont le 1^{er} objectif affiché était l'acquisition de connaissance floristique et d'inventaire diatomique, deux prototypes d'outils indiciels avaient fait l'objet de premiers tests : un indice au genre, l'IDG (ou Indice Diatomique Générique), jugé complètement insatisfaisant, et un prototype d'**indice à l'espèce**, l'ISG (ou Indice Spécifique Guyanais), qui semblait plutôt l'option méthodologique à poursuivre à l'avenir.
- Une deuxième étude scientifique a été menée à nouveau sur les diatomées benthiques, en 2009-2010 en collaboration avec l'IRD et Hydreco Guyane (Coste et al, 2010) dans le cadre d'un large programme scientifique multi-maillons intitulé QUES Guyane. Elle a permis d'augmenter la liste des espèces reconnues en Guyane (**527 taxons** dont 21, très probablement endémiques, étaient encore impossibles à nommer dans la littérature publiée). Cette étude a notamment permis la réalisation d'une mission sur place du Dr Michel Coste, expert taxonomiste mondial qui a procédé à la détermination et au comptage les échantillonnages diatomiques correspondants. Dans ce cadre, 63 sites ont été échantillonnés dont seulement 45, faisant partie des réseaux de surveillance, ont pu bénéficier d'un couplage de données chimiques (problème du nombre contingenté d'analyses de chimie prises en compte dans ce cadre d'étude). Ce programme conclut à nouveau que les résultats de bio-indication les plus corrects en Guyane sont obtenus par des **indices à l'espèce** ; l'IPS "adapté Guyane", indice diatomique généraliste à portée mondiale construit à l'espèce et utilisant toutes les espèces de l'assemblage (IPS, Coste, 1982), se montrant supérieur à l'IBD₂₀₀₇ (Coste et al, 2009) dont les listes indicielles, fermées et adaptées au contexte de métropole, subissent un décalage biogéographique conséquent vis-à-vis du contexte Guyanais . Dans ce contexte local, ces deux indices à l'espèce ont en tout cas donné des résultats nettement plus probants et intelligibles qu'un indice au genre (l'IDG). Sur un autre plan, malgré la lacune en données de chimie pour 30 % des relevés, les investigations des couples données abiotiques – données diatomiques réalisées au cours de cette étude ont permis de conclure à la faisabilité d'une démarche de mise en place d'un indice diatomique adapté au contexte biogéographique local (*i.e.* utilisant les données diatomiques et des données de chimie des eaux collectées en Guyane).

Suite à ces deux programmes, la construction d'un indice diatomique élaboré avec des données locales restait donc l'objectif visé sur le moyen terme. Dans cette optique, des données régulières d'inventaires diatomiques ont été collectées et déterminées dans le cadre des réseaux de surveillance.

Cependant, afin de pouvoir satisfaire sur le court terme la mise en application locale de la DCE, un dispositif réglementaire provisoire d'évaluation des cours d'eau de Guyane basé sur l'adaptation locale de l'IPS. Indice qui avait donné, lors des études précédentes les résultats les plus probants dans le contexte local, a été construit et mis en place dans le cadre de l'Arrêté Évaluation du 27 juillet 2015. Ce dispositif actuellement en vigueur restera applicable jusqu'à la fin du Plan de Gestion des Masses d'Eau actuel (2016-2021). Toutefois, malgré une certaine consistance de l'évaluation produite, l'IPS pose de nombreux problèmes imputables à un décalage biogéographique évident (**profils indiciaires spécifiques** des taxons définis, non avec des données locales, mais **mondiales**). De ce fait, le dispositif d'évaluation actuel est très nettement perfectible en Amazonie, et comporte aussi une marge d'amélioration en zone d'influence littorale des criques du nord.

Les problèmes rencontrés tiennent probablement au fait que les **nouvelles espèces trouvées et déterminées en Guyane**, non pré-existantes auparavant dans les bibliothèques d'attributs-taxons de l'IPS, y ont bien sûr été introduites (d'où le vocable d'IPS "adapté Guyane") et se sont vues attribuer un code-métier à 4 lettres (*i.e.* codes de type Omnidia). Cependant, faute de données de chimie suffisantes, le profil écologique qui leur a été attribué pour le calcul de l'indice est le plus souvent celui attribué **au genre** à l'échelle mondiale dans les bibliothèques Omnidia. Cette **prise en compte insuffisante de l'écologie locale** des taxons originaux de Guyane, mais aussi de taxons déjà connus par ailleurs mais susceptibles de présenter des particularités de positionnement écologique local, est très certainement à l'origine des aspects perfectibles du système d'évaluation diatomique actuellement utilisé pour les cours d'eau de Guyane.

Depuis la mise en place du système réglementaire d'évaluation basé sur l'IPS, l'assise de données à disposition, tant biologiques que physico-chimiques, s'est largement élargie. En effet, 9 années de chroniques de données couplées sont maintenant disponibles, obtenues dans le cadre des réseaux classiques de surveillance mais aussi, à l'occasion d'études plus ciblées sur des types de milieux (étude PME) ou sur des cas particuliers (recherche de sites spécifiquement pollués). D'autre part, des progrès très concluants ont été faits sur la systématique des diatomées guyanaises, aboutissant à la reconnaissance actuelle de plus de 1600 espèces diatomiques.

Ces avancées récentes ont justifié la mise en place de la **Fiche-Action AFB - Irstea N° 87** (programmation 2017-2018), grâce à laquelle a été rendue possible la réalisation du présent programme de recherche aboutissant à l'élaboration du nouvel Indice Diatomique de Guyane Française (IDGF).

Le présent rapport présente le contexte d'acquisition des données et les différentes analyses exploratoires et descriptives qui ont été réalisées lors de ce programme puis détaille la méthodologie développée pour la construction du nouvel indice diatomique IDGF. En fin de rapport, les résultats fournis par ce nouvel indice sont analysés puis discutés et les perspectives concernant le transfert opérationnel sont présentées.

1. Contexte local de la Guyane

1.1. Éléments généraux

La Guyane Française est un département français d’Outre-Mer (DOM) dont le territoire situé au nord-est de l’Amérique du Sud s’étend entre 2° et 6° de latitude nord et entre 52 et 54° de longitude ouest, (Barret et al., 2001) pour une superficie totale actuellement estimée à 83 546 km² (Cilleros, 2017). Elle fait partie, avec la Guadeloupe et la Martinique, des départements français d’Amérique (DFA). Ce département est délimité par deux fleuves transfrontaliers : le fleuve Oyapock (403 km de longueur) démarque la frontière avec le Brésil au sud / sud-est tandis que le fleuve Maroni (520 km de longueur) démarque la frontière avec le Suriname à l’ouest (Figure 1). La forêt primaire guyanaise est un des hot-spots de biodiversité les plus riches du monde, tant en milieux terrestres qu’en milieux aquatiques. Le territoire héberge plus de 7 000 espèces végétales, dont 5 300 espèces de plantes supérieures (Hoff, 2007) et présente également une faune très diversifiée et riche en espèces emblématiques telles que jaguars, singes hurleurs, harpies féroces ou caïmans noirs.

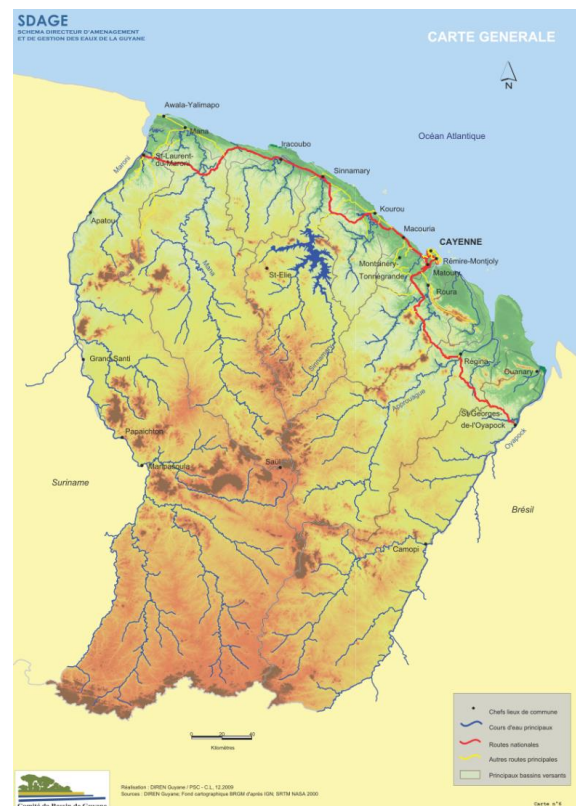


Figure 1 : Cartographie générale de la Guyane avec position géographique vis à vis de la métropole (cartographies : DEAL Guyane)

1.2. Géologie et relief

La Guyane appartient à un ensemble géologique vaste nommé “Plateau des Guyanes”, d’origine précambrienne (≈ 2 milliards d’années) (Choubert, 1974 ; Milési et al., 1995) et qui présente dans l’ensemble un relief très peu marqué, à l’exception de quelques massifs culminants à 800 mètres (Figure 2). Le plateau Guyanais est caractérisé par des formations latéritiques allant jusqu’à plusieurs dizaines de mètres d’épaisseur, pauvres en silice et en éléments nutritifs fertilisants (Ca, Mg, K, Na) et résultant d’un lessivage important depuis 2 milliard d’années en lien avec le climat néotropical (Dedieu, 2014).

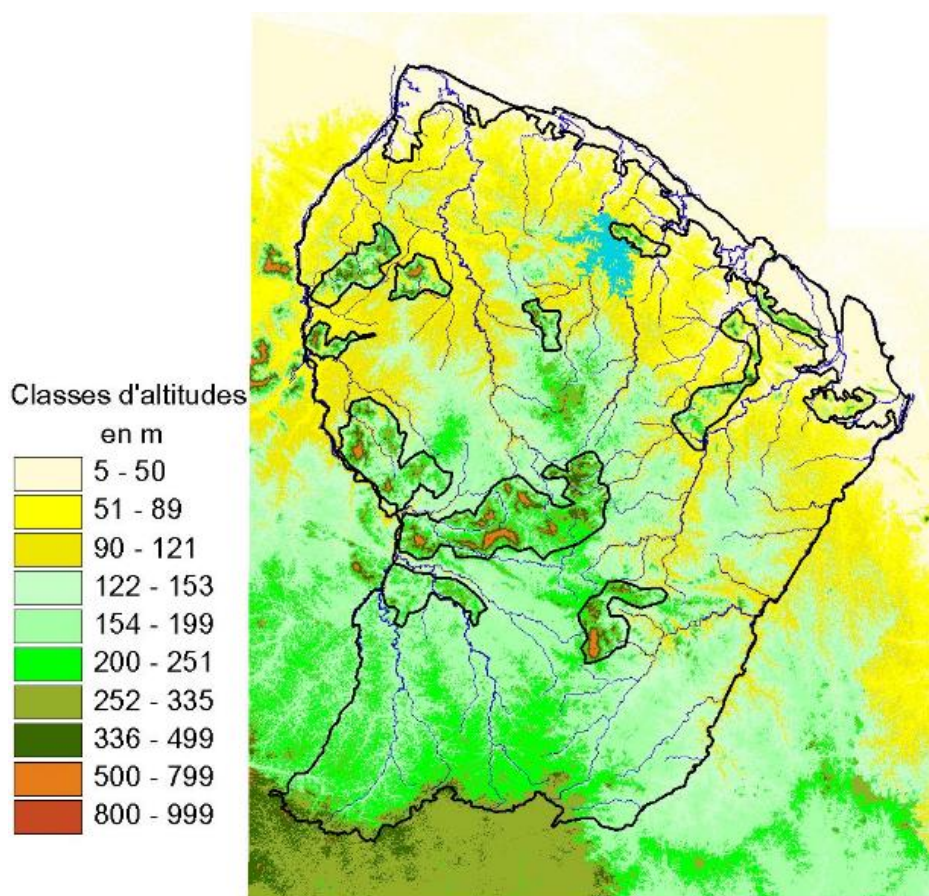


Figure 2 : Profils d'altitude retrouvés en Guyane (Chandesris et al., 2005)

1.3. Climat et hydrologie

Le climat en Guyane est de type équatorial humide. Sa proximité avec l'équateur ainsi que sa façade océanique lui confèrent une bonne stabilité climatique avec des températures constantes entre 25°C et 26°C. Les précipitations, en revanche, présentent des variations annuelles conséquentes qui vont structurer les 4 saisons en Guyane :

- La petite saison des pluies débutant vers la mi-décembre, durant laquelle les pluies sont abondantes et la couverture nuageuse quasi permanente ;
- Le petit été de mars, une saison sèche courte se traduisant par une trêve des précipitations et un ciel souvent ensoleillé ;

- La saison des pluies, suivant le petit été de mars et durant laquelle les précipitations redeviennent très fréquentes et les éclaircies alternent avec des averses brèves mais souvent intenses ;
- La saison sèche, caractérisant un été avec des journées le plus souvent ensoleillées et qui s'étend de la mi-août à fin octobre.

La répartition de la pluviométrie est cependant variable sur le territoire. Le nord et en particulier la zone marécageuse de Kaw est bien plus arrosée que le sud (Figure 3).

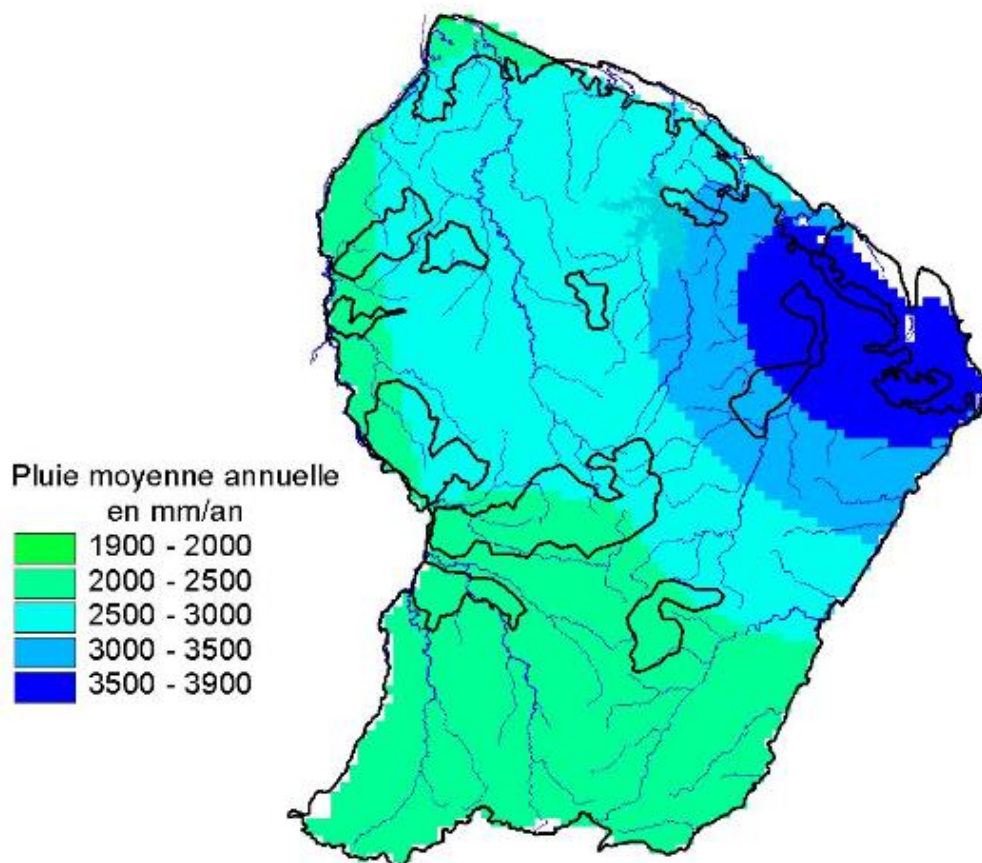


Figure 3 : Répartition de la pluviométrie annuelle sur le territoire guyanais

Du fait de cette pluviométrie importante, le réseau hydrographique guyanais est particulièrement dense et composé en majeure partie (à plus de 80%) de cours d'eau de petite taille, localement dénommées "criques".

On dénombre en Guyane 5 grandes régions hydrographiques (Figure 4), incluant 9 bassins de grande et moyenne importance, de surface variant entre 60 940 km² pour le fleuve-frontière avec le Suriname (le Maroni) et 1760 km² pour de plus petits fleuves centraux tels que la Comté, l'Iracoubo et l'Organabo.

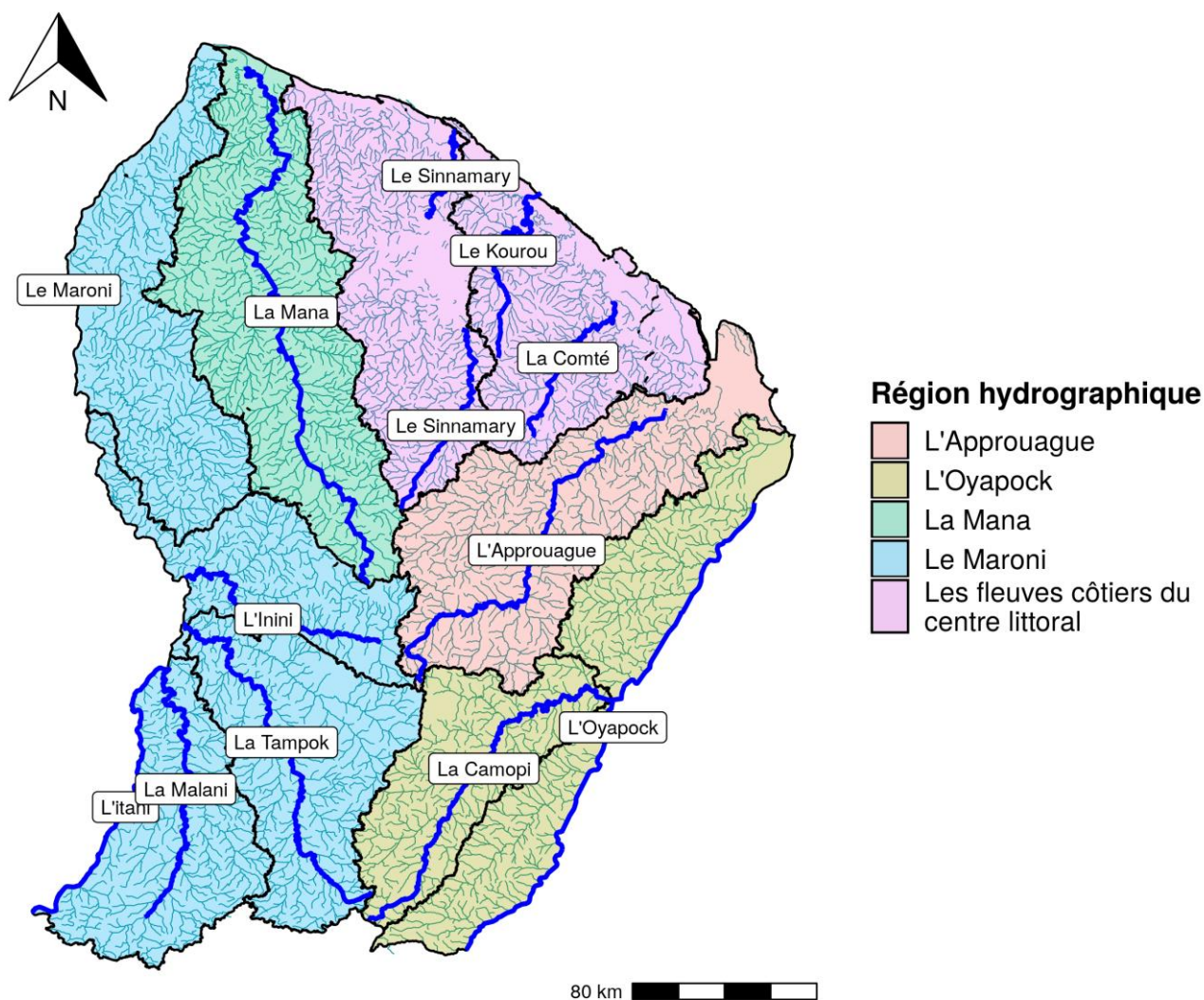


Figure 4 : Réseau hydrographique global de la Guyane (source BD CARTHAGE). Les étiquettes correspondent aux noms des principaux fleuves.

1.4. Zonation hydroécologique

À partir des différentes informations à disposition (géologie, relief, climat), une zonation en hydroécorégions a été proposée par le Cemagref en 2005 (Chandesris et al., 2005). Cette zonation propose dans un premier temps une première classification en deux niveaux séparant la partie amazonienne (Bouclier Guyanais) et la frange littorale (Plaine littorale du Nord). La plaine littorale se distingue notamment par une géologie et des paysages différents (plains) du massif amazonien et présente une hydrologie soumise à l'influence des marées et aux intrusions halines du fait du faible relief général en Guyane. Chacune de ces deux régions de niveau 1 a ensuite été divisée en 2 sous-régions distinguant la zone de Kaw du reste pour la bande littorale et distinguant les zones à reliefs plus importants du reste pour le bouclier Guyanais (Figure 5).

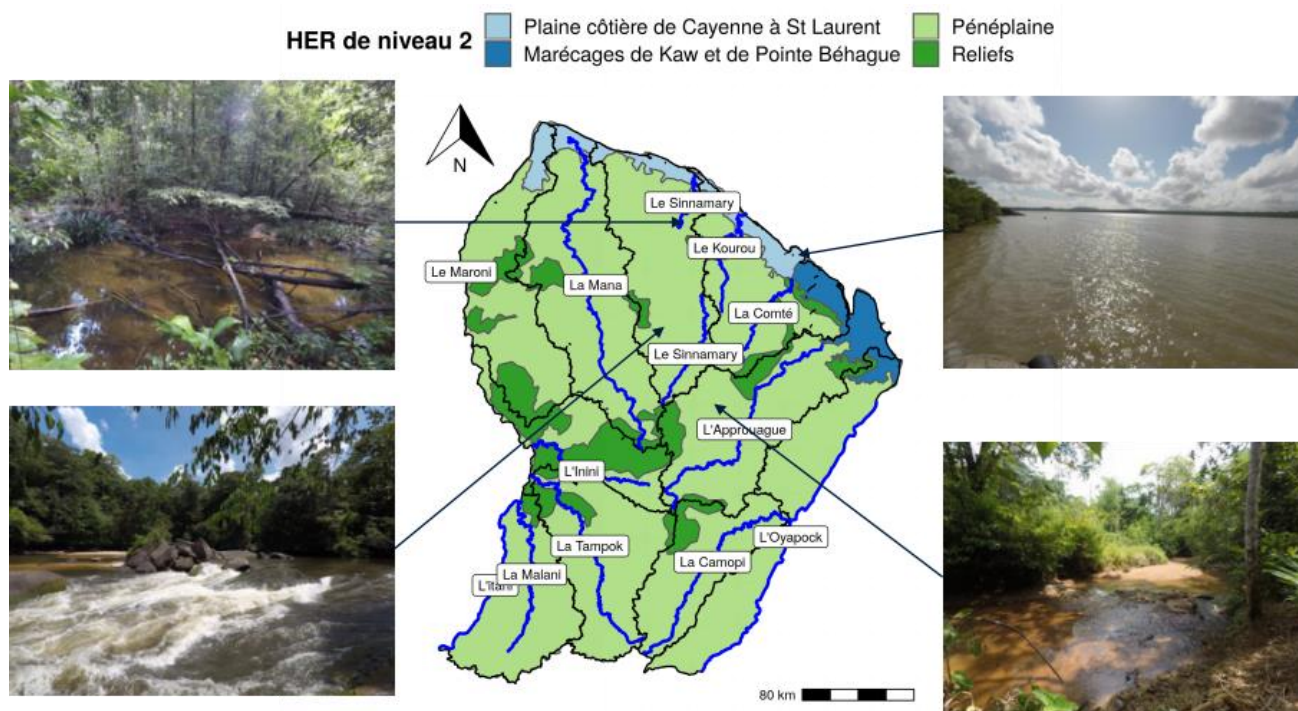


Figure 5 : Représentation des HER de niveau 2. Les HER vertes correspondent au niveau 1 “Bouclier Guyanais” tandis que les HER bleues correspondent à au niveau 1 “Plaine littorale du Nord”. Des photos illustratives de la diversité de situations rencontrées en Guyane sont localisées dans ces différentes régions (photos D. Carayon)

1.5. Présence et impacts humains sur les milieux aquatiques

La Guyane comptait 259 865 habitants en 2015 et ce nombre augmente de manière exponentielle (source INSEE).

Il s’agit néanmoins de la région la moins densément peuplée de France (≈ 3 habitants / km²) puisque la population est répartie de manière très hétérogène sur le territoire (Figure 6).

La bande côtière concentre la majorité de la présence humaine et de son activité (les trois villes principales Saint Laurent, Kourou et Cayenne, les deux routes nationales, etc.).

La forêt primaire, quant à elle, abrite quelques populations, le plus souvent d’origine amérindienne ou bushinengue, sur des communes seulement accessibles par voies fluviales et aériennes (Maripasoula, Papaïchton, etc.).

Les pressions et menaces sur la biodiversité et la qualité des milieux aquatiques sont différentes sur ces deux secteurs.

En effet, le secteur côtier est plus soumis à des pressions liées à l’urbanisation (industries, STEP), source d’émission de matière organique et de nutriments divers (phosphore, azote).

Le secteur amazonien est lui plutôt soumis aux activités d’orpaillage en amont ainsi qu’à l’exploitation forestière et à l’agriculture pour sa partie littorale (Allard, 2014).



Figure 7 : Photographies (à gauche) d'une ancienne zone d'orpaillage en cours de renaturation et (à droite) d'une situation aval d'un ancien site d'orpaillage où le substrat est colmaté par du sédiment fin (photos D. Carayon)

2. Réseaux de surveillance et acquisition des données

2.1. Structure des réseaux de surveillance hydrobiologiques

Notre étude a mobilisé les résultats issus de 4 réseaux de suivi physico-chimiques et hydrobiologiques de 2008 à 2017 sur 189 stations :

- Le **Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS)** : Réseau de stations de mesure ayant pour vocation, dans le cadre du programme de surveillance de l'état des eaux, d'évaluer l'état général et les tendances d'évolution (à long terme) des eaux du bassin hydrographique, que ces évolutions soient naturelles ou dues aux activités humaines. C'est le réseau produisant le plus grand nombre de données et présentant les chroniques les plus longues ;
- Un réseau issu du projet **Petites Masses d'Eau (PME)** : Réseau de prélèvement physico-chimique et biologique mis en place de 2010 à 2012 dans le cadre de 2 thèses encadrées par Hydreco, visant à l'élaboration de deux indices de bioindication, l'un basé sur les invertébrés aquatiques (Dedieu, 2014), l'autre sur les poissons (Allard, 2014), applicables sur les petites masses d'eau continentales ;
- Un **Réseau Complémentaire (RC)** : Ce réseau qui vise à mettre en évidence différentes altérations anthropiques ciblées sur des sites en principe impactés a pour l'instant couvert la réalisation d'une seule campagne annuelle (2015).
- Un **Réseau de Contrôle Opérationnel (RCO)** : Réseau de stations de mesure permettant, dans le cadre de la surveillance de l'état des eaux, d'identifier des masses d'eau risquant de ne pas atteindre leurs objectifs environnementaux et d'évaluer l'efficacité des programmes de mesures qui y sont appliqués. Ce réseau ciblant des sites potentiellement impactés est suivi au rythme d'une campagne annuelle.

Les implantations des sites des différents réseaux de Guyane sont présentées en **Erreur ! source du renvoi introuvable.**

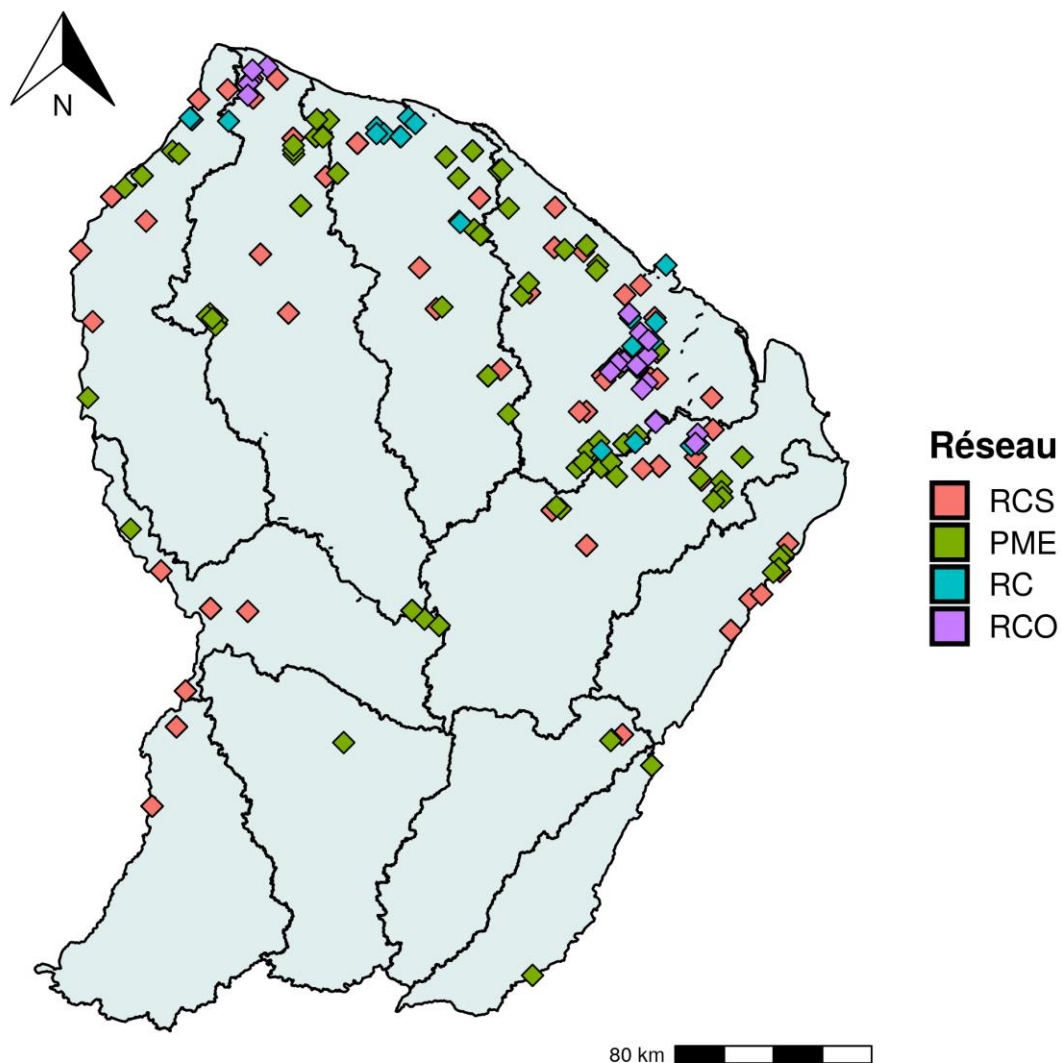


Figure 8 : Localisation des 189 stations de suivis identifiées lors de cette étude et distinction de leur réseau d'appartenance. Les délimitations noires correspondent aux différents bassins versants.

Les stations du réseau RCS sont réparties uniformément sur le territoire afin d'évaluer l'état écologique général des masses d'eau de Guyane (cf. mise en application de la DCE).

En toute logique, les sites des deux réseaux complémentaires (RC et RCO) se situent donc plutôt sur le littoral, autour des principales activités humaines, tandis que les stations du réseau PME sont en majorité situés sur les têtes de bassin versant, dans le bouclier amazonien.

2.2. Les suivis physico-chimiques

Les données physico-chimiques issues des réseaux de surveillance en Guyane présentent la particularité d'être mesurées deux fois au cours d'une même campagne.

Un premier prélèvement est réalisé dans le cadre du réseau "DCE chimie" et est souvent temporellement proche des prélèvements biologiques, ceci afin d'optimiser la logistique de terrain lorsqu'il est réalisé par Hydreco. Il peut cependant être réalisé par d'autres prestataires (ex: BRGM).

Une seconde source de données physico-chimiques est le prélèvement "chimie support à la DCE biologie" qui correspond aux mesures *in situ* réalisées parallèlement aux prélèvements diatomiques d'Hydreco.

Les mesures et analyses de laboratoires ont été réalisées par Hydreco en Guyane et par le laboratoire CARSO en métropole en respectant les prescriptions des normes AFNOR en vigueur (résumées en **Annexe 1**).

Les normes concernant le prélèvement de terrain sont adaptées aux contraintes logistiques guyanaises (locomotion en pirogue, franchissement de seuils, contraintes de marnage, etc...) (Figure 9).

La réalisation d'analyses physico-chimiques par le laboratoire CARSO implique toute une logistique autour du maintien de la chaîne de froid lors des envois en métropole.



Figure 9 : Photographies du principal moyen de locomotion pour les prélèvements en Guyane, une pirogue (gauche) et exemple de sauts à franchir lors des prélèvements (droite) (Crédits photos D. Carayon)

27 paramètres physico-chimiques issus de ces réseaux ont été retenus pour les analyses de données (Table 1).

Table 1 : Liste des paramètres physico-chimiques considérés dans cette étude

Code	Unité	Nom complet du paramètre	Famille
PH	u.ph	Potentiel Hydrogène	In situ
T	°C	Température	In situ
COND.	µS/cm	Conductivité	In situ
TURB	NTU	Turbidité	In situ
O2_SAT	%	Saturation en oxygène	In situ
O2	mg/L	Oxygène dissous	In situ
MES	mg/L	Matières En Suspension	In situ
SIO2	mg SiO2/L	Silice	Minéralisation
HCO3	mg/L	Bicarbonates	Minéralisation
NA+	mg/L	Sodium	Minéralisation
K	mg /L	Potassium	Minéralisation
CA	mg/L	Calcium	Minéralisation
MG	mg/L	Magnésium	Minéralisation
TH	°f	Titre Hydrotimétrique	Minéralisation
CL	mg/L	Chlorures	Minéralisation
SO4	mg/L	Sulfates	Minéralisation
TAC	°f	Titre Alcalimétrique	Minéralisation
NK	mg N/L	Azote Kjeldahl	Saprobie
COT	mg/L	Carbone Organique Total	Saprobie
DCO	mg O2/L	Demande Chimique en Oxygène	Saprobie
NH4	mg/L	Ammonium	Saprobie
NO2	mg/L	Nitrites	Saprobie
DBO5	mg O2/L	Demande Biologique en Oxygène pour 5 jours	Saprobie
COD	mg/L	Carbone Organique Dissous	Saprobie
NO3	mg/L	Nitrates	Trophie
PO4	mg/L	Orthophosphates	Trophie
PTOT	mg/L	Phosphore Total	Trophie

2.3. Les suivis biologiques

Les données d'inventaires diatomiques utilisés dans cette étude sont issues des 4 réseaux de suivi cités précédemment et ont été acquises en majorité par Hydreco.

Les prélèvements de terrain ont été réalisés conformément à la norme NF T 90-354 d'avril 2016 relative à la mise en œuvre de l'IBD, avec des adaptations particulières au contexte guyanais. La surface de substrat à prélever a notamment été augmentée pour compenser l'abondance globalement faible et relativement variable des diatomées en Guyane.

Du fait de la rareté des substrats durs naturels en Guyane, une méthodologie spécifique de récolte du biofilm sur substrat artificiel a été développée, dans laquelle des supports sont immergés pendant 6 semaines minimum, à une profondeur variant de 30 à 40 cm de la surface à 1,50 m dans le cas de marnage (ce qui correspond à la zone photique) (Figure 10).

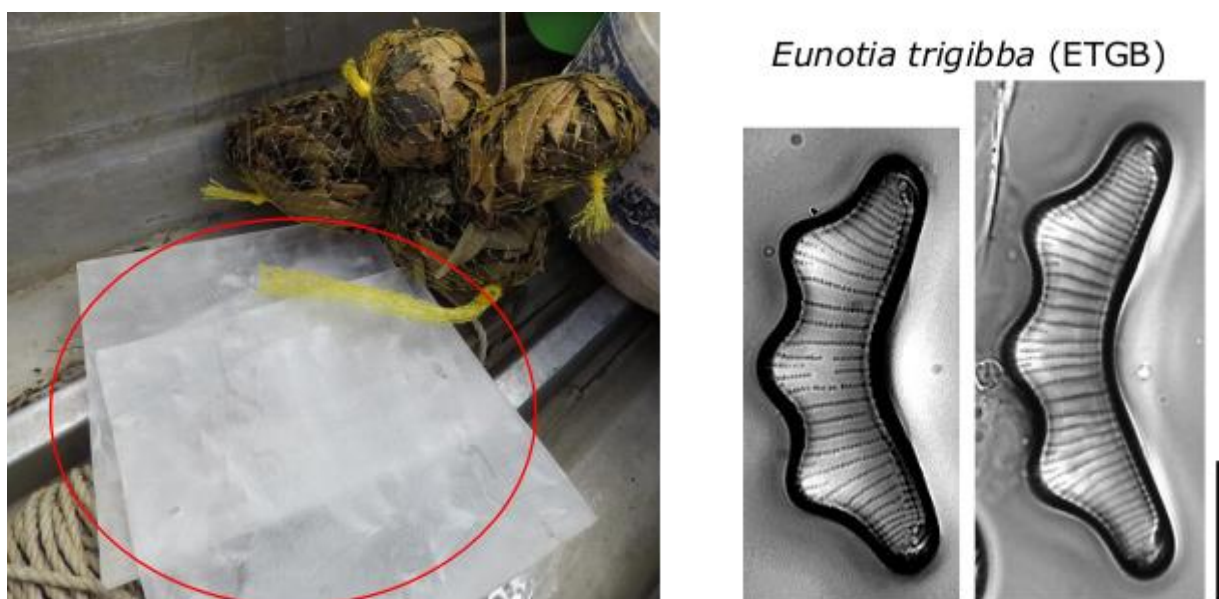


Figure 10 : Partie gauche : Photographie d'un support artificiel immergé pour la récolte de diatomées (cerclé en rouge) et d'un support artificiel utilisé pour la collecte de macro-invertébrés aquatiques. Partie droite : Photographie d'une diatomée d'un genre typique de Guyane, *Eunotia trigibba* (photo A. Eulin-Garrigue)

Une fois en laboratoire, les lames sont préparées et montées conformément à la norme NF T 90-354.

Jusqu'à présent, l'effort de comptage appliqué en Guyane était de 400 valves par échantillon diatomique, comme pour l'IBD. Cependant la norme NF T 90-354 révisée d'avril 2016, sous-jacente à la mise en application des Arrêtés Surveillance et Evaluation en vigueur, établit désormais la pression de comptage à **500 valves par échantillon** pour le calcul normatif valide des indices diatomiques à appliquer dans le cadre des réseaux institutionnels de tous les départements d'Outre-mer.

L'identification fait appel aux ouvrages des séries "Süßwasserflora von Mitteleuropa", "Diatoms of Europe", "Iconographia Diatomologica", "Bibliotheca Diatomologica", ainsi qu'à d'autres ouvrages et articles plus spécifiques, en particulier sur les flores tropicales et sub-tropicales d'Amérique du Sud publiés respectivement par Metzeltin & Lange Bertalot (1998), Rumrich & al (2000), Metzeltin & al. 2003 et Metzeltin & Lange Bertalot (2007) ou encore Costa & al (2017) (cf. **Annexe 2** pour une liste plus détaillée).

La flore diatomique de Guyane est particulièrement diversifiée (plus de 1600 taxons dénombrés), avec un fort endémisme, et est encore aujourd'hui fortement méconnue. De ce fait, l'identification des diatomées depuis 2008 a été réalisée par A. Eulin-Garrigue qui a effectué la très grande majorité des identifications et créé des planches photographiques indexées à chaque taxon. Ce premier travail primordial doit absolument être complété par la suite d'un véritable guide taxonomique, document indispensable pour faciliter la mise en œuvre future de la nouvelle méthode indicielle.

2.4. Compilation et constitution de la base de données

2.4.1. Données physico-chimiques

La première base de données abiotiques, précompilée par Hydreco à partir de différentes sources (Office de l'Eau Guyane, données internes Hydreco), a été reçue le **05 juillet 2018** par Irstea. A partir de cet envoi, un travail conséquent et chronophage a été entrepris pour transformer et harmoniser les différents formats afin de traduire l'ensemble en une base de données homogène pouvant servir de support de travail. Ce travail a pu être mené à son terme début **octobre 2018**, suite au déplacement en Guyane de David Carayon (Irstea) pour rencontre avec les partenaires locaux et participation à des missions de terrain.

Les opérations apportées à la base de données abiotiques, après confrontation avec les bases de données internes à Hydreco et consultation des experts et préleveurs, sont notamment :

- Traitement des stations aberrantes (ex : données typiques de situation marine renseignées pour la station Apsik Icholi, station pristine du bouclier amazonien, dans la base de données de l'Office de l'Eau) ;
- Traitement des différences entre données interne Hydreco et données bancarisées par l'office de l'eau, au cas par cas ;
- Harmonisation des sous-réseaux "DCE chimie" et "chimie support biologie" du RCS pour que la totalité des informations soit prise en compte ;
- Harmonisation inter-réseaux pour que les résultats soient comparables ; Traitement des unités divergentes sur un même paramètre ;
- Harmonisation des paramètres (ex : Si, SiO₂ et SiO₃ harmonisés en SiO₂, la forme plus communément exprimée pour la silice, via les poids moléculaires) ;
- Traitement des valeurs représentant des seuils de quantification (ou LQ). Les valeurs correspondant à une LQ ont été divisées par 2 avant intégration à la base de données, conformément à la pratique habituelle.

2.4.2. Données biologiques

Les données biologiques produites par Hydreco ont été reçues le **26 novembre 2018** par Irstea. Tout comme pour les données physico-chimiques, un travail de compilation et d'harmonisation a été entrepris dès réception de la base pour aboutir rapidement à une base de travail homogène.

La flore diatomique de Guyane étant très diversifiée et surtout méconnue, de nombreux taxons trouvés depuis 2008 sont encore aujourd'hui mal identifiés voire inconnus de la science. Dans une optique de bioindication, cependant, cette connaissance incomplète peut être maîtrisée de manière satisfaisante par la mise en place de tables de transcodage. Ces tables répertorient l'historique de dénomination de chaque valve depuis sa première identification, qui peut être numérotée (ex : NPA4) jusqu'à son identification complète dans les années suivantes (NPAL par exemple) voire son changement radical de groupe taxonomique.

Une table de transcodage a donc été développée en collaboration active avec Anne Eulin-Garrigue, Docteur en Diatomologie à Hydreco, pour cette première version de l'indice et également en prévision des futures versions de l'indice pour lesquelles les connaissances dans la systématique auront forcément évolué.

Au-delà de ces aspects taxonomiques, seules certaines étapes de standardisation du nombre de valves dénombrées et de traitement des prélèvements réalisés en doublons sur 2 substrats différents (ex : racine et substrat dur) ont été nécessaires pour aboutir à une base de données homogène.

2.4.3. Métadonnées stationnelles et compilation en base de données

Enfin, les métadonnées liées aux stations de prélèvement (biotiques et abiotiques) ont été compilées en une table unique, nécessitant un travail de recherche conséquent en confrontant différentes bases (Hydreco, Office de l'Eau, DEAL) pour renseigner un maximum de champs. L'harmonisation des coordonnées cohérentes (terrain vs théoriques) dans le bon système de géoréférencement (UTM22) a également été nécessaire pour produire une métadonnée supplémentaire affiliant chaque station à son HER d'appartenance.

De plus, ce travail s'inscrivant dans une démarche DCE, il était nécessaire de disposer de stations dites "de référence", sur lesquelles les métriques biologiques vont être calibrées pour définir les "écarts à la référence" traduits par les Ratios de Qualité Ecologiques (ou EQR). Une telle classification n'ayant pas, à ce jour, été bancarisée de manière "officielle" par les autorités environnementales guyanaises, une sélection de sites de référence au sens DCE a été réalisée sur la base des références identifiées lors de précédentes études et après consultation des experts locaux tels que R. Vigouroux, directeur d'Hydreco.

Les références ainsi définies ont cependant été nuancées en deux catégories :

- Certaines stations sont considérées comme "**références pérennes**", c'est à dire qu'elles sont actuellement exemptes de tout impact anthropique et sont susceptibles de rester ainsi à un pas de temps très lointain (>15 ans).

- Les autres stations, qualifiées de “**références temporaires**”, ont été sélectionnées parce qu’elles présentent des conditions proches de situations de référence et permettent une bonne couverture spatiale du territoire guyanais. Ces stations n’ont pas été considérées comme des références pérennes car des sources de pressions anthropiques potentielles sont connues et, si leur état diatomique passé et actuel peut être considéré comme non-altéré dans le cadre de l’étude, ce statut est évolutif. En effet, il est possible que certains signaux d’altérations soient émis par ces stations dans l’avenir.

La phase de compilation des données s’est concrétisée par la construction d’une base de données relationnelle (consultable en SQL ou via R) qui constitue la base de travail pour cette étude (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Figure 11 : Schéma de structure de la base de données relationnelle compilée dans le cadre de cette étude

La liste complète des stations étudiées décrivant plusieurs caractéristiques telles que l’affiliation HER, les coordonnées retenues et le statut de référence figure en **Annexe 3**.

3. Démarche biomathématique globale

La stratégie biomathématique générale est très similaire à celles qui ont pu être développées pour les indices diatomiques d’autres DOM-COM tels que les Antilles (IDA), la Réunion (IDR) ou la Nouvelle-Calédonie (IDNC) (Figure 12).

En partant dans un premier temps d’une **matrice de données abiotiques**, correspondant aux mesures physico-chimiques issues des réseaux de suivi des hydrosystèmes, différentes analyses exploratoires ont d’abord été réalisées afin d’étudier la qualité et la quantité de données à disposition.

Puis différentes analyses plus exploratoires telles qu'une matrice des corrélations et une ACP ont été menées afin d'obtenir une sélection restreinte de paramètres pertinents et de visualiser les principaux gradients structurant les conditions abiotiques de Guyane.

Dans un second temps, la **matrice de données biologiques**, correspondant aux inventaires diatomiques issus des réseaux de suivi, a également été décrite puis analysée dans l'optique de dégager 2 types de connaissances utiles au dispositif d'évaluation :

- Du fait du nombre très important de taxons (plus de 1 600) actuellement inventoriés en Guyane, **sélection d'une liste plus restreinte de taxons** sur lesquels un niveau minimum d'information écologique a été acquis, leur permettant de participer effectivement à l'élaboration et au calcul de l'indice (notion de taxons indiciaires de l'IDGF) ;
- **Etude de la structuration spatiale de ces taxons**, afin d'identifier des grandes zones aux cortèges diatomiques homogènes, en vue de repérer la trame biogéographique la plus adéquate pour l'application de grilles d'évaluation diatomique.

Enfin, ces deux matrices ont été couplées afin d'identifier les conditions abiotiques correspondant à chaque inventaire diatomique. Cette matrice couplée a servi de base pour la recherche de **taxons d'alerte** via la procédure TITAN pour aboutir, *in fine*, à l'élaboration de l'**Indice Diatomique pour la Guyane Française (IDGF)**.

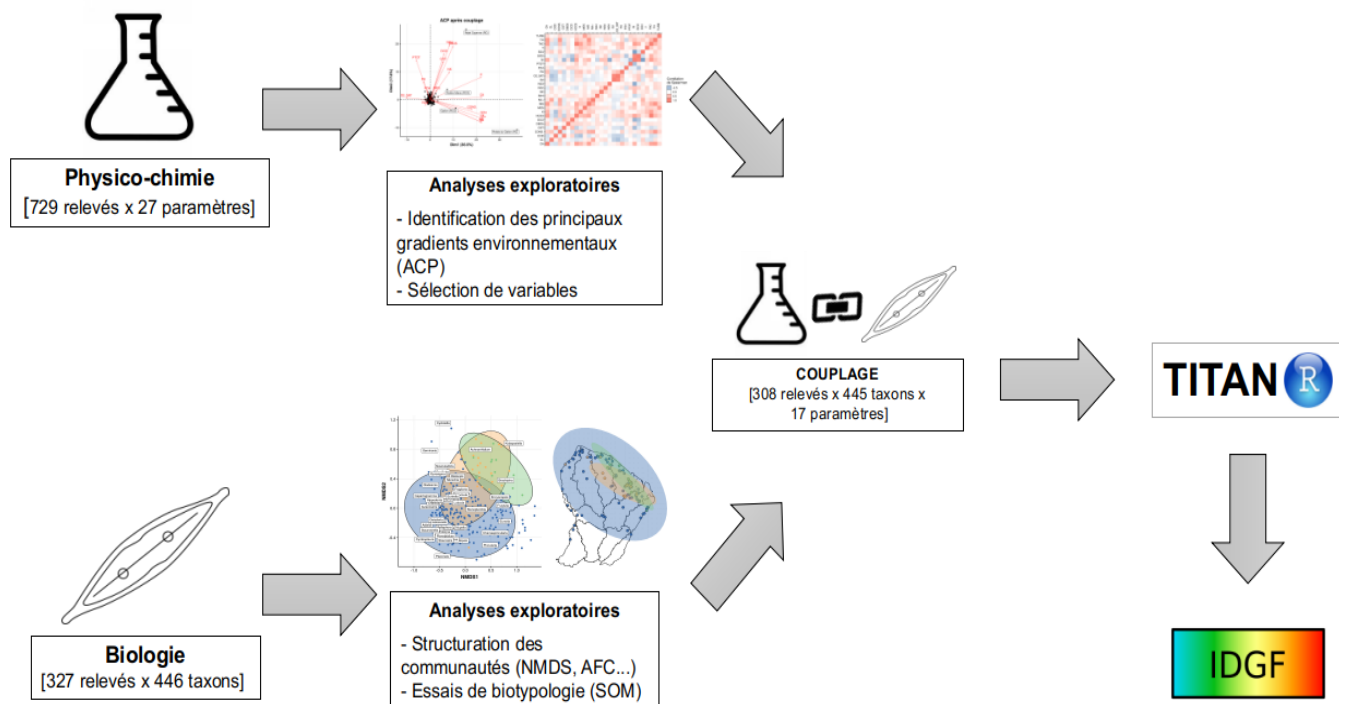


Figure 12 : Stratégie biomathématique globale développée au cours de cette étude

4. Description des données par des analyses exploratoires

4.1. Analyses exploratoires des données physico-chimiques

La distribution des valeurs brutes mesurées dans les réseaux de suivi physico-chimiques (Figure 13) met en lumière différentes problématiques liées au contexte guyanais. En effet, les pollutions anthropiques “trophiques” sont peu apparentes, d’une part du fait du contexte peu anthropisé, mais probablement aussi du fait des difficultés logistiques liée aux conditions des missions (pirogue) altérant la qualité de la chaîne de froid avant l’analyse en laboratoire.

De ce fait, même si le classement relatif des sites entre eux est probablement respecté en multi-dates sur l’assise complète du jeu de données disponible, il est fort probable que les référentiels collectés donnent, pour certains paramètres, des valeurs plus basses que la réalité intégrée *in situ*, ou que la gamme des possibles dans la rivière au long de l’épisode temporel concerné par l’épisode de développement des biofilms diatomiques (de l’ordre d’au moins 2 mois sous ces conditions).

Les problèmes concrets rencontrés ou suspectés à l’examen des référentiels abiotiques sont les suivants :

- Pour de nombreux **paramètres liés à l’anthropisation** (NH_4^+ , PO_4^{3-} , DBO5...), en raison du faible degré effectif de pression anthropique (territoire peu peuplé à couverture naturelle très dominante) et du caractère très dilutif des bassins versants vis-à-vis des altérations localisées rencontrées, ainsi que des limites de représentativité temporelle liées au prélèvement d’un seul échantillon ponctuel instantané d’eau, la quasi-majorité des sites apparaissent donc quasiment exempts de toute pression à la date de l’échantillonnage.
- En conditions tropicales, et malgré tout le soin pris pour assurer la chaîne de froid sur des missions de durée variable, opérées dans des conditions logistiques elles aussi très variables (par véhicule terrestre à proximité d’un laboratoire, exceptionnellement par hélicoptère, *versus* mission éloignée de plusieurs jours en pirogue), **certaines paramètres associés à des altérations anthropiques** peuvent de plus, subir une **évolution variable** à l’intérieur des flaconnages avant l’analyse (baisse variable de la DBO5, évolution interne de la balance des formes de l’azote, avec perte de formes réduites – dont NH_4^+ – par volatilisation et/ou gain de formes azotées oxydées, etc...).
- Il en est de même pour le **degré de minéralisation hydrochimique** (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , hydroxycarbonates, SO_4^{2-}) susceptible d’être lié à une **influence haline littorale** difficile à capter par une seule physico-chimie instantanée de l’eau en un site donné, du fait de la conjonction du débit et des intensités de marée. Ainsi, un site donné sous influence haline temporaire peut être sous conditions d’eau douce la plupart du temps et n’avoir été détecté halin par la chimie de l’eau qu’à des occasions particulières (conjonction de débits très faibles du cours d’eau et d’horaires correspondant à l’entrée haline maximale), alors qu’il peut être soumis périodiquement à cette influence.

Par conséquent, pour les 2 types de variables précitées, seuls quelques rares sites échantillonnés dans des conditions particulières et caractéristiques forment les parties hautes des gradients et semblent le plus souvent extrêmes par rapport aux autres sites (voir Figure 13).

A cette **faiblesse de représentativité temporelle de l'échantillonnage** qui contribue à faire ressortir comme faux-outliers des valeurs de pointe apparaissant un peu exceptionnelles, mais susceptibles d'être rencontrées périodiquement au même site, au hasard de l'hydrogramme et de pressions à rythmicité irrégulière, peut se rajouter un **flou sur le résultat analytique** lié au recours fait, par le jeu des attributions de Marchés Publics, à différents laboratoires basés parfois en Guyane, parfois en métropole, qui utilisent différentes méthodes analytiques.

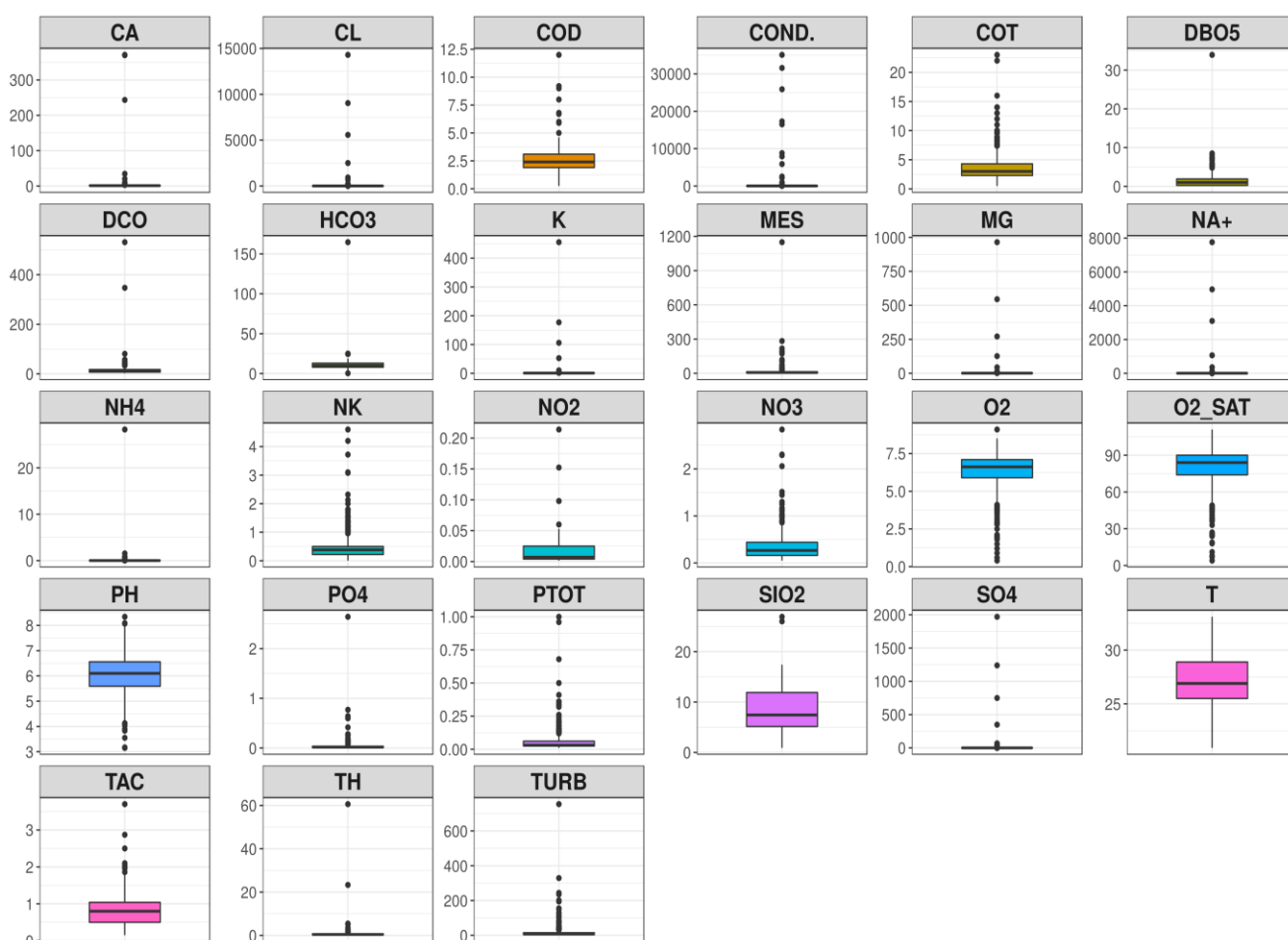


Figure 13 : Distributions boxplot des gradients environnementaux observés dans les réseaux de suivi physico-chimiques en Guyane

C'est tout particulièrement le cas vis-à-vis des référentiels de DBO5 obtenus, parfois sur place, parfois après voyage en avion, parfois sans congélation, parfois après congélation, pratique couplée ou non à une pratique d'ensemencement pour la réactivation de l'activité biologique.

Comme l'illustre le box-plot de distribution dans la Figure 13, les valeurs du référentiel de DBO₅ obtenues dans un tel DOM tropical sont en général assez fortement atténuées, cette atténuation pouvant de plus être très variable selon la localisation du site (*cf.* durée et conditions de la mission sur le terrain) et la destinée ultérieure de l'échantillon : 1) en matière de laboratoire auquel a été attribué un Marché Public donné ; 2) en matière de durée de conservation et de circuit d'acheminement ; 3) en fonction des particularités du protocole pré-analytique et de la méthode analytique mis en application par le laboratoire attributaire sur l'échantillon concerné.

De fait, même si le gradient des situations inter-sites est probablement grosso-modo respecté, le référentiel DBO₅ mesuré sur tout le jeu de données d'étude ne dépasse réellement les seuils de quantification de la méthode que sur un faible nombre de sites et de relevés. Dans un tel cas, il ne faut donc pas accorder plus de confiance que nécessaire aux valeurs numériques trouvées, très certainement inférieures à la réalité de terrain et de plus floutées par les différentes variabilités pré-évoquées, mais au gradient **relatif** des valeurs trouvées (élément en faveur du choix d'une stratégie indicielle basée sur des taxons d'alerte).

Selon le paramètre considéré, d'autres référentiels de physico-chimie et d'hydrochimie sont aussi entachés de façon variable par ces **problèmes de représentativité temporelle défectueuse** en liaison avec un échantillonnages d'eau ponctuel unique (pollution selon un régime irrégulier, possibilités d'évolution ultérieure interne de l'échantillon, aspect des influences halines très périodiques...) ; voire de **flou sur les résultats analytiques** liés au choix de laboratoires différents, vis-à-vis desquels s'imposent des conditions logistiques d'acheminement et de conservation différentes, et qui peuvent utiliser différentes méthodes analytiques, dotées d'incertitudes et de seuils de quantification différents...

Bien que non-souhaitables à l'idéal, en particulier dans le cadre de référentiels utilisés pour générer un outil biologique calé sur des descripteurs abiotiques, ces variabilités étaient présentes dans le jeu de données d'étude et il a fallu composer au mieux pour qu'elles impactent le moins possible la nouvelle méthode indicielle produite. Ainsi, certains choix méthodologiques sous-jacents à l'élaboration de l'IDGF (notamment l'utilisation de taxons d'alerte, sans hiérarchisation de signal d'altération au stade actuel) ont été clairement orientés de façon à maîtriser cette faiblesse de représentativité des données abiotiques au bénéfice de la robustesse de l'indicateur produit.

Une autre difficulté rencontrée vis-à-vis du jeu de données abiotiques mobilisé dans le cadre de cette étude est que celui-ci présente un taux de complétion d'environ 67% seulement. De fait, la matrice de données résultante [728 relevés x 27 paramètres] dénombrerait un peu plus de 33 % de valeurs manquantes (représentées en noir dans la Figure 14).

Cette figure permet d'observer que les mesures *in situ* (pH, température, conductivité, turbidité, teneur et saturation en oxygène) sont naturellement mieux renseignées (< 5% de valeurs manquantes) que les données de nutriments et d'autres éléments majeurs (P_{total}, DBO₅, COT), pour lesquels près de 20% des valeurs sont manquantes. Les paramètres tels que les ions majeurs (Ca²⁺, K⁺, Cl⁻) sont suivis de manière encore plus occasionnelles (entre 40 et 60% de valeurs manquantes) et d'autres paramètres liés à la dureté de l'eau (TAC, TH), ou d'autres composés à impact chimique moins important (Carbone, Silice) n'ont été suivis que de façon anecdotique (> 75% de valeurs manquantes).

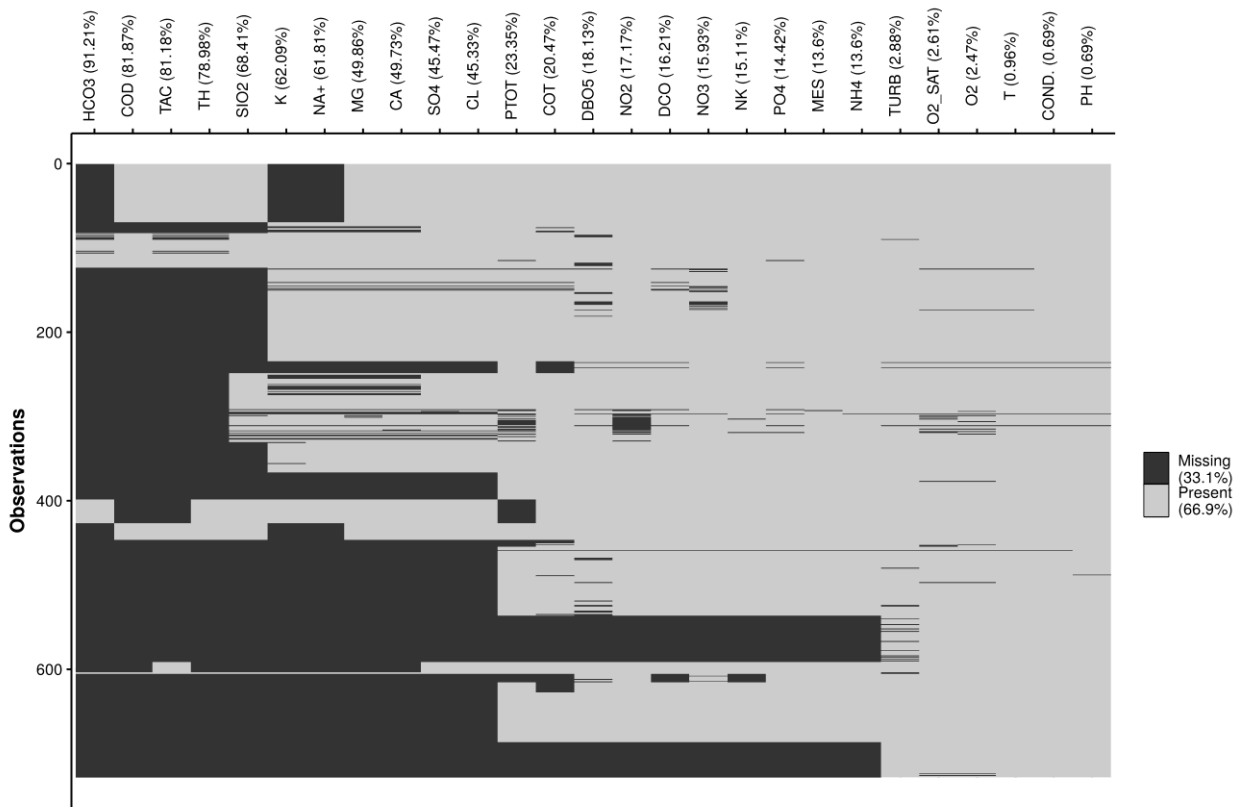


Figure 14 : Visualisation des données manquantes sur la matrice abiotique.

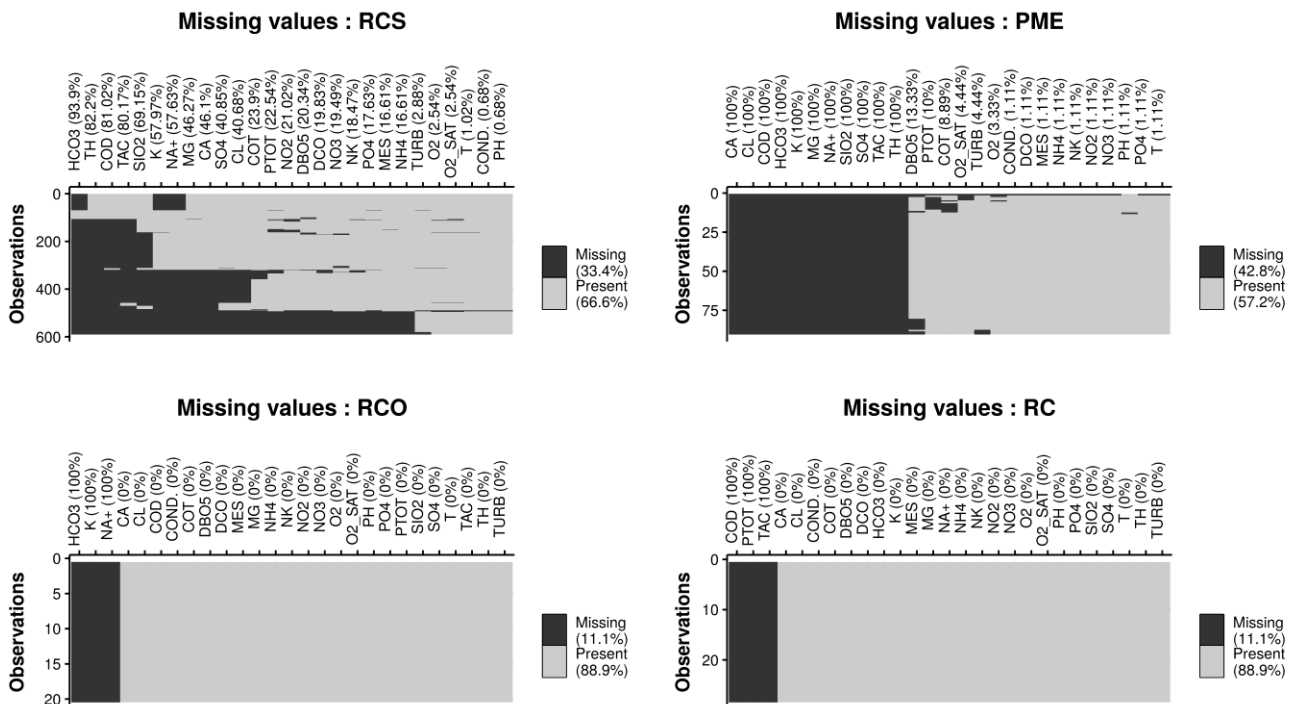


Figure 15 : Visualisation des données manquantes sur la matrice abiotique déclinée par réseau de suivi

L'hétérogénéité de suivi des différents paramètres physico-chimiques telle qu'elle apparaît en Figure 14 peut s'expliquer par la diversité des réseaux de suivi qui ont participé à cette base de données. Le même type d'analyse réalisé de façon différenciée par type de réseau (Figure 15) souligne ces disparités.

Les réseaux dédiés à la caractérisation détaillée de sites subissant différents types d'altérations anthropiques (RC et RCO) présentent un éventail beaucoup plus complet de substances mesurées ($\approx 10\%$ de valeurs manquantes) que le réseau PME, qui avait des objectifs différents puisque s'inscrivant dans le cadre de thèses ($\approx 40\%$ de valeurs manquantes). Le réseau RCS est le plus hétérogène ($\approx 33\%$ de valeurs manquantes) car impliquant une plus grande diversité d'opérateurs, des marchés différents, ainsi qu'une chronique plus longue (9 ans contre 1 à 2 ans pour les autres réseaux).

La Figure 16 récapitule l'analyse d'autocorrélation entre les différents paramètres constituant le référentiel abiotique.

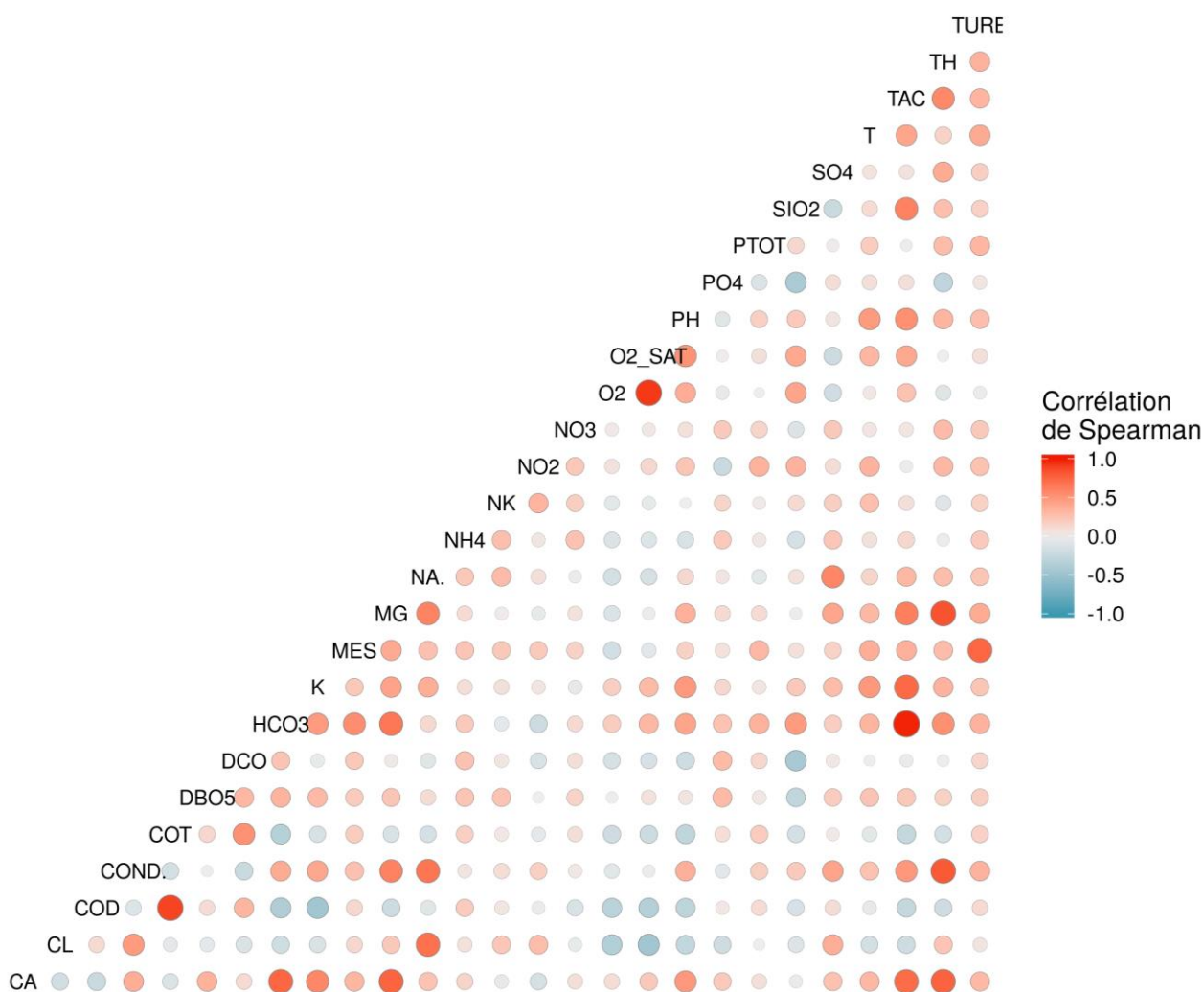


Figure 16 : Matrice des corrélations de Spearman permettant d'identifier les variables fortement corrélées entre elles et/ou redondantes

A partir des enseignements tirés des analyses préalables présentées (Figures 14 à 16), une liste restreinte de paramètres d'intérêt a été établie, à conserver pour la suite de l'étude.

Les analyses réalisées dans la suite de la démarche sont en effet particulièrement sensibles aux forts taux de valeurs manquantes, ainsi qu'aux variables redondantes (*i.e.* trop fortement autocorrélées).

Un seuil de 65% de valeurs manquantes a systématiquement été appliqué comme premier filtre de sélection, tous les paramètres se situant au-delà de ce seuil étant retirés.

Par rapport au choix entre les variables trop fortement autocorrélées : 1) vis-à-vis de la relation entre MES et turbidité, seules **les MES** ont été retenues ; et 2) la **saturation de l'eau en oxygène** (paramètre corrigé vis-à-vis de la pression atmosphérique et de la température de l'eau, donc à la fois re-normé et plus pertinent sur le plan biologique) a été préférée par rapport à la concentration en oxygène dissous/l d'eau.

Enfin, certains paramètres (température, NO₂) ont également été retirés après expertise car étant peu susceptibles d'apporter des informations significatives dans le contexte local.

À partir de cette nouvelle matrice restreinte de paramètres physico-chimiques, une Analyse en Composante Principale (ACP) a été menée afin d'identifier les principaux gradients structurant le contexte abiotique guyanais.

Cependant, comme indiqué auparavant, une telle analyse n'est possible qu'après imputation (ou modélisation) statistique des données manquantes, sous peine de perdre le doublet complet de données en cas de manque d'un seul paramètre abiotique, et la quasi-totalité du jeu de données au final.

Cette imputation a été réalisée par un algorithme d'ACP itérative fournie par le package R "missMDA" développé par AgroCampus Ouest ([Josse & Husson, 2012](#)).

Cet algorithme va d'abord remplacer les valeurs manquantes par la moyenne du paramètre, puis en réaliser une première ACP. Ensuite, sur la base des corrélations entre les différents paramètres, les valeurs remplacées vont être ajustées de manière itérative afin d'obtenir les relations les plus satisfaisantes.

Une fois cette imputation réalisée, l'ACP a pu être tracée (Figure 17).

Le premier plan factoriel (F1XF2) de l'ACP résume à lui seul plus de 50% de l'inertie du jeu de données (54,2%), ce qui est élevé pour ce type d'analyse et limite de fait l'intérêt d'exploiter les axes suivants. En effet, chaque nouvel axe dégagé devient porteur de trop peu d'inertie globale pour pouvoir en tirer parti sur le plan des composantes vectorielles des paramètres individuels.

Le premier axe de ce plan factoriel, fortement structurant (41.6%), correspond à un gradient de salinité/minéralisation représenté par les ions majeurs, ainsi que par la conductivité des eaux.

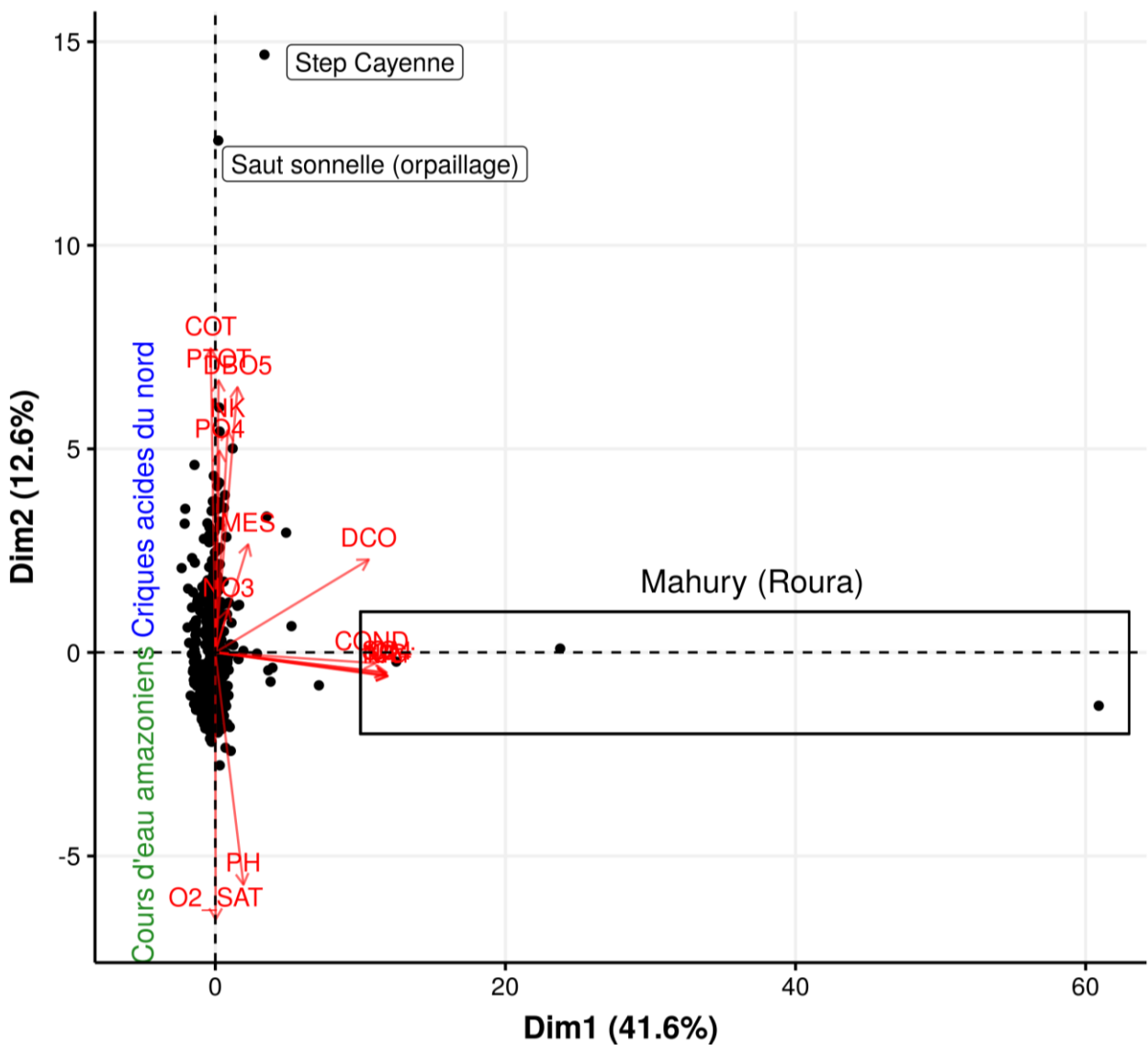


Figure 17 : ACP réalisée après imputation sur une sélection restreinte de paramètres

Le message est principalement porté par des relevés réalisés en aval du Mahury, au niveau de Roura, une zone particulièrement proche de l'océan puisque faisant partie de la partie basse de la zone mésohaline de la Masse D'eau de Transition (MET) du Mahury (Habert, 2012) et donc sujette à de nombreux intrants salés.

Le second axe, bien que moins structurant dans l'analyse générale des gradients abiotiques (12.6%), porte néanmoins une information de premier intérêt sur le plan de la bio-indication diatomique dans le domaine des eaux douces, puisqu'elle oppose d'un côté les criques acides du nord, qualifiées par des plus fortes concentrations en différents composés liés à l'anthropisation (phosphore, azote, matière organique), et de l'autre les cours d'eau amazoniens, plus exempts d'altération avec des eaux plus oxygénées et moins acides.

L'information "anthropique" est principalement portée par la STEP de Cayenne ainsi que par un site pourtant situé assez haut dans le bouclier amazonien (Saut Sonnelle) mais soumis à de nombreuses activités humaines, dont l'orpaillage illégal.

Cette configuration factorielle rappelle les résultats issus du programme QUES (Coste et al., 2010) mais avec, cependant, un second axe lié à l'activité anthropique plus cohérent et porté en grande partie par les relevés des réseaux complémentaires (RC et RCO). Cette observation, près de 9 ans plus tard, souligne l'importance de ces réseaux de suivi dédiés à la mise en évidence d'altérations en vue de l'élaboration d'un nouvel indice biologique et l'information cruciale qu'ils apportent dans cet objectif par rapport au RCS, qui a plutôt pour vocation de représenter l'état général des masses d'eau.

4.2. Analyses exploratoires des données biologiques

4.2.1. Aspects taxonomiques

Il est très probable que la forêt amazonienne constitue encore un réservoir d'une énorme quantité de taxons de diatomées inconnues dans le reste du monde, tant au niveau générique que spécifique, comme cela a déjà été mis en évidence, notamment, par les travaux sur le bassin de l'Amazonie brésilienne (Wetzel, 2011 a, b).

Sur les **1 648** taxons diatomiques (répartis en 68 genres) référencés à ce stade dans notre base de données de 327 inventaires, 1 361 d'entre eux (soit plus de 80%) portent un numéro provisoire, signifiant que l'identification n'a pas pu être menée jusqu'à trouver la bonne correspondance dans la littérature taxonomique mondiale, mais permet de conserver l'information au niveau spécifique. Pour exemple, NPA3 et NPA4 appartenant au complexe *Nitzschia palea* sont des entités taxonomiques différentes et **bien identifiées en tant que telles**, nécessité essentielle pour le développement et la pratique de la bio-indication.

Le nombre très élevé de taxons provisoirement sous numéro à la fin de cette étude est rapidement évolutif, donc reste indicatif. En effet, le travail de repérage taxonomique se poursuit en continu et certains taxons ayant participé à cette statistique ont depuis pu être identifiés ou sont en cours d'identification (cf. suivi régulier des publications récentes).

Pour exemple, il a été repéré depuis peu que le taxon répertorié sous "Inconnu sp1 " ou "IN01" est en fait *Lacuneolimna novagallia*, nouveau genre et nouvelle espèce décrite par (Tudesque et al, 2015). Cependant, en l'absence actuelle de code métier standardisé et à des fins de traçabilité dans le cadre du développement de l'indice, nous avons pour l'instant conservé sa numérotation initiale dans tous les inventaires.

De même, l'ouvrage de Costa et al (2017) recense 96 espèces d'*Eunotia* du Brésil dont 17 nouvelles espèces et 11 espèces numérotées, dont un grand nombre correspond à des taxons aussi inventoriés en Guyane Française. Dans la démarche de mise au point de l'IDGF sous délai temporel très contraint, il a bien fallu stabiliser, à une date donnée, la base de données d'inventaires diatomiques utilisée. Ces *Eunotia* sont donc restées aussi sous numéro, pour les mêmes raisons que *Lacuneolimna novagallia*.

Sur la base du nombre d'espèces trouvées par genre dans le jeu de données complet d'étude, les inventaires de Guyane Française sont majoritairement dominés par le groupe des Brachyraphidées, représenté en majeure partie par le genre *Eunotia* avec 542 taxons. Le genre *Gomphonema* (famille des Gomphonematacées) est le deuxième genre le plus représenté, avec 106 taxons (Table 2 et Figure 18).

Table 2 : Nombre de taxons dénombrés dans les 10 genres les plus représentés. Le genre "indéterminé" correspond aux taxons pour lesquels la diagnose n'a pas encore pu être poussée jusqu'au genre.

Genre	Nombre de taxons
Eunotia	542
Gomphonema	106
<i>indéterminé</i>	101
Nitzschia	92
Navicula	70
Pinnularia	65
Encyonema	44
Nupela	38
Frustulia	36
Eolimna	35

Le genre *Eunotia* (dont beaucoup d'espèces font partie de flores « régionales », voire même endémiques du bassin Amazonien) est donc de loin le plus représenté dans les eaux de Guyane. En effet, la plupart des espèces de ce genre se complaisent dans des eaux à pH plutôt acides et à faibles conductivités électriques, conditions hydrochimiques naturelles rencontrées à large échelle sur le bouclier précambrien.

Les espèces à rattacher à un genre pour l'instant indéterminé restent nombreuses (101 taxons de genres encore à préciser ou à consolider), ce constat étant sous-tendu par 2 types de raisons :

- La première résulte du **niveau de l'équipement utilisé**. En effet, les exploitations d'inventaires diatomiques pour calculs indiciels réalisés dans le cadre des réseaux de surveillance sont faites sous protocole normatif AFNOR NF-T 90-354, qui prévoit l'utilisation en routine d'un microscope optique doté d'un objectif à immersion. Or, de plus en plus souvent, les créations de genres nouveaux se basent sur des détails d'ultrastructure seulement visibles sous microscope électronique. De fait, il est parfois plus difficile, à l'heure actuelle, d'avoir une certitude sur le nom exact de genre alors que le nom attaché à l'espèce par un auteur donné à un moment donné va historiquement rester plus stable dans le temps.

- Le nombre élevé de **taxons non-encore déterminés au niveau du genre** (une centaine) peut aussi trouver en partie son origine par le **taux d'endémisme élevé** attaché au grand bassin Amazonien, isolé de fait (par la distance, par la discontinuité des hydrosystèmes d'eau douce, par les océans) des autres zones pantropicales. Il est alors plus long et difficile, voire impossible de lui trouver une correspondance dans la littérature taxonomique déjà publiée.

La Figure 18 illustre de façon plus détaillée la représentation des différents genres rencontrés en Guyane sur la base du nombre de taxons différents appartenant au genre et inventoriés sur place (représentation basée sur la biodiversité spécifique par genre des assemblages diatomiques de Guyane).

Nombre de taxons par genre

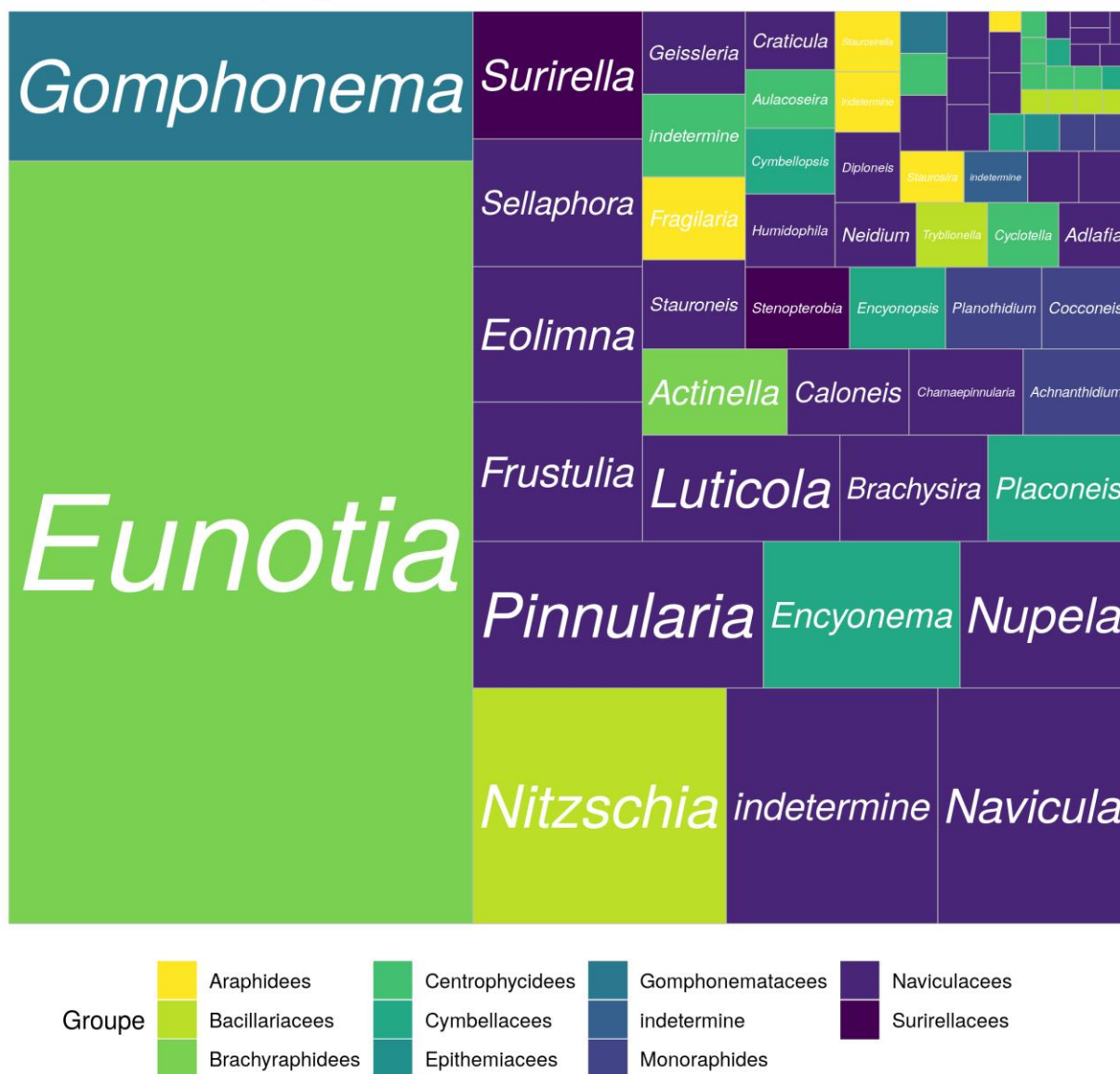


Figure 18 : Richesse taxonomique par genre de diatomées. La taille de chaque compartiment correspondant à un des 68 genres est relative au nombre de taxons appartenant à ce genre.

Une vision probablement un peu différente de la composition générique des assemblages, plus proche de la pratique de bio-indication, pourrait aussi être obtenue sur la base de l'abondance relative globale trouvée pour chaque taxon individuel compté dans les inventaires, puis en procédant ensuite au regroupement au genre (intervention quantitative au genre des taxons trouvés en Guyane).

Lorsqu'une espèce est décrite et reconnue en tant que telle, qu'elle soit déjà réellement nommée ou encore sous numéro, à condition qu'elle ait été vue et comptée suffisamment pour qu'il puisse lui être calculé des préférences écologiques, **elle peut ensuite être concrètement utilisée** pour une **bio-indication efficiente** dans le contexte biogéographique local (taxon indiciel utilisé dans le cadre de l'IDGF).

Une fois ce nouvel indice diatomique local créé, ce qui constituait le principal objectif opérationnel de la présente fiche-action AFB-Irstea, un chantier important restera à résoudre ultérieurement, en Guyane comme dans les autres DOM-COM, à savoir le nommage des espèces et genres actuellement sous numéro.

Pour ce faire, il sera particulièrement appréciable de s'appuyer aussi sur deux autres moyens d'investigation utiles pour consolider la connaissance taxonomique voire la description d'espèces nouvelles, à savoir :

- 1) la microscopie électronique (investigations spécifiques à réaliser en plus de l'effort normatif d'identification-comptage dans le cadre des réseaux) ,
- 2) la description-consolidation du taxon à partir du repérage et du décryptage de séquence permis par la métagénomique (perspective devenant envisageable dans un proche avenir).

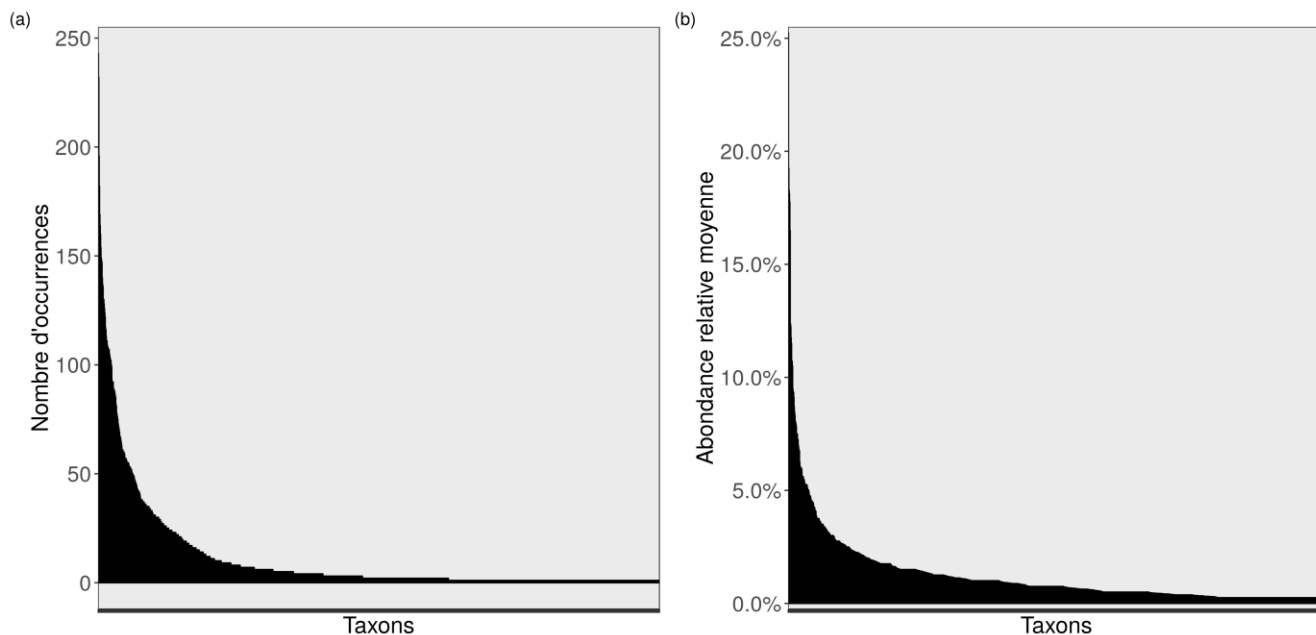


Figure 19 : (a) Nombre d'occurrences et (b) Abondance relative moyenne pour chaque taxon (présentation en ordre décroissant).

Comme classiquement constaté pour les peuplements de diatomées benthiques, en métropole comme dans les DOM, une grande partie des taxons répertoriés en Guyane (Figure 19) sont présents soit en de faibles occurrences (< 30 occurrences), soit en de faibles abondances (< 5% d'abondance relative moyenne), participant à une longue "queue de comète" de taxons qui seront trouvés et dénombrés de façon de plus en plus faible et aléatoire au fur et à mesure qu'on se déplace vers la droite des histogrammes de distribution.

Cette structuration des communautés diatomiques en termes d'occurrences et d'abondances relatives rend nécessaire une étape de réduction de l'assise taxonomique afin de ne travailler qu'avec le "cœur" du peuplement porteur d'une information écologique suffisamment lisible pour présenter un minimum de robustesse. En effet, il devient vite risqué, voire impossible de dégager de l'information autoécologique structurante à partir de taxons rencontrés de façon trop rare et très aléatoire et ce : 1) que l'on rencontre le taxon dans des conditions environnementales apparemment homogènes ; 2) ou, à plus forte raison, sans lien tangible entre la présence du taxon et une structuration des variables environnementales abiotiques décrites.

La procédure de sélection des taxons utilisés pour la suite des analyses et la construction indicielle a été réalisée selon les modalités suivantes (voir organigramme en Figure 20).

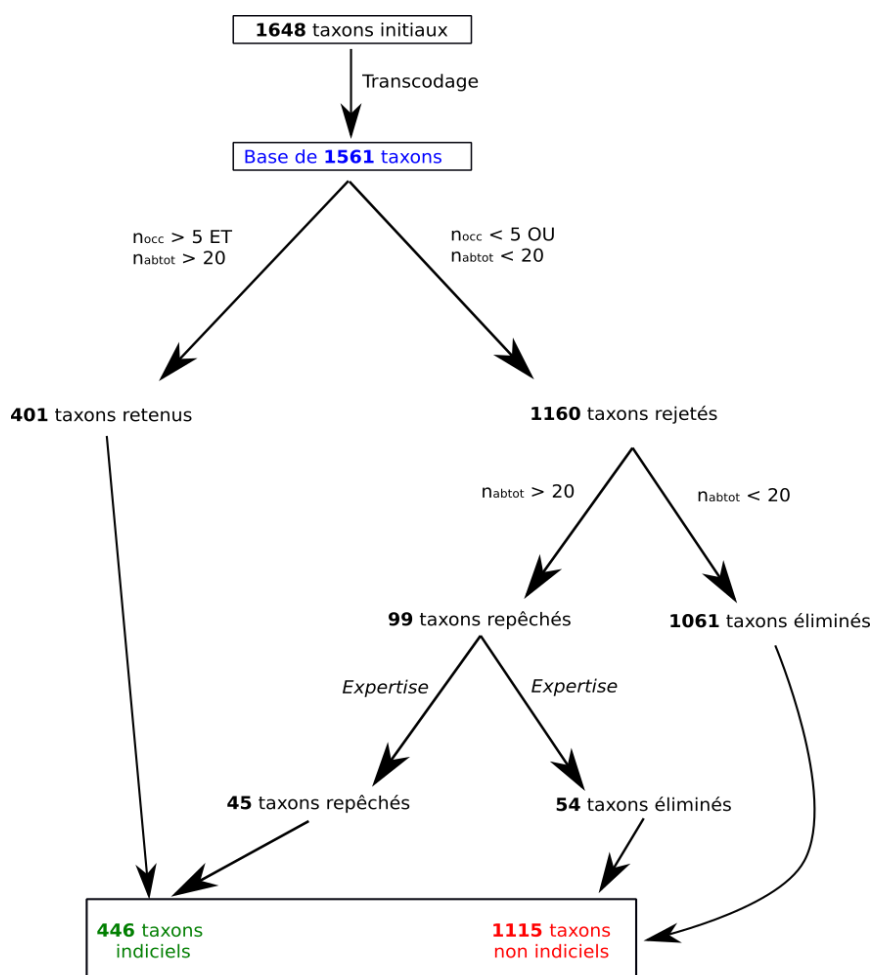


Figure 20 : Démarche de sélection des taxons indiciels mêlant seuillage numérique et expertise

Après une étape préliminaire de transcodage visant à traiter les problèmes de synonymie et de changements de dénomination d'un même taxon sur la période d'étude (homogénéisation interne du référentiel diatomique), un double seuillage numérique a dans un premier temps été appliqué. Après différentes itérations, nous avons opté pour un seuillage initial basé sur un **nombre minimal de 5 occurrences et** sur un **nombre minimal de 20 valves comptées** sur l'ensemble des 327 relevés diatomiques.

Parmi les taxons éliminés, malgré leur occurrence faible, certains présentent des abondances significatives sur des sites soumis à des pressions connues (taxons de type « urbain » associés à des conditions particulières de pressions, qui présentent un intérêt pour le diagnostic particulier des sites où ils sont représentés. L'expérience acquise dans d'autres DOM (Antilles, Réunion) montre qu'on retrouvera inévitablement ces taxons, éventuellement de façon plus abondante, à des dates ultérieures. Leur non-prise en compte initiale, surtout s'il s'agit de taxons d'alerte, viendra affaiblir à la fois la finesse de l'évaluation et la robustesse du calcul indiciel sur les sites où on les dénombrera.

Donc, en vue d'augmenter de façon ciblée l'assise indicielle afin de limiter autant que possible le problème précité, un deuxième seuillage a été appliqué en n'utilisant que le critère des 20 valves sur la totalité du jeu de données, permettant de récupérer 99 taxons potentiellement pertinents. Sur ces 99 taxons, 45 ont été conservés par expertise approfondie des sites sur lesquels ces taxons ont été retrouvés. Enfin, les taxons ne pouvant être identifiés plus précisément qu'au genre (ex : EUNS pour *Eunotia species*) ont été automatiquement retirés.

Ce processus de sélection tel que résumé en Figure 20 mène à une base de 446 taxons (\approx 30% de la biodiversité totale trouvée dans les inventaires de Guyane), qui constitueront d'une part l'assise de la base de données biologiques prise en compte dans les analyses statistiques ultérieures visant à la construction de l'indice, et qui seront ensuite les seuls taxons pris en compte lors du calcul de l'indice (*i.e.* taxons indiciels de l'IDGF). Ce ratio de 1/3 entre taxons indiciels et non indiciels est du même ordre de grandeur que pour les indices diatomiques développés dans les autres DOM-COM tels que les Antilles ([Gueguen et al., 2015](#)), la Réunion ([Boutry et al., 2013](#)) ou la Nouvelle-Calédonie ([Marquié et al., 2017](#)).

4.2.2. Structuration des communautés et essais de biotypologie

Malgré la forte réduction du nombre de taxons entraînée par la sélection des taxons indiciels, l'information portée par les espèces, sous-espèces et variétés produit un bruit statistique trop important pour l'identification de structures globales consistantes dans les communautés (arbre très lissé, peinant à dégager des métastructures biotypologiques claires avant d'arriver aux feuilles élémentaires).

Ce fait est probablement dû à la biodiversité considérable de ce DOM et à l'aléa des espèces rencontrées dans le contexte naturel amazonien (notion de grande variété et de grande redondance des taxons possibles dans les communautés, en correspondance avec les mêmes conditions environnementales générales).

En fonction de cette difficulté rencontrée, nous avons dans un 2ème temps décidé de procéder à un regroupement au niveau du genre (soit 47 genres différents de diatomées indicielles présentes en Guyane) pour la réalisation de ces analyses à objectif purement exploratoire.

Ainsi, en vue d'explorer la structuration biotypologique des communautés diatomiques locales, l'analyse mobilisée à ce stade a été une Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS).

La NMDS permet de représenter sur un plan en 2 dimensions la distance entre des éléments (sites, taxons) ; la distance ici utilisée est la distance de Bray-Curtis, un indice adapté mesurant la différence entre deux stations en termes de composition floristique.

Dans une NMDS, contrairement à d'autres analyses factorielles, les axes ne sont pas hiérarchisés et seules les distances entre objets sont à considérer pour l'interprétation.

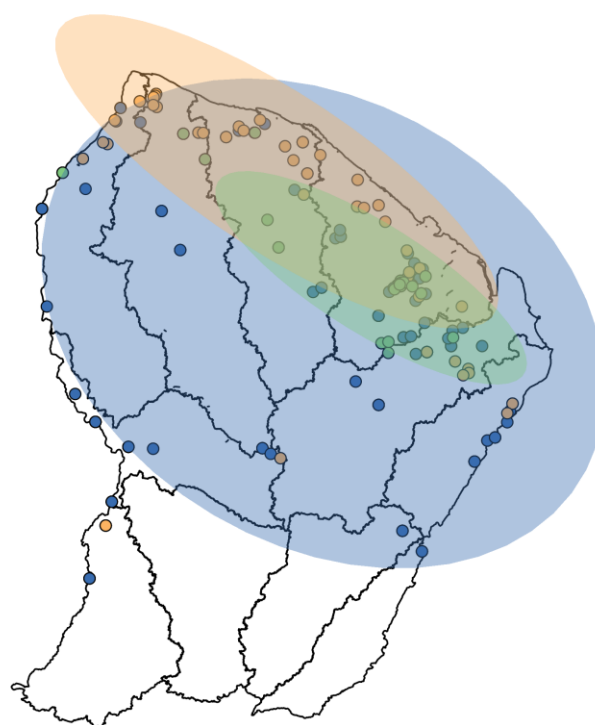
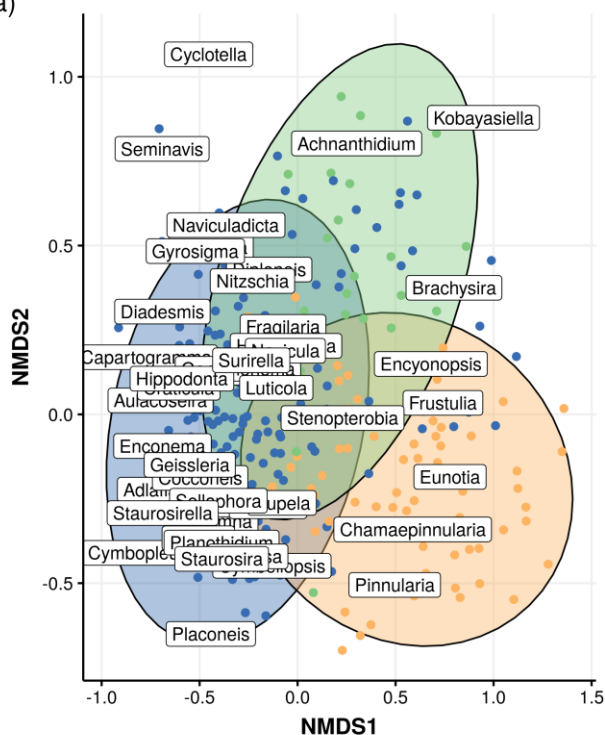
Cette méthode a été privilégiée par rapport à des méthodes plus classiques type Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) car plus robuste, caractéristique fortement souhaitée dans notre situation où des genres peuvent parfois recouvrir des taxons aux profils écologiques très différents.

Afin d'exploiter au mieux les résultats de cette NMDS, celle-ci a été couplée à 3 analyses différentes de groupement afin d'identifier des grands groupes homogènes de sites et ainsi en extraire une biotypologie basée sur le compartiment diatomique.

Les trois méthodes de groupement testées ont été les suivantes (voir Figure 21) :

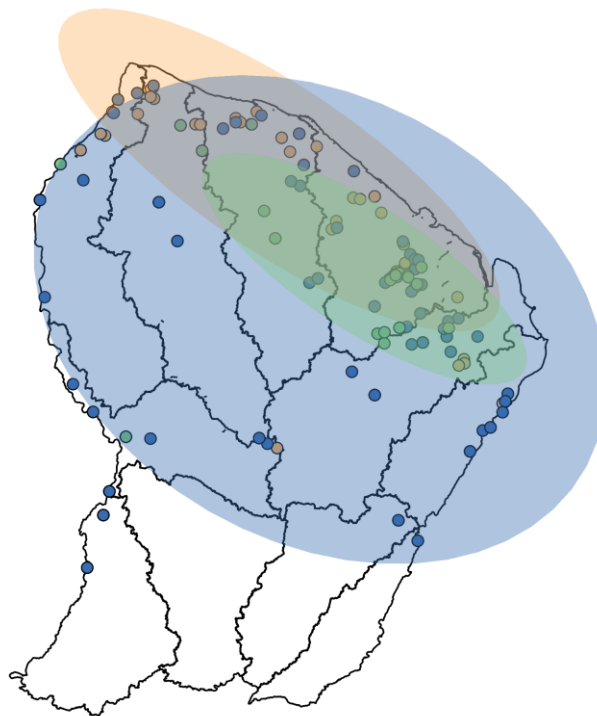
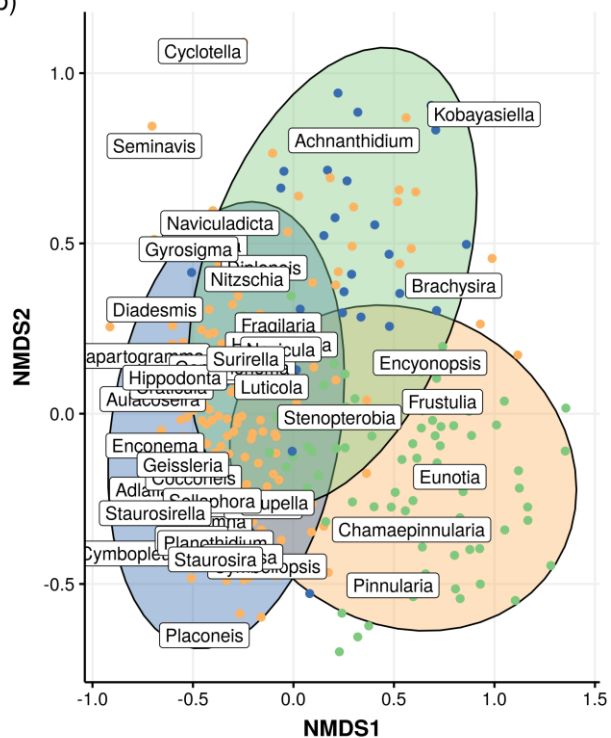
CAH

(a)



Kmeans

(b)



SOM

(c)

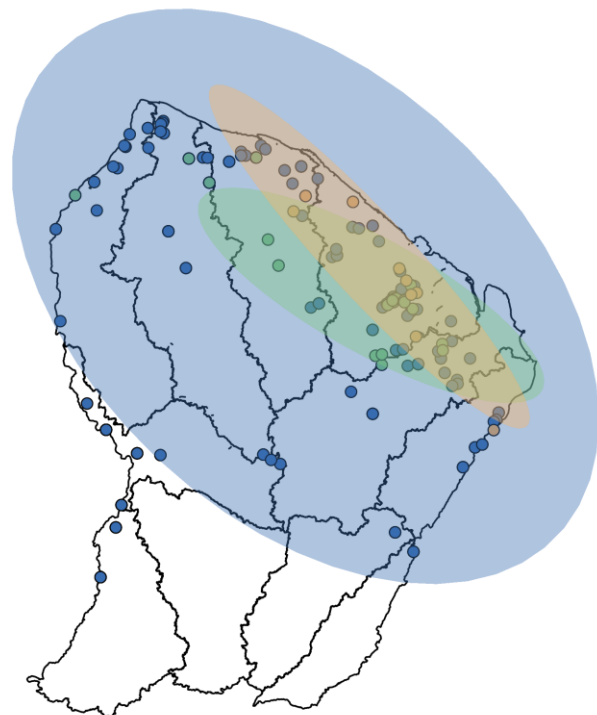
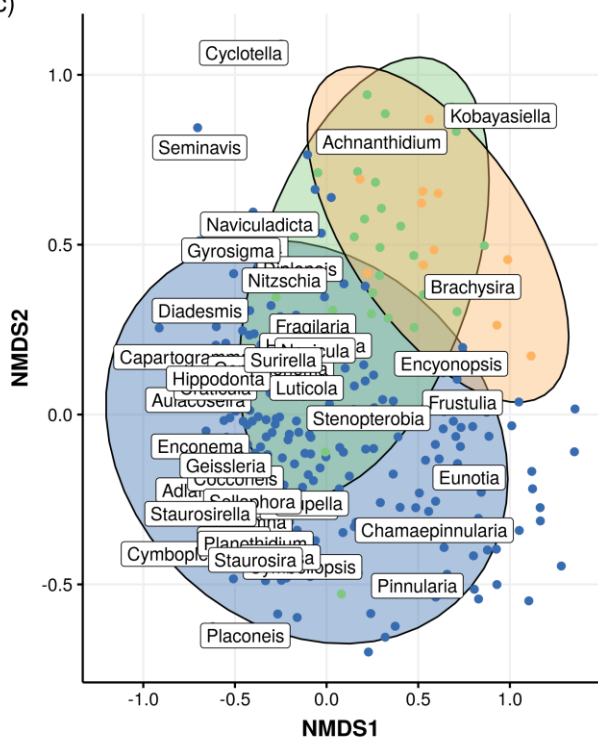


Figure 21 : (gauche) Résultats de la NMDS et (droite) cartographie des sites avec superposition des groupes issus de (a) la CAH (b) la méthode Kmeans et (c) la SOM.

- La Classification Hiérarchique Ascendante (CAH), basée sur la distance de Bray-Curtis (tout comme la NMDS) et utilisant l'algorithme de Ward ;
- La méthode des k-moyennes ou Kmeans, un algorithme de groupements itératifs moins souvent utilisé en écologie dans lequel on essaye d'isoler *k* groupes dont les moyennes sont les plus distantes possibles ;
- Les cartes auto-organisantes ou Self Organising Maps (SOM), une méthode appartenant à la famille des réseaux de neurones non supervisés, déjà utilisée par le passé pour typifier des zones biologiques, par exemple en métropole (Tison et al., 2005).

Dans les trois cas, le nombre optimal de groupes a été défini par un algorithme décisionnel propre au k-moyennes (Kodinariya and Makwana, 2013) et donc fixé à 3.

Géographiquement, les trois groupes mis en évidence dans chacune des approches semblent tous être globalement en adéquation avec la typologie géochimique actuellement utilisée comme trame pour les Hydroécorigions ou HER de Guyane (Chandesris et al., 2005) et correspondent aux biotypologies réalisées, par exemple, pour les invertébrés (Dedieu, 2014, 2015).

Un biotype intermédiaire entre les 2 HER, repéré sur les sites se situant dans la zone Cayenne-Kourou ainsi que dans le bassin agricole de la Comté (biotype représenté en vert dans les résultats des 3 méthodes biotypologiques appliquées), semble se dessiner dans l'ensemble de ces classifications, sans que l'origine principale de cette différenciation ne soit encore complètement clarifiée à ce stade :

- S'agit-il de **conditions naturelles mitigées et intermédiaires** entre Amazonie et Criques du Nord ? Auquel cas, si un zonage facile à mettre en œuvre (*i.e.* calé sur des conditions hydrochimiques et floristiques intelligibles) arrive à se dégager, il pourrait être pertinent de générer une grille d'évaluation particulière "régionalisée".
- S'agit-il du résultat biotypologique d'une **influence plus sensible d'altérations d'origine anthropique** dans cette zone un peu plus soumise à différentes activités anthropiques ? Auquel cas ce biotype marqué par l'apparition de flores altérées va déjà être pris en charge par le dispositif d'évaluation et se traduire par une baisse des notations indicielles.

L'affiliation des taxons dans chacun des groupes peut diverger en partie entre les 3 méthodes testées, notamment entre la SOM et la CAH/Kmeans. Ecologiquement, la CAH propose les résultats les plus pertinents, avec un groupe correspondant aux criques acides du nord représenté notamment par les genres *Eunotia*, *Pinnularia* et *Chamaepinnularia*, un groupe correspondant à la zone intermédiaire-Est représenté par *Achnantidium* et *Kobayasiella* et enfin un dernier groupe correspondant au bouclier amazonien et présentant la plupart des autres genres.

Globalement, la divergence de résultats de ces différentes méthodes de groupement nous démontre la fragilité d'une telle analyse réalisée au genre, qui ne permet pas à ce stade d'identifier de structuration biotypologique claire des diatomées susceptible de remplacer avantageusement les HER actuellement utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau.

Au stade actuel, c'est donc la structuration abiotique en 2 HER principales, confirmée de longue date, qui continuera de servir de base au dispositif d'évaluation.

Cependant, l'existence d'une zone biotypologique intermédiaire entre les deux HER semble se dégager.

La vérification de la matérialité et des raisons réelles de cette structuration biologique est une piste intéressante qui peut mériter un approfondissement ultérieur en vue de vérifier l'intérêt éventuel de sa prise en compte dans le cadre de futures versions du dispositif d'évaluation basé sur les indices biologiques guyanais.

Ainsi, il pourrait par exemple être tenté de repérer une structuration biologique cohérente et commune dans un contexte d'évaluation multi-maillon.

4.3. Couplage biotique/abiotique

Une fois que chacune des deux matrices, biotique et abiotique, ont été analysées, les deux matrices ont été couplées afin d'identifier les conditions environnementales correspondantes à chaque relevé biologique.

Contrairement à des réseaux plus diversifiés tels qu'en métropole, et surtout du fait de lourdes contraintes logistiques liées au terrain, très peu de relevés physico-chimiques sont effectués par an (1 à 3, Figure 22).

De ce fait, la stratégie ici employée a été de rapatrier pour chaque relevé biologique des relevés physico-chimiques considérés comme suffisamment représentatifs des conditions abiotiques auxquelles ont été soumises les communautés prélevées.

Une large fenêtre de 180 jours (6 mois) avant le prélèvement à 75 jours (2,5 mois) après a été appliquée pour affecter les relevés physico-chimiques aux relevés biologiques.

Si plusieurs relevés physico-chimiques se trouvent dans la fenêtre d'un relevé biologique, alors la moyenne des valeurs mesurées est calculée afin d'obtenir une valeur unique et représentative en face de la donnée biologique.

Malgré cette large fenêtre, ce couplage chimie/biologie a entraîné une perte de 19 relevés biologiques, pour lesquels aucune chimie représentative n'a pu être rapatriée, ainsi que la perte d'1 taxon qui était exclusif à l'un de ces 19 relevés.

Au final, nous obtenons donc une matrice de [308 relevés x 445 taxons indiciels x 17 paramètres physico-chimiques] comme base de travail pour l'élaboration de l'indice.

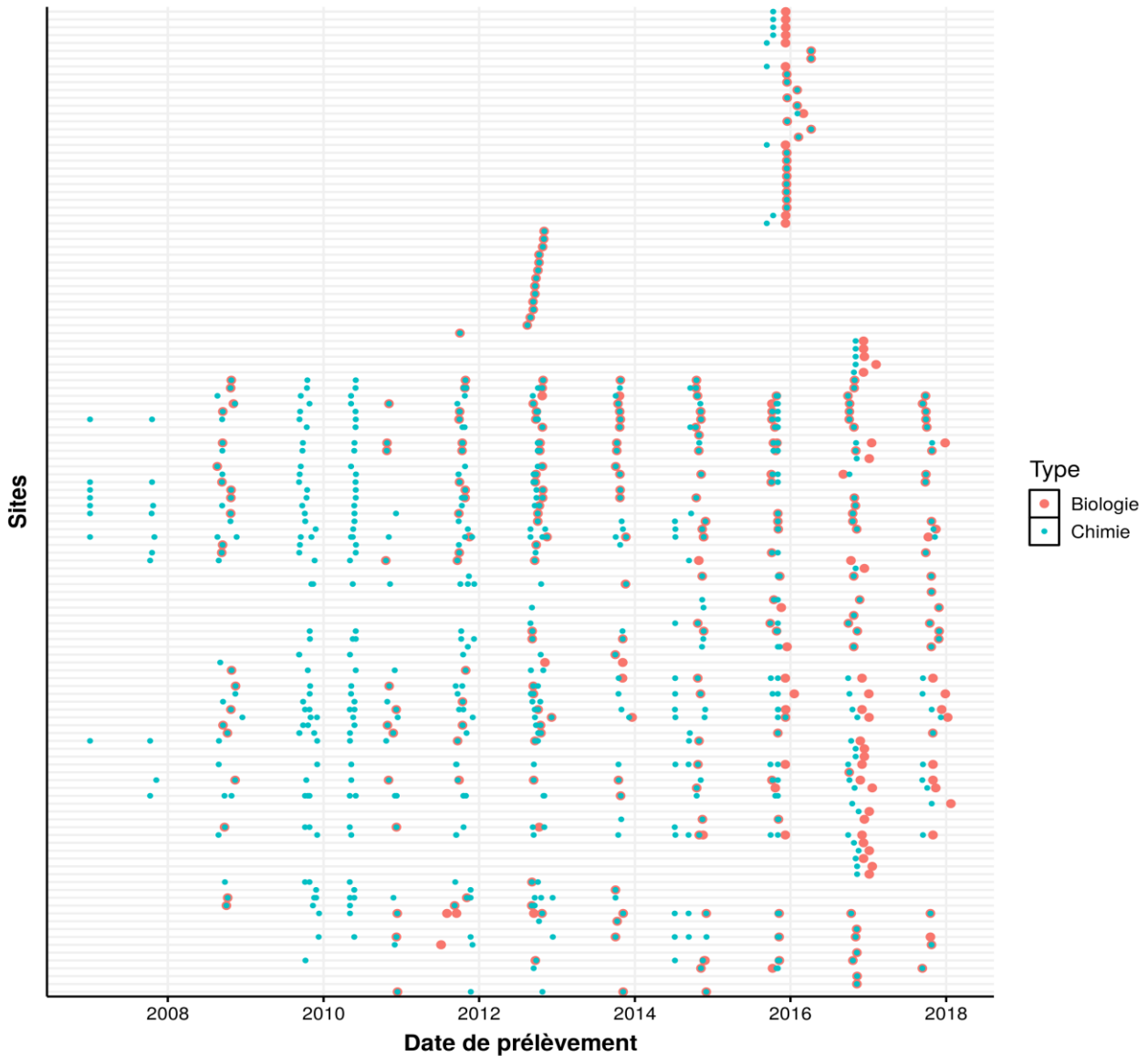


Figure 22 : Positionnement temporel des relevés biologiques et physico-chimiques sur les 189 sites de relevés identifiés

5. Préalables à la construction de l'indice

5.1. Réflexion méthodologique sur la stratégie indiciaire à mettre en place

Parmi les différents indices biologiques développés ces dernières décennies sur le territoire national, notamment l'IPS (Coste, 1982) et la version actuelle (2007) de l'IBD (Coste et al., 2009), et comme pour la plupart des indices diatomiques, la philosophie de construction repose toujours sur un dérivé de la formule de Zelinka & Marvan (1961) qui s'appuie sur la pondération entre abondance relative des taxons, leur sensibilité spécifique et leur valeur indicatrice.

Ce type d'approche appliquée sur les cours d'eau de métropole dont les linéaires sont assez longs, repose sur le principe conceptuel que les assemblages locaux de diatomées sous l'influence d'une altération sont, au niveau de leur composition spécifique complète, dans un équilibre global avec le milieu environnant et que la structure de la communauté complète constitue un bon reflet du niveau d'altération anthropique subi.

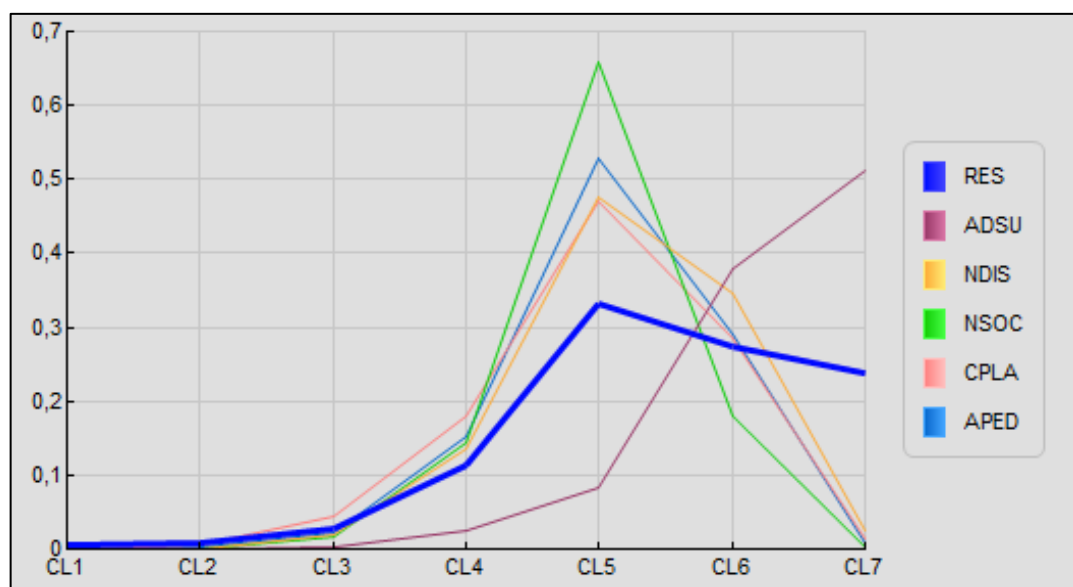


Figure 23 : Exemple de profils renseignés pour 6 taxons participant à l'IBD sur le gradient composite d'altération identifié en métropole

Dans cette configuration, tous les taxons de l'assemblage contributifs à l'IBD servent à établir la note indicelle du taxon fictif représentant l'assemblage complet, avec l'application de la modulation apportée par le coefficient de sténoécie qui leur est affecté en fonction de leur plus ou moins large amplitude écologique (c.f. Figure 23).

Les travaux de mise au point de nouveaux bioindicateurs diatomiques pour les cours d'eau spécifiques aux DOM-COM, réalisés entre 2008 et 2017 à la Réunion (IDR), aux Antilles (IDA) et en Nouvelle-Calédonie (IDNC), ont dû s'adapter à une autre réalité physique et naturelle exerçant une forte influence sur la structure interne des jeux de données d'étude. En effet, s'agissant de territoires îliens adossés à des reliefs volcaniques importants et situés en zone tropicale, les linéaires de cours d'eau sont plus courts et sous influence d'un climat parfois violent entraînant une dilution des altérations locales et un drift important des taxons de bonne qualité, venant de l'amont, dans les zones potentiellement altérées (littoral), ce qui occulte une grande part des effets d'altérations sur la structuration des cortèges diatomiques.

Du fait de ces contextes particuliers, les indices de bioindication n'ont pas été basés sur la composition spécifique complète des assemblages, qui floute et atténue les messages d'altération, mais plutôt sur une liste restreinte de taxons d'alerte dont l'apparition signale de façon claire la présence d'une altération anthropique à l'amont.

Bien que n'étant pas une île et bien que marquée par un relief bien moins important, la Guyane française présente tout de même des problématiques similaires : climat tropical, pollutions peu marquées et fortement diluées ; ou encore une flore diatomique méconnue, très incomplète et évolutive sur le plan de l'inventaire et encore mal décrite sur le plan de l'écologie de beaucoup de taxons rares.

De ce fait, le principe basé sur l'utilisation de taxons d'alerte, certainement plus approprié que l'utilisation complète de communautés complexes à l'écologie encore peu connue, a également été sélectionné pour l'élaboration de l'indice guyanais.

5.2. Choix et présentation de la procédure TITAN

La recherche d'une liste restreinte de taxons signaux d'une altération anthropique a été abordée de différentes façon au cours de la genèse des différents indices diatomiques en DOM-COM.

Par exemple, dans le cas de l'IDA aux Antilles, les taxons d'alerte ont été définis par une formulation de leur autoécologie sur un Gradient Composite Multimétrique Anthropique (GCMA), en sélectionnant les taxons présentant les plus grandes affinités aux fortes valeurs du gradient (procédure relativement proche d'une démarche autoécologique classique).

Dans le cas de l>IDNC, le dernier indice diatomique récemment mis au point pour la Nouvelle-Calédonie durant l'année 2017, c'est l'outil TITAN (Baker et King, 2010) qui a été choisi et adapté à la sélection de taxons d'alerte. Cet algorithme s'est avéré particulièrement pertinent dans le cadre de l>IDNC puisqu'il repose sur une analyse univariée de chaque gradient physico-chimique, en proposant dans chaque cas une liste de taxons d'alerte propre au paramètre.

Cet outil a permis la mise en œuvre d'une méthodologie intéressante pour procurer une **évaluation plus ciblée**, à savoir une conception modulaire de l'indice qui a notamment permis de séparer altération trophique et altération minière, originalité de la Nouvelle-Calédonie.

De plus, cet outil s'avère particulièrement adapté sur des gradients environnementaux incomplets puisqu'il introduit, via l'utilisation de tirages aléatoires (bootstraps), des **notions de robustesse et d'incertitude** autour des résultats qu'il propose.

TITAN permet ainsi de conforter, vis-à-vis du hasard de distribution, l'interprétation de la réponse biologique du taxon au gradient environnemental considéré.

C'est essentiellement pour ces 2 catégories de raisons que cette méthode a été sélectionnée et mobilisée pour la recherche de taxons d'alerte dans l'IDGF.

5.2.1. Description de l'outil

En résumé

La Threshold Indicator Taxa ANalysis (TITAN) permet d'identifier les valeurs optimales d'un gradient environnemental qui permettent de partitionner les sites de relevés en maximisant les scores de spécificité (traduit par un IndVal) de chaque taxon.

Les valeurs d'IndVal sont standardisées via le calcul de z-scores qui sont issus d'écart-types et de moyennes produits par des permutations aléatoires ($n \geq 250$). Cette standardisation permet d'augmenter la contribution de taxons aux occurrences et abondances faibles mais pourtant particulièrement sensibles au gradient.

La distinction est ensuite faite entre les réponses positives, traduisant une affinité au gradient (z+) et les réponses négatives, traduisant un déclin face à l'augmentation du gradient (z-).

Enfin, une étape de bootstrap (analyse sur des sous-jeux de données, $n \geq 500$) permet d'estimer la pureté et fiabilité des z-scores calculés et d'insérer une notion d'incertitude autour des seuils de rupture définis.

TITAN est une méthode d'identification de seuils de rupture dans les communautés qui combine deux méthodes préexistantes :

- La nCPA (King et Richardson, 2003) est une méthode non paramétrique de partitionnement de gradient dont le fonctionnement est similaire à des arbres de régression multivariés (De'Ath, 2002). Dans ces deux méthodes, le partitionnement s'effectue en essayant de maximiser la distance intergroupes tout en diminuant la distance intergroupes (afin d'obtenir des groupes homogènes et distincts) sur la base d'une matrice de distance multivariée propre au jeu de données étudié (Bray-Curtis par exemple pour des données de faune-flore). La nCPA rajoute ensuite une étape de bootstrap (ré-échantillonnage aléatoire) pour estimer l'incertitude liée aux points de partitionnement calculés.

- La procédure IndVal (Dufrière et Legendre, 1997) mêle de façon simple et intuitive des notions de fidélité (B_{kj}) et de spécificité (A_{kj}) pour définir le caractère indicateur de chaque taxon à chaque groupe. De ce fait, deux valeurs d'IndVal peuvent être calculées pour un même taxon dans une classification binaire. Les scores IndVal sont le produit de l'abondance relative intergroupe et de la fréquence d'occurrence intergroupe. Il en découle qu'un taxon à forte abondance dans un groupe donné n'aura une forte valeur d'IndVal que s'il apparaît également de manière régulière dans ce groupe.

TITAN reprends le principe de la nCPA mais remplace la matrice des distances, qui est une agrégation à l'échelle de la communauté, par le calcul d'un indice taxon-spécifique, l'IndVal.

Le principe de fonctionnement de l'algorithme est présenté synthétiquement en **Erreur ! source du renvoi introuvable.** page suivante.

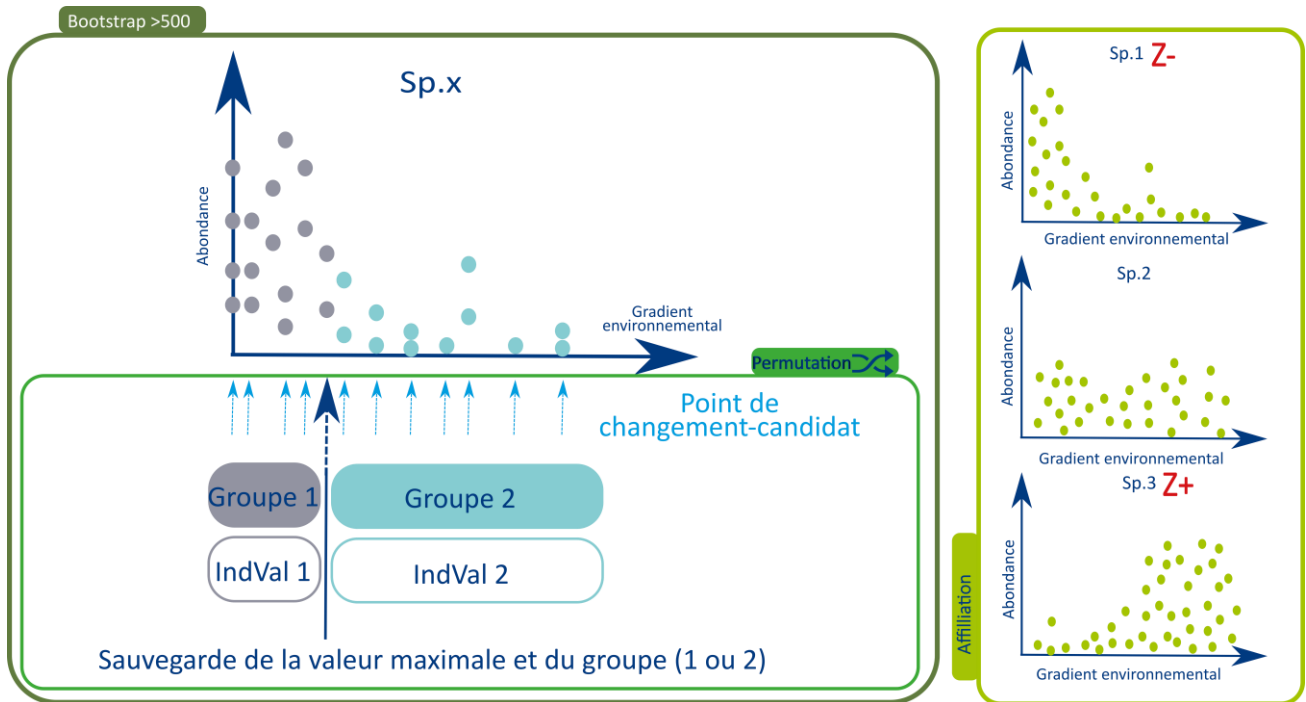


Figure 24 : (gauche) Fonctionnement schématique de l'algorithme TITAN en prenant l'exemple d'une espèce x et (droite) Exemple de profils observés pour les 3 affiliations possibles (z-, aucune et z+) (Schéma © S. Boutry)

La procédure suivie est détaillée sommairement ci-dessous :

Phase 1 : Initialisation

Le gradient est mis en forme de manière à préparer l'examen successif de potentiels seuils de changement (= segmentation du gradient). Pour l'étude de chaque valeur de changement-candidat, cela conduit à la définition de 2 regroupements de relevés (un au-dessous du seuil-candidat, l'autre au-dessus) et, pour chacun d'entre eux, un score IndVal peut être calculé pour chaque taxon.

Cependant, comparer un très important nombre d'échantillons d'un côté d'un seuil, et un trop faible effectif seulement dans l'autre groupe, n'aurait pas de sens et ne serait pas fiable ; c'est ce qui peut se passer en pratique aux 2 extrémités du gradient considéré.

Il faut donc définir le nombre minimum d'échantillons admis dans un sous-ensemble d'une partition pour que le calcul de l'IndVal garde son sens. C'est l'opérateur qui décide de ce nombre minimum avant de lancer l'analyse, fixé à 5 dans le cas présent. De ce fait, le nombre de partitions du gradient à tester est égale à $n - 10$, avec n le nombre d'observations, moins 10 pour satisfaire les conditions de taille minimale de groupe.

Phase 2 : Détermination des seuils de rupture et incertitudes pour chaque taxon

L'algorithme cherche ici à calculer, pour chaque partition du gradient et pour chaque taxon, le score IndVal dans chacun des groupes (au- dessous du seuil versus au-dessus). Dans chaque partition, la plus grande des deux valeurs d'IndVal, ainsi que sa direction (groupe au-dessous ou au-dessus du seuil), sont enregistrés pour comparaison avec les autres partitions.

Parmi toutes les partitions candidates, le plus fort IndVal obtenu marque le seuil de changement le plus efficient pour ce taxon, c'est à dire celui où il est le plus spécifique et le plus fidèle à un sous-ensemble donné. L'algorithme va donc enregistrer, pour chaque taxon, ce seuil de basculement ainsi que le sens dans lequel son abondance évolue :

- L'abondance augmente avec le gradient, ce qui traduit une affinité positive
- L'abondance diminue avec le gradient, ce qui traduit une sensibilité (ou affinité négative)

Enfin, cette phase de l'algorithme est répétée 250 fois avec permutation aléatoire de l'appartenance des sites aux deux groupes, ce qui permet de calculer un IndVal moyen et un écart-type des IndVal. Ces valeurs permettent d'assigner une incertitude autour du seuil de changement repéré pour le taxon sur la base des valeurs réelles.

Phase 3 : Standardisation et détermination des seuils à l'échelle de la communauté

Dans cette troisième phase, l'algorithme synthétise l'information mono-spécifique issue des phases précédentes pour inférer des seuils de rupture à l'échelle des communautés. Afin de donner autant de poids aux taxons peu occurrents/abondants, mais pourtant tout aussi structurants que d'autres taxons mieux représentés, les valeurs d'IndVal sont standardisés en z-scores par centrage (retrait de la moyenne) puis réduction (division par l'écart-type) à partir des résultats issus des 250 permutations réalisées en phase 2.

Les z-scores individuels (propres à chaque taxon) sont ensuite cumulés selon leur groupe d'assignation (taxons qui régressent versus taxons qui augmentent au long du gradient) pour chaque point de changement-candidat (ou partition). Les valeurs du paramètre environnemental x qui correspondent aux z - maximum et z + maximum sont les points de changement au niveau des communautés multispécifiques.

Phase 4 : Estimation de l'incertitude par bootstrapping

Les phases 1 à 3 sont enfin réitérées sur 500 sous-échantillons du jeu de données (méthode appelée bootstraps). La confrontation entre les valeurs initialement calculées et ces valeurs obtenues de manière aléatoire permet d'estimer l'incertitude autour de la réponse de chaque taxon ainsi qu'autour des seuils de changement à l'échelle de la communauté.

Phase 5 : Diagnostic et interprétation

Cette dernière phase mobilise les résultats acquis pour effectuer une interprétation des seuils écologiques obtenus. À partir des bootstraps, la pureté ainsi que la fiabilité de chaque taxon peut être calculée. En utilisant ces deux caractéristiques, il est possible de déterminer quels sont les taxons indicateurs significatifs à utiliser pour interpréter les seuils de changement des communautés.

5.2.2. Adaptation à la recherche de taxons d'alerte

Tel qu'il a été conçu par ses auteurs, TITAN n'était pas dédié à la recherche de taxons d'alerte signant des effets de pollutions. En effet, en développant cet outil, les auteurs travaillaient plutôt à l'échelle des communautés et s'intéressaient en particulier aux seuils environnementaux structurant profondément et expliquant les basculements de communautés naturelles multispécifiques (Figure 26).

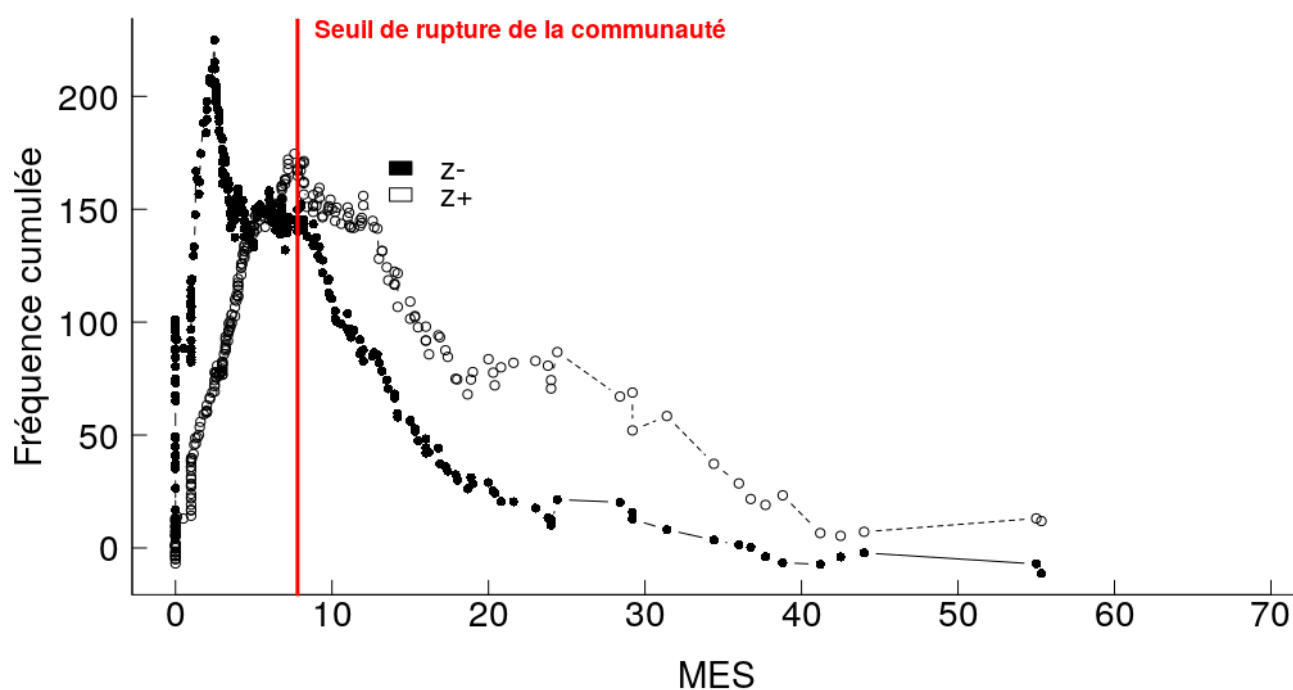


Figure 25 : Exemple de résultats issus de TITAN à l'échelle de la communauté pour les MES, présentant la fréquence cumulée des taxons z+ et z- le long des gradients environnementaux et permettant d'identifier les seuils responsables du basculement des communautés.

Néanmoins, la possibilité d'exploration et d'utilisation des résultats à l'échelle infra-communautaire (c.a.d. pour chaque taxon individuel) nous a permis d'utiliser cet outil dans un nouvel objectif, à savoir la **sélection de taxons d'alerte** dans une optique de bio-indication des **impacts de pollutions anthropiques**.

Dans le contexte des DOM, l'intensité **forte**, mais **très variable** du drift amont-aval (d'un bassin hydrographique à l'autre ; d'un épisode hydrologique –étiage– à l'autre –crue–), ne permet pas une utilisation robuste, au service de la **bio-indication des pollutions**, de la **baisse** des peuplements considérés comme **sensibles au gradient considéré** (ou Taxons z-), beaucoup trop bruitée par l'influence de déterminants naturels, notamment hydroclimatiques. Nous avons donc plutôt recherché les taxons dont l'**augmentation** était liée de façon claire et fidèle à l'**augmentation du gradient anthropique considéré** (Taxons z+, considérés comme **tolérants** vis-à-vis du gradient d'altération considéré).

Sur le plan général, l'analyse TITAN fournit donc des résultats à deux niveaux : à l'échelle de la communauté (cf. Figure 25, comme déjà indiqué antérieurement) puis à l'échelle infra-communautaire (cf. Figure 26).

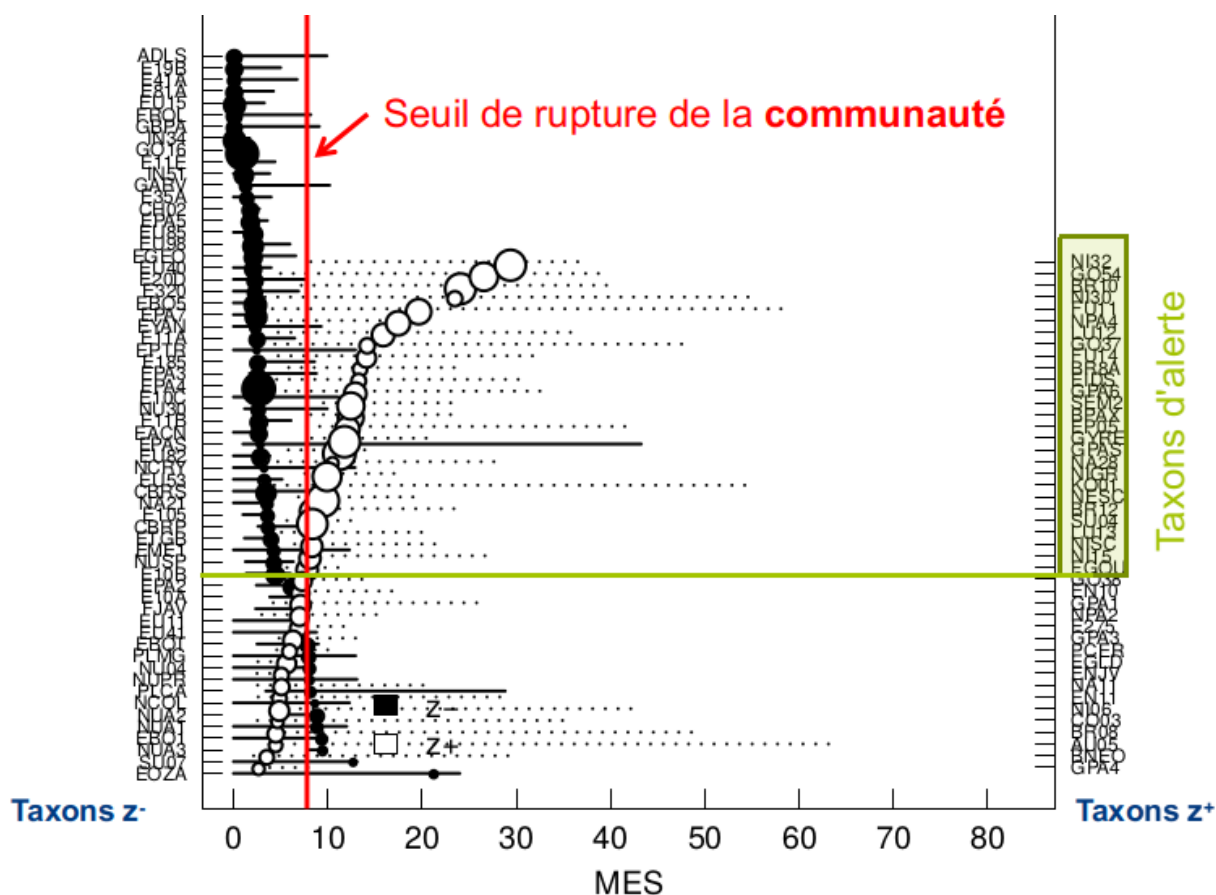


Figure 26 : Exemple de résultats obtenus via TITAN pour les MES à l'échelle infra-communautaire. Les taxons z- sont figurés en noir à gauche et les taxons z+ sont figurés en blanc à droite. La taille des cercles correspond à l'abondance relative moyenne du taxon et les traits/pointillés (selon l'affiliation) à son amplitude écologique.

Afin de produire une liste de taxons d'alerte la plus robuste possible, les taxons identifiés comme z+ ont été retenus comme taxons d'alerte pour un paramètre donné à partir du seuil identifié comme responsable de la rupture à l'échelle des communautés sur le gradient considéré.

Certains seuils d'utilisation de TITAN étant initialement fixés par l'utilisateur de façon un peu empirique, donc sans réelle certitude, le seuil de basculement des communautés initialement utilisé a pu être légèrement ajusté par expertise pour certains paramètres, afin d'augmenter / diminuer l'assise de taxons d'alerte et d'optimiser la pertinence de l'indice final.

6. Construction de l'IDGF

6.1. Processus global

Une fois la base de données couplant biologie et chimie compilée et la philosophie globale de l'indice choisie, la démarche d'élaboration de l'indice a été construite en 5 phases, résumées de manière schématique et globale en Figure 27.

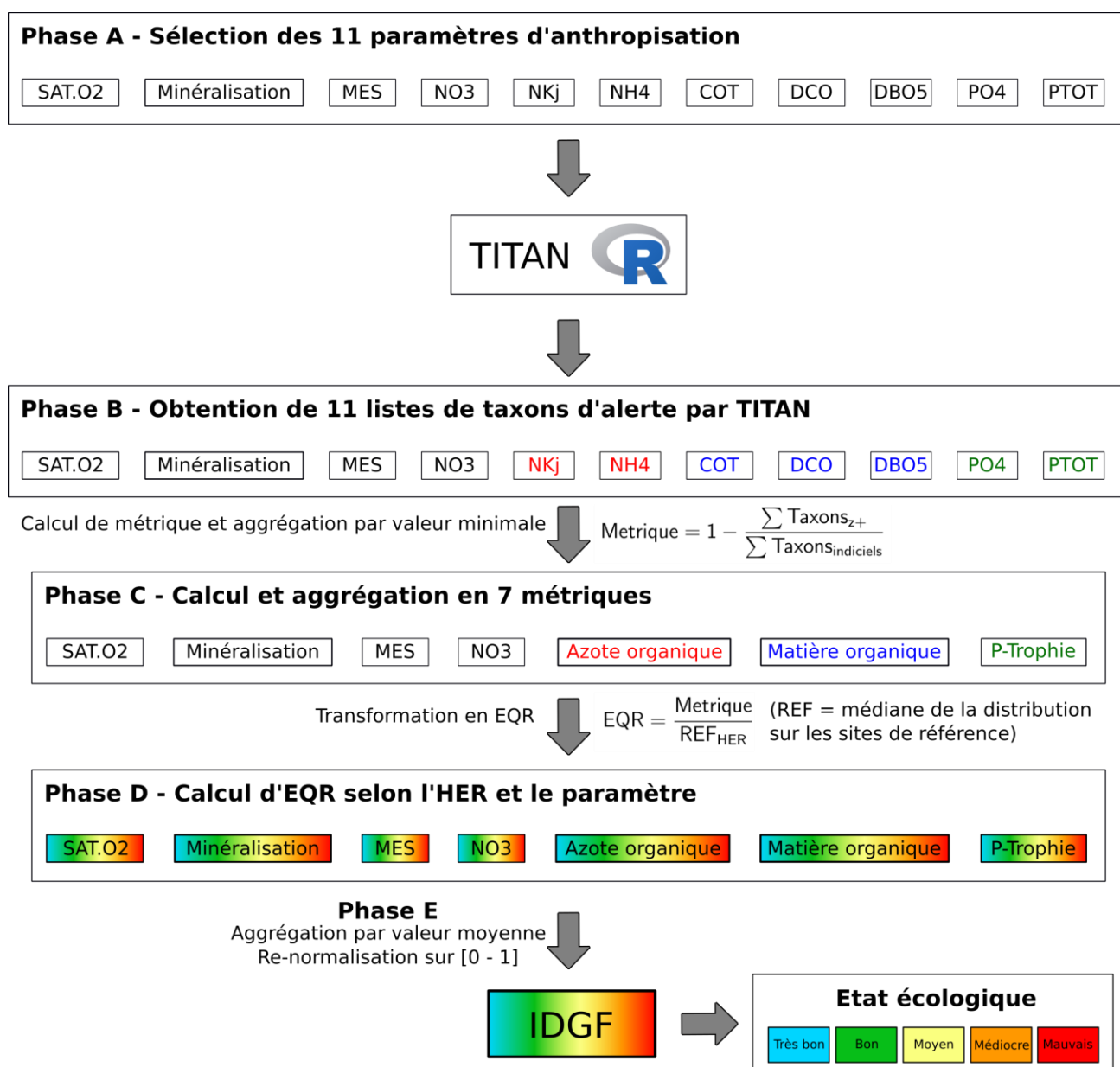


Figure 27 : Démarche globale de construction de l'indice IDGF

6.2. Phase A : Sélection des paramètres d'anthropisation

La structuration des 17 paramètres physico-chimiques finalement retenus après analyses exploratoires et couplage avec la biologie (et donc perte potentielle de certains sites ne pouvant être reliés à des prélèvements biologiques) a été explorée par une nouvelle ACP (Figure 28).

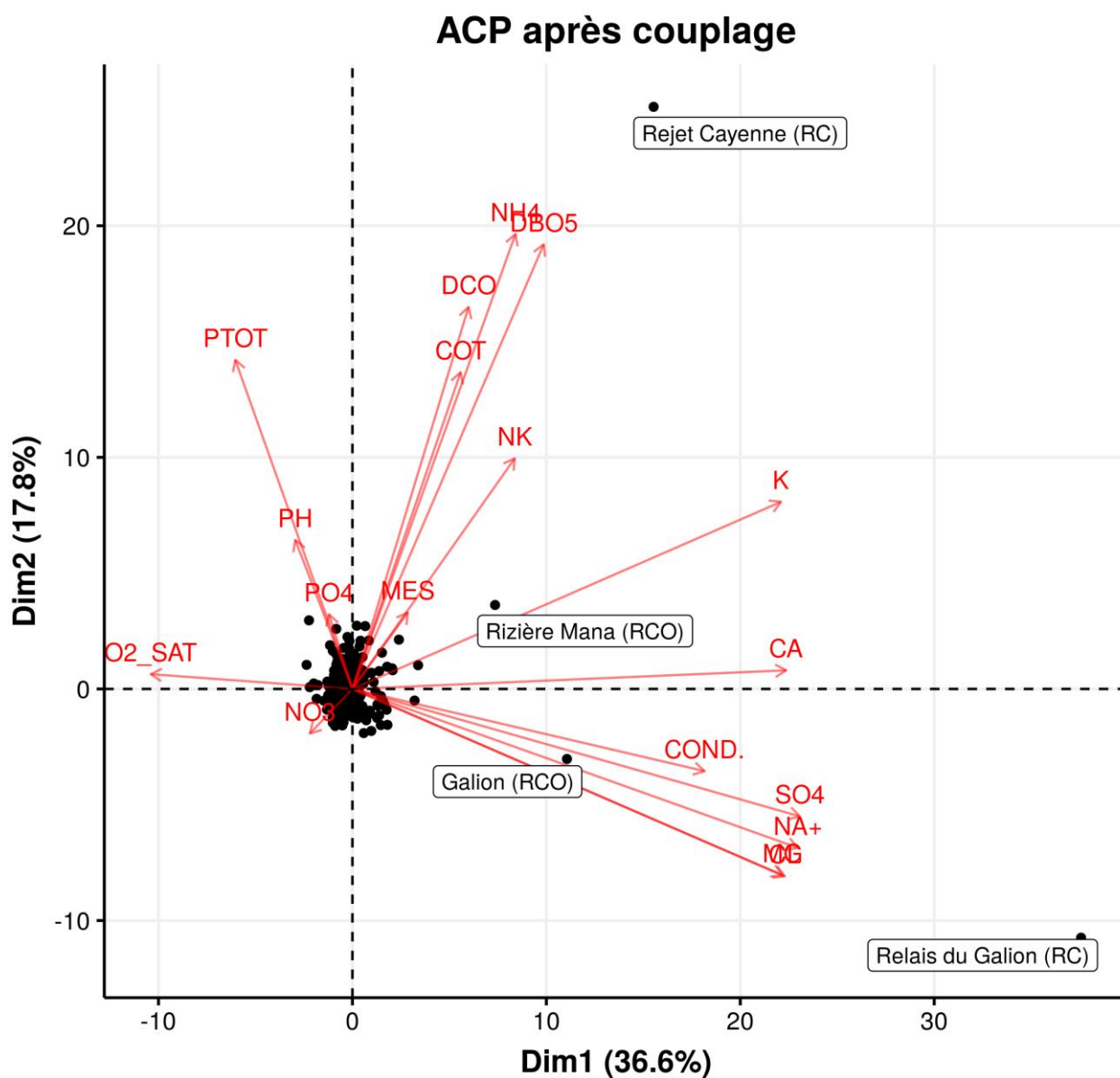


Figure 28 : ACP réalisée sur la matrice de données abiotique résultante après couplage avec la biologie.

Sur cette nouvelle ACP, le premier plan factoriel est à lui seul porteur de plus de la moitié (54.4%) de l'inertie totale, minimisant l'intérêt de l'extraction d'axes supplémentaires. Les deux axes portent plus ou moins la même information que dans l'ACP initiale (minéralisation sur l'axe 1, trophie/saprobie sur l'axe 2) mais l'axe 1 s'avère moins structurant que dans l'ACP initiale. En revanche, nous constatons que, dans le cas de cette ACP, l'information de la minéralisation n'est plus tirée par des prélèvements sous influence haline (ces stations n'ayant pas de correspondances dans la matrice biologique) mais par des prélèvements issus des réseaux complémentaires (RC/RCO) mettant en évidence l'influence de la carrière du Galion, dont l'exploitation semble émettre de fortes concentrations en minéraux divers. Vient en second le site du RCO ciblant l'impact de rizières dans le bassin de la Mana. Enfin, la STEP de Cayenne du RC est toujours positionnée en tête de l'axe 2 "anthropique".

Au vu de cette structuration, 11 paramètres ont été retenus pour l'indice :

- 1 paramètre composite de minéralisation correspondant aux coordonnées sur l'axe 1 de cette ACP et intégrant l'information des différents ions ainsi que de la conductivité
- 3 paramètres liés à la matière organique : DCO, COT et DBO₅
- 2 paramètres liés à la trophie par le phosphore : PO₄³⁻ et PTotal
- 2 paramètres liés à l'azote organique : NKj et NH₄⁺
- 1 paramètre lié à l'azote minéral : NO₃⁻
- 1 paramètre lié aux possibles rejets terrigènes en lien avec l'orpaillage : MES
- 1 paramètre lié à l'oxygénation des eaux : % de saturation en oxygène

En toute rigueur, NH₄⁺ est une **forme minérale dissoute** de l'azote, mais c'est la première forme d'azote minéral qui résulte de la dégradation en cours de la matière organique azotée (via le processus d'ammonification) ; ce qui fait qu'on trouve le plus souvent dans les rejets domestiques, de STEP et d'IAA, en mélange très variable sur des pas de temps courts, du NH₄⁺ associé à de l'azote organique. D'ailleurs, l'azote Kjeldahl représente à la fois l'azote organique (minéralisé en NH₄⁺ par le processus pré-analytique) et le NH₄⁺ dissous de l'eau analysée. Enfin, dans un flacon d'eau donné, en liaison avec les conditions logistiques de mission, d'acheminement et de stockage liées à un contexte tropical, la proportion relative entre azote organique et ammoniacal est susceptible d'évoluer assez sensiblement dans le flacon, du fait du processus microbien d'ammonification en cours. Aussi, NKJ et NH₄⁺ ont tous deux été sélectionnés comme proxys intéressants et directement utilisables pour représenter l'altération par l'azote organique.

6.3. Phase B : Identification des 11 listes de taxons d'alerte

Une fois que les gradients d'altération anthropique ont été sélectionnés, la réponse des communautés floristiques à chacun de ces gradients a été analysée par la procédure TITAN et 11 listes de taxons d'alerte ont été obtenues (

Le nombre de taxons d'alerte finalement retenus varie entre 3 et 28 selon les paramètres.

Table 3). En fonction des limites du recul-données, l'**intervention d'expertise** a dans un 2^{ème} temps permis de rajouter (ou de retirer, dans un seul cas) certains taxons à certaines listes par expertise, en augmentant par exemple le seuil appliqué aux taxons z+ de TITAN après une première calibration de l'indice afin d'en améliorer ses performances, en accord avec les retours d'experts du contexte local.

Le nombre de taxons d'alerte finalement retenus varie entre 3 et 28 selon les paramètres.

Table 3 : Listes de taxons d'alerte issus de TITAN correspondant à chaque paramètre

Paramètre	Nombre de taxons d'alerte	Taxons d'alerte
Minéralisation	14	ENJV, ENVZ, ESOU, LU15, NUA3, SL03, SLTA, CE19, E251, NOBT, BR22, NCPL, ENVZ, NUA1
COT	17	CBPA, E19C, ECF1, EO03, EU03,EU10, FMAG, GKOB, GO07, NI07,NPA4, PRUM, SL03, SPLC, SEM2, FU01, ESLE
DBO ₅	13	ADEG, ENCS,EO03, EOMI, EPA1, IN12, IN15, NA11, NBR1, NPA4, NUA2, E321, NI54
DCO	13	CBPA, CO03, EMIN, ENCS, EO03, FUDO, GKOB, LU07, LU15, NPA4, SGUY, E314, E386
MES	28	BPAX, BR10, BR12, BR8A, EIDS, EP05, FU11, FU14, GO37, GO54, GPA6, GPAS, GYRE, KO01,LU12, LU13, NA28, NESC, NI15, NI30, NI32, NIGR, NISC, NPA4, SEM2, SU04, NFAS, GO66, NBR1
NH ₄ ⁺	3	FUDO, NI14, NPA4
NKj	12	ADMA, BNEO, BR05, BR12,BR8A, E255, FU11, FU14, GO19, LU03, NPA4, SP03
NO ₃ ⁻	17	BR12, DI04, E198, E435, EN11, GO19, GPA2, GPA4, GPAS, NA10, NI30, NPA2, E299, E396, EU59, EBOT
PO ₄ ³⁻	8	EO03, GNTP, LU07, NUSP, SU04, NESC, GYRE, NI01
PTOT	12	AU05, E331, GO38, IN72, NA10, NU17, SEM2,SP04, NESC, GYRE, LU02, NLGC
% SAT O ₂	14	E105, E11A, E186, E41A, EBO5, EMIN, ETGB, FMAG, KO01, NBR1, NCLA, NI07, PRUM, DCOT

* Ajustements par expertise après un premier calcul de l'indice

6.4. Phase C : Calcul des métriques élémentaires et agrégation

À partir des listes de taxons d’alerte, la formulation du calcul d’une métrique correspondant à chacun de ces 11 paramètres a été conceptualisée comme un ratio entre le nombre de taxons d’alerte pour le paramètre considéré et le nombre total de taxons indiciels du relevé, contribuant donc à l’indice même s’ils ne sont pas taxons d’alerte. Pour exemple, la métrique DBO5 sur un site donné est calculé de la manière suivante :

$$\text{Métrique}_{\text{DBO5}} = 1 - \left(\frac{\sum \text{taxons d'alerte}_{\text{DBO5}}}{\sum \text{taxons indiciels}} \right)$$

Ainsi, plus le résultat de la métrique est proche de 0, plus il y a de taxons d’alerte dans l’assemblage et plus le signal d’altération pour le paramètre donné est fort. A l’inverse, une métrique de 1 signifie qu’il n’y a aucun taxon d’alerte, et donc aucun signal d’altération.

Une fois que les 11 métriques sont calculées, celles-ci vont ensuite être agrégées par famille d’altération selon la règle du “One Out All Out” (Figure 29). Par cette approche, une information sur la matière organique qui n’aurait pas été capturée par la métrique de DCO va être rattrapée par celle de DBO₅ ou de COT, vu que c’est le résultat de la métrique marquant la plus forte altération biologique qui sera retenue pour la métrique “Matière organique”.

Si une approche par valeur moyenne avait été retenue, on considérerait alors qu’une valeur faible de métrique pourrait être compensée par une valeur haute d’une autre métrique de la même famille d’altérations. Cette façon de faire modulerait et atténuerait beaucoup le diagnostic d’altération et ferait perdre de la sensibilité à la méthode dans un contexte tel que celui de la Guyane. En effet, ce DOM est peu peuplé et a une occupation du sol quasi-naturelle sur la grande majorité des espaces. De ce fait, il n’est donc que modérément exposé aux pressions anthropiques dans la plupart des situations (hors contextes particuliers comme celui des agglomérations du littoral Nord et de certains sous-bassins agricoles). Il faut donc pouvoir déceler de façon précoce l’effet d’altérations, qui interviennent souvent dans un contexte très dilutif de bassin versant peu anthropisé. D’autre part, une catégorie d’altération anthropique donnée ne sera pas forcément et automatiquement impactée par la totalité des descripteurs abiotiques élémentaires que nous avons choisis pour la représenter, ce qui n’empêche pas qu’un seul descripteur abiotique puisse exercer un impact anthropique fort via la métrique biotique considérée. Sans que le but soit de surévaluer les effets de l’anthropisation, le principe du « One out-All out » est donc le plus adapté à une mesure sensible d’altération dans un contexte naturel tel que celui de la Guyane Française.

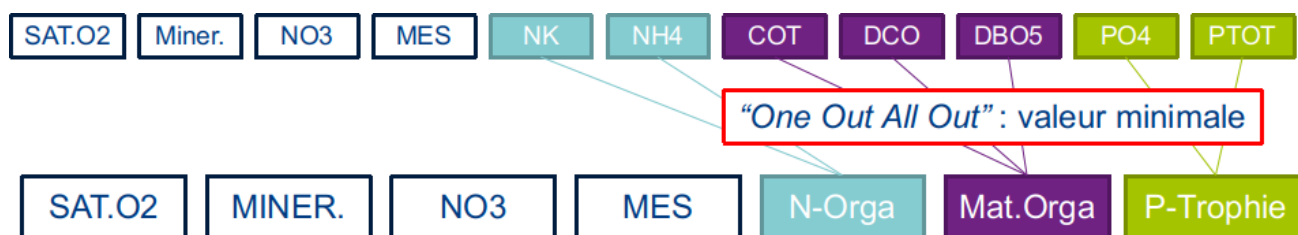


Figure 29 : Agrégation des 11 métriques élémentaires en 7 métriques plus globales par sélection de la valeur minimale, ou "One Out All Out"

6.5. Phase D : Transformation en EQR

Afin de correspondre aux exigences de la directive cadre sur l'eau (DCE), les résultats de bioindication doivent rendre compte d'un écart par rapport à une situation de référence régionale.

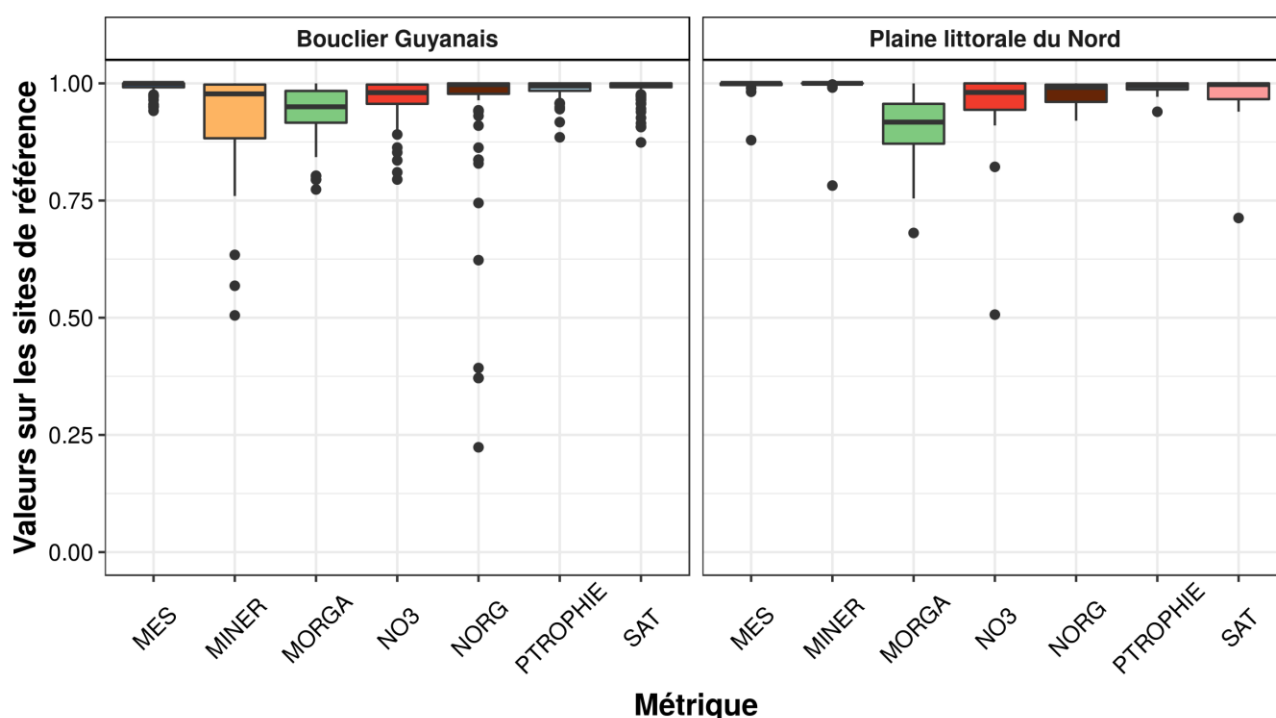
Dans notre cas, l'approche biotypologique n'ayant pas pu dégager une nouvelle régionalisation plus convaincante que la trame initiale des HER, les HER de niveau 1 (soit Bouclier Guyanais et Plaine littorale du nord) ont été sélectionnées comme régions de référence pour le calcul de ratios de qualité écologique (EQR).

La notion d'écart à la référence a donc été introduite dès cette phase de calcul d'EQR de métriques afin d'identifier des références pour chacune des 7 métriques individuelles de réponse biologique, ce qui apporte des informations importantes lors du diagnostic qui accompagne le calcul de l'indice.

Ainsi, à ce stade et pour chacune des 7 métriques d'altération, un EQR de métrique a été calculé (ratio entre la valeur obtenue par la métrique et la valeur de référence pour cette métrique dans l'HER concernée). Pour exemple, l'EQR de la DBO₅ pour une station située dans l'HER "Bouclier Guyanais" est calculé de la manière suivante :

$$EQR_{DBO_5} = \text{Métrique}_{DBO_5} / \text{REF}_{\text{Bouclier Guyanais}}$$

La valeur de référence pour chaque métrique dans chaque HER a été définie, conformément à ce qui est habituellement fait, par la médiane de la distribution de la métrique dans les sites de référence (Figure 30).



HER	MES	MINER	MORGA	NO3	NORG	PTROPHIE	SAT
Plaine littorale du nord	1,00	1,00	0,92	0,98	0,99	0,99	1,00
Bouclier Guyanais	1,00	0,98	0,95	0,98	1,00	0,99	1,00

Figure 30 : Distribution boxplot de chacune des métriques globales d'anthropisation dans chaque HER. La valeur de référence pour la métrique, qui correspond à la médiane (trait noir à l'intérieur de chaque boîte), est ensuite répertoriée dans le tableau récapitulatif

Dans les cas où le résultat de ce ratio serait supérieur à 1 (ce qui, par construction, est techniquement possible pour 50% des relevés de référence), celui-ci est écrêté à 1 afin de rester dans une échelle cohérente.

6.6. Phase E : Agrégation finale par moyenne et normalisation

Enfin, la dernière étape nécessaire au calcul de l'indice passe par le calcul de la moyenne des 7 EQR calculés précédemment. Le calcul d'une moyenne fera qu'une métrique faible va certes être compensée par une métrique plus forte, mais le classement relatif entre sites sera quand même respecté, étant donné que la moyenne sera influencée par cette valeur basse. Contrairement à une nouvelle règle "One Out All Out", si deux métriques présentent une valeur faible, la moyenne va en tenir compte et donnera une valeur finale plus faible que si une seule des métriques était déclassante.

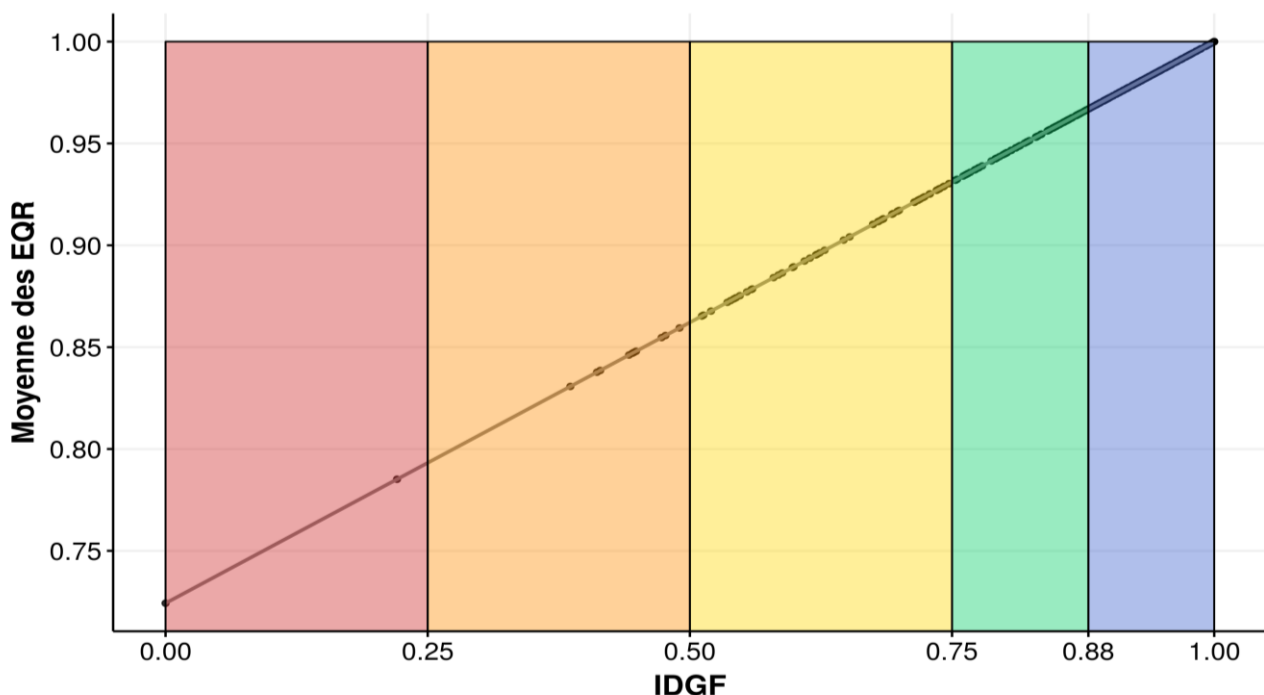


Figure 31 : Re-normalisation de la moyenne des 7 EQR sur [0;1] pour les 327 relevés diatomiques considérés et superposition des seuils de classes de qualité écologique

Néanmoins, l'échelle actuelle des notes d'IDGF obtenues ne varie qu'entre 0.7 et 1 du fait de la compression liée à la moyenne. Afin d'obtenir une évaluation de l'état écologique sensible et gradée sur toute l'échelle des possibles, en correspondance avec les impératifs de la DCE, la valeur moyenne des 7 EQR doit être re-normée sur une échelle variant entre 0 et 1 (Figure 31). Sur l'hypothèse que les meilleures comme les pires situations possibles ont déjà pu être observées, globalement, dans le large éventail de situations couvert par le jeu de données d'étude (hypothèse qui a également été utilisée, par exemple, pour le calcul des EQR pour l'IBD), la moyenne des EQR est re-normée sur cette échelle plus pertinente via l'équation suivante :

$$\text{IDGF} = (3.63 \times \text{EQR}_{\text{moy}}) - 2.63$$

Pour le prochain Plan de Gestion, dans le cas où une situation encore pire que celle utilisée dans notre jeu de construction serait identifiée, l'IDGF négatif qui en serait issu sera écrêté à 0, ce qui reste une note alarmante caractérisant un site en très mauvais état écologique.

Le recul temporel acquis est encore limité, notamment sur des sites potentiellement très pollués de type RCO ou Contrôle d'Enquête. S'il s'avérait à l'usage que le cas de figure pré-évoqué intervienne de façon trop répétitive, il serait alors possible de recalibrer le dispositif sur des bases plus réalistes. Sur constat des plus basses valeurs atteintes et sur décision collective, l'adaptation consisterait à abaisser au niveau le plus adéquat la note minimale atteignable (valeur la plus basse de l'axe des y de la Figure 20, correspondant au zéro de l'échelle d'EQR sur l'axe des x).

La dernière étape du processus, à savoir la définition des seuils de classement d'état écologique sur la base de ce nouvel indice, a été menée en deux temps. Le premier seuil, séparant les classes "Très bon état" et "Bon état" a été défini par le percentile 25 de l'IDGF sur les sites de référence, soit 0,88.

Les seuils suivants ont ensuite été adaptés via plusieurs scénarios présentés aux experts locaux. Les seuils finalement définis après cette expertise sont 0.75, 0.50 et 0.25. Puisque la notion d'écart à la référence a été introduite dès la phase C impliquant les 7 métriques constitutives de l'IDGF et puisque l'indice final est la moyenne de ces EQR, la classification d'Etat résultant de la valeur de l'IDGF est la même dans les deux HER (Table 4).

Table 4 : Grille définissant la classe de qualité d'eau selon la note de l'IDGF selon l'HER

HER	Valeur de l'IDGF	Classe d'état
Plaine littorale du nord	≥ 0.88	Très bon
	≥ 0.75	Bon
	≥ 0.50	Moyen
	≥ 0.25	Médiocre
	< 0.25	Mauvais

Bouclier Guyanais	≥ 0.88	Très bon
	≥ 0.75	Bon
	≥ 0.50	Moyen
	≥ 0.25	Médiocre
	< 0.25	Mauvais

6.7. Robustesse de l'indice

L'introduction d'une notion de robustesse accompagnant le calcul de l'indice semble nécessaire dans le contexte actuel des connaissances encore sensiblement évolutives sur la flore guyanaise, ainsi que du fait de la particularité des gradients abiotiques avec une influence haline variable, selon le climat et les saisons, sur la zone la plus concernée en matière de pressions anthropiques (à savoir la zone littorale Nord).

En effet, de nombreuses espèces de diatomées des eaux douces de Guyane sont encore à découvrir et il n'est pas impossible que certaines d'entre-elles, actuellement rares et non indiciaires, voire nouvellement identifiées à l'avenir, soient trouvées en forte abondance dans de futurs relevés. Ces **flores encore peu connues** pourraient diminuer fortement la proportion relative de taxons indiciaires dans le relevé concerné et **affaiblir ainsi l'assise du calcul indiciaire** par rapport à la composition complète du relevé, entraînant aussi une modification aléatoire du ratio entre taxons d'alerte et taxons indiciaires.

Dans un tel cas de figure, la participation trop faible de taxons indiciaires aux taxons totaux d'un relevé donné constituerait le signe d'un décalage biogéographique important du relevé par rapport aux situations déjà connues et prises en compte au moment de la conception de l'IDGF. Il s'agirait donc d'une **situation encore peu valide d'application de l'indice** par rapport à son jeu de données d'apprentissage (d'où un affaiblissement de la confiance que l'on peut placer dans le résultat d'un tel calcul indiciaire).

Ce cas de figure est également susceptible de se présenter sur des masses d'eau à la frontière fluctuante entre eaux douces et eaux sous influence littorale. Selon le niveau réel d'influence haline exercé au cours de l'épisode de croissance du biofilm, les assemblages de telles stations pourraient être nettement marqués par des **taxons typiques de situations estuariennes et/ou marines**.

En vue de détecter et de rendre compte de ces problèmes auprès de l'opérateur ou du gestionnaire produisant ou devant utiliser un calcul d'indice, un seuillage minimal de faisabilité et une indication sur la robustesse de l'indice ont été élaborés sur la base de la **proportion de taxons indiciaires dans l'assemblage**, gérant aussi de manière sous-jacente le cas des relevés sous influence de taxons halins (Figure 32) :

- En **situation normale** (c'est-à-dire au-delà de 90% de valves indiciaires), le calcul indiciaire est considéré comme **fiable**.
- Entre 75 et 90% de valves indiciaires, la **fiabilité du calcul indiciaire** sera qualifiée de **réduite**.

- Enfin, en dessous de 75% de valves indicielles (soit 300 valves sur 400 dans la pratique antérieure de Guyane, ou 375 valves sur 500 dans la pratique normative actualisée), le calcul de l'indice est considéré comme **non utilisable**.

Les deux derniers cas de figure listés provoquent un affaiblissement, voire une annulation de la confiance que l'on peut accorder au résultat indiciel.

Dans les cas où ce type de problème serait rencontré sur des sites exposés à des **entrées occasionnelles d'influences halines**, une suggestion permettant de restaurer cette confiance tout en étendant un peu les limites de validité de la méthode d'évaluation IDGF vers la zone aval des cours d'eau pourrait être d'**augmenter à vue la pression de comptage** afin de dépasser ces effectifs-seuils.

Dans un tel cas, une solution opérationnelle (à préconiser dans le futur guide-méthode) pourrait être d'arrêter le comptage lorsqu'on atteint 450 valves indicielles cumulées (bonne fiabilité de l'IDGF) ou à défaut, 375 (fiabilité réduite), **sans dépasser 1000 valves totales comptées**.

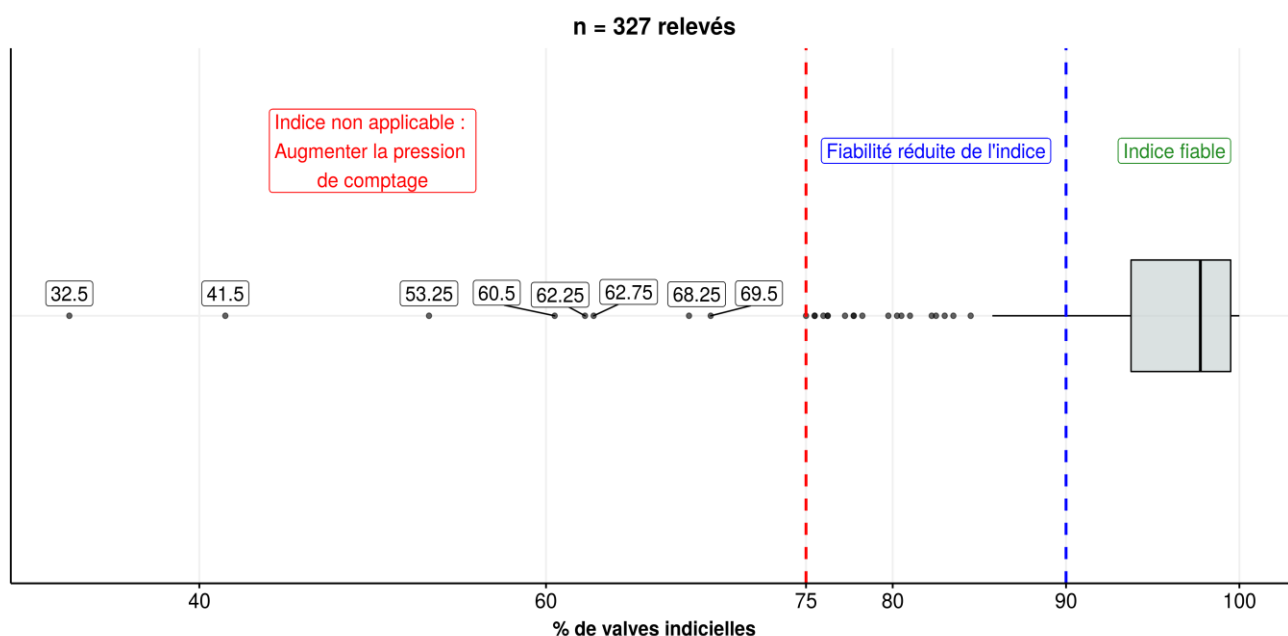


Figure 32 : Nombre de valves indicielles dénombrées dans chacun des 327 relevés mobilisés pour l'élaboration de l'indice, avec superposition des recommandations basées sur différents seuils numériques

Dans le cadre de notre étude (cf. Figure 32), 8 relevés diatomiques présentaient moins de 75% de taxons indiciels, n'autorisant pas une évaluation d'état écologique présentant le minimum de robustesse nécessaire.

De ce fait, les résultats de statistique d'état écologique présentés au chapitre suivant sont basés sur les 319 relevés diatomiques restants.

7. Évaluation de l'état écologique des cours d'eau de Guyane par l'IDGF et comparaison avec l'IPS

7.1. Cartographies et statistiques globales

Les résultats synthétiques de classification écologique obtenus sur tous les relevés du jeu de données d'étude présentant un calcul d'IDGF jugé suffisamment fiable sont présentés en Figure 33 ci-dessous.

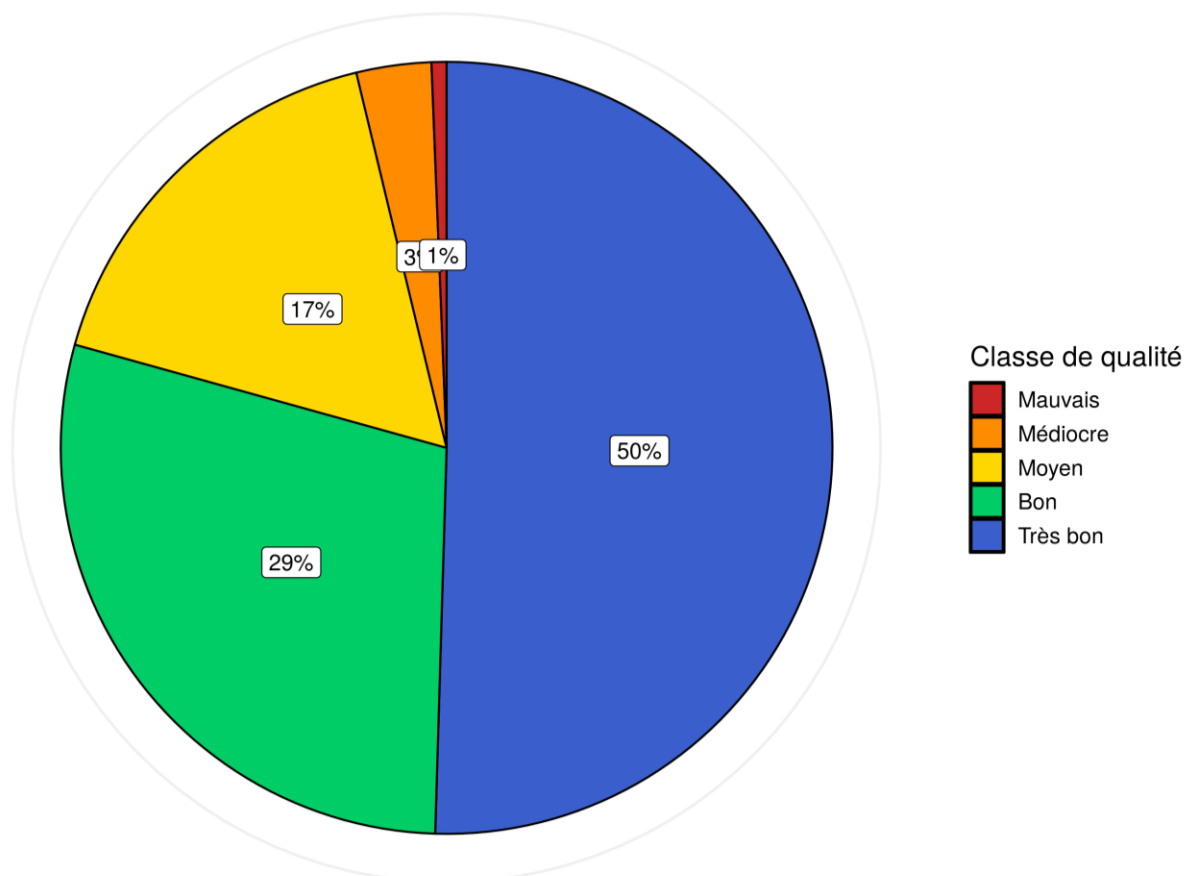


Figure 33 : Résultats globaux de la classification d'état écologique issue de l'IDGF sur les 319 relevés diatomiques mobilisés entre 2008 et 2017

L'IDGF permet de classer en "Très Bon Etat" la moitié (50%) des 319 relevés mobilisés dans le cadre de cette statistique (8 relevés ayant fait l'objet d'un calcul indiciel non valide dans l'état de par leur nombre de taxons indiciels trop faible). Le cumul avec le "Bon Etat" élève cette proportion à 79%.

Par rapport à la situation générale de France métropolitaine, cette statistique globale traduit donc une situation locale des cours d'eau de Guyane nettement plus favorable sur le plan de leur état écologique (en métropole, à peine 50 % sont en Bon Etat).

Ce résultat est logique compte-tenu de la faible densité locale d'habitants et du niveau général nettement plus faible des pressions anthropiques exercées (même si des situations locales sous forte influence anthropique peuvent aussi être rencontrées dans ce DOM).

Dans le jeu de données d'étude, 21% des relevés traduiraient une situation "préoccupante" pour les gestionnaires, à savoir un état écologique (ici diatomique) inférieur au Bon Etat, donc nécessitant obligatoirement des actions de gestion corrective pour la restauration du Bon Etat.

Il convient à ce niveau de souligner trois aspects importants permettant de relativiser la portée des résultats présentés dans la figure précédente, ainsi que la signification qui peut lui être réellement accordée en lien plus étroit avec l'application de la DCE.

1) Dans les faits, l'application de la DCE ne se limite pas seulement à viser le classement en Bon Etat, mais ambitionne aussi de **veiller à la non-dégradation d'état de sites actuellement mieux classés que cette limite**, afin d'éviter de subir une évolution négative d'Etat Ecologique dans le futur.

2) La statistique d'état présentée résume l'information de classement diatomique selon le **résultat de l'IDGF au relevé**, sur **l'assise maximale de** relevés locaux disponibles et mobilisables pour la mise au point initiale de l'indice. La statistique présentée recouvre donc **largement plus que les seuls relevés du RCS**, réseau spécifiquement dédié au suivi représentatif de l'Etat Ecologique sur un territoire biogéographique donné et au rapportage périodique d'Etat auprès de l'Union Européenne. En particulier, une grande partie des 21% de relevés évalués en-dessous du Bon Etat ont été collectés dans le cadre de campagnes de collecte concernant les réseaux complémentaires RC et RCO

Dans la mesure ou toute l'ampleur possible des effets de gradients anthropiques représentés en Guyane est nécessaire pour pouvoir mettre au point un indice sensible et robuste dans ce contexte (et pas seulement les résultats du RCS, qui ne présenteraient pas des gradients suffisants pour ce faire...), notre jeu de données d'étude a en effet tiré parti de **tous les doublets de relevés complets disponibles sur ce territoire**, incluant notamment depuis des situations de référence jusqu'aux situations les plus altérées qu'il est possible de rencontrer localement, produits dans le cadre des différents réseaux institutionnels, ainsi que dans des études particulières.

Le détail de l'ensemble de ces classifications d'Etat Ecologique au relevé est consultable en **Annexe 4**.

3) Au sens de la DCE et de son Arrêté national d'application (dans notre cas, Arrêté Evaluation du 27 juillet 2015), l'état écologique de sites, qui peut être évalué de façon variable selon les épisodes temporels, est établi à l'échelle moyennée de demi-plans de gestion, **en intégrant et en moyennant les états obtenus sur un pas de temps de 3 ans**. Cette pratique tempère le résultat et réduit la dynamique des possibles par rapport à une figuration au relevé telle que présentée dans la Figure 33 ou dans les 2 figures suivantes.

La Figure 34 présente la projection cartographique, par classe de qualité écologique, des résultats de campagnes annuelles de prélèvements diatomiques effectuées de 2008 à 2017, tous réseaux confondus.

Classe de qualité ■ Très bon ■ Bon ■ Moyen ■ Médiocre ■ Mauvais

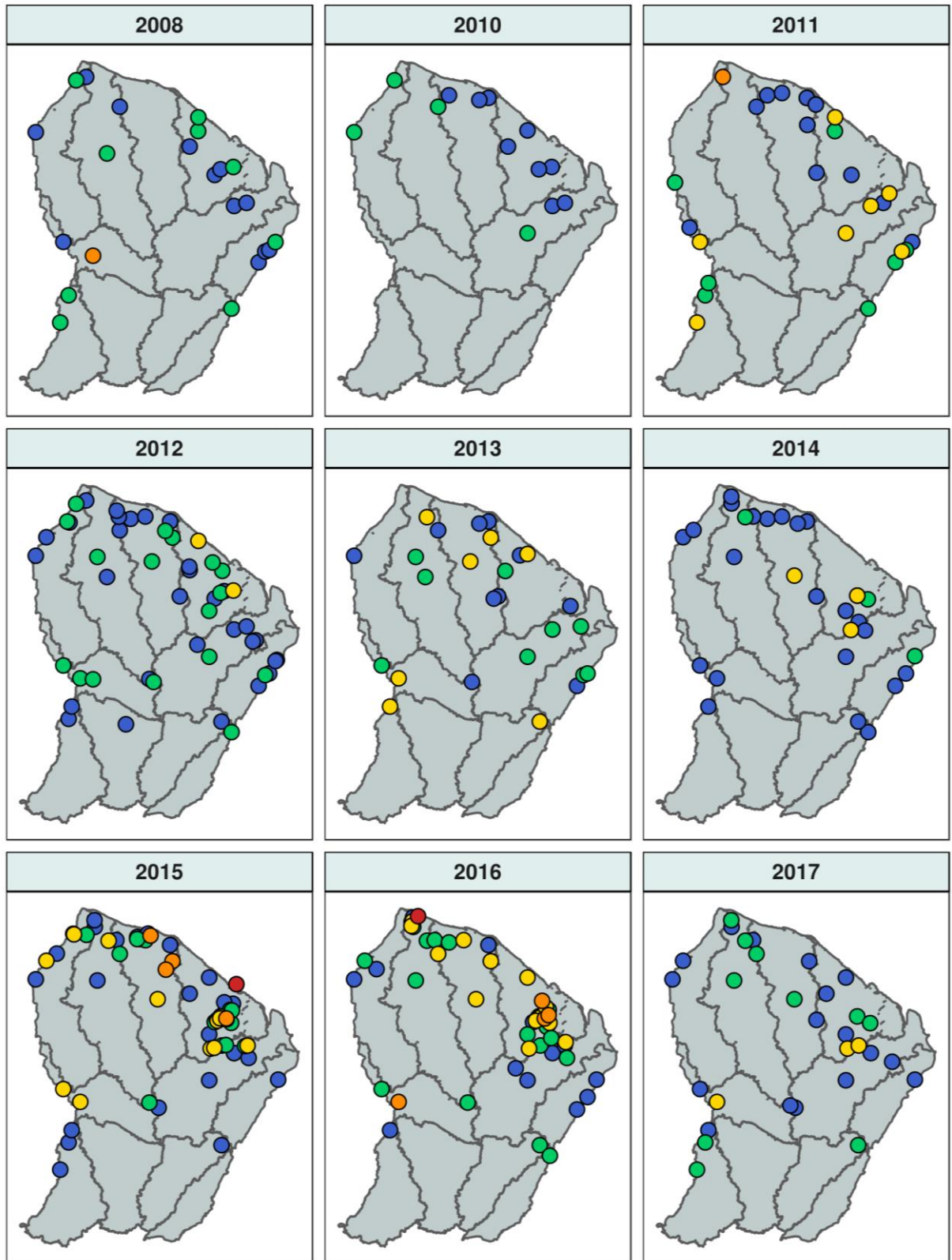


Figure 34 : Cartographie des classifications écologiques issues de l'IDGF pour chacune des 9 années de données mobilisées.

La Figure 35 présente, sur la même base, les statistiques d'Etat Diatomique obtenues par campagne annuelle de prélèvements diatomiques, tous réseaux confondus (années 2008 à 2017).

Proportions des classes de qualité selon l'IDGF

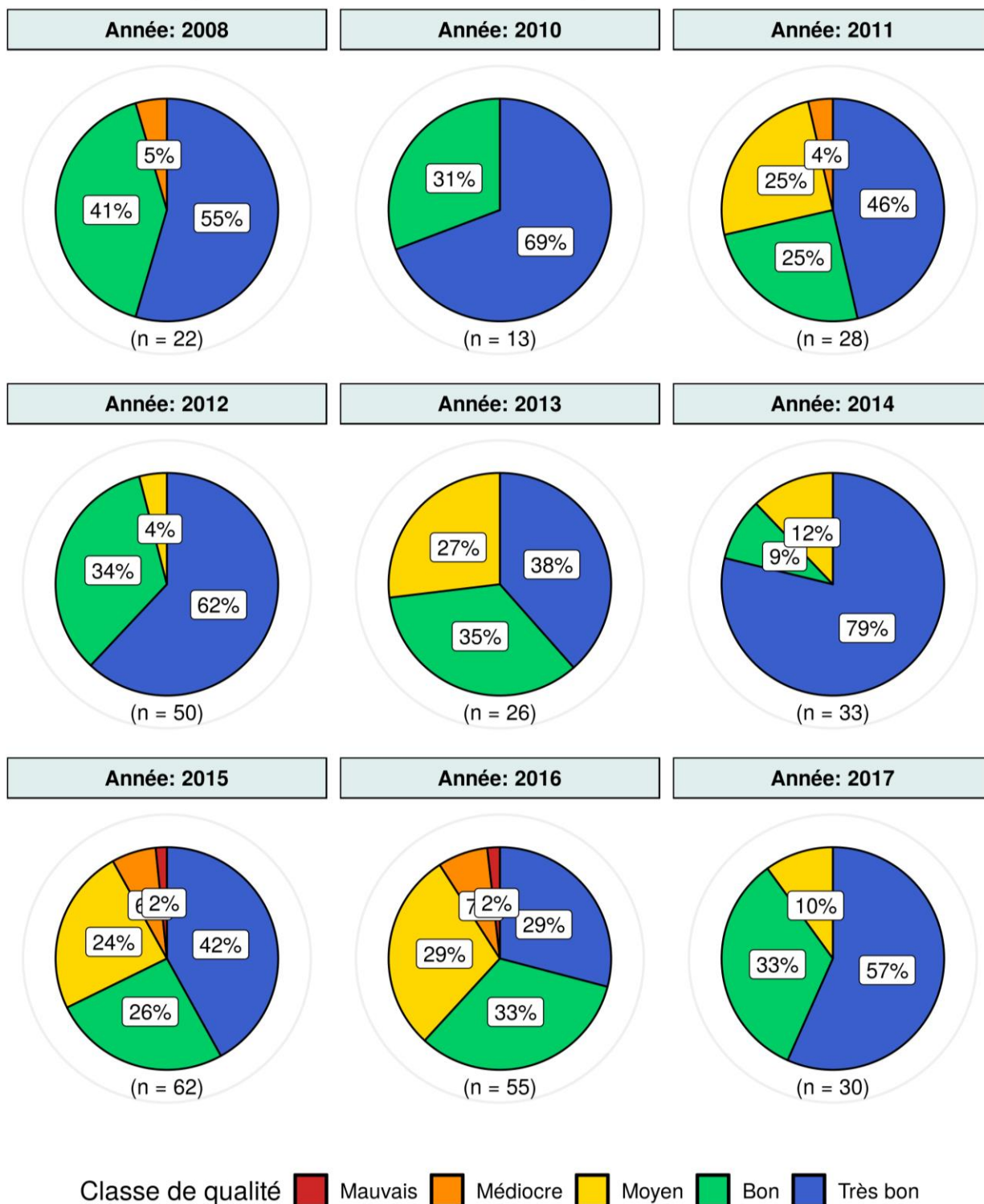


Figure 35 : Détail des proportions des classifications écologiques issues de l'IDGF pour chacune des 9 années de données mobilisées.

On peut en particulier remarquer que les années 2015 et 2016 se distinguent significativement des années les plus habituelles, à la fois par le **nombre plus important de sites suivis** (respectivement 62 et 55 relevés) et par une **contribution plus importante de sites en état diatomique dégradé**. En effet, la plus grande partie des 21% de relevés évalués en-dessous du Bon Etat au cours de toute cette étude (cf. Figure 33) a été collectée dans le cadre des réseaux complémentaires RC et RCO, dont le fonctionnement n'a respectivement été activé qu'au cours des 2 années précitées.

Malgré leur fonctionnement très occasionnel sur la période de portée de l'étude, la présence des relevés de ces réseaux plutôt dédiés à la **surveillance rapprochée de sites altérés à très altérés** a constitué un apport particulièrement appréciable, et même complètement indispensable pour la réussite d'une telle démarche de création d'un nouvel outil indiciel dédié à une zone biogéographique très particulière (ici, démarche de création de l'IDGF pour la Guyane Française). Il sera donc important de continuer de capitaliser de bonnes données de détermination d'assemblages diatomiques sur de tels réseaux à l'avenir, afin d'aider à l'amélioration et à l'optimisation rapide de la version actuellement délivrée (notamment en termes de révision pertinente et rapide des listes de taxons d'alerte).

On peut aussi remarquer que l'année 2012 a elle aussi permis de produire un nombre plus important de relevés qu'à l'accoutumée (au total, 50 relevés), ce surcroît de données résultant de l'effort accru de collecte de relevés de têtes de bassins acquis dans le cadre de l'étude PME. Les relevés PME ont permis une acquisition accélérée de données sur des flores naturelles de zones amont pouvant le plus souvent tenir lieu de flores naturelles de référence pour le bassin hydrographique considéré. Cette action spécifique a donc permis un renforcement important de l'acquisition de connaissance et de la mission générale d'inventaire sur les flores naturelles d'Amazonie, permettant le repérage de nombreuses nouvelles espèces encore peu connues (donc souvent sous numéro). Sur le plan général et du fait de cette contribution importante des secteurs amont de bassins versants, la statistique annuelle d'état diatomique qui en résulte est à la fois robuste, en fonction de l'effectif élevé de relevés représentés (50), et très bonne sur le plan de la statistique d'Etat (incluant 62 % de TBE).

Ces résultats globaux et par campagne annuelle ont été présentés ici essentiellement à titre informatif et indicatif, tous relevés confondus. Ils contribuent d'une part à illustrer de façon assez démonstrative les performances d'évaluation manifestées par le nouvel IDGF dans un panel large de situations différentes. D'autre part, les harmonisations et les analyses réalisées dans le cadre de cette étude contribuent au stockage historique de tous les relevés déterminés selon un mode suffisamment reproductible, sous la forme : 1) d'**inventaires diatomiques ré-homogénéisés**, 2) de **résultats de calculs indiciels IDGF** et 3) de **classification correspondante d'état diatomique**.

En toute rigueur, l'évaluation rigoureuse d'Etat Ecologique utilisable dans le rapportage Européen d'Etat Ecologique devra être établie à partir d'**intégrations triennales d'état au site** établies sur les stations du RCS.

Au bilan, donc, les différents résultats présentés précédemment illustrent bien les aptitudes indicielles du nouvel IDGF, qui se révèle à la fois **sensible** (avis confirmés par les experts du contexte local), **dynamique** (l'évaluation annuelle reste conditionnée par le niveau d'impact anthropique subi, forcément variable selon pressions et contexte bio-climatique de l'épisode annuel) et apte à évaluer une **très large gamme d'altérations** (de l'état de référence au bas de la classe de Mauvais Etat).

7.2. Stabilité et fiabilité de l'indice

L'étude de chroniques indicielles sur différentes stations (cf: Figure 36) démontre en général une plutôt bonne stabilité et reproductibilité inter-annuelle de l'indice. Cependant, elle rend aussi compte de différents types de variations annuelles qui restent le lot de toutes les méthodes biologiques.

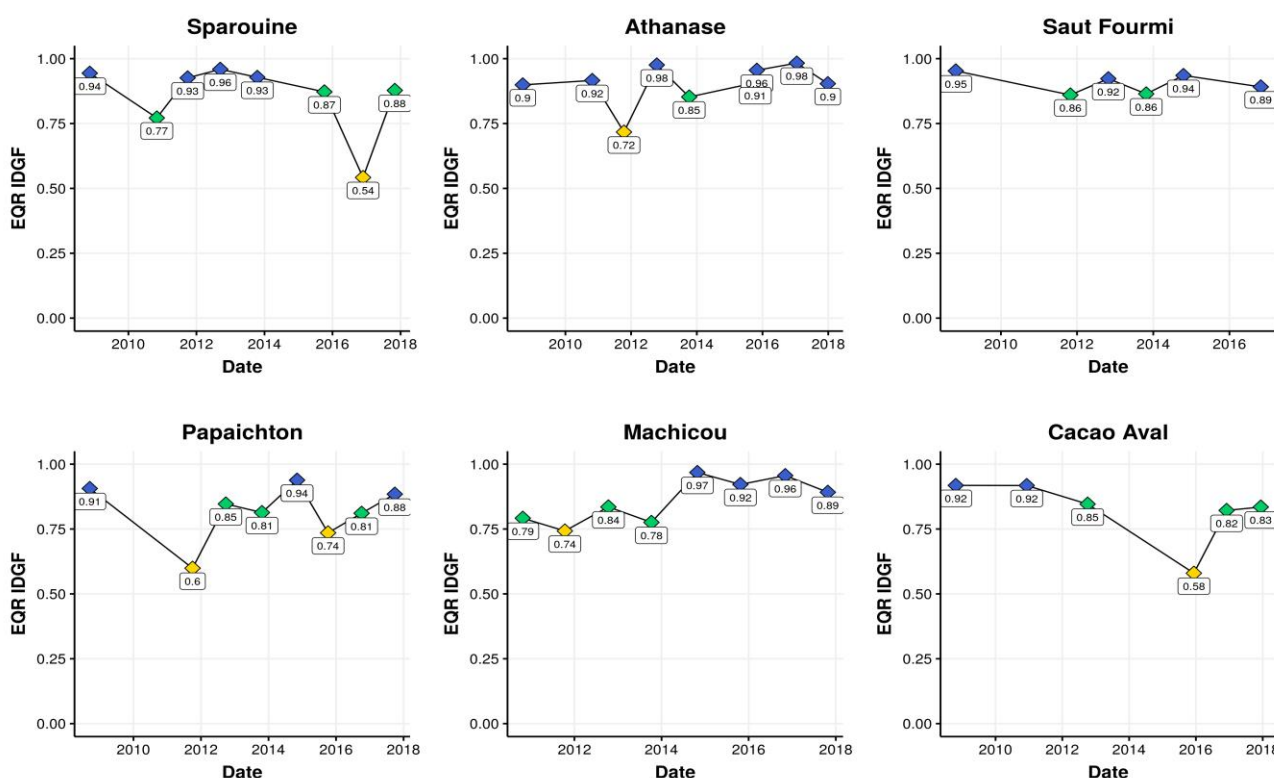


Figure 36 : Exemple de chronique IDGF pour 6 stations. Les couleurs de chaque point correspondent à la classe de qualité correspondante

Sachant que l'impact *in situ* résultant de pratiques ou d'usages anthropiques éventuellement discontinus ou irréguliers n'a aucune raison d'être constant dans le temps, il peut aussi survenir certaines années des variabilités particulières d'origine naturelle (températures, pluviométrie, épisode hydrologique particulier ressenti dans le cours d'eau, du type onde de crue inhabituelle à la saison des prélèvements ou étiage plus prononcé qu'à l'habitude, etc...), qui peuvent contribuer à moduler ou à amplifier l'effet de pressions connues.

De fait, après consultation des experts locaux, les résultats obtenus leur apparaissent très plausibles, et les notes les plus sévères rencontrées peuvent, dans la plupart des cas, s'expliquer par une altération très ponctuelle et localisée à une date proche du prélèvement diatomique, en conjonction éventuelle avec un épisode bio-climatique particulier.

7.3. Appui au diagnostic

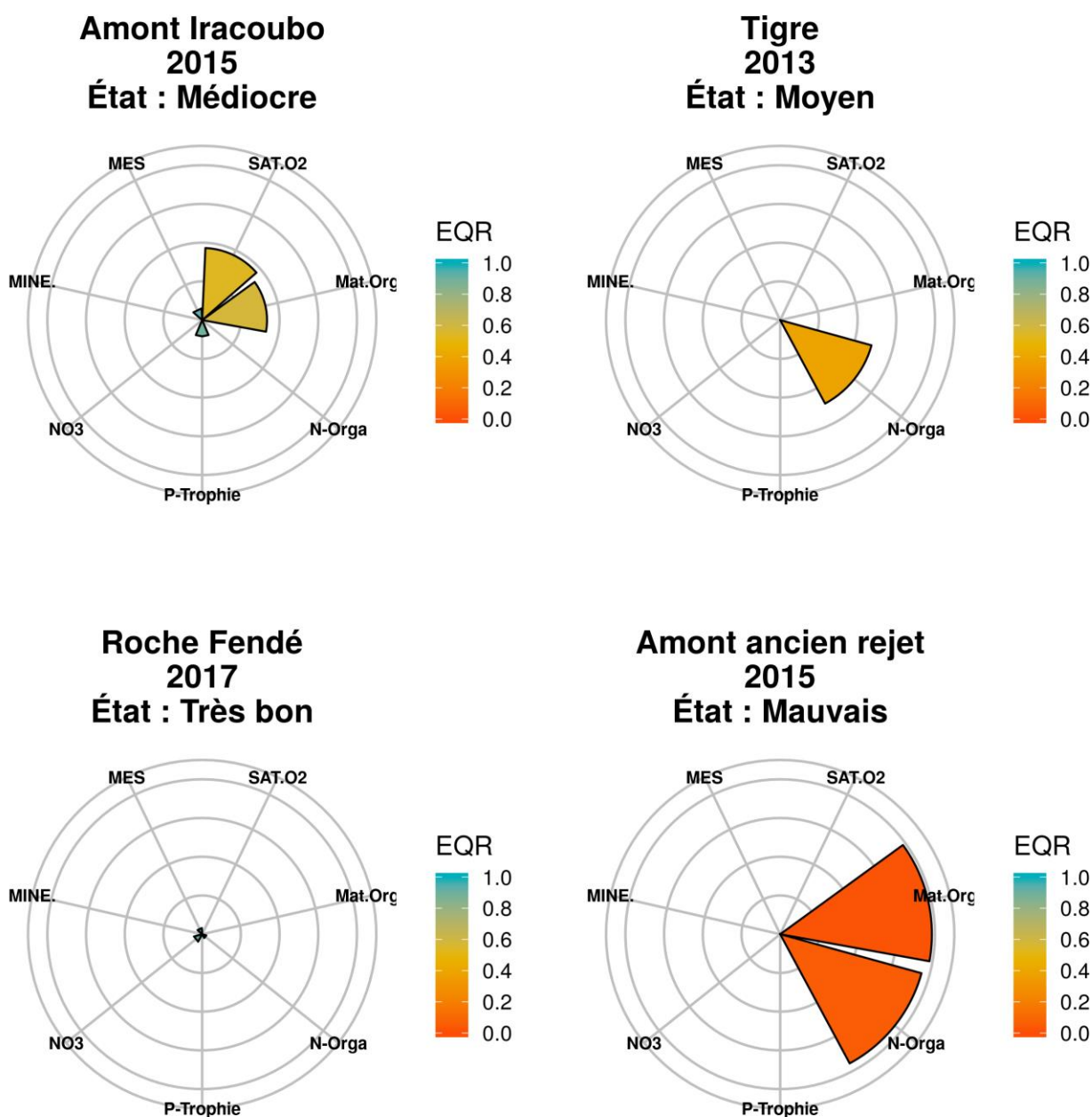


Figure 37 : Exemples de diagrammes de diagnostic obtenus pour 4 relevés diatomiques.

L'IDGF étant multimétrique de par sa construction, il est possible d'extraire la valeur de chaque métrique biotique indépendante (après qu'elle ait été transformée en EQR) afin d'identifier et de quantifier de façon re-normée la ou les sources principales d'altération parmi le panel de métriques biotiques prise en compte dans le cadre de cet indice, et de venir ainsi appuyer le diagnostic d'un site en mauvais état.

Ces résultats peuvent être synthétisés notamment sous la forme de "diagrammes radar" tels qu'actuellement utilisés pour les indices biologiques en métropole (cf. en Figure 37 l'information résumée liée à 4 exemples de relevés [site X date], selon un type de présentation possible).

Afin de rendre directement lisible le résultat de ces diagrammes en termes d'intensité d'altération, l'échelle des polygones est inverse (1 - EQR de la métrique) afin de mieux mettre en lumière les métriques signant une altération, mais la couleur est bien fidèle à l'échelle d'EQR indiquée sur le côté.

Moyennant un peu d'ingénierie de projet, il resterait possible d'adapter plus avant les sorties d'outil de diagnostic et leur présentation, en fonction de l'expression de besoins et/ou de souhaits particuliers manifestés par les gestionnaires locaux.

7.4. Comparaison avec l'IPS

La pertinence d'évaluation du nouvel IDGF a été testée par comparaison avec les résultats fournis par l'indice diatomique jusqu'ici utilisé par défaut en Guyane, à savoir l'IPS. Les analyses qui suivent ont été réalisées sur une base de 245 relevés pour lesquels la comparaison directe IPS-IDGF était possible.

L'examen détaillé de la Figure 40 révèle que les changements les plus fréquents de statut des relevés en termes de classes de qualité concernent les classes de Très Bon Etat et de Bon Etat de l'IPS et de l'IDGF (cf. flux les plus importants de changement de classe de qualité entre ces 2 indices).

S'ils conduisent le plus souvent à une évaluation dégradée entre l'IPS et l'IDGF (l'IDGF procurant le plus souvent une évaluation plus sévère d'1, voire 2 classes), il convient aussi de noter qu'un flux inverse important existe aussi entre classe de TBE et de BE, dans une proportion d'1/3.

On peut en déduire qu'il ne s'agit donc pas uniquement d'un aspect de sévérité différente du niveau de calage des grilles d'évaluation entre les 2 dispositifs inter-comparés (auquel cas le sens du changement de classe serait relativement systématique), mais que ces 2 indices présentent des différences assez importantes de leur performance d'évaluation des classes d'altération, et en particulier des classes de qualité de faible à modérée.

Parmi les 2 indices, c'est de toute évidence l'IDGF qui effectue l'évaluation la plus juste des altérations anthropiques dans le contexte de Guyane.

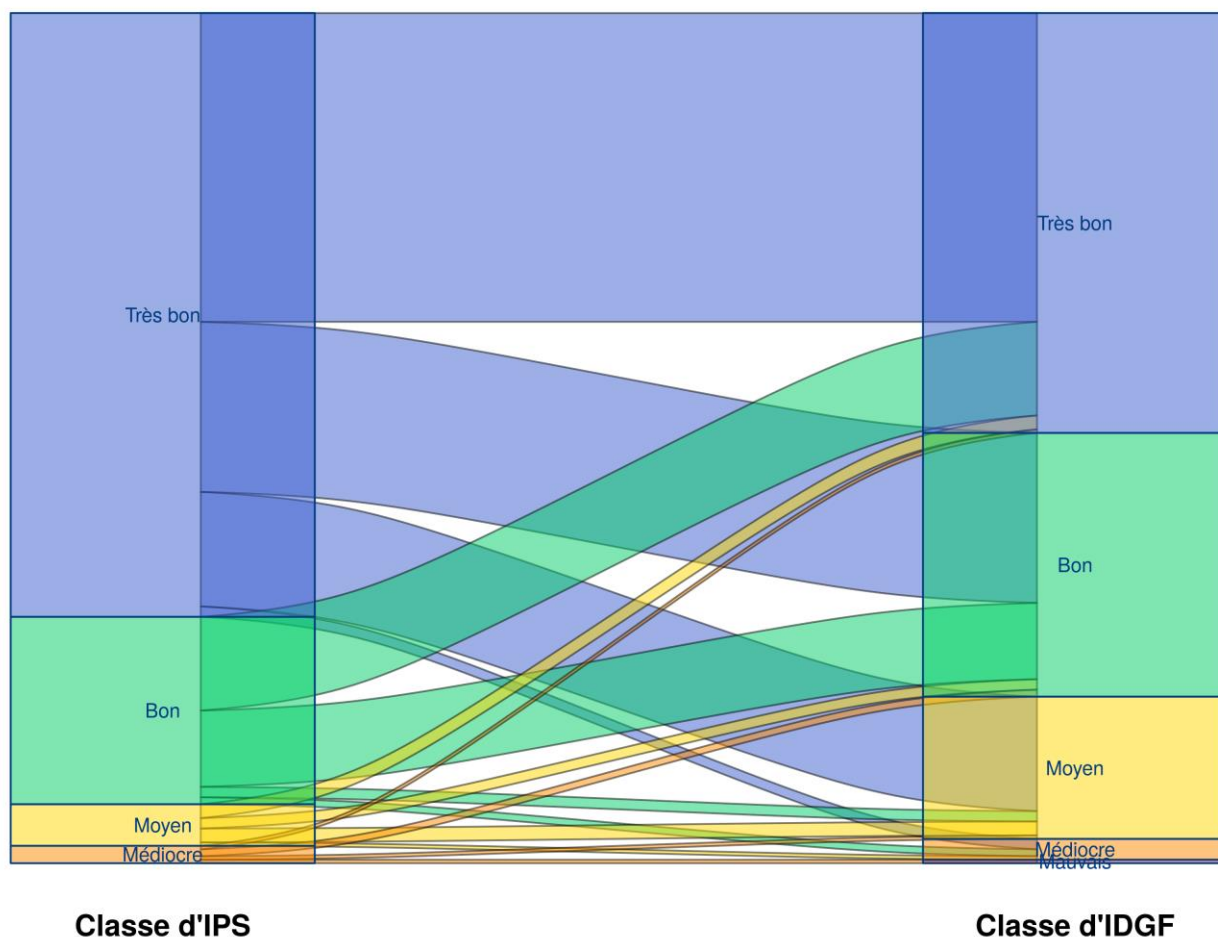


Figure 38 : Diagramme de Sankey représentant les flux de changement de classification entre l'IPS (à gauche) et l'IDGF (à droite). L'épaisseur de chaque flux est proportionnelle au nombre de relevés concernés par chaque changement.

En effet, ce nouvel indice a été calé d'emblée sur une meilleure connaissance et exploitation des propriétés bio-indicatrices des **espèces locales** (*i.e.* uniquement construit sur la base de données biologiques et sur la base de données abiotique locales).

Il en va différemment pour l'IPS qui, d'une part, exploite des profils spécifiques généraux calés dans le contexte mondial et ramène d'autre part au **profil mondial du genre** la plupart des **espèces sous numéro spécifiques à la Guyane** (espèces qui ne pouvaient pas encore avoir de profil spécifique décrit dans l'IPS).

La figure suivante (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) permet d'approfondir la comparaison des résultats d'évaluation procurés par ces 2 indices.

La sous-figure a) montre à nouveau que, sur le plan de la statistique globale d'état sur la période 2008-2017, l'IDGF semble se révéler à la fois **plus sensible** et **plus sévère** que l'IPS. En effet, près de 70% des relevés sont classés en "Très bon état" par l'IPS alors que l'IDGF classe seulement 50% des relevés dans cette catégorie, soit 20% de moins.

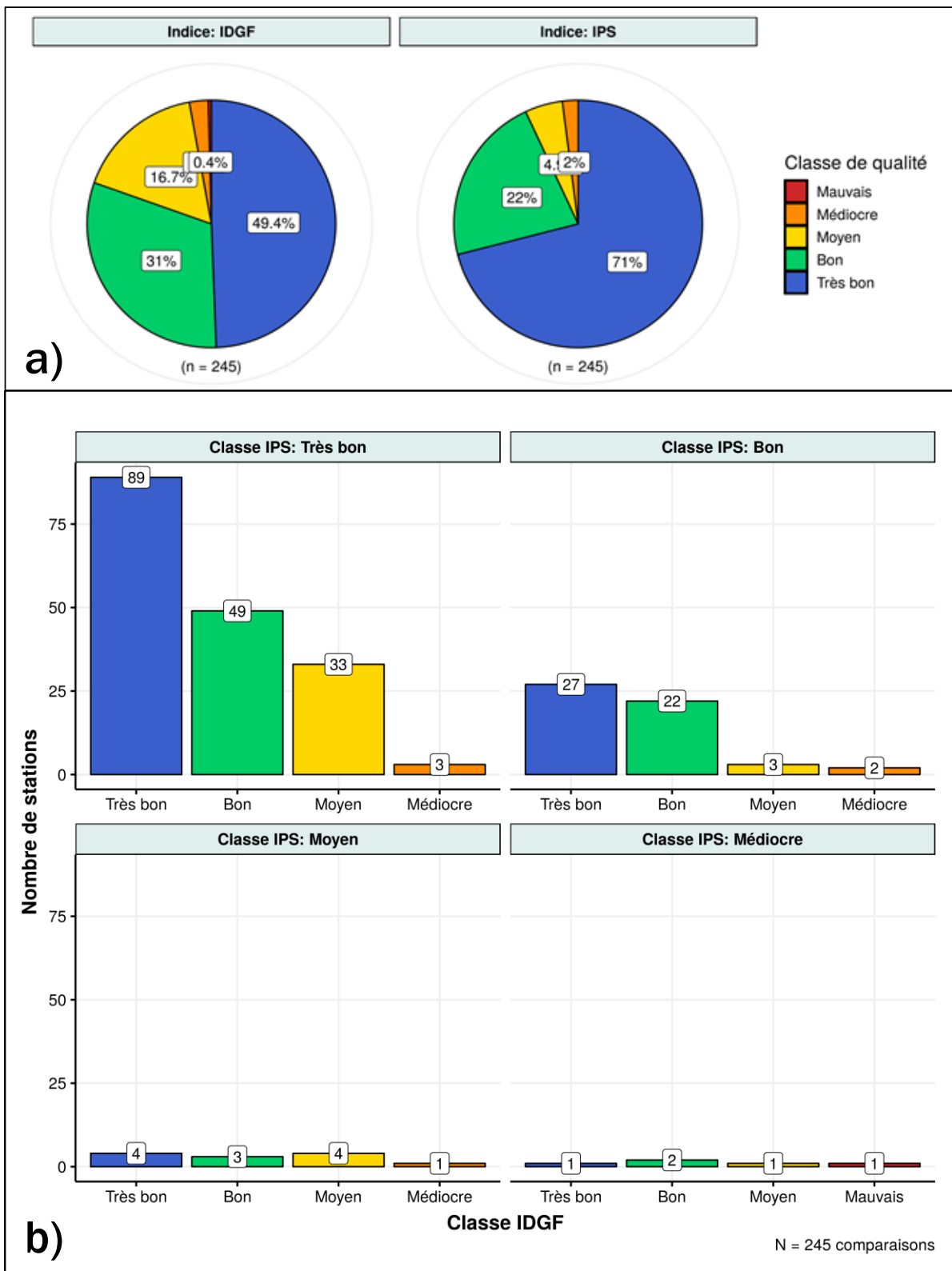


Figure 39 : **a)** Comparaison des statistiques globales de classification écologique entre l'IDGF et l'IPS sur la période 2008-2017. **b)** Ventilation en classes de qualité déterminées par l'IDGF pour chaque classe de qualité initialement déterminée par l'IPS.

Le fait que l'IDGF reconnaisse moins de sites en TBE est donc le signe que cet indice se révèle plus sensible à l'apparition des premiers symptômes d'altération anthropique. Ce constat ne constitue pas une surprise, du fait de sa conception basée sur le repérage des **taxons d'alerte spécifiques à chaque descripteur élémentaire d'altération anthropique**.

En outre, le message donné par cet indice est forcément plus précis et plus fiable que celui de l'IPS qui, basé d'une part sur les profils écologiques mondiaux (*i.e.* non locaux) des taxons nommés à l'espèce, mobilise d'autre part le profil au genre (donc encore plus imprécis) des taxons inconnus de lui et encore identifiés sous numéro en Guyane (soit 80 % des taxons inventoriés sur place).

Un signal qui oriente vers le même type de constat est que l'IDGF classe certains sites dans le plus mauvais état possible ("Mauvais") alors que l'IPS ne classe pas plus bas qu'en "Médiocre".

Une mise en perspective plus fine de la sous-figure 39 b) et de la Figure 40 conduit à constater qu'un écart conséquent de classification (jusqu'à 3 classes d'écart) est parfois observable entre les deux indices.

La sous-figure 39 b) permet notamment de bien constater que les sites classés en état "Très bon" par l'IPS présentent une classification écologique beaucoup plus contrastée lorsqu'ils sont classés par l'IDGF, en glissant pour moitié vers les classes "Bon" et "Moyen".

Comme déjà souligné précédemment (Figure 38), ce sens d'évolution n'est pas systématique. Ainsi, par exemple, 27 sites classés en "Bon" par l'IPS sont classés en "Très bon" par l'IDGF. Ce fait est révélateur que les différences d'évaluation procurées ne sont pas uniquement dues à une différence de sévérité de calage des grilles d'évaluation, mais aussi, quelque part, au contenu différent de ces indices en matière d'interprétation de la réponse biotique des diatomées aux pressions anthropiques.

Des différences parfois importantes de classement existent (par exemple, 3 sites classés en "Très bon" par l'IPS sont classés en "Médiocre" par l'IDGF), l'avis-expert conduisant la plupart du temps à conforter le classement procuré par l'IDGF par rapport à celui délivré par l'IPS.

Ces premiers résultats, qui découlent très vraisemblablement d'une meilleure adaptation biogéographique du nouvel indice, illustrent une **meilleure capacité de discrimination des altérations par l'IDGF**, avec une utilisation élargie de la zone des possibles en matière d'évaluation (du TBE au plus mauvais état rencontré). De plus, ce qui serait le signe assez net d'une **meilleure sensibilité**, l'IDGF semble répondre de façon plus progressive et gradée dans la zone d'installation des premiers effets anthropiques, puis en fonction de la gradation des altérations modérées (passage du TBE au BE, puis du BE à l'EM).

Au bilan, le nouvel indice produit au terme de ce programme (l'IDGF) autorise certainement un diagnostic à la fois **mieux adapté au contexte biogéographique local** et, dans une optique d'Evaluation de l'Etat Ecologique plus fidèle à ce que prône la DCE, **plus pertinent** sur le plan de la **sensibilité de détection** des altérations anthropiques particulières rencontrées sur place.

Sur un plan plus général, l'amélioration des résultats procurée par un tel indice biologique généré **à partir des données locales** (dont des données floristiques très spécifiques à la zone géographique considérée) se vérifie une nouvelle fois de façon plutôt évidente. Le succès de cette entreprise donne donc l'occasion de ré-insister sur un grand principe de base sous-jacent à toute bio-indication pertinente, à savoir l'importance d'utiliser un indice biologique sur sa zone biogéographique de validité afin qu'il puisse donner des résultats robustes sans adaptation particulière (e.g. des listes d'espèces indicielles, de leurs profils spécifiques dans la méthode, etc...).

Sur le plan des représentations cartographiques (cf. Figure 40), les 2 indices (à droite, IPS tel qu'actuellement utilisé en Guyane et à gauche, nouveau dispositif proposé à partir de l'IDGF) procurent une image globale relativement cohérente de l'état écologique.

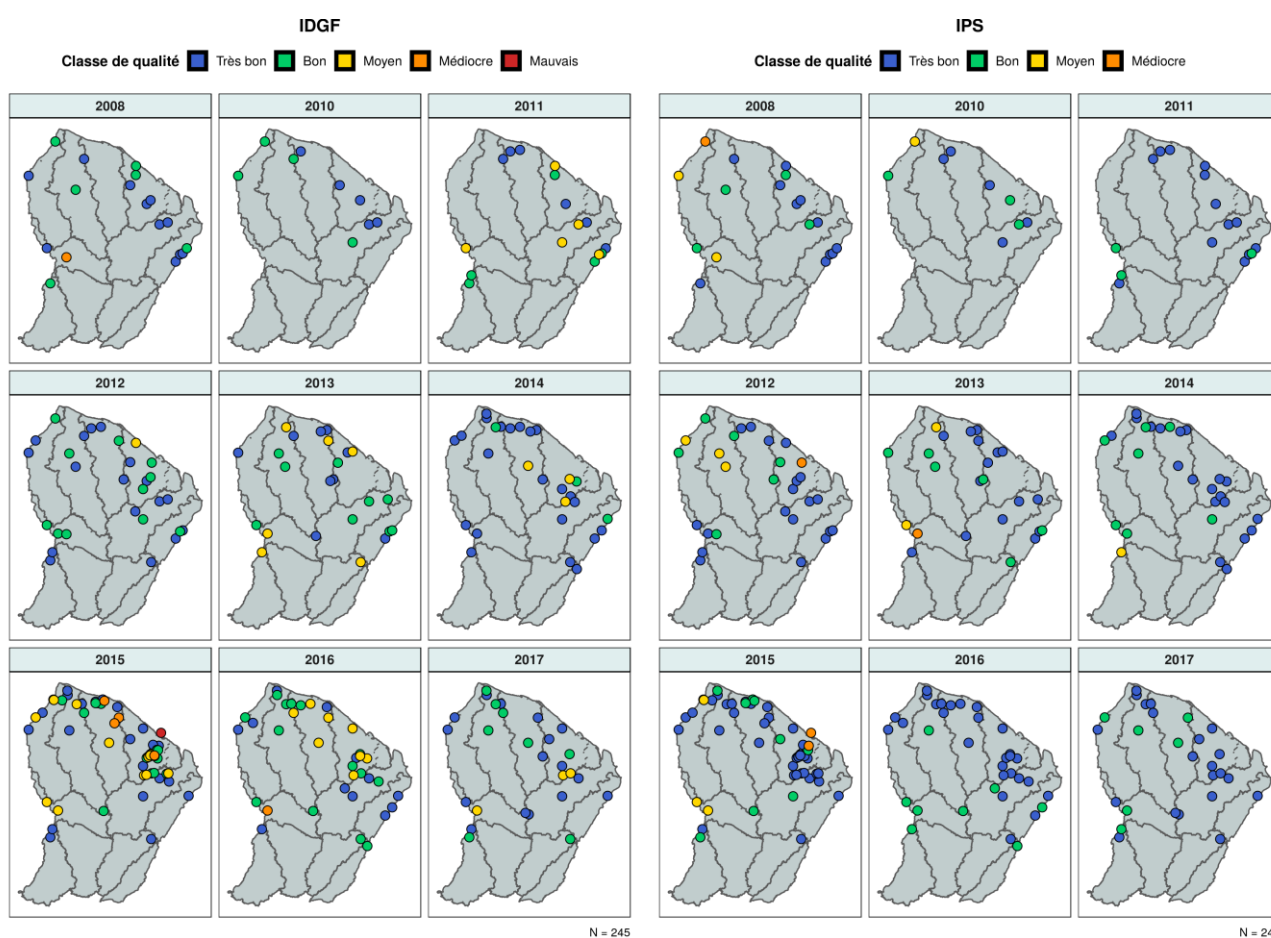


Figure 40 : Cartographie des classes de qualités données à gauche par l'IDGF et à droite par l'IPS pour chaque année

Cependant, au-delà de l'aspect général des cartes représentant une même campagne annuelle selon chacun des 2 systèmes indiciaires, la classification écologique produite peut être assez différente à très différente, la même année, sur des points particuliers.

Les différences les plus évidentes entre les 2 dispositifs sont visibles les années 2015 et 2016, où il a été incorporé un effectif sensible de relevés émanant du RC et du RCO (incorporation de sites plus spécifiquement concernés par des altérations anthropiques particulières). Sur la comparaison de cartes de la même année, Il est en effet patent que les réponses de l'IDGF marquent de façon plus nette et plus sensible les effets de ces altérations dans le contexte local que l'IPS.

Outre la meilleure adaptation biogéographique de ses profils spécifiques, l'autre avantage de l'IDGF tient probablement au meilleur succès, dans ces conditions générales rapidement dilutives des effets de pollution, de la stratégie basée sur une sélection limitée de taxons d'alerte par paramètre abiotique élémentaire, par rapport à l'utilisation de la formule de Zélinka et Marvan qui tiendra compte de toute la composition spécifique de la communauté (d'autant que les espèces sous numéro sont ramenées au profil du genre).

Il en résulte donc une évaluation certainement plus sensible et plus robuste (indice intégrant une meilleure connaissance des flores locales, donc plus adéquat).

8. Discussion & Conclusion

8.1.1. Retour sur l'évaluation de l'état écologique

Dans sa première version, le nouvel indice diatomique guyanais (IDGF) présenté dans ce rapport propose une classification d'une large majorité de relevés d'étude (79%) en bon à très bon état écologique. Ce résultat, bien qu'apparaissant plutôt élevé par rapport à d'autres contextes, notamment celui de la France métropolitaine, est en bonne adéquation avec le contexte local d'étude. En effet, en dépit du développement de l'activité anthropique sur la plaine littorale Nord, la Guyane comporte encore aujourd'hui de nombreuses situations typiques d'une Amazonie pristine aux altérations quasi-inexistantes. Au cours des dernières années, cependant, les activités d'orpaillage sauvage (illégal) se sont multipliées, provoquant des effets visibles sur les cours d'eau (rejets terrigènes, colmatage des substrats, etc...) mais pourtant très difficile à évaluer et à localiser.

Le maillon diatomique étant bien connu par ailleurs pour répondre de façon robuste aux pollutions classiques provoquant un enrichissement en nutriments, la mise en évidence d'altérations liées à l'orpaillage, ainsi que d'autres pressions potentielles plus spécifiques au contexte Guyanais (exploitation forestière, présence de pistes en bord de cours d'eau, etc...), tout en prenant en compte l'autocorrélation particulière entre présence humaine et intrusions halines (contexte du littoral Nord), sont les principaux enjeux locaux spécifiques à bien prendre en compte dans l'élaboration de bioindicateurs guyanais.

Le choix des 11 pressions élémentaires prises en compte dans la construction de l'IDGF permet de couvrir tous les champs d'altérations anthropiques visées, y compris cette liste de paramètres d'altération plus spécifiques au contexte local.

L'IDGF a été comparé aux résultats obtenus sur les mêmes stations aux mêmes dates avec l'indice invertébré IBMG (Dedieu, 2014) calculé pour les seules stations du réseau PME et IBMGII (Dedieu, 2015) élargi à toute la Guyane (hors zone MET). Globalement, l'IDGF est plus sensible pour les stations des petites criques et correspond très bien aux attentes des stations actuellement listées comme références vraies officielles, ainsi que d'autres correspondant visiblement au même statut écologique (Crique Petit-Laussat, Machicou, Saut Alexis, etc...).

De façon cohérente avec ces deux indices, il rend aussi bien compte de l'évolution interannuelle des stations (Athanase, Angoulême), et peut parfois se révéler plus fin et plus en accord avec la réalité du terrain (Crique Cacao, Crique Affluent Bois Bandé).

Sur de nombreuses stations où une activité d'orpaillage est connue mais difficile à contrôler, l'IDGF se montre pertinent en signant par moments, selon la bonne position temporelle du relevé diatomique, une baisse de qualité en lien avec cette activité d'orpaillage (ex : la station Plaque Roche qui est soumise de manière ponctuelle à de l'orpaillage en amont, qui est classée en 2014 en très bon état mais qui passe à bon état en 2016). L'IDGF caractérise également des impacts constants comme par exemple pour la station Vénus à l'aval du Barrage de Petit Saut ou pour Angoulême sur la Mana (impactée par le barrage au fil de l'eau de Saut Maman Valentin ainsi que par l'orpaillage fortement implanté sur tout le bassin versant de la Mana).

Ce nouvel indice présente de plus l'avantage d'être multimétrique et permet donc d'identifier avec plus de précision les sources d'altération.

La fiabilité des réponses en milieux constant, que cela soit en termes d'impact ou de référence, et la réponse aux impacts localisés est donc bien établie. Ces observations valident donc la pertinence d'utilisation de cet indice en substitution de la version adaptée de l'IPS, indice généraliste mondial qui prend en compte la totalité de l'assemblage floristique et qui était jusqu'à maintenant utilisé en Guyane.

Cependant, l'indice semble présenter un retard de réponse en milieu dilué ou correspondant à des stations de grands fleuves telles que sur les stations Langatabiki, Aval Apatou ou Gabaret. Dans ces situations, l'indice semble surévaluer la qualité par rapport à la réalité du terrain exprimée par les agents de terrain et experts du contexte local. Ces situations ponctuelles où l'indice est moins précis restent néanmoins le lot de tous les indicateurs biologiques et soulignent la nécessité d'accompagner tout calcul d'indice d'une expertise hydrobiologique considérant toutes les spécificités du contexte local.

Il sera peut-être envisageable de résoudre ces cas de façon plus satisfaisante ultérieurement, avec l'augmentation des données et du recul capitalisé sur l'outil pendant ses quelques premières années d'utilisation.

8.1.2. Choix méthodologiques

L'approche par taxon d'alerte s'avère, pour la Guyane tout comme dans les autres indices diatomiques d'outre-mer, particulièrement adaptée au contexte local. En effet, le manque de connaissances actuelles sur l'autoécologie des diatomées de Guyane et le cadre abiotique particulier dans lequel les communautés sont étudiées (grande dominance de territoires forestiers à très faible pression anthropique) diminue fortement l'intérêt d'approches considérant les assemblages dans leur globalité. La focalisation sur une liste restreinte de taxons d'alerte pour la mise en évidence d'altérations permet, de plus, de proposer une réponse beaucoup plus fine dans le cas d'altérations très anecdotiques ou très localisées.

La procédure Threshold Indicator Taxa ANalysis (TITAN) a été choisie comme base de recherche de taxons d'alerte tout comme cela a été proposé précédemment pour l'IDNC en Nouvelle-Calédonie. Cette approche diffère légèrement des indices développés pour les autres DOM (Antilles, Réunion), dans lesquels un taxon d'alerte est un taxon dont on a préalablement décrit l'autoécologie et qui s'avère être caractéristique de zones sous influence d'un gradient composite d'altération (gradient auquel contribuent ensemble et de façon composite 9 à 10 paramètres abiotiques différents influencés par l'anthropisation), tout en graduant ce caractère "alerte" (taxons +, - et -- par exemple aux Antilles).

Les taxons d'alerte identifiés via TITAN en Nouvelle-Calédonie et ici pour la Guyane se rapprochent en revanche de la définition originale d'un taxon d'alerte : **1)** des listes spécifiques sont établies, paramètre particulier d'altération par paramètre particulier d'altération et, **2)** vis-à-vis d'un paramètre donné, soit le taxon est signal d'alerte, soit il ne l'est pas (réponse binaire).

Toutefois, TITAN permet en réalité de caractériser deux types de taxons :

- les **taxons z+** d'une part, qui sont utilisés dans l'IDNC et l'IDGF comme taxons d'alerte (après une étape de seuillage préalable) car correspondant à des taxons apparaissant lorsque les valeurs du paramètre sont croissantes (**taxons tolérants**, adaptés à l'augmentation des valeurs du gradient considéré).
- les **taxons z-** d'autre part, qui vont être présents sur les faibles valeurs du gradient puis vont régresser lorsque le gradient augmente (notion de **taxons sensibles**, ayant tendance à disparaître avec l'augmentation des valeurs), en étant progressivement remplacés par des taxons z+.

Dans l'absolu, bien que pouvant se révéler complémentaire de l'information des taxons z+ pour la recherche d'altérations, l'information apportée par les taxons z- n'a pas encore été intégrée aux indices de bioindication ayant mobilisé TITAN pour leur conception, pour deux types de raisons :

- À ce jour, la formulation mathématique d'un indice intégrant les deux informations simultanées poserait question sur la forme (nécessité d'une formulation différente par rapport à un ratio basé sur les abondances relatives tel qu'il est actuellement exprimé), ainsi que sur le fond (lien, statut et valeur indicielle entre un taxon z- et z+ pas forcément équivalents, posant des questions conceptuelles pas forcément triviales à résoudre et rebondissant ensuite sur des règles d'utilisation éventuellement différentes, sur des questions spécifiques de formulation...).
- les quatre indices développés pour l'instant dans le cadre du même réseau partenarial concernaient le plus souvent des DOM-COM îliens, à bassins versants courts et adossés à des reliefs importants, soumis à des épisodes de pluies tropicales parfois intenses, à forte hydrodynamique (cours d'eau le plus souvent à faciès de torrents). De telles conditions sont d'une part très dilutives pour l'altération anthropique appliquée, et soutiennent d'autre part un drift très important d'espèces de qualité en provenance des milieux amont. Dans de telles conditions, les biotypologies réalisées ont bien montré une résilience importante des peuplements naturels aux effets de l'altération et font perdre tout intérêt à l'utilisation de la perte des taxons sensibles (taxons z- dans le cadre de Titan), trop soutenue par le drift, trop variable et trop bruitée en fonction des spécificités de conditions hydrologiques et hydrodynamiques s'appliquant d'un bassin versant à l'autre.

Même si certaines caractéristiques de la Guyane diffèrent de celles précédemment rencontrées (bassins versants nettement plus longs, faible relief), les cours d'eau présentent aussi un caractère fortement dilutif des altérations, les taxons naturels dominant nettement les assemblages (faible contexte d'anthropisation) et sont aussi soutenus par un drift important. Dans ce DOM aussi, afin d'arriver à une solution de bio-indication performante il a été choisi en connaissance de cause de n'utiliser que des taxons d'alerte sélectionnés parmi les taxons tolérants aux gradients d'anthropisation présents sur place (soit les taxons z+ dans TITAN).

8.1.3. Vers une seconde version de l'indice

Cette étude concrétise les résultats des 9 années de surveillance ayant suivi les premiers travaux d'élaboration d'indice diatomique (programme QUES, 2009). Elle donne aussi l'occasion de faire un bilan sur la pertinence des réseaux en place sur le territoire guyanais et d'en tirer différents enseignements pour l'amélioration des outils de bioindication. En effet, bien que l'indice puisse être considéré comme déjà nettement plus satisfaisant que l'IPS en l'état, cette première version reste perfectible sur divers aspects qui sont à considérer pour la planification des futurs réseaux de surveillance.

Une des principales difficultés rencontrées lors de cette étude, symptomatique des conditions guyanaises, est le manque de situations intermédiaires dans les gradients abiotiques, la plupart d'entre eux présentant un profil quasi-binaire oscillant entre aucune altération et altération maximale. Bien que les données issues du RCS soient importantes pour procurer une évaluation représentative de l'Etat Ecologique sur un territoire biogéographique donné (optique application de la DCE et réalisation du rapportage européen), il est impératif de disposer d'une assise de données la plus complète et la plus contrastée possible pour caler ces indicateurs, qui doivent aussi permettre ensuite de répondre à toutes les situations d'altération anthropique pouvant être rencontrées sur le territoire concerné.

Les données apportées par les réseaux complémentaires RC et RCO, malgré leur faible nombre (1 campagne annuelle pour chaque réseau) ont été particulièrement précieuses dans le cadre de la présente étude et ont permis de compenser de nombreuses lacunes de représentation des gradients couverts dans le RCS, tout en permettant aussi d'identifier les situations correspondant aux états "Mauvais" et "Médiocre" et d'aider à dégager les taxons d'alerte correspondants.

Cependant, la consolidation d'un indice vraiment stable et proposant une réponse pertinente à un maximum de situations rencontrées nécessite encore l'acquisition de nouvelles données relatives aux valeurs fortes et intermédiaires de chaque gradient, ainsi que la capitalisation d'un peu de recul temporel et de retours-utilisateurs. La mise en place de nouveaux réseaux de ce type serait donc à privilégier dans un avenir proche en visant, par exemple, la caractérisation de plusieurs continuums depuis l'amont jusqu'en aval d'une perturbation, ceci permettant l'obtention des gradients les plus exhaustifs possibles.

Enfin, la sélection initiale de sites continentaux a permis d'occulter une très grande partie de la problématique liée aux contextes halins, les quelques stations présentant une chimie indiquant des intrusions salées dans notre matrice de données abiotique n'ayant pas d'assemblages diatomiques correspondants.

La problématique d'intrusions halines éventuelles reste cruciale en Guyane, en particulier sur le littoral Nord. Ainsi, des stations correspondant le plus souvent à des conditions qualifiées de continentales (eau douce) peuvent présenter, selon l'intensité des précipitations et selon l'étendue du biseau salé de l'année, une physico-chimie périodiquement haline et des cortèges diatomiques plus ou moins riches en espèces marines.

L'IDGF étant un bioindicateur **d'eau douce continentale**, il atteindra assez vite sa limite de validité dans de telles conditions se matérialisant par l'intrusion rapide d'un pourcentage élevé d'espèces halines .

Cependant, ces zones proches du littoral représentent aussi un **enjeu tout particulier de surveillance** dans le contexte local car elles sont aussi les **principales zones peuplées** et les **principales zones à subir des impacts anthropiques prononcés** (zone de Cayenne, zone de Kourou, implantations urbaines et industrielles...) de toute la Guyane Française.

Si les cours d'eau subissent des pollutions anthropiques dans ces secteurs aval proches du littoral, ce n'est pas au niveau du milieu marin qu'il sera possible d'évaluer correctement ces impacts. En effet, le plateau continental du littoral Nord est sous la très forte influence du panache de l'Amazone, qui dilue fortement et balaie rapidement vers l'Ouest les pollutions arrivant au littoral par l'exutoire des cours d'eau.

Dans un tel contexte et hors cas particulier des plus gros systèmes estuariens (qui n'accueillent d'ailleurs pas les rejets des principales zones urbanisées et industrialisées), c'est bien **au niveau des rivières**, le plus à l'aval possible de la zone d'eau douce et éventuellement (à préciser ultérieurement) **à partir des flores d'eau douce** qu'il reste le plus envisageable et probablement le plus faisable **d'évaluer l'impact des pollutions anthropiques du littoral Nord**.

En effet, les espèces locales d'eau douce présentes et fixées sur place (diatomées benthiques des biofilms) ont subi les pollutions arrivant et circulant (parfois dans les 2 sens) dans le chenal du cours d'eau (d'origine continentale, éventuellement de proximité dans le cas des agglomérations littorales). Elles sont donc capables de marquer les effets des pollutions qui s'exercent dans le cours d'eau au site considéré. Par contre, des taxons halins éventuellement planctoniques, amenés sous influence littorale naturelle et arrivant directement, sous une influence physique de flux entrant, depuis le milieu marin déconcentré en nutriments et en polluants, n'ont probablement aucune signification particulière en relation avec les pollutions localement trouvées dans le chenal du cours d'eau.

Il reste cependant envisageable que des flores oligo à méso-halines spécifiques puissent s'installer et prospérer dans les biofilms benthiques de ces secteurs aval en étant avantagées par l'influence des pollutions anthropiques rencontrées localement. De telles espèces, qui ne sont pas encore clairement repérées, pourraient le cas échéant être prises en considération pour l'évaluation des altérations de qualité d'eau dans ces conditions d'aval de cours d'eau (taxons d'alerte additionnels venant renforcer les capacités d'évaluation de l'IDGF dans les secteurs encore à dominance dulçaquicole des cours d'eau à l'aval du dernier saut). Toutefois, faute d'un recul-données suffisant sur de telles zones, ils ne sont pas encore ressortis comme taxons d'alerte à l'issue de la présente étude.

A l'avenir, il serait donc utile de prévoir des dispositifs particuliers d'étude, basé sur des doublets "Amont dernier saut - Aval dernier saut" couplés avec des données de chimie, pour pouvoir plus clairement mettre en évidence les nouveaux taxons intéressants pour renforcer la bio-indication des pollutions dans ces contextes.

Outre les effectifs comptés dans les relevés, qui constituent un critère général de sélection des taxons indiciels, des vérifications de bonne implantation et de contrôle d'intégrité vitale en mode de vie benthique fixé (notamment via observations *in vivo*) permettraient de conforter la signification de leur présence et leur bonne viabilité dans ces conditions, et **ainsi étoffer les listes de taxons d'alerte de l'IDGF**.

Faute d'autres solutions de bio-indication actuellement efficaces ou escomptées dans un avenir proche, dans un tel contexte sous influence d'incidences halines occasionnelles, et dans l'attente de ces nouveaux acquis, il paraît intéressant et souhaitable, dans le contexte naturel et sociétal du littoral Nord de Guyane, de **propager l'utilisation de l'IDGF le plus loin possible vers l'aval des cours d'eau**, jusqu'à certaines limites d'influence haline sur les peuplements qui marqueraient la limite inférieure de validité de l'IDGF.

Il sera de toute façon intéressant de continuer à étudier et d'établir plus précisément jusqu'à quel plafond de pourcentage de taxons halins l'IDGF peut continuer de donner une information jugée valide, ou relativement valide (confiance plus faible) sur le message de pollution délivré par les taxons d'eau douce en contexte d'influence haline littorale.

Selon les règles actuellement fixées pour établir le niveau de confiance d'un calcul d'IDGF en fonction de l'assise réellement indicielle d'un relevé (voir Chapitre 6-7 p 52-53), en dessous de 75% de valves indicielles (soit 300 valves sur 400 dans le contexte antérieur ou 375 valves sur 500 dans le contexte normatif actuellement en vigueur), le calcul de l'indice est considéré comme **non utilisable**.

Face à une telle situation, et en particulier s'il s'agit d'un problème causé par des **influences halines**, la recommandation actuelle serait d'augmenter la pression de comptage afin de dépasser les seuils permettant le rétablissement de la confiance dans le calcul d'indice.

En cas de non-atteinte de ces seuils dans le cadre d'une pression d'observation normale de 500 valves par échantillon, la proposition concrète serait donc, pour l'opérateur effectuant le comptage, d'augmenter à vue l'effectif de valves comptées jusqu'à atteindre les seuils de rétablissement de la confiance dans le calcul de l'indice, en plafonnant cependant l'effort de comptage à 1000 valves déterminées au maximum par échantillon.

Au-delà, le travail de détermination comptage demandé à l'intervenant deviendrait trop important pour une absence de plus-value réelle, l'influence haline manifestée sortant trop largement du domaine d'applicabilité de l'indice et ne permettant plus d'assurer la fiabilité du résultat indiciel obtenu.

Afin de mieux anticiper l'augmentation de comptage pouvant résulter de ces stations sous influence haline occasionnelle (optique d'une bonne prévision de l'effort de travail et de la rémunération correspondante des opérateurs intervenant dans le cadre de Marchés Publics), une possibilité serait de **recenser une fois pour toutes** les sites de réseaux des cours d'eau du littoral Nord **déjà connus** et **possiblement soumis à influence haline temporaire** à une date ou à une autre (sites implantés à l'aval du dernier saut et susceptibles de nécessiter, au moins à certaines dates, une augmentation conséquente de la pression d'observation-comptage).

Cette liste pourra être amenée à évoluer et à être complétée à la marge ultérieurement, en fonction de l'évolution de la connaissance locale et(ou) du rajout de stations nouvellement à suivre dans le cadre d'un réseau (notamment RCO ou RC), ou d'une étude d'impact particulière.

Un dernier aspect reste à évoquer : en Guyane, la pratique antérieure prise en compte dans les Marchés Publics prévoyait une pression d'observation de 400 valves par échantillon. Or cette pratique ne correspond plus à la norme AFNOR 90-T-354 qui, au vu des spécificités locales présentées dans les contextes particuliers des DOM (flores tropicales méconnues, aspects de biodiversité spécifique, caractère dilutif des rivières, part de taxons non-indiciels dans les assemblages...), prescrit dans ces contextes une **pression d'observation de 500 valves**.

Afin que le travail effectué dans le cadre des réseaux respecte le cadre normatif en vigueur, il sera donc nécessaire à l'avenir de tenir compte de ce surcroît de pression d'observation et de travail pour l'établissement des futurs Marchés Publics.

9. Transfert et valorisation

9.1.1. Outils de calcul IDGF

L'IDGF a été élaboré sous le logiciel libre R ([R core Team, 2018](#)) et ses outils de calculs sont pour le moment liés à cet environnement de travail.

Pour appuyer le transfert opérationnel lié aux résultats de la présente action, une nouvelle fiche-Action Irstea-AFB est prévue sur 2019-2020 (mais pas encore signée à cette date).

Une première partie concerne la stabilisation de l'outil de calcul régionalisé de l'IDGF.

Il est prévu de produire un package R qui sera hébergé dès que possible (avant la fin 2019) en open-source sous licence GPL-3 sur la forge logicielle publique GitHub d'IRSTEA (<https://github.com/irstea>) et téléchargeable depuis n'importe quelle machine connectée à internet disposant d'une version actuelle de R.

Ce package sera composé de 2 modules :

- un module de calcul de l'indice
- un module de production graphique

Irstea assurera aussi le contact avec l'AFB pour incorporation de ces nouveaux modules au module DOM de l'outil de calcul national de référence, le SEEE.

Pour un utilisateur non-initié, en attendant l'intégration future au SEEE, un environnement de travail dédié (un dossier chargeant automatiquement le package, les ressources, les sous-dossiers et scripts nécessaires) sera diffusé en même temps que l'outil et mis à disposition sur GitHub sous licence GPL-3 accompagné d'un guide utilisateur (visible directement sur la page de téléchargement) détaillant toutes les étapes nécessaires depuis l'installation de R sur la machine et visant à la production des résultats le plus rapidement et simplement possible pour l'utilisateur.

Enfin, en liaison avec la Direction de l'Eau du Ministère en charge de l'Ecologie, Irstea proposera le contenu ad hoc d'un modificatif d'Arrêté Evaluation en temps voulu pour la préparation de sa parution, à l'initiative de la DEB, au Journal Officiel de la République Française (JORF).

9.1.2. Appui au transfert

Dans le cadre de l'appui au transfert de ce nouvel outil, l'élaboration de différents documents de cadrage et d'appui à la mise en œuvre de la nouvelle méthode IDGF sont envisagés en collaboration étroite avec Hydreco.

Parmi ces documents, la production d'un **guide méthodologique** est envisagée pour guider le prélèvement, le comptage et l'analyse des résultats produits dans le cadre de l'évaluation d'état diatomique obtenu à partir de l'IDGF.

Cependant, si, comme antérieurement, Irstea est engagé à participer autant que possible à la fourniture de contenus et à la relecture - reformulation de parties du document (qui, dans les précédentes actions DOM, a été édité sous charte graphique AFB, dans la collection « Guides et Protocoles »), le travail d'élaboration-maquettage d'un tel document de transfert est plus du ressort du Bureau d'Étude-partenaire compétent sur ce dossier. Irstea peut s'engager à assumer le travail de son ressort sur ce document, cependant l'implication contractuelle d'Hydreco à ce niveau reste à prévoir et à mettre en place.

Il en est de même au sujet de la production d'un **guide taxinomique**. Irstea a également prévu, dans les 2 années qui viennent, de produire un travail afin de formaliser sous une forme appropriée des éléments participant à la signalétique chaque taxon indiciel de l'IDGF, notamment une illustration résumée de leur autoécologie (réponse aux différents paramètres abiotiques), ainsi que de leur chorologie (*i.e.* leur répartition géographique dans les inventaires ayant participé à l'étude).

Un tel document est très précieux pour faciliter la mise en œuvre future de la nouvelle méthode indicielle, sachant qu'il résume en français des informations publiées à l'échelle mondiale, donc dans différents pays et en différents langages ; cette synthèse étant ensuite directement utilisable au service de l'application opérationnelle de l'IDGF en Guyane. Comme, de plus, un nombre conséquent de taxons participant au calcul indiciel est toujours sous numéro, ces nouvelles espèces, ainsi que les seules acquisitions iconographiques permettant de les décrire, ont été acquises dans le cadre des partenariats en place et ne sont pas disponibles ailleurs dans les sources bibliographiques accessibles (documents internes de travail).

Il serait donc important de couvrir, via le niveau national ou plus local de Guyane, l'implication en maîtrise d'œuvre d'Hydreco pour la production et le maquettage d'un tel document.

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier le bureau d'étude Hydreco, partenaire privilégié de cette action, ayant accueilli D. Carayon dans ses locaux durant trois semaines afin qu'il puisse expérimenter les missions de terrain guyanaises. Nous remercions en particulier A. Eulin-Garrigue pour l'organisation logistique de cette mission ainsi que pour sa réactivité de réponse sur la taxonomie des diatomées, ainsi que Régis Vigouroux pour son expertise du contexte biogéographique guyanais. Parce qu'ils ne sont jamais assez remerciés, nous tenons également à rendre hommage aux personnels de terrain sans lesquels aucunes de ces recherches de ne seraient possibles.

Nous remercions également l'Office de l'Eau ainsi que la DEAL de Guyane pour leurs contributions à l'élaboration de cette fiche et pour la fourniture rapide de données lorsqu'elles étaient demandées.

Des remerciements particuliers sont également adressés aux collègues de l'équipe Ecovea à Irstea Bordeaux, en particulier S. Boutry, pour les différents échanges et conseils sur la construction de l'indice.

Enfin, nous remercions l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) pour le financement de cette action, sans lequel la production de ce nouvel indice diatomique n'aurait pas été possible.

Bibliographie

- Allard, L., 2014. Elaboration d'un indice de qualité des eaux basé sur la structure taxonomique et fonctionnelle des assemblages de poissons des petits cours d'eau de Guyane (PhD Thesis). Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Baker, M.E., King, R.S., 2010. A new method for detecting and interpreting biodiversity and ecological community thresholds: Threshold Indicator Taxa ANalysis (TITAN). *Methods in Ecology and Evolution* 1, 25–37. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00007.x>
- Barret, J., Blancaneaux, P., Caillé, O., Charron, C., Gaucherel, C., Granville, J.-J. de, Grenand, P., Guiral, D., Lointier, M., Mérona, B. de, others, 2001. Atlas illustré de la Guyane.
- Boudou, A., Dominique, Y., Cordier, S., Frery, N., 2006. Les chercheurs d'or et la pollution par le mercure en Guyane française: conséquences environnementales et sanitaires. *Environnement, Risques & Santé* 5, 167–179.
- Boutry, S., Gassiole, G., Rosebery, J., Giraudel, J.L., Peres, F., Coste, M., Delmas, F., 2013. Mise au point d'un indice diatomique pour les cours d'eau de la Réunion (IDR) : Rapport final sur la démarche d'élaboration de l'indice.
- Chandesris, A., Wasson, J., Pella, H., 2005. Hydro-écorégions de la Guyane, in: Propositions de Régionalisation Des Écosystèmes Aquatiques En Vue de l'application de La Directive Cadre Européenne Sur l'Eau. Convention CEMAGREF. Report.
- Choubert, B., 1974. Le précambrien des Guyanes. Éditions BRGM.
- Cilleros, K. (2017) Diversity and assembly processes of Guyanese freshwater fish assemblages. These Univ. Toulouse III – 254P.
- Coste, M., 1982. Étude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Cemagref QE Lyon-AF Bassin Rhône Méditerranée Corse.
- Coste, M. - 2000. Evaluation de la qualité des eaux des rivières de Guyane française à l'aide des communautés de diatomées benthiques : essai de mise au point d'un indice diatomique. 49 p. [00/0931 (PUB). DOC ARCH QE (BX).
- Coste, M., Boutry, S., Tison-Rosebery, J., Delmas, F. - 2009. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators* 9, 621–650. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.06.003>
- Coste, M., Boutry, S., Delmas, F., de Mérona, B., Cerdan, P. - 2010. Diatomées des eaux courantes de Guyane : essai de biotypologie et application au diagnostic du bon état écologique. 81 p. []
- De'ath, G., 2002. Multivariate Regression Trees: A New Technique for Modeling Species–Environment Relationships. *Ecology* 83, 1105–1117. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[1105:MRTANT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[1105:MRTANT]2.0.CO;2)
- Dedieu N, 2015 – Présentation de l'indice Biologique Macroinvertébrés de Guyane II (IBMGII). Rapport Final – Convention recherche ECOLAB-CNRS-DEAL. 47p.

- Dedieu, N., 2014. Mise au point d'un outil d'évaluation de la qualité biologique des petites rivières de Guyane sur la base des invertébrés benthiques (PhD Thesis). Université Toulouse III Paul Sabatier.
- Dedieu, N., Clavier, S., Vigouroux, R., Cerdan, P., Céréghino, R., 2016. A multimetric macroinvertebrate index for the implementation of the European Water Framework Directive in French Guiana, East Amazonia. *River Research and Applications* 32, 501–515.
- Dufrêne, M., Legendre, P., 1997. Species Assemblages and Indicator Species: the Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecological Monographs* 67, 345–366. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0345:SAAIST\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2)
- Gueguen, J., Eulin, A., Lefrançois, E., Boutry, S., Tison Rosebery, J., Coste, M., Delmas, F., 2015. Production d'une version améliorée de l'Indice Diatomique Antilles (IDA-2), utilisation pour l'évaluation de l'Etat Ecologique des cours d'eau des Antilles : Rapport Final.
- Habert A., 2012. Redécoupage des masses d'eau de transition dans le cadre de la Directive européenne Cadre de l'Eau. Rapport final. NBC/DEAL. 204 p.
- Hoff, M., 2007. État actuel et enjeux de la flore et de la conservation dans les DOM-TOM. *Acta Botanica Gallica* 154, 335–350.
- Josse, J., Husson, F., 2012. Handling missing values in exploratory multivariate data analysis methods 22.
- King, R.S., Richardson, C.J., 2003. Integrating Bioassessment and Ecological Risk Assessment: An Approach to Developing Numerical Water-Quality Criteria. *Environmental Management* 31, 795–809. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-0036-4>
- Kodinariya, T.M., Makwana, P.R., 2013. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal* 1, 90–95.
- Marquié, J., Boutry, S., Lefrançois, E., Coste, M., Delmas, F., 2017. Research and Study Program 2012 - 2016 "Diatoms of the New Caledonian rivers: Design of a taxonomic atlas and of a bio-evaluation index for the assessment of the ecological quality of rivers with benthic diatoms. Volume 1: IDNC Final Development Report (V0-2, 25-07-2017).
- Milési, J., Egal, E., Ledru, P., Vernhet, Y., Thiéblemont, D., Cocherie, A., Tegye, M., Martel-Jantin, B., Lagny, P., 1995. Les minéralisations du Nord de la Guyane française dans leur cadre géologique. *Chronique de la recherche minière* 518, 5–58.
- R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Tison, J., Park, Y.-S., Coste, M., Wasson, J., Ector, L., Rimet, F., Delmas, F., 2005. Typology of diatom communities and the influence of hydro-ecoregions: a study on the French hydrosystem scale. *Water Research* 39, 3177–3188.
- Tudesque & al (2015) *Lacuneolimna* gen. nov., *Lacuneolimna zalokariae* comb. nov. and *Lacuneolimna novagallia* spec. nov. (Bacillariophyceae) from the French Guiana diatom freshwater flora

Wetzel, C.E. (2011a) Biodiversidade e distribuição espacial de diatomáceas (Bacillariophyceae) na bacia hidrográfica do Rio Negro, Amazonas, Brasil. Volume 1. Ph D Thesis, Universidad de São Paulo, São Paulo, 524 pp.

Wetzel, C.E. (2011b) Biodiversidade e distribuição espacial de diatomáceas (Bacillariophyceae) na bacia hidrográfica do Rio Negro, Amazonas, Brasil. Volume 2. Ph D Thesis, Universidad de São Paulo, São Paulo, 1372 pp.

Annexe 1 : Récapitulatif des normes utilisées pour l'analyse des paramètres physico-chimiques en Guyane

Analyses *in situ* :

Paramètres	Code Sandre Paramètre	Unité	Code Sandre Unité	Norme
Conductivité à 25°C Et/ou salinité	1303	µS/cm	147	NF EN 27888
Concentration en oxygène dissous	1311	mgO ₂ /L	175	NF EN 25814
Taux de saturation en oxygène dissous	1312	%	243	NF EN 25814
pH	1302	unité pH	264	NF EN ISO 10523
Température	1301	°C	27	Sonde combinée
Turbidité	1295	NTU	233	NF EN ISO 7027

Analyses en laboratoire :

Paramètre physico-chimique	Libellé SANDRE du paramètre	Libellé SANDRE du support	Libellé SANDRE de la fraction	Unité	Norme	Laboratoire d'analyse
NH ₄ ⁺	Ammonium	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(NH ₄)/L	NF EN ISO 14911	HYDRECO GUYANE
NKJ	Azote Kjeldhal	Eau	Eau brute	mg(N)/L	NF T 90-110	HYDRECO GUYANE
Cl ⁻	Chlorures	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(Cl)/L	NF EN ISO 10304-1	HYDRECO GUYANE
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours	Eau	Eau brute	mg(O ₂)/L	NF EN 1899-2	HYDRECO GUYANE
ST-DCO	Demande Chimique en Oxygène	Eau	Eau brute	mg(O ₂)/L	ISO 15705	HYDRECO GUYANE
TH	Dureté totale	Eau	Eau brute	°f	NF T 90-003	HYDRECO GUYANE
MEST	Matières En Suspension Totales	Eau	Eau brute	mg/L	NF EN 872	HYDRECO GUYANE
NO ₃ ⁻	Nitrates	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(NO ₃)/L	NF EN ISO 10304-1	HYDRECO GUYANE

NO ₂ ⁻	Nitrites	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(NO ₂)/L	NF EN ISO 10304-1	HYDRECO GUYANE
PO ₄ ³⁻	Orthophosphates	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(PO ₄)/L	NF EN ISO 10304-1	HYDRECO GUYANE
P total	Phosphore total	Eau	Eau brute	mg(P)/L	NF EN ISO 6878	HYDRECO GUYANE
TAC	Titre Alcalimétrique Complet	Eau	Eau brute	°f	NF EN ISO 9963-1	HYDRECO GUYANE
SO ₄ ²⁻	Sulfates	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(SO ₄)/L	NF EN ISO 10304-1	HYDRECO GUYANE
Chlorophylle a	Chlorophylle a	Eau	Eau brute	µg/L	NF T 90-117	CARSO
COD	Carbone Organique Dissous	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(C)/L	NF EN 1484	CARSO
COT	Carbone Organique Total	Eau	Eau brute	mg(C)/L	NF EN 1484	CARSO
Phéopigments	Phéopigments	Eau	Eau brute	µg/L	NF T 90-117	CARSO
Silice dissoute	Silicates	Eau	Phase aqueuse de l'eau (filtrée, centrifugée...)	mg(SiO ₂)/L	NF T 90-007	CARSO

Annexe 2 : Bibliographie mobilisée pour l'identification des diatomées

Sübwasserflora von Mitteleuropa :

KRAMMER K. and LANGE-BERTALOT H., Bacillariophyceae 1. Naviculaceae. H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer ed., Sübwasserflora von Mitteleuropa - Vol.2/1 (Gustav Fisher Verlag, Stuttgart - New York, 1986). 876 p.

KRAMMER K. and LANGE-BERTALOT H., Bacillariophyceae 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer ed., Sübwasserflora von Mitteleuropa - Vol.2/2 (Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1988). 611 p.

KRAMMER K. and LANGE-BERTALOT H., Bacillariophyceae 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer ed., Sübwasserflora von Mitteleuropa - Vol.2/3 (Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1991). 599 p.

KRAMMER K. and LANGE-BERTALOT H., Bacillariophyceae 4. Achnantheaceae. Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema*. H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer ed., Sübwasserflora von Mitteleuropa - Vol.2/4 (Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1991). 468 p.

Diatoms of Europe :

KRAMMER K., The genus *Pinnularia*. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.1 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2000). 703 p.

KRAMMER K., *Cymbella*. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.3 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2002). 584 p.

KRAMMER K., *Cymbopleura*, *Delicata*, *Navicymbela*, *Gomphocymbellopsis*, *Afrocymbella*. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.4 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2003). 530 p.

LANGE-BERTALOT H., *Navicula sensu stricto* - 10 genera separated from *Navicula sensu lato* - *Frustulia*. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.2 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2001). 526 p.

LANGE-BERTALOT H., BAK M., WITKOWSKI A., AND TAGLIAVENTI N., Eunotia and some related genera. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats – Vol.6 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2011). 747 p.

LEVKOV Z., *Amphora sensu lato*. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.5 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2009). 916 p.

LECKOV Z., METZELTIN D. & PAVLOV A., Luticola and Luticolopsis. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.7 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2013). 698 p.

LEVKOV Z., MITIC-KOPANJA D. & REICHARDT E., The diatom genus *Gomphonema* from the Republic of Macedonia. H. Lange-Bertalot ed., Diatoms of Europe - Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats - Vol.7 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2016). 552 p.

Iconographia Diatomologica :

ANTONIADES D., HAMILTON P.B., DOUGLAS M.S.V. AND SMOL J.P., Diatoms of North America: Freshwater Floras of Prince Patrick, Ellef Ringnes and northern. H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.17 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2008). 649 p.

HEIN, M. K., WINSBOROUGH B. M. and SULLIVAN M. J., Bacillariophyta (Diatoms) of the Bahamas. H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.19 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2008). 303 p.

LANGE-BERTALOT H. and METZELTIN D., Annotated Diatom Micrographs. H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.2 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1996). 390 p.

- LANGE-BERTALOT H. and GENKAL S.I., Diatoms from Sibéria I - Islands in the Arctic Ocean (Yugorsky-Shar Strait). H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.6 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1999). 294 p.
- LANGE – BERTALOT H., CAVACINI P., TAGLIAVENTI N. and ALFINITO S., Diatoms of Sardinia. Rare and 76 new species in rock pools and other ephemeral waters. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.12 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2003). 438 p.
- LEVKOV Z., KRSTIC S., METZELTIN D. and NAKOV T., Diatoms of Lakes Prespa and Ohrid. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.16 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2007). 613 p.
- METZELTIN D. and LANGE-BERTALOT H., Diatoms from the Island continent Madagascar. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.11 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2002). 286 p.
- METZELTIN D. and LANGE-BERTALOT H., Tropical Diatoms of South America. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.18 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2007). 877 p.
- METZELTIN D. and LANGE-BERTALOT H., Tropical Diatoms of South America I. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.5 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1998). 695 p.
- METZELTIN D., LANGE-BERTALOT H. and GARCIA-RODRIGUEZ F., Diatoms of Uruguay. Compared with other taxa from South America and elsewhere. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.15 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2005). 736 p.
- REICHARDT E., Die Diatomeen (Bacillariopyceae) in Ehrenbergs Material von Cayenne, Guyana Gallica (1843). H. Lange-Bertalot ed., (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1995). 99p.
- REICHARDT E., Zur Revision der Gattung *Gomphonema*. Die Arten um *G. affine/insigne*, *G. angustatum/micropus*, *G. acuminatum* sowie gomphonemoide Diatomeen aus dem Obereroligozän in Böhmen. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.8 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1999). 203 p.
- RUMRICH U., LANGE-BERTALOT H. and RUMRICH M., Diatomeen der Anden, Von Venezuela bis Patagonien/Tierra del Fuego. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.9 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2000). 673 p.
- SIVER P.A., HAMILTON P.B., STACHURA-SUCHOPLES K. AND KOCIOLEK J.P., Diatoms of North America: The Freshwater Flora of Cape Cod. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* -Vol.14 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2005). 463 p.
- WERUM M. and LANGE-BERTALOT H., Diatom in springs. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* -Vol.13 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2004). 479 p.
- WITKOWSKI A., LANGE-BERTALOT H. and METZELTIN D., Diatom flora of marine coasts. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.7 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2000). 925 p.
- YANLINKG L., LANGE-BERTALOT H. and METZELTIN D., Diatoms in Mongolia. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.7 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2009). 702 p.
- ZIMMERMAN C., POULIN M. and PIENITZ R., Diatoms of North America: The Pliocene-Pleistocene Freshwater Flora of Bylot Island, Nunavut, Canadian High Arctic. H. Lange-Bertalot ed., *Iconographia Diatomologica* - Vol.21 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2010). 407 p.

Bibliotheca Diatomologica :

- ARCHIBALD R.E.M., The Diatoms of the Sundays and Great Fish Rivers in the Eastern Cape Province of South Africa. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 1. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1983).
- BENSON M.E. & KOCIOLEK J.P., Freshwater diatom floristics of the late Eocene Florissant Formation, Clare's Quarry site, central Colorado, USA. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 58. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 2012) 136 p.
- CASSIE V., A contribution to the study of New Zealand Diatoms. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 17. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1989). 266 p.
- COCQUYT C., Diatoms from the Northern Basin of Lake Tanganyika. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 39. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1998).
- COSTA L.F., WETZEL C.E., LANGE-BERTALOT H., ECTOR L. & BICUDO D. C., Taxonomy and ecology of *Eunotia* species (Bacillariophyta) in southern Brazilian reservoirs. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 64. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 2017) 302 p.

- FALLU M. A., ALLAIRE N. & PIENITZ R., Freshwater Diatoms from northern Québec and Labrador (Canada). *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.45 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 2000). 200 p.
- FOGED N., Freshwater and Littoral Diatoms from Cuba. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.5 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1984).
- FOGED N., Diatoms in Gambia. Diatoms in the Volo Bay, Greece. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.12 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1986).
- FOGED N., Diatoms from Viti Levu, Fiji Islands. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.14 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1987).
- FUNGLADDA N., KACZMARSKA I. & RUSHFORTH S.R., A contribution to the Freshwater Diatom Flora of the Hawaiian Islands. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.2 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1983). 103 p.
- FUREY P.C., LOWE R.L. & JOHANSEN J.R., *Eunotia* Ehrenberg (Bacillariophyta) of Great Smoky Mountains National Park, USA. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.56 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 2011). 132 p.
- GASSE F., East African diatoms. Taxonomy, ecological distribution. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.11 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1986).
- KACZMARSKA I. & RUSHFORTH S.R., The Diatom Flora of Blue Lake Warm Spring, Utah, USA. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.2 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1983). 122 p.
- KRAMMER K., Die cymbelloiden Diatomeen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 1. Allgemeines und Encyonema Part. H. Lange-Bertalot and P. Kociolek ed., *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.36 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1997). 382 p.
- KRAMMER K., Die cymbelloiden Diatomeen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 2. Encyonema part., Encyonopsis and Cymbellopsis. H. Lange-Bertalot and P. Kociolek ed., *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.37 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1997). 469 p.
- KRAMMER K. & LANGE-BERTALOT H., Naviculaceae. Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen zu einigen Gattungen. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.9 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1985). 230 p.
- LANGE-BERTALOT H. 85 Neue Taxa und über 100 weitere neu definierte Taxa ergänzend zur Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/1-4. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.27 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1993). 454 p.
- LANGE-BERTALOT H. & KRAMMER K., Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen und Ergänzungen zu den Naviculaceae. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.15 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1987). 289 p.
- LANGE-BERTALOT H. and KRAMMER K., *Achnanthes*, eine Monographie der Gattung mit Definition der Gattung *Cocconeis* und Nachträgen zu den Naviculaceae. H. Lange-Bertalot ed., *Bibliotheca Diatomologica* - Vol.18 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1989). 389 p.
- LANGE-BERTALOT H. & MOSER G., *Brachysira* Monographie der Gattung. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 29. H. Lange-Bertalot ed. (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1994) 212 p.
- MOSER G., Die Diatomeenflora von Neukaledonien. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 43. H. Lange-Bertalot ed. (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1999) 205 p.
- MOSER G., LANGE-BERTALOT H. and METZELTIN D., Insel der Endemiten. Geobotanisches Phänomen Neukaledonien. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 38. H. Lange-Bertalot ed. (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1998) 464 p.
- MOSER G., STEINDORF A. & LANGE-BERTALOT H., Neukaledonien Diatomeenflora einer Tropeninsel. Revision der Collection maillard und Untersuchung neuen Materials. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 32. H. Lange-Bertalot ed. (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1995) 340 p.
- NAGUMO T., Taxonomic studies of the subgenus *Amphora* Cleve of the genus *Amphora* (Bacillariophyceae) in Japan. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 49. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 200) 265 p.
- PIENITZ R., FEDJE D. & POULIN M., Marine and Non-Marine Diatoms from Haide Gwii Archipelago and surrounding Coasts, Northerne Pacific, Canada. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 48. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 2003) 146 p.
- PODZORSKI A.C. & HAKANSSON H., Freshwater and marine diatoms from Palawan (a Philippine island). *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 13. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1998).

REAVIE E.D. & SMOL J.P., Die Freshwater diatoms from the St. Lawrence River. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 41. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1987).

REICHARDT E., Die Diatomeen der Altmuhl. *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 6. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1984).

RIAUX-GOBIN C., ROMERO O.E., COMPERE P. & AL-HANDAL A.Y., Small-sized Achnanthes (Bacillariophyta) from coral sands Mascarenes (Western Indian Ocean). *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 57. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 2011) 234 p.

RUCK E.C. & KOCIOLEK J.P., Preliminary Phylogeny of the Family Surirellaceae (Bacillariophyta). *Bibliotheca Diatomologica* - Vol. 50. H. Lange-Bertalot ed. (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 2004) 236 p.

Autres livres ou ouvrages :

BOURRELLY P., Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II : Les algues jaunes et brunes : Chrysophytes, Xanthophycées et Diatomées (N. BOUBÉE & Cie, Paris, 1981) 517 p.

ECTOR L. and HLUBIKOVA D., Atlas des diatomées des Alpes-Maritimes et de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Conseil Général des Alpes-Maritimes, 2009) 393 p.

HOFMANN et al., 2011. Diatomeen im Süßwasser - Benthos von Mitteleuropa. Lange-Bertalot, H. Eds., (A.R.G. Gantner verlag K.G. 2011) 908p.

KOBAYASI H., IDEI M., MAYAMA S., NAGUMO T. and OSADA K. Kobayasi's Atlas of Japanese Diatoms based on electron microscopy. Kobayasi H., Idei M., Mayama S., Nagumo T. and Osada K. Ed (Uchida Rokakuho Publishing Co. 2006)

LAVOIE I., HAMILTON P.B., CAMPEAU S., GRENIER M. and DILLON P.J., Guide d'identification des Diatomées des rivières de l'Est du Canada (Presses de l'Université du Québec, Québec, 2008) 252 p.

ROUND F.E., CRAWFORD R.M. and MANN D.G., The diatoms. Biology & morphology of the genera (Cambridge University Press, Cambridge, 2007) 747 p.

TAYLOR JC, HARDING WR, ARCHBALD GM - An illustrated Guide to Some Common Diatom Species from South Africa - WRC Report TT 282/07 - January 2007

TUDESQUE L., ECTOR L., 2002. Pré-atlas iconographique des rivières de la Guadeloupe. p78.

Bibliographie spécifique : documents produits dans le cadre des programmes de recherche & développement « Indice Diatomique Antillais »

GUEGUEN, J., EULIN, A., LEFRANCOIS, E., BOUTRY, S., ROSEBERY, J., COSTE, M. & DELMAS, F. - 2013 - Programme d'Etude et de Recherche 2009-2012 - Mise au point d'un indice de bio-indication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées : l'IDA. Rapport final (Version du 14/10/2013). 189 pages + annexes.

GUEGUEN, J., EULIN, A., LEFRANCOIS, E., BOUTRY, S., ROSEBERY, J., COSTE, M. & DELMAS, F. - 2013 - Programme d'Etude et de Recherche 2009-2012 - Mise au point d'un indice de bio-indication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées : l'IDA. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Diatomées Antillais (Version du 04/04/2013). 88 pages + planches iconographiques.

EULIN A., LEFRANCOIS, E., GUEGUEN, J., ROSEBERY, J., COSTE, M., DELMAS, F. - 2013- Note de travail : Evaluation de l'Etat Ecologique dans l'HER regroupée « Volcan » à partir de L'IDA (Indice Diatomique Antilles). Version du 28-05-2013, 4 pages.

GUEGUEN, J., EULIN, A., LEFRANCOIS, E., BOUTRY, S., ROSEBERY, J., COSTE, M. & DELMAS, F. - 2014 - Programme d'Etude et de Recherche 2009-2012 - Mise au point d'un indice de bio-indication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées : l'IDA. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Diatomées Antillais – Volume 1 (Version du 29/04/2014). 128 pages + planches illustratives des taxons inventoriés.

GUEGUEN, J., EULIN, A., LEFRANCOIS, E., BOUTRY, S., ROSEBERY, J., COSTE, M. & DELMAS, F. - 2014 - Programme d'Etude et de Recherche 2009-2012 - Mise au point d'un indice de bio-indication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées : l'IDA. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Diatomées Antillais – Volume 2 (Version du 29/04/2014). 474 p. dont planches iconographiques.

EULIN A., LEFRANCOIS, E., GUEGUEN, J., ROSEBERY, J., COSTE, M., DELMAS, F. - 2013- Note de travail : Evaluation de l'Etat Ecologique dans l'HER regroupée « Volcan » à partir de L'IDA (Indice Diatomique Antilles). Version du 28-05-2013, 4 pages.

EULIN A., LEFRANCOIS, E., GUEGUEN, J., ROSEBERY, J., COSTE, M., DELMAS, F. - 2014- Note technique : Evaluation de l'Etat Ecologique aux Antilles à partir de l'IDA-2 (Indice Diatomique Antilles). Version finale du 11/05/2014, 48 pages.

GUEGUEN, J., EULIN, A., LEFRANCOIS, E., BOUTRY, S., ROSEBERY, J., COSTE, M. & DELMAS, F. - 2015 - Programme d'Etude et de Recherche 2009-2014 - Production d'une version améliorée de l'Indice Diatomique Antilles (IDA-2), utilisation pour l'évaluation de l'Etat Ecologique des cours d'eau des Antilles. Rapport final (Version du 12/03/2015). 134 pages + annexes.

EULIN A., LEFRANCOIS E., DELMAS F., COSTE M., GUEGUEN J. et ROSEBERY J. 2017 Flore des diatomées des Antilles françaises. 5 volumes, 763 p.

LEFRANCOIS, E., EULIN, A., GUEGUEN, J., COSTE, M., DELMAS, F., MONNIER, O. Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'indice diatomique antillais – IDA. Collection "Guides et protocoles" de l'AFB. A paraître

Annexe 3 : Caractéristiques des 189 stations étudiées

Code station	Nom de la station	HER	x	y	Statut référence
00DCE_01	Saint Lucien (Tortue)	Bouclier Guyanais	330339	463522	Non
09110503	Petit	Bouclier Guyanais	267058	590087	Ref_Perenne
09111214	Sainte Anne Cacao	Bouclier Guyanais	338401	506633	Non
09111216	Tigany	Bouclier Guyanais	339705	506622	Non
09111507	Cipanama	Plaine littorale du Nord	387830	467703	Non
09120115	Bastien	Bouclier Guyanais	143093	582471	Ref_Temporaire
09121208	Crique Cacao	Bouclier Guyanais	337965	504388	Ref_Perenne
09121215	Sainte Marie	Bouclier Guyanais	335822	505038	Non
09130715	Crique Maman Lézard	Bouclier Guyanais	278512	560504	Ref_Perenne
09131004	Macouria "matiti"	Plaine littorale du Nord	324386	553966	Ref_Perenne
09131212	aval Crique Cacao	Bouclier Guyanais	336912	505930	Non
09131508	Affluent Païra	Plaine littorale du Nord	387829	467702	Ref_Perenne
09140111	Charvein	Plaine littorale du Nord	178016	617587	Non
09140706	Saulnier	Bouclier Guyanais	222809	583441	Non
09140707	Crique Toussaint	Plaine littorale du Nord	277887	592616	Ref_Temporaire
09140902	Passoura	Plaine littorale du Nord	311564	569558	Non
09140903	Singe rouge	Plaine littorale du Nord	311244	553154	Non
09140906	Singes rouges PME	Plaine littorale du Nord	315435	552329	Ref_Perenne
09141102	Tonnegrande	Plaine littorale du Nord	340002	533870	Ref_Temporaire
09141222	Boulangier amont	Bouclier Guyanais	344925	505219	Non
09141223	Boulangier aval	Bouclier Guyanais	349465	509198	Non
09141224	Saint Régis	Bouclier Guyanais	346308	518370	Non
09141225	Tibourou aval	Bouclier Guyanais	349185	498059	Non
09141515	Affluent Crique Ineri	Bouclier Guyanais	369710	477123	Non
09150110	Balate	Bouclier Guyanais	162823	605871	Non
09150205	Sainte Anne	Bouclier Guyanais	188370	614203	Non
09151206	Orapu	Bouclier Guyanais	353146	510428	Non
09151207	Degrad Correze	Bouclier Guyanais	350504	499963	Non
09151208	Degrad Moufflet	Bouclier Guyanais	347073	495487	Non
09151217	Dégrad Corrèze	Bouclier Guyanais	353274	499667	Non
09151401	Kaw	Bouclier Guyanais	375414	491940	Ref_Temporaire
09151701	Gabaret	Bouclier Guyanais	406484	432453	Non
09160102	Sparouine	Bouclier Guyanais	218015,32	582097,87	Non
09160116	Sparouine (Takouba)	Bouclier Guyanais	144764	563986	Ref_Perenne
09160201	Acarouany	Plaine littorale du Nord	188010	622135	Non

09160211	Populo 1	Plaine littorale du Nord	187544	620976	Non
09160212	Populo2	Plaine littorale du Nord	186461	620092	Non
09160501	Patagai	Bouclier Guyanais	248366	598455	Non
09160901	Leodate	Bouclier Guyanais	301150	534749	Non
09161004	Crique Matiti	Bouclier Guyanais	323146	551535	Non
09161505	Mataroni	Bouclier Guyanais	368830	467694	Ref_Temporaire
09170701	Vénus	Bouclier Guyanais	280712	573395	Non
09171201	Cacao Aval	Bouclier Guyanais	337854	507694	Non
09171205	Mahury (Cacao aval)	Plaine littorale du Nord	352186	524557	Non
09171506	Régina	Plaine littorale du Nord	375966	478911	Non
09180101	aval Apatou	Bouclier Guyanais	130709	573901	Non
09180109	aval Saint Laurent	Plaine littorale du Nord	166164	613563	Non
09180203	Mana aval	Plaine littorale du Nord	198173	621871	Non
09180209	Angoulême	Bouclier Guyanais	204702	597757	Non
09181706	Maripa aval	Bouclier Guyanais	403245	421083	Non
09220703	Tigre	Bouclier Guyanais	256250	545021	Non
09220905	Crique Kampi	Bouclier Guyanais	297954	533734	Non
09221210	Crique affluent Bois Bandé	Bouclier Guyanais	326190	469463	Non
09230114	Crique Nouvelle France	Bouclier Guyanais	258266	401710	Ref_Perenne
09230206	Crique à l'Est	Bouclier Guyanais	253189	405143	Ref_Temporaire
09230208	Petit Laussat aval	Bouclier Guyanais	213951	598468	Non
09231236	Petit Approuague nord	Bouclier Guyanais	352579	481943	Non
09231509	Crique Calebasse	Bouclier Guyanais	264268	399022	Ref_Perenne
09231511	Kapiri	Bouclier Guyanais	371284	458308	Ref_Temporaire
09231519	Crique affluent Kapiri	Plaine littorale du Nord	379397	453716	Ref_Temporaire
09240207	Korossibo	Bouclier Guyanais	207827	570273	Non
09240705	Crique Saul	Bouclier Guyanais	284200	500839	Ref_Perenne
09241209	Crique Grillon	Bouclier Guyanais	339670	473075	Non
09250113	Salva	Bouclier Guyanais	122937	522973	Non
09250202	Plaque Roche	Bouclier Guyanais	230932	595738	Non
09250215	Pont Piste Sainte Anne	Bouclier Guyanais	186265	615327	Non
09250502	Plaque Roche 2	Bouclier Guyanais	230932	595738	Non
09251504	Balenfrois	Bouclier Guyanais	310546	446341	Ref_Perenne
09260103	Apsik Icholi	Bouclier Guyanais	147193	325363	Ref_Perenne
09260112	Petit Inini	Bouclier Guyanais	186188	404824	Non
09260702	Saut Dalles	Bouclier Guyanais	289388	503502	Ref_Perenne
09260704	Leblond	Bouclier Guyanais	263095	528158	Non
09261202	Roche Fendé	Bouclier Guyanais	324338	486282	Non
09261203	Bagot	Bouclier Guyanais	330932	500960	Ref_Perenne

09261204	Galibi	Bouclier Guyanais	321440	486258	Ref_Perenne
09261501	Arataï	Bouclier Guyanais	310327	445999	Ref_Perenne
09261702	Noussiri	Bouclier Guyanais	383197	396967	Ref_Perenne
09261705	Armontabo	Bouclier Guyanais	391068	409835	Ref_Perenne
09270104	Marouini	Bouclier Guyanais	157124	357751	Ref_Perenne
09270105	Saut Sonnelle	Bouclier Guyanais	171026	405980	Non
09270204	Saut Fracas	Bouclier Guyanais	202789	526528	Non
09271220	Griffolet	Bouclier Guyanais	334135	502534	Non
09271502	Machicou	Bouclier Guyanais	324414	431668	Non
09271503	Athanase	Bouclier Guyanais	354031	464044	Non
09271510	Colonis	Bouclier Guyanais	347231	462869	Non
09271707	Saut Alexis	Bouclier Guyanais	339012	354539	Non
09280106	Twenké	Bouclier Guyanais	160846	372345	Non
09280107	Papaichton	Bouclier Guyanais	150816	421270	Non
09280108	Langatabiki	Bouclier Guyanais	118065	551801	Non
09280202	Saut Lézard	Bouclier Guyanais	191367	550435	Non
09281703	Païra Itou (Camopi)	Bouclier Guyanais	350970	341942	Non
09281704	Saut Fourmi	Bouclier Guyanais	395786	411734	Ref_Perenne
12R08004	Orapu 2	Bouclier Guyanais	353817	511462	Non
60008450	Couchipouri	Bouclier Guyanais	368789	473360	Non
60008451	Rizière Mana 1	Plaine littorale du Nord	194151	626921	Non
60008452	Rizière Mana 2	Plaine littorale du Nord	188123	625517	Non
60009351	Comté Pont	Bouclier Guyanais	349634	515395	Non
60009354	Galion	Bouclier Guyanais	341722	526199	Non
RC1	Amont Roche hirondelles	Bouclier Guyanais	238751	602174	Ref_Temporaire
RC2	Amont dégrad Maman Piray	Bouclier Guyanais	241645	599671	Non
RC3	Patagay DCE	Bouclier Guyanais	248617	598390	Non
RC24	Aval dégrad Savane	Plaine littorale du Nord	251724	606193	Non
RC5	Amont Iracoubo	Plaine littorale du Nord	254589	603820	Non
RC6	Aval Saut Bief	Bouclier Guyanais	333623	503312	Non
RC7	Ponton Carbet Pompier	Bouclier Guyanais	343167	512942	Non
RC9	Ponton Aval Pont RN	Bouclier Guyanais	351423	514821	Non
RC10	Ponton Roura	Bouclier Guyanais	352669	522747	Non
RC8	Amont Station Comté EP	Bouclier Guyanais	349218	515321	Non
PME_19	Paracou amont	Bouclier Guyanais	288648	584704	Ref_Perenne
PME_20	Paracou aval	Bouclier Guyanais	289896	585071	Non
PME_22	ONF 6	Bouclier Guyanais	370598	459187	Non
PME_23	ONF 7	Bouclier Guyanais	378794	452287	Non
PME_24	Crique La Boue	Bouclier Guyanais	336608	459824	Non

PME_25	Crique Tortue	Bouclier Guyanais	334465	465509	Non
PME_27	Tête Crique Tortue	Bouclier Guyanais	330515	463675	Non
PME_28	Saint Lucien	Bouclier Guyanais	330339	463522	Non
PME_30	Crique Rosette	Bouclier Guyanais	325169	470452	Non
PME_31	Crique Blanc	Bouclier Guyanais	320476	463330	Non
PME_32	Affluent Crique Blanc	Bouclier Guyanais	323296	465615	Non
PME_33	Tawin	Bouclier Guyanais	345041	476542	Non
PME_34	Affluent Crique Tortue	Bouclier Guyanais	334466	465507	Non
PME_35	Crique Bois Bandé	Bouclier Guyanais	329456	474065	Non
PME_37	Petit Approuague	Bouclier Guyanais	352636	482582	Non
PME_38	Affluent Crique La Boue	Bouclier Guyanais	336608	459824	Non
PME_39	Volitalia 2	Bouclier Guyanais	205006	591184	Non
PME_40	Volitalia 3	Bouclier Guyanais	204816	592866	Non
PME_41	Volitalia 4	Bouclier Guyanais	204865	594913	Non
PME_43	ISDND-1	Bouclier Guyanais	329041	546014	Non
PME_44	Grande Waki	Bouclier Guyanais	225340	351300	Ref_Perenne
PME_45	Gargoulette	Bouclier Guyanais	214360	605447	Non
PME_46	Organabo	Bouclier Guyanais	219214	605178	Non
PME_48	Petit Laussat 3 amont	Bouclier Guyanais	216855	598271	Ref_Temporaire
PME_52	Cascade	Bouclier Guyanais	155485	592530	Ref_Temporaire
PME_53	Crique APA	Bouclier Guyanais	158180	591459	Ref_Temporaire
PME_55	Crique Pontat	Bouclier Guyanais	136071	577664	Ref_Temporaire
PME_56	Kaipiri 1	Bouclier Guyanais	379461	457816	Non
PME_57	Kaipiri 2	Bouclier Guyanais	379395	453675	Non
PME_58	Kaipiri 4	Bouclier Guyanais	379739	451214	Non
PME_59	Kaipiri 5	Bouclier Guyanais	376232	449844	Ref_Temporaire
PME_61	Crique Dachine	Bouclier Guyanais	342147	509719	Non
PME_62	Crique Grenouille	Bouclier Guyanais	173402	521999	Non
PME_63	Crique Bordel	Bouclier Guyanais	173704	523532	Non
PME_64	Crique Montagne	Bouclier Guyanais	173068	521520	Non
PME_65	Crique Clando	Bouclier Guyanais	170790	526213	Non
PME_66	Crique Quad	Bouclier Guyanais	169647	525204	Non
PME_67	Crique Violette	Bouclier Guyanais	171718	524255	Non
PME_69	Crique Mari	Bouclier Guyanais	404902	427877	Non
PME_7	Aratai 1 amont	Bouclier Guyanais	313851	446634	Ref_Perenne
PME_70	Crique SM	Bouclier Guyanais	403290	426558	Non
PME_71	Crique Minette	Bouclier Guyanais	402845	422317	Non
PME_72	Crique Pied Saut	Bouclier Guyanais	400518	420741	Non
PME_73	Eaux Claires	Bouclier Guyanais	292548	569230	Ref_Perenne

PME_75	Relâché 1	Bouclier Guyanais	281833	558669	Ref_Perenne
PME_76	Relâché 2	Bouclier Guyanais	281017	558346	Ref_Perenne
PME_78	Trois Saut Amont	Bouclier Guyanais	302358	256334.9	Ref_Perenne
PME_79	Trois Saut Aval	Bouclier Guyanais	302358	256334.9	Ref_Perenne
PME_8	Arataï 9 aval	Bouclier Guyanais	312113	447649	Ref_Perenne
PME_83	Crique Saint Elie	Bouclier Guyanais	272188	581496	Non
PME_84	Crique Georges	Bouclier Guyanais	272410	563982	Ref_Perenne
PME_85	Crique Humus	Bouclier Guyanais	328464	543873	Non
PME_86	Crique Galibi	Bouclier Guyanais	300695	538791	Ref_Perenne
PME_87	Bas Lucifer	Bouclier Guyanais	265458	528946	Non
PME_88	Deux Roros	Bouclier Guyanais	292488	485323	Ref_Perenne
PME_89	Crique Chien S1	Bouclier Guyanais	334622	352501	Non
PME_90	Crique Chien S2	Bouclier Guyanais	334203	352089	Non
RC11	Amont Pont RN1	Bouclier Guyanais	178369	604747	Non
RC12	Amont Cacao	Bouclier Guyanais	334155	502510	Non
RC13	amont ancien rejet	Plaine littorale du Nord	356784	546047	Non
RC14	Relais du Galion	Bouclier Guyanais	341725	526198	Non
RC15	Rejet	Bouclier Guyanais	163535	605352	Non
RC16	Copeaux Canne	Bouclier Guyanais	163449	605450	Non
RC17	Crique Boulanger	Bouclier Guyanais	344773	505245	Non
RC18	amont Crique Boulanger	Bouclier Guyanais	345049	504284	Non
RC20	Pont RN	Bouclier Guyanais	162639	606025	Non
RC21	Amont pont Crique Cacao	Bouclier Guyanais	337321	505392	Non
RC22	Ponton Auberge	Bouclier Guyanais	370047	472959	Non
RC25	Crique Corossony	Bouclier Guyanais	238751	599671	Non
RC26	Crique Jean-Pierre	Bouclier Guyanais	367070	472433	Non
RC27	Carrière RIBAL	Bouclier Guyanais	342340	524484	Non
RC28	Roura	Bouclier Guyanais	344240	473701	Non
RC29	Orpaillage citerne	Bouclier Guyanais	330434	470315	Non
RC30	aval poste refoulement STEP	Bouclier Guyanais	337022	505614	Non
RC4	aval zone de lagunage	Bouclier Guyanais	337037	505908	Non
09121101	Cayenne	Plaine littorale du Nord	346452	537838	Non
09271211	Lisis	Bouclier Guyanais	331935	499174	Non
PME_93	Crique Gargoulette	Bouclier Guyanais	214359	605447	Non
PME_91	Abattis Kotika A	Bouclier Guyanais	138410	438365	Ref_Perenne
PME_92	Atachi bakka A	Bouclier Guyanais	121017	491956	Ref_Perenne
RC31	SINNAMARY A KERENROCK	Bouclier Guyanais	272843	563373	Non

Annexe 4 : Détail du classement écologique issu de l'IDGF pour chaque relevé diatomique

Code station	Nom de la station	Date	IDGF	Classe
09270204	Saut Fracas	20/08/2008	0,75	Bon
09140111	Charvein	26/08/2008	0,95	Très bon
09260103	Apsik Icholi	10/09/2008	0,87	Bon
09270104	Marouini	11/09/2008	0,8	Bon
09260112	Petit Inini	14/09/2008	0,48	Médiocre
09280107	Papaichton	15/09/2008	0,91	Très bon
09271503	Athanase	14/09/2008	0,9	Très bon
09161505	Mataroni	16/09/2008	0,95	Très bon
09160901	Leodate	07/10/2008	1	Très bon
09140903	Singe rouge	08/10/2008	0,8	Bon
09151206	Orapu	23/09/2008	0,85	Bon
09140902	Passoura	02/10/2008	0,79	Bon
09281703	Païra Itou (Camopi)	22/10/2008	0,8	Bon
09261702	Noussiri	23/10/2008	0,89	Très bon
09261705	Armontabo	24/10/2008	0,96	Très bon
09281704	Saut Fourmi	25/10/2008	0,95	Très bon
09181706	Maripa aval	26/10/2008	0,84	Bon
09261203	Bagot	22/10/2008	0,99	Très bon
09171201	Cacao Aval	23/10/2008	0,92	Très bon
09180109	aval Saint Laurent	14/11/2008	0,83	Bon
09280108	Langatabiki	04/11/2008	0,92	Très bon
09160102	Sparouine	12/11/2008	0,94	Très bon
09250502	Plaque Roche 2	20/10/2010	0,97	Très bon
09271502	Machicou	25/10/2010	0,79	Bon
09271503	Athanase	26/10/2010	0,92	Très bon

09161505	Mataroni	28/10/2010	0,97	Très bon
09160901	Leodate	24/11/2010	0,99	Très bon
09151206	Orapu	09/12/2010	0,93	Très bon
09171201	Cacao Aval	08/12/2010	0,92	Très bon
09180109	aval Saint Laurent	05/11/2010	0,78	Bon
09280108	Langatabiki	04/11/2010	0,79	Bon
09160102	Sparouine	02/11/2010	0,77	Bon
09140111	Charvein	16/09/2011	0,44	Médiocre
09140707	Crique Toussaint	17/09/2011	0,94	Très bon
09250502	Plaque Roche 2	21/09/2011	0,95	Très bon
09160501	Patagai	22/09/2011	0,95	Très bon
09260103	Apsik Icholi	30/09/2011	0,7	Moyen
09270104	Marouini	01/10/2011	0,75	Bon
09280106	Twenké	29/09/2011	0,83	Bon
09280107	Papaichton	02/10/2011	0,6	Moyen
09271502	Machicou	13/10/2011	0,74	Moyen
09271503	Athanase	14/10/2011	0,72	Moyen
09161505	Mataroni	15/10/2011	0,96	Très bon
09171506	Régina	15/10/2011	0,68	Moyen
09140903	Singe rouge	04/11/2011	0,75	Bon
09140902	Passoura	08/09/2011	0,54	Moyen
09281703	Païra Itou (Camopi)	26/10/2011	0,86	Bon
09261702	Noussiri	27/10/2011	0,87	Bon
09261705	Armontabo	28/10/2011	0,75	Moyen
09281704	Saut Fourmi	29/10/2011	0,86	Bon
09181706	Maripa aval	30/10/2011	0,91	Très bon
09261203	Bagot	28/09/2011	0,98	Très bon
09160102	Sparouine	29/09/2011	0,93	Très bon
09260702	Saut Dalles	17/11/2011	0,98	Très bon

09270204	Saut Fracas	24/10/2012	0,89	Très bon
09280202	Saut Lézard	23/10/2012	0,86	Bon
09140111	Charvein	13/09/2012	0,98	Très bon
09140707	Crique Toussaint	14/09/2012	0,98	Très bon
09250502	Plaque Roche 2	18/09/2012	0,95	Très bon
09160501	Patagai	19/09/2012	0,94	Très bon
09270104	Marouini	21/09/2012	0,89	Très bon
09280106	Twenké	23/09/2012	0,89	Très bon
09270105	Saut Sonnelle	24/09/2012	0,87	Bon
09260112	Petit Inini	25/09/2012	0,81	Bon
09280107	Papaichton	26/09/2012	0,85	Bon
09261501	Arataï	10/10/2012	0,98	Très bon
09271502	Machicou	12/10/2012	0,84	Bon
09271503	Athanase	13/10/2012	0,98	Très bon
09161505	Mataroni	15/10/2012	0,95	Très bon
09160901	Leodate	17/10/2012	0,99	Très bon
09220703	Tigre	05/11/2012	0,84	Bon
09151206	Orapu	09/10/2012	0,68	Moyen
09141102	Tonnegrande	05/09/2012	0,88	Bon
09140902	Passoura	04/09/2012	0,55	Moyen
09281703	Païra Itou (Camopi)	23/10/2012	0,85	Bon
09271707	Saut Alexis	24/10/2012	0,89	Très bon
09261702	Noussiri	25/10/2012	0,91	Très bon
09261705	Armontabo	26/10/2012	0,82	Bon
09281704	Saut Fourmi	27/10/2012	0,92	Très bon
09261202	Roche Fendé	02/10/2012	0,88	Bon
09261203	Bagot	03/10/2012	1	Très bon
09171201	Cacao Aval	04/10/2012	0,85	Bon
09180109	aval Saint Laurent	11/09/2012	0,76	Bon

09280108	Langatabiki	11/09/2012	0,93	Très bon
09160102	Sparouine	13/09/2012	0,96	Très bon
09180101	aval Apatou	12/09/2012	0,9	Très bon
09260702	Saut Dalles	15/11/2012	0,98	Très bon
09170701	Vénus	06/12/2012	0,82	Bon
09270204	Saut Fracas	03/10/2013	0,77	Bon
09280202	Saut Lézard	21/10/2013	0,8	Bon
09280106	Twenké	25/10/2013	0,71	Moyen
09270105	Saut Sonnelle	23/10/2013	0,58	Moyen
09280107	Papaichton	22/10/2013	0,81	Bon
09271502	Machicou	08/10/2013	0,78	Bon
09271503	Athanase	08/10/2013	0,85	Bon
09220703	Tigre	05/11/2013	0,68	Moyen
09271707	Saut Alexis	22/10/2013	0,74	Moyen
09261702	Noussiri	23/10/2013	0,93	Très bon
09261705	Armontabo	24/10/2013	0,87	Bon
09281704	Saut Fourmi	25/10/2013	0,86	Bon
09151401	Kaw	26/10/2013	0,91	Très bon
09280108	Langatabiki	14/10/2013	0,89	Très bon
09160102	Sparouine	16/10/2013	0,93	Très bon
09260702	Saut Dalles	20/11/2013	0,93	Très bon
09170701	Vénus	19/12/2013	0,69	Moyen
09220905	Crique Kampi	01/10/2013	0,85	Bon
09230114	Crique Nouvelle France	05/11/2013	0,9	Très bon
09240705	Crique Saul	18/11/2013	0,9	Très bon
09140707	Crique Toussaint	07/11/2013	0,93	Très bon
09140906	Singes rouges PME	02/10/2013	0,91	Très bon
09131508	Affluent Païra	10/10/2013	0,86	Bon
09131004	Macouria "matiti"	02/10/2013	0,68	Moyen

09110503	Petit	07/11/2013	0,9	Très bon
09180209	Angoulême	04/11/2013	0,74	Moyen
09280202	Saut Lézard	22/10/2014	0,93	Très bon
09150205	Sainte Anne	17/11/2014	0,9	Très bon
09150205	Sainte Anne	30/10/2014	0,9	Très bon
09160201	Acarouany	24/10/2014	0,99	Très bon
09250502	Plaque Roche 2	28/10/2014	0,99	Très bon
09160501	Patagai	29/10/2014	0,91	Très bon
09280106	Twenké	07/11/2014	0,99	Très bon
09270105	Saut Sonnelle	08/11/2014	0,89	Très bon
09280107	Papaichton	05/11/2014	0,94	Très bon
09280107	Papaichton	06/11/2014	0,94	Très bon
09271502	Machicou	28/10/2014	0,97	Très bon
09271503	Athanase	30/10/2015	0,96	Très bon
09260704	Leblond	13/11/2014	0,71	Moyen
09281703	Païra Itou (Camopi)	15/10/2014	0,92	Très bon
09271707	Saut Alexis	14/10/2014	0,91	Très bon
09261702	Noussiri	16/10/2014	0,94	Très bon
09281704	Saut Fourmi	17/10/2014	0,94	Très bon
09151701	Gabaret	18/10/2014	0,87	Bon
09261202	Roche Fendé	29/11/2014	0,96	Très bon
09261202	Roche Fendé	28/11/2014	0,96	Très bon
09180101	aval Apatou	05/11/2014	0,94	Très bon
09260702	Saut Dalles	19/11/2014	0,97	Très bon
09260702	Saut Dalles	20/11/2014	0,97	Très bon
09140707	Crique Toussaint	02/12/2014	0,99	Très bon
09110503	Petit	02/12/2014	0,93	Très bon
09180209	Angoulême	23/10/2014	0,86	Bon
09151207	Degrad Correze	14/11/2014	0,83	Bon

09231509	Crique Calebasse	19/11/2015	0,95	Très bon
09120115	Bastien	07/11/2014	1	Très bon
09121208	Crique Cacao	26/11/2014	0,67	Moyen
09121208	Crique Cacao	22/11/2014	0,67	Moyen
09230208	Petit Laussat aval	23/10/2014	0,97	Très bon
00DCE_01	Saint Lucien (Tortue)	12/11/2014	0,75	Moyen
09241209	Crique Grillon	13/11/2014	0,91	Très bon
09271510	Colonis	29/10/2014	0,92	Très bon
09260103	Apsik Icholi	05/10/2015	0,98	Très bon
09270104	Marouini	03/10/2015	0,95	Très bon
09270105	Saut Sonnelle	03/10/2015	0,62	Moyen
09280107	Papaichton	07/10/2015	0,74	Moyen
09280106	Twenké	06/10/2015	0,9	Très bon
09280108	Langatabiki	06/10/2015	0,99	Très bon
09160102	Sparouine	06/10/2015	0,87	Bon
09180101	aval Apatou	19/01/2016	0,62	Moyen
09120115	Bastien	09/10/2015	0,94	Très bon
09280202	Saut Lézard	27/10/2015	0,93	Très bon
09180209	Angoulême	08/12/2015	0,61	Moyen
09150205	Sainte Anne	08/12/2015	0,95	Très bon
09160201	Acarouany	08/12/2015	0,91	Très bon
09230208	Petit Laussat aval	28/09/2015	0,91	Très bon
09230206	Crique à l'Est	28/10/2015	0,86	Bon
09160901	Leodate	03/11/2015	0,96	Très bon
09260704	Leblond	05/11/2015	0,71	Moyen
09170701	Vénus	09/12/2015	0,41	Médiocre
09140707	Crique Toussaint	09/11/2015	0,95	Très bon
09131004	Macouria "matiti"	09/11/2015	0,9	Très bon
09261202	Roche Fendé	03/11/2015	0,9	Très bon

09261203	Bagot	03/11/2015	0,86	Bon
09171201	Cacao Aval	10/12/2015	0,58	Moyen
09151207	Degrad Correze	06/11/2015	0,82	Bon
09121208	Crique Cacao	10/11/2015	0,62	Moyen
09241209	Crique Grillon	12/11/2015	0,78	Bon
09221210	Crique affluent Bois Bandé	16/12/2015	0,52	Moyen
09271502	Machicou	24/10/2015	0,92	Très bon
09271503	Athanase	13/10/2015	0,91	Très bon
09231511	Kapiri	15/10/2015	0,97	Très bon
09271707	Saut Alexis	20/10/2015	0,91	Très bon
09151701	Gabaret	22/10/2015	0,98	Très bon
09270105	Saut Sonnelle	05/09/2016	0,45	Médiocre
09280107	Papaichton	04/10/2016	0,81	Bon
09280106	Twenké	03/10/2016	0,95	Très bon
09280108	Langatabiki	05/10/2016	0,97	Très bon
09160102	Sparouine	24/11/2016	0,54	Moyen
09180101	aval Apatou	03/01/2017	0,81	Bon
09160116	Sparouine (Takouba)	03/10/2016	0,94	Très bon
09280202	Saut Lézard	27/09/2016	0,76	Bon
09180209	Angoulême	02/12/2016	0,81	Bon
09150205	Sainte Anne	02/12/2016	0,86	Bon
09160201	Acarouany	02/12/2016	0,96	Très bon
09230208	Petit Laussat aval	29/09/2016	0,83	Bon
09230206	Crique à l'Est	10/11/2016	0,83	Bon
09260704	Leblond	07/11/2016	0,72	Moyen
09170701	Vénus	04/01/2017	0,55	Moyen
09140707	Crique Toussaint	12/10/2016	0,9	Très bon
09131004	Macouria "matiti"	02/11/2016	0,72	Moyen
09160501	Patagai	24/11/2016	0,74	Moyen

09250502	Plaque Roche 2	11/10/2016	0,88	Bon
09261202	Roche Fendé	20/10/2016	0,8	Bon
09261203	Bagot	19/10/2016	0,9	Très bon
09171201	Cacao Aval	02/12/2016	0,82	Bon
09151207	Degrad Correze	13/12/2016	0,73	Moyen
09121208	Crique Cacao	20/10/2016	0,6	Moyen
09241209	Crique Grillon	24/10/2016	0,84	Bon
09221210	Crique affluent Bois Bandé	24/10/2016	0,56	Moyen
09271502	Machicou	03/11/2016	0,96	Très bon
09271503	Athanase	16/01/2017	0,98	Très bon
09261501	Arataï	01/11/2016	0,94	Très bon
09231511	Kapiri	21/11/2016	0,8	Bon
09271707	Saut Alexis	25/10/2016	0,87	Bon
09281703	Païra Itou (Camopi)	26/10/2016	0,86	Bon
09261702	Noussiri	27/10/2016	0,93	Très bon
09281704	Saut Fourmi	28/10/2016	0,89	Très bon
09151701	Gabaret	19/01/2017	0,93	Très bon
09271503	Athanase	27/12/2017	0,9	Très bon
09271502	Machicou	26/10/2017	0,89	Très bon
09231519	Crique affluent Kapiri	24/10/2017	1	Très bon
09231509	Crique Calebasse	28/11/2017	1	Très bon
09160901	Leodate	30/10/2017	0,96	Très bon
09131004	Macouria "matiti"	19/10/2017	0,95	Très bon
09171201	Cacao Aval	11/12/2017	0,83	Bon
09151217	Dégrad Corrèze	23/01/2018	0,82	Bon
09261202	Roche Fendé	24/10/2017	0,93	Très bon
09221210	Crique affluent Bois Bandé	23/10/2017	0,63	Moyen
09241209	Crique Grillon	23/10/2017	0,74	Moyen
09180209	Angoulème	31/10/2017	0,77	Bon

09150205	Sainte Anne	31/10/2017	0,98	Très bon
09280202	Saut Lézard	26/09/2017	0,77	Bon
09160201	Acarouany	31/10/2017	0,85	Bon
09230208	Petit Laussat aval	16/10/2017	0,97	Très bon
09260103	Apsik Icholi	27/09/2017	0,86	Bon
09180101	aval Apatou	28/12/2017	0,92	Très bon
09280108	Langatabiki	12/09/2017	0,95	Très bon
09280107	Papaichton	28/09/2017	0,88	Très bon
09270105	Saut Sonnelle	28/09/2017	0,68	Moyen
09160102	Sparouine	31/10/2017	0,88	Bon
09280106	Twenké	28/09/2017	0,93	Très bon
09270104	Marouini	25/09/2017	0,83	Bon
09230114	Crique Nouvelle France	27/11/2017	1	Très bon
09151701	Gabaret	13/11/2017	0,92	Très bon
09271707	Saut Alexis	02/10/2017	0,87	Bon
09260704	Leblond	14/11/2017	0,85	Bon
09260702	Saut Dalles	09/10/2017	0,94	Très bon
09170701	Vénus	08/01/2018	0,95	Très bon
09131004	Macouria "matiti"	09/12/2010	0,97	Très bon
09140707	Crique Toussaint	13/12/2010	0,94	Très bon
09110503	Petit	14/12/2010	0,89	Très bon
09130715	Crique Maman Lézard	06/07/2011	0,98	Très bon
09130715	Crique Maman Lézard	07/07/2011	0,95	Très bon
09140707	Crique Toussaint	03/08/2011	0,98	Très bon
PME_91	Abattis Kotika A	10/09/2011	0,92	Très bon
PME_92	Atachi bakka A	13/09/2011	0,88	Bon
PME_19	Paracou amont	03/10/2011	0,9	Très bon
PME_48	Petit Laussat 3 amont	28/08/2012	0,93	Très bon
PME_44	Grande Waki	14/08/2012	0,96	Très bon

PME_93	Crique Gargoulette	29/08/2012	0,99	Très bon
09230206	Crique à l'Est	06/09/2012	0,88	Très bon
09230114	Crique Nouvelle France	06/09/2012	0,88	Très bon
PME_53	Crique APA	10/09/2012	0,94	Très bon
PME_52	Cascade	11/09/2012	0,87	Bon
PME_58	Kaipiri 4	19/09/2012	0,98	Très bon
PME_59	Kaipiri 5	19/09/2012	0,98	Très bon
PME_61	Crique Dachine	24/09/2012	0,92	Très bon
PME_69	Crique Mari	08/10/2012	0,95	Très bon
PME_70	Crique SM	08/10/2012	0,96	Très bon
09140707	Crique Toussaint	22/10/2012	0,94	Très bon
PME_83	Crique Saint Elie	25/10/2012	0,84	Bon
PME_85	Crique Humus	30/10/2012	0,84	Bon
PME_86	Crique Galibi	01/11/2012	0,92	Très bon
09160211	Populo 1	13/12/2016	0,65	Moyen
09160212	Populo2	13/12/2016	0,88	Très bon
60008451	Rivière Mana 1	06/02/2017	0,22	Mauvais
60008452	Rivière Mana 2	13/12/2016	0,89	Très bon
09250215	Pont Piste Sainte Anne	13/12/2016	0,72	Moyen
60008450	Couchipouri	09/12/2016	0,92	Très bon
09141515	Affluent Crique Ineri	09/12/2016	0,65	Moyen
09131212	aval Crique Cacao	07/11/2016	0,73	Moyen
09111214	Sainte Anne Cacao	08/11/2016	0,59	Moyen
09121215	Sainte Marie	08/11/2016	0,8	Bon
09111216	Tigany	09/11/2016	0,56	Moyen
60009351	Comté Pont	09/12/2016	0,83	Bon
09271220	Griffolet	05/01/2017	0,72	Moyen
09141222	Boulangier amont	05/01/2017	0,47	Médiocre
09141223	Boulangier aval	19/01/2017	0,49	Médiocre

09141225	Tibourou aval	05/01/2017	0,92	Très bon
09151208	Degrad Moufflet	05/01/2017	0,85	Bon
09231236	Petit Approuague nord	24/10/2016	0,86	Bon
60009354	Galion	09/12/2016	0,39	Médiocre
09141224	Saint Régis	09/12/2016	0,61	Moyen
RC6	Aval Saut Bief	10/12/2015	0,87	Bon
RC7	Ponton Carbet Pompier	10/12/2015	0,97	Très bon
RC8	Amont Station Comté EP	10/12/2015	0,84	Bon
RC9	Ponton Aval Pont RN	10/12/2015	0,87	Bon
RC10	Ponton Roura	10/12/2015	0,94	Très bon
RC1	Amont Roche hirondelles	09/12/2015	0,95	Très bon
RC2	Amont dégrad Maman Piray	09/12/2015	0,91	Très bon
RC3	Patagay DCE	09/12/2015	0,79	Bon
RC24	Aval dégrad Savane	02/03/2016	0,96	Très bon
RC5	Amont Iracoubo	09/12/2015	0,45	Médiocre
RC17	Crique Boulanger	15/12/2015	0,45	Médiocre
RC18	amont Crique Boulanger	15/12/2015	0,54	Moyen
RC28	Roura	16/12/2015	0,86	Bon
RC29	Orpaillage citerne	15/12/2015	0,74	Moyen
RC27	Carrière RIBAL	02/02/2016	0,93	Très bon
RC15	Rejet	15/12/2015	0,7	Moyen
RC16	Copeaux Canne	15/12/2015	0,76	Bon
RC20	Pont RN	08/02/2016	0,88	Bon
RC13	amont ancien rejet	14/12/2015	0	Mauvais
RC30	aval poste refoulement STEP	07/04/2016	0,54	Moyen
RC4	aval zone de lagunage	07/04/2016	0,86	Bon
RC26	Crique Jean-Pierre	17/12/2015	0,83	Bon
RC22	Ponton Auberge	17/12/2015	0,51	Moyen
RC25	Crique Corossony	02/02/2016	0,85	Bon

RC12	Amont Cacao	15/12/2015	0,51	Moyen
RC21	Amont pont Crique Cacao	07/04/2016	0,69	Moyen
RC11	Amont Pont RN1	15/12/2015	0,84	Bon
RC31	Sinnamary a Kerenrock	13/01/2016	0,41	Médiocre



1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
01 40 96 61 21
<http://www.irstea.fr/>

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
<http://www.afbiodiversite.fr/>