



**HAL**  
open science

## **Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques. Phase 1 : étude de faisabilité**

J. Marquié, F. Pérès, François Delmas, Sébastien Boutry, Michel Coste, Y.  
Dominique, Adrien Bertaud

### ► To cite this version:

J. Marquié, F. Pérès, François Delmas, Sébastien Boutry, Michel Coste, et al.. Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques. Phase 1 : étude de faisabilité. [Rapport de recherche] Programme Diatomées, Oeil (Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie), CNRT Nickel et son environnement. 2013, 73 p., annexe III. hal-02605870v1

**HAL Id: hal-02605870**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02605870v1>**

Submitted on 16 May 2020 (v1), last revised 22 Apr 2022 (v2)

**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.

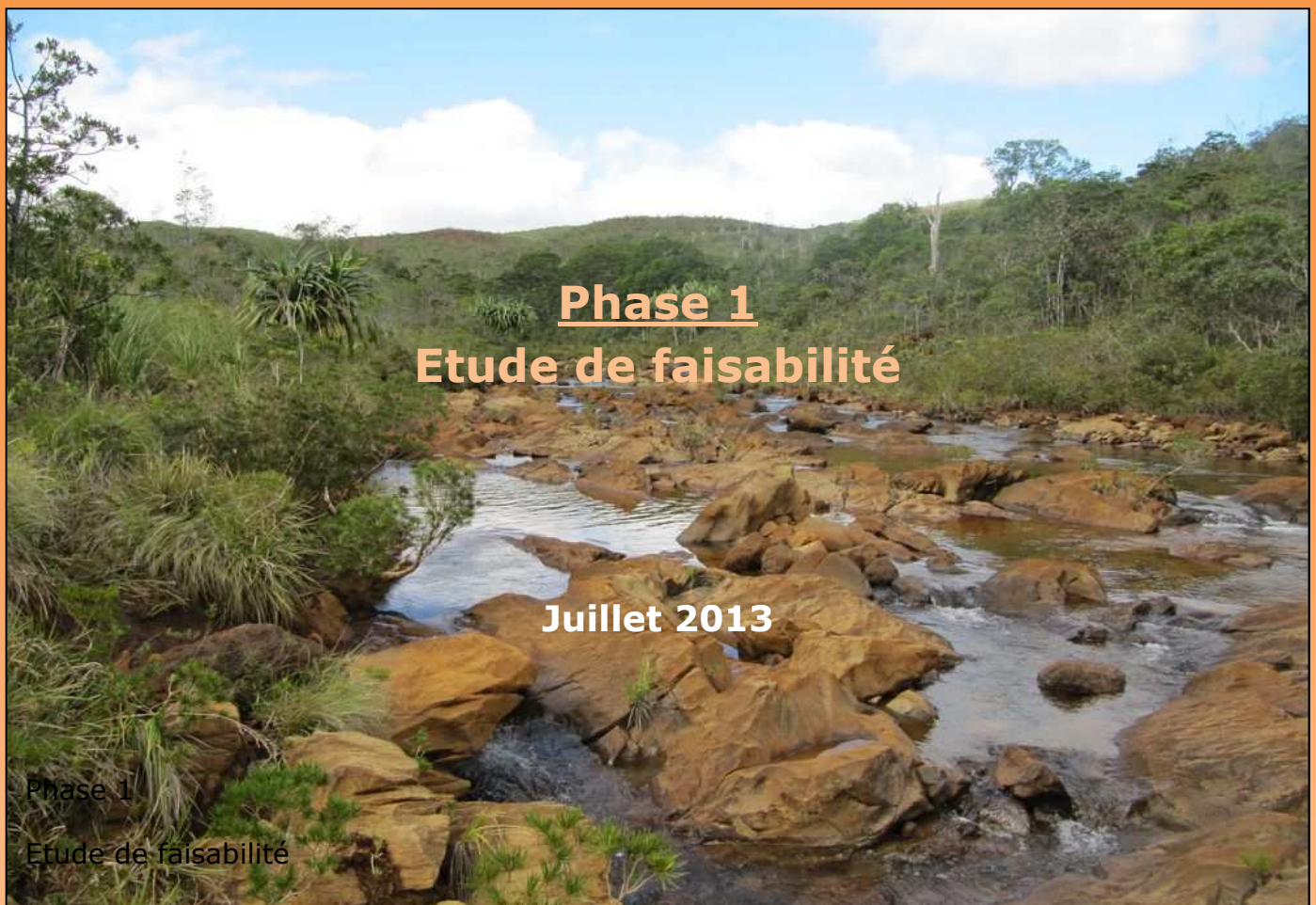


Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

## Programme d'étude et de recherche

2012 - 2015

**Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie:  
Conception d'un atlas taxinomique et d'un indice  
de bio-évaluation  
de la qualité écologique des cours d'eau à partir  
des diatomées benthiques**



Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

Principaux contacts:		
Asconit Consultants	Julien Marquié	<a href="mailto:julien.marquie@asconit.com">mailto:julien.marquie@asconit.com</a>
	Florence Peres	<a href="mailto:florence.peres@asconit.com">mailto:florence.peres@asconit.com</a>
IRSTEA	François Delmas	<a href="mailto:francois.delmas@irstea.fr">mailto:francois.delmas@irstea.fr</a>
Biotop	Yannick Dominique	<a href="mailto:ydominique@biotop.nc">mailto:ydominique@biotop.nc</a>
Observatoire de l'environnement	Adrien Bertaud	<a href="mailto:adrien.bertaud@oeil.nc">mailto:adrien.bertaud@oeil.nc</a>
CNRT Nickel & son environnement	Bernard Robineau	<a href="mailto:bernard.robineau@cnrt.nc">mailto:bernard.robineau@cnrt.nc</a>

***Référence à citer pour le présent rapport :***

Marquié, J., Boutry, S., Pérès, F., Dominique, Y., Coste, M., Delmas, F. (2013) - Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : Conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bio-évaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques. Rapport de fin de Phase de Faisabilité (Juillet 2013). Asconit-Irstea Eds. 68 p.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

## Avant-propos

La situation particulière de la Nouvelle-Calédonie, «hotspot» de biodiversité (Myers et *al.*, 2000) et parmi les premières réserves de gisements nickélifères (Mainguet, 2012), soumet ce "Caillou" à peine grand comme 2 fois la Corse, au défi de concilier exploitation des richesses minières et préservation de la richesse biologique.

L'extraction du minerai en carrières à ciel ouvert implique le décapage de la végétation et des horizons supérieurs du sol afin d'atteindre les couches d'intérêt. Outre l'aspect inesthétique de ces paysages dénudés, c'est toute la dynamique du bassin versant affecté qui est bouleversée. Le sol ainsi dénudé est soumis à une érosion accélérée, les eaux de ruissellement charrient davantage de matériaux, modifiant la composition en éléments minéraux des cours d'eau en aval et entraînent des dépôts alluvionnaires en zone lenticule. La perte du sol et de ses capacités d'infiltration et de rétention empêchent la recharge de la nappe phréatique sous jacente, donc ses capacités de relargage en saison sèche alimentant les creeks à cette période. Ce dernier point est fondamental à la pérennité de populations micro-endémiques inféodées à la vie aquatique. Les terrains alternent alors entre périodes d'inondations et de sécheresses. Aujourd'hui, le confinement des déblais en « verses à stériles latéritiques », l'allègement des moyens de transport et de prospection, la revégétalisation et la prise en compte des débits hydriques tendent à renverser la tendance. Mais d'autres menaces pèsent sur l'érosion accélérée du sol par la disparition du couvert végétal, comme les feux de brousse intentionnels ou non, et le broutage par les cerfs (*Cervus timorensis rusa*) et les cochons sauvages (*Sus scrofa*), espèces envahissantes.

L'urbanisation croissante, illustrée par le développement de la zone VKP (Voh, Kone, Pouembout), menace à son tour l'intégrité des cours d'eau. Déjà fragilisés par la pollution diffuse des effluents domestiques des villages peu pourvus en réseau d'assainissement et les effluents agricoles utilisant engrais et pesticides, il est nécessaire de pouvoir estimer l'effet des pollutions sur la qualité des cours d'eau.

La gestion intégrée des milieux et ressources aquatiques a été identifiée depuis le début des années 2000 comme un axe fort des actions à mener en termes de conservation de la biodiversité du territoire calédonien. Cette dernière fait à ce titre partie des objectifs du plan d'action élaboré en 2004 par les collectivités locales (gouvernement, Provinces) et nationale dans le cadre du plan d'action outre-mer de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB), programmation 2004-2010.

La gestion intégrée de la ressource en eau passe par le développement d'outils de gouvernance permettant de poser le cadre juridique et institutionnel de mise en œuvre des politiques de l'eau. Cette gestion nécessite également l'existence d'indicateurs robustes d'état de la qualité écologique des cours d'eau. En effet,

ces indicateurs sont des outils de diagnostic indispensables permettant d'identifier les problèmes existant sur la qualité de l'eau (nature et localisation). Ils permettent alors d'orienter et de prioriser les actions à mener dans le cadre des stratégies ou politiques publiques déployées. En effet, leur suivi temporel permet de renseigner les commanditaires, organismes de tutelle, citoyens et autres usagers de la ressource en eau sur l'efficacité et l'efficience des actions engagées. Ces stratégies/politiques sectorielles s'inscrivent elles mêmes dans des projets de plus grandes envergures (SNB, Schéma de développement durable du territoire calédonien, Stratégie régionale pour la Biodiversité du PROE<sup>1</sup>). Ces outils de diagnostic deviennent de fait des outils de reporting de l'atteinte ou non des objectifs fixés par celles-ci.

En Nouvelle-Calédonie, seuls les invertébrés benthiques ont à ce jour fait l'objet d'études ayant abouti à la mise en place d'un bioindicateur pertinent et validé de la qualité écologique des masses d'eau de surface : l'Indice Biotique de Nouvelle-Calédonie (IBNC). A partir des travaux menés sur cet indice spécifiquement dédié à la caractérisation des altérations organiques, un second indice plus spécifiquement dédié aux altérations « minérales » est en cours de développement (IBS - Indice BioSédimentaire). Quelques études sur les communautés piscicoles ont été réalisées, mais aucun indice valide n'est à ce jour disponible. Seul un maillon biologique permet donc à ce jour d'évaluer la qualité écologique des masses d'eau de surface calédoniennes. D'autre part, précisons également qu'à ce jour aucun bioindicateur pertinent du degré d'exposition des biocénoses aquatiques aux éléments traces métalliques (ETM), anciennement appelés "métaux lourds", n'existe pour les milieux dulçaquicoles calédoniens. En effet, les maillons « poisson » ou « macrocrustacés » les plus souvent utilisés pour retranscrire le degré d'exposition aux ETM, ne présentent pas toutes les caractéristiques requises pour ce type d'indicateur : le manque de sédentarité de ces derniers ne permet pas en effet d'affecter la charge métallique dosée au sein de ces modèles à la station où ils ont été collectés (Biotop, 2012).

Face à ce manque d'indicateurs et dans la lignée des conclusions émises à l'issue des Ateliers thématiques « eau douce », tenus en avril 2010, l'Observatoire de l'Environnement en Nouvelle-Calédonie et le CNRT-Nickel et son Environnement ont décidé de lancer un programme de Recherche et Développement ayant pour objectif la mise en place d'un nouvel indicateur, complémentaire à l'IBNC/IBS et basé sur l'étude des diatomées benthiques. D'autres partenaires pourront venir appuyer et compléter le financement de ce programme, à l'instar de la DAVAR<sup>2</sup>, impliquée dans la prochaine phase de l'étude. Ce projet prévoit 4 phases, la première, de 8 mois, est la phase d'étude de faisabilité. Elle correspond à la synthèse de données existantes et l'acquisition de données de terrain, comprenant une campagne de prélèvement des diatomées et leur inventaire

---

<sup>1</sup> Programme Régional Océanien de l'Environnement

<sup>2</sup> Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales

préliminaire. La seconde phase, de 21 mois, comprend 3 autres campagnes de prélèvements, l'illustration et la description des taxons. La troisième phase, de 12 mois, est consacrée à l'analyse biomathématique des données afin d'établir les profils écologiques des espèces, ainsi qu'à la rédaction du rapport final. La quatrième phase, d'un mois, est dédiée à la présentation des livrables. Un guide d'identification des principaux taxons présents en Nouvelle-Calédonie sera remis, la forme de ce guide restant encore à définir avec les maîtres d'ouvrage. Alors, un Indice Diatomique pour la Nouvelle-Calédonie (IDNC), toujours perfectible au fur et à mesure de son utilisation à l'instar de l'indice métropolitain, pourra être utilisé. Cette dernière phase comprend aussi l'accompagnement des acteurs locaux pour l'utilisation de l'indice par leur formation sous forme d'ateliers théoriques (présentation de la méthode et de l'indice) et pratiques (prélèvements *in situ*). Des réunions au cours de chaque phase sont prévues entre les membres du comité de pilotage de thèse, bailleurs de fonds du projet et coordinateurs scientifiques.

Cet indicateur biologique doit permettre (cf. expérience métropolitaine et réalisations réussies à la Réunion et aux Antilles) de mesurer l'état de santé des écosystèmes aquatiques de type cours d'eau et d'estimer les changements d'état sous l'effet de perturbations. En tant que producteurs primaires et donc à la base de la chaîne alimentaire, les diatomées jouent un rôle fonctionnel crucial au sein des écosystèmes. Les diatomées que l'on récolte sont des formes benthiques, c'est-à-dire peu mobiles. Tributaires de leur environnement, elles ne peuvent que s'adapter ou disparaître en cas de modifications de leur milieu, d'où leur intérêt particulier pour l'évaluation de l'état écologique des hydrosystèmes.



Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

## Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GENERALITES SUR LES DIATOMEES.....</b>	<b>1</b>
<b>2.1</b>	<b>Les diatomées comme bioindicateurs.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Contexte naturel.....</b>	<b>4</b>
3.1.1	Situation géographique .....	4
3.1.2	Géographie.....	4
3.1.3	Climat.....	5
3.1.4	Aspects hydrologiques .....	5
3.1.5	Les hydro-écorégions.....	6
<b>4</b>	<b>MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1</b>	<b>Mise au point de l'indice diatomique .....</b>	<b>7</b>
4.1.1	Choix des stations de prélèvement .....	7
4.1.1.1	Difficultés rencontrées .....	8
4.1.1.2	Nomenclature du code des stations .....	9
4.1.2	Prélèvements de terrain .....	15
4.1.2.1	Mesures <i>in situ</i> et prélèvements d'eau .....	15
4.1.2.2	Le prélèvement des diatomées.....	16
4.1.3	Mesures de laboratoire.....	18
4.1.3.1	Les paramètres abiotiques: la physico-chimie .....	18
4.1.3.2	Identification des diatomées.....	23
<b>4.2</b>	<b>Protocole expérimental: les substrats artificiels.....</b>	<b>25</b>
4.2.1	Choix des stations .....	26
4.2.2	Mise en place des substrats artificiels.....	28
4.2.3	Les paramètres mesurés .....	28
4.2.3.1	Estimation de la production primaire .....	29
4.2.3.2	Estimation de la biomasse organique .....	30
4.2.3.3	Estimation de la densité cellulaire des diatomées .....	30
4.2.3.4	Composition floristique diatomique .....	33

<b>5</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>Paramètres physico-chimiques.....</b>	<b>34</b>
5.1.1	Résultats des mesures <i>in situ</i> .....	34
5.1.2	Analyse des données physico-chimiques.....	38
<b>5.2</b>	<b>Résultats des inventaires floristiques.....</b>	<b>42</b>
5.2.1	Etat d'avancement .....	42
5.2.2	Généralités sur les espèces rencontrées .....	42
5.2.3	Variations naturelles et gradients amont-aval floristiques .....	46
5.2.3.1	Bassin versant de la Yahoué .....	47
5.2.3.2	Bassin versant de la Karikouïé .....	48
5.2.3.3	Bassins versants de La Foa.....	49
5.2.3.4	Bassin versant de la Moindou.....	50
5.2.3.5	Bassin versant de la Nera.....	51
5.2.3.6	Bassin versant de la Talea.....	53
5.2.3.7	Bassin versant de Kone-Pouembout.....	54
5.2.3.8	Bassin versant de la rivière des Kaoris et de la Baie Nord .....	55
5.2.3.9	Bassin versant de la Wadjana .....	57
<b>5.3</b>	<b>Croisement des données abiotiques et biotiques.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4</b>	<b>Application de l'IBD.....</b>	<b>60</b>
<b>5.5</b>	<b>Résultats des substrats artificiels.....</b>	<b>62</b>
5.5.1	Production primaire .....	62
5.5.1.1	Colonisation des substrats artificiels .....	62
5.5.1.2	Biomasse et concentration en pigments .....	63
5.5.1.3	Densité cellulaire des substrats artificiels .....	64
5.5.1.4	Données floristiques .....	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>73</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Diversité de formes et de tailles entre différents genres de diatomées, a) Navicula, b) Epithemia, c) Gomphonema, d) Cocconeis, e) Brachysira.....	2
Figure 2: Paysage minier sur la route Kouaoua-Canala (HER G). .....	8
Figure 3: Carte du réseau des stations, région Nord. ....	13
Figure 4: Carte du réseau des stations, région Sud.....	14
Figure 5: Récupération du biofilm à l'aide d'une brosse à dents.....	17
Figure 6: Illustration schématique du balayage par transects au microscope et illustration d'un champ de l'objectif du microscope. ....	24
Figure 7: Graphique de la richesse spécifique en fonction de la pression de comptage sur les 23 inventaires effectués (ronds blancs). ....	25
Figure 8: Station 6T (code Vale-NC), à l'aval de BAN11, a) vue amont vers aval, b) vue aval vers amont. ....	27
Figure 9: Station sur la rivière des Kaoris, vue d'ensemble. ....	27
Figure 10: Cagettes et lames de verre fixées. ....	28
Figure 11: Fixation des cagettes sur la Baie Nord, 1er essai, station BAN11, a) à J+0, b) à J+17.....	28
Figure 12: Récupération du biofilm par grattage du substrat artificiel.....	29
Figure 13: Protocole simplifié de la détection de l'impact des métaux sur le biofilm. ....	33
Figure 14: Température (°C) et pourcentage de saturation en O <sub>2</sub> dissous des différentes stations échantillonnées. ....	35
Figure 15: Valeurs de pH des eaux des différentes stations échantillonnées. ....	36
Figure 16: Conductivité (µS/cm) des eaux des différentes stations échantillonnées. ....	37
Figure 17: a) Croisement des axes 1 et 2 de l'ACP. b) Croisement des axes 3 et 4 de l'ACP. ....	39
Figure 18: ACP de la projection des sites dans l'espace des données abiotiques sur les 2 premiers axes et mise en valeur de paramètres. ....	40
Figure 19: Abondance spécifique et occurrence au sein des inventaires illustrant la présence d'espèces ubiquistes (ellipse bleu) et d'espèces plus spécialisées (ellipse violette). ....	43
Figure 20: Richesse spécifique et types d'altérations envisagées. ....	44
Figure 21: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Yahoué. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »). ....	47
Figure 22: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement (sinon classe "autres") des inventaires taxinomiques le long de la Karikouïé. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la	

présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).....	48
Figure 23: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de La Foa et sur son affluent, la Fonwhary. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).....	49
Figure 24: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques sur la Moindou. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »). ....	50
Figure 25: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Douencheur, de son affluent, la Wa Menao et de la Boghen. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »)...	51
Figure 26: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Taléa, bras Nord et bras Sud et à la confluence, la Coco. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).....	53
Figure 27: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Kone et de la Pouembout. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »). ....	54
Figure 28: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la rivière des Kaoris et de la Baie Nord, et comparaison avec des inventaires de 2011, réalisés par Hytec (surlignés jaune). Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).....	55
Figure 29: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Wadjana. Les taxons dont l'abondance relative est $<5\%$ sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »). ....	57

Figure 30: Représentation graphique des résultats de l'AFC sites-taxons, a) Croisement des axes 1 et 2, b) Croisement des axes 3 et 4. ....	59
Figure 31: Représentation du pourcentage de taxons pris en compte dans l'IBD. ....	61
Figure 32: Colonisation des substrats artificiels sur les deux sites.....	62
Figure 33: Moyennes de la biomasse totale et organique du biofilm et de la densité en pigments sur 2 cagettes sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord. MSSC: Matière Sèche Sans Cendre. ....	63
Figure 34: Moyennes des densité des diatomées sur 2 cagettes sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord.....	64
Figure 35: Nombre de taxons, indice de diversité et équitabilité des inventaires des substrats artificiels sur la rivière des Kaoris et la Baie Nord.....	65
Figure 36: Représentation des taxons dont l'abondance relative est $\geq 5\%$ du peuplement (sinon classe "autres") des inventaires taxinomiques sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord a) des substrats artificiels et b) de l'échantillonnage <i>in situ</i> .....	66

#### LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Position GPS, correspondance des stations avec celles des réseaux de suivi. ....	11
Tableau II: Analyses de laboratoire préconisées pour la construction de l'indice diatomique. ....	18
Tableau III: Nombre de taxons, indice de diversité et équitabilité.....	65

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

# 1 Introduction

Ce programme de recherche et développement a pour objectif la conception d'un outil de bioindication de la qualité de l'eau à partir des diatomées benthiques, adapté aux creeks de Nouvelle Calédonie. Il fait l'objet d'une thèse soutenue par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (thèse CIFRE<sup>3</sup>) : "**Conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau de Nouvelle - Calédonie à partir des diatomées benthiques**". Ces travaux apporteront, d'une part, une meilleure connaissance de ce maillon biologique encore aujourd'hui très peu étudié et d'autre part, les éléments nécessaires aux gestionnaires pour évaluer la qualité de l'eau des milieux concernés, mieux appréhender les impacts qu'ils subissent et, *in fine*, mieux les protéger. Après quelques travaux exploratoires réalisés sur place (Manguin, 1962 ; Maillard, 1978 ; Le Cohu, 1985), les dernières études réalisées sur les diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie sont relativement anciennes (Moser et *al.*, 1995, 1998, Moser, 1999) et montrent la richesse de ce territoire en espèces endémiques qui seraient plus spécifiquement concentrées sur les substrats ultramafiqes du sud (Moser, 1999).

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la phase 1 du programme de recherche<sup>4</sup> et a pour objectif principal de démontrer la faisabilité de l'utilisation des diatomées comme maillon bioindicateur sur le territoire calédonien.

Lors de la première campagne qui s'est déroulée en octobre-novembre 2012, 64 stations ont été échantillonnées sur l'ensemble de la Grande Terre. Tous les échantillons biologiques ont pu être pré-traités en vue de leur analyse au microscope. A ce jour, 30 inventaires diatomiques ont pu faire l'objet de détermination et de comptage. Le protocole et les résultats d'une expérience exploratoire de détection de l'effet d'éléments traces métalliques mis en place sur la rivière des Kaoris et la Baie Nord dans la zone ouest de la Plaine du Grand Sud sont également décrits. Diatomées et bioindication.

## 2 Généralités sur les diatomées

Les diatomées ou Bacillariophyta sont des microorganismes eucaryotes unicellulaires photosynthétiques qui vivent en solitaire ou en formant des colonies). Elles appartiennent aux Chromophytes (algues brunes).

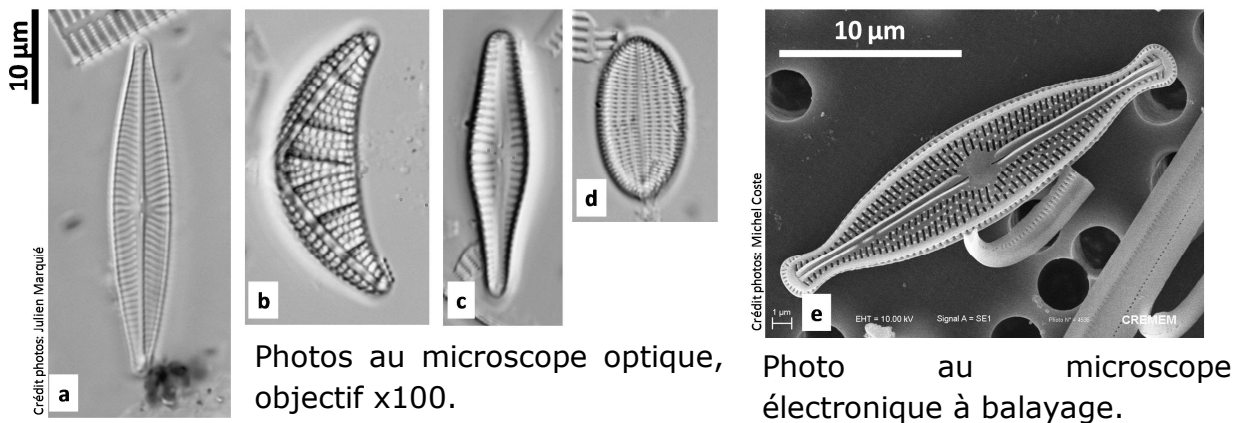
---

<sup>3</sup> Conventions Industrielles de Formation par la REcherche

<sup>4</sup> Convention de recherche OEIL-ASCONIT-IRSTEA du 10/10/2012 – Phase 1 (étude de faisabilité).



Leur caractéristique principale est leur paroi extracellulaire de silice, appelée frustule, constituée de 2 valves emboîtées telles une "boîte à camembert", de formes et d'ornementations variées (Figure 1). Leur description spécifique est basée sur ces caractéristiques morphologiques. Les diatomées colonisent la plupart des milieux aquatiques, aussi bien en milieu marin qu'en eau douce et vivent à l'état planctonique (dans la colonne d'eau) ou benthique c'est-à-dire fixées sur différents types de substrats. Ce sont ces dernières que l'on utilise pour la mise en œuvre des indices diatomiques des cours d'eau. En effet, la sédentarité de cet indicateur biologique permet l'intégration des paramètres physico-chimiques sur le lieu même du relevé.



**Figure 1: Diversité de formes et de tailles entre différents genres de diatomées, a) *Navicula*, b) *Epithemia*, c) *Gomphonema*, d) *Cocconeis*, e) *Brachysira*.**

La conception de l'indice de bio-évaluation est réalisée par croisement des jeux de données abiotiques du cours d'eau (T°, pH, conductivité, concentrations en nutriments et en éléments traces métalliques...) avec la composition floristique associée. Les traitements statistiques visent à déterminer la contribution des variables dans la distribution des espèces, le profil écologique des différents taxons et la formule mathématique qui servira de base au calcul de l'indice.

La pertinence des jeux de données est primordiale et passe par un plan d'échantillonnage réfléchi et large afin d'obtenir une assise statistique suffisante pour asseoir les bases des traitements mathématiques ultérieurs. Les données doivent être représentatives des conditions rencontrées sur l'ensemble du territoire, tenant compte de la variabilité naturelle des assemblages, de la saisonnalité marquée, alternant entre une saison sèche et une saison des pluies ainsi que des différents gradients et types d'anthropisation. La stratégie d'échantillonnage a tenu compte de tous ces facteurs et se traduit par un programme prévisionnel basé sur un vaste plan d'échantillonnage. Ainsi, 4 campagnes sont prévues sur 2 ans, 2 suivant la période sèche (octobre-novembre) et 2 suivant la période des pluies (juin-juillet).

## 2.1 Les diatomées comme bioindicateurs

Les organismes ou les communautés d'organismes bioindicateurs, présentent des comportements ou des adaptations physiologiques (= changements d'état réversibles) en relation aussi simple et étroite que possible avec des facteurs écologiques dont les variations peuvent être un facteur de stress.

Les diatomées sont utilisées depuis des dizaines d'années pour apprécier la qualité des eaux des milieux lotiques (Lange-Bertalot 1979, Whitton et *al.* 1991). En Europe, en Amérique du Nord et au Japon, les diatomées sont utilisées pour des études de surveillance de la qualité des eaux des rivières en routine (Prygiel et *al.* 1999).

Les avantages, non exhaustifs, des diatomées en bioindication sont les suivants:

- Ubiquité et cosmopolisme: elles se retrouvent dans la plupart des milieux aquatiques éclairés, sous toutes les latitudes.
- Sensibilité à la physico-chimie du milieu: étant des organismes unicellulaires et autotrophes, les diatomées sont immédiatement affectées par les polluants et les concentrations en nutriments présents dans l'eau.
- Diversité: les nombreuses espèces, sous-espèces et variétés possèdent chacune des seuils de tolérance à une variété de facteurs du milieu. La structure d'une communauté plurispécifique peut alors représenter plus finement et plus sûrement les conditions du milieu.
- Cycle de vie: la reproduction a lieu par divisions mitotiques principalement. Le taux de division est relativement rapide, il est aussi relativement homogène pour une espèce donnée. La communauté intègre ainsi les conditions environnementales sur une période estimée de 1 à 2 mois. Contrairement à une analyse physico-chimique ponctuelle, qui ne représente qu'une image instantanée de la physico-chimie du milieu au moment du prélèvement.
- Facilité d'échantillonnage et de traitement des échantillons: la rapidité de récolte sur la station peu permettre d'échantillonner près d'une dizaine de sites dans la journée. Cette simplicité minimise ainsi les biais de prélèvements entre opérateurs.
- Coût réduit d'un indice diatomique : le coût de mise en œuvre de l'indice basé sur l'étude des diatomées benthiques en routine est estimé à près d'un quart du coût des indices basés sur l'étude du macrobenthos.
- Conservation des échantillons : La conservation des échantillons entre lame et lamelle de manière presque illimitée (des lames datant de 200 ans sont consultables au Museum d'Histoire Naturelle de Paris) et occupant un faible espace de stockage permet la

création d'une phycothèque de référence pour des études taxinomiques ou environnementales ultérieures.

La diversité des diatomées est parfois aussi présentée comme un inconvénient par la difficulté de reconnaissance des taxons que cela entraîne. La taxonomie changeante nécessite une mise au point régulière de la dénomination des taxons, néanmoins, la durée estimée de l'apprentissage de l'utilisation en routine d'un indice diatomique est de 6 mois avec un atlas illustré et la bibliographie de base.

Des réponses de la flore diatomique à des stress environnementaux ont souvent été rapportées dans la bibliographie et peuvent s'exprimer de différentes façons: (Falsco et *al.*, 2009) :

- Sélection d'espèces tolérantes au détriment d'espèces sensibles qui disparaissent progressivement ou brutalement.
- Apparition de formes tératologiques: le frustule siliceux subit des déformations au niveau de l'ensemble de la valve ou des ornements.
- Réduction de la taille de la communauté:
  - Sélection d'espèces de plus petite taille,
  - Diminution de la taille des individus au sein d'une même espèce (nanisme).

## 3 Contexte de l'étude

### 3.1 Contexte naturel

Les données suivantes sont essentiellement tirées de l'atlas de Nouvelle-Calédonie / Edition 2012 de l'IRD et de l'atlas climatique de Nouvelle-Calédonie / Edition 2007 de Météo France.

#### 3.1.1 Situation géographique

La Nouvelle-Calédonie se situe à environ 1500 km à l'est de l'Australie et à 2000 km au nord de la Nouvelle Zélande, juste au-dessus du tropique du Capricorne.

L'île principale ou "Grande Terre", orientée dans les sens nord-ouest - sud est, couvre environ 16000 km<sup>2</sup>, et mesure environ 400 km de long sur 50 km de large.

#### 3.1.2 Géographie

La Grande Terre est partagée dans sa longueur par des reliefs relativement élevés. Une région montagneuse, couramment appelée la chaîne centrale, d'environ 1000 m d'altitude, lie 2 massifs culminant à plus de 1600 m :

au nord, le Mont Panié (1629 m) et au sud le mont Humbolt (1618 m). Elle départage une côte au vent à l'est et une côte sous le vent à l'ouest.

L'île est ainsi partagée entre deux côtes singulièrement dissymétriques. Schématiquement, à l'est, une mince bande côtière adossée aux contreforts de la chaîne, à l'ouest, une plus large bande côtière avec une zone de piémont et des plaines alluviales. La côte ouest est aussi ponctuée de massifs montagneux isolés tels que Kopeto (1134 m), Koniambo (930 m) et Thiébaghi (590 m). Le sud de l'île est une région de plaines assez élevées. Le territoire est prolongé au sud par l'île des Pins et au nord par l'archipel des Belep qui s'apparentent par leur relief et leur structure à l'île principale. A l'est, les îles des Loyauté, formations récifales comptant pour environ 10% du territoire calédonien, contrastent par leurs reliefs plats et bas. Ces terres ne possédant pas de réseau hydrique superficiel naturel pérenne ne seront pas traitées dans cette étude.

### **3.1.3 Climat**

La Nouvelle-Calédonie, située en région subtropicale est à la fois sous influence tropicale et tempérée au cours de l'année. Il existe ainsi deux saisons contrastées, une saison chaude et pluvieuse de novembre à mai et une saison fraîche et sèche de mai à octobre. Les transitions entre ces saisons sont peu marquées et les variabilités interannuelles importantes rendent les limites saisonnières fluctuantes. Pour autant, le cœur des saisons est assez marqué, par un pic de précipitations durant les mois de janvier et février et une sécheresse importante d'aout à octobre. Le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) conditionne la variabilité interannuelle, les phases El Niño et La Niña intensifient les épisodes saisonniers les plus marqués, respectivement un été plus sec pour El Niño et un hiver plus humide pour La Niña. En dehors de ce phénomène, les phases dites "neutres" dominant, et se rapprochent ainsi des normales saisonnières. Cette année semble appartenir à une phase neutre.

La variabilité saisonnière des précipitations a conditionné le choix des périodes des campagnes de prélèvement. Ainsi ont été retenues, deux campagnes au mois d'octobre-novembre, en fin de saison sèche, pour obtenir des étiages, concentrant les polluants et deux campagnes en juin-juillet, période de moyennes eaux, faisant suite à une période de hautes eaux, diluant les pollutions tout en augmentant le processus d'érosion.

### **3.1.4 Aspects hydrologiques**

Le contexte général de la Grande Terre impose au réseau hydrographique une orientation principalement perpendiculaire à l'axe longitudinal du territoire. Les bassins versants, escarpés à l'amont, connaissent un régime torrentiel. La taille réduite des bassins impose des temps de transfert très courts entre l'amont et l'embouchure. La conséquence d'une telle typologie des bassins versants est la soudaineté des crues, lors desquelles le processus d'érosion est le plus intense et qui façonne véritablement le lit du cours d'eau. Les vallées encaissées peuvent

laisser place à des deltas sur la côte ouest, suffisamment large. La principale exception est la vallée du Diahot, entamant le nord de la chaîne centrale longitudinalement et abritant la plus longue rivière: le Diahot (55 km). La région du plateau karstique des plaines du sud possède un système hydrique particulier avec une zone marécageuse d'eau douce, parsemé de dolines et un écoulement subsuperficiel.

Les régimes hydrauliques, directement influencés par la pluviosité, sont contrastés selon la saison, moins fortement sur la région de la plaine des lacs où la capacité de charge et de décharge due au sol karstique tamponne ces variations. Les contrastes entre débits de crue et d'étiage sont assez homogènes le long des deux côtes au niveau des pieds de massif. La côte ouest, sous le vent, connaît les étiages les plus sévères d'autant plus marqués sur la région nord-ouest qui connaît les étés les plus secs. La présence de certaines roches péridotitiques tamponne les effets de la sécheresse par leur propriété aquifère permettant un relargage d'eau, soutenant ainsi les débits d'étiage.

Les conséquences pour la biologie seraient *a priori*, une constance plus importante des peuplements de diatomées sur la côte est et au sud vis-à-vis d'un régime hydrologique plus stable tout au long de l'année. La différence d'assemblage floristique saisonnier devrait donc être plus importante sur la zone nord ouest.

### **3.1.5 Les hydro-écorégions**

A partir des facteurs primaires tels que, le relief, le climat, l'hydrologie, et la géologie, le territoire de la Grande Terre a été découpé en 6 unités avec pour objectif de décrire les conditions naturelles abiotiques des différents types de cours d'eau et les peuplements de référence correspondant (Asconit, Biotop, 2011). Ces 6 unités peuvent être décrites sommairement comme suit:

- HER B: les plaines littorales ouest, à géologie relativement hétérogène, connaissent un relief collinaire et peu arrosé.
- HER C: les collines schisteuses de la pointe nord ont un à relief et une pluviométrie faible.
- HER D: les plaines du grand sud sont constituées d'un plateau formé d'une nappe de péridotite, elles sont très arrosées.
- HER E: le massif ultramafique au sud de la chaîne centrale et le littoral, est constitué d'une nappe de péridotite, à relief élevé et très arrosé.
- HER F: le massif du Panié, schisteux, est une région montagneuse à relief élevé et arrosé.
- HER G: au cœur de la chaîne centrale, elle est principalement formée par l'unité Anté Sénonienne, c'est une région montagneuse très arrosée.

## 4 Matériels et méthodes

### 4.1 Mise au point de l'indice diatomique

#### 4.1.1 Choix des stations de prélèvement

Afin de prendre en considération la variabilité naturelle et les gradients d'altération, le choix des stations s'est appuyé d'une part sur les différentes hydroécorégions (HER) de la Grande Terre (Asconit, Biotop, 2011) qui sont définies comme de vastes ensembles relativement homogènes en termes de géologie, relief et climat (Wasson et *al.*, 2004). La Grande Terre est ainsi découpée en 6 HER notées de B à G (l'HER A correspond aux îles Loyauté). Ce choix s'est déterminé d'autre part sur une sélection de stations dont le type et le degré d'altération sont connus de façon certaine ou probable.

Forts de l'expérience acquise lors de la conception de l'indice diatomique à la Réunion (IDR) et en Guadeloupe-Martinique (IDA), nous savons qu'il est important d'obtenir des données tant physico-chimiques que biologiques relatives à des situations très peu impactées (que l'on définira comme « références »), modérément impactées et très polluées. La qualité des gradients représentés est essentielle pour la définition du profil des espèces vis-à-vis des altérations et pour la qualité finale de l'outil indicatif produit.

Les impacts considérés sont essentiellement d'origine domestique, agricole et minière. Ces impacts rassemblent donc les pollutions organiques et/ou minérales et/ou toxiques avec des effets délétères plus ou moins avérés.

Il est très difficile de cerner de manière spécifique un type de pollution, les pollutions étant généralement mixtes ; l'agriculture enrichit les milieux par des apports minéraux via les engrais et génère aussi des contaminations toxiques par les pesticides utilisés.

Cependant, la stratégie adoptée dans le choix des stations tente d'obtenir des informations sur la réponse des communautés diatomiques à un type de pollution aussi spécifique que possible.

La bioindication à l'aide des diatomées benthiques est jusqu'ici limitée au milieu dulçaquicole. Les eaux saumâtres rencontrées lors de la prospection des sites d'échantillonnage ne peuvent être considérées comme de potentiels lieux de détection d'altération en réseau de surveillance. Néanmoins, des sites ont été prélevés afin de définir des espèces caractéristiques de ces milieux saumâtres en vue de discriminer des espèces spécifiques de milieux sous influence haline, en milieu altéré et relativement préservé.

Le choix des stations s'appuie également sur celles du réseau de surveillance des 5 bassins versants (Dumbea, La Foa, Néra, Koné, Pouembout) mis en place par

la DAVAR, afin de bénéficier du suivi des paramètres physico-chimiques préexistants. Ces 5 bassins versants ont leur partie basse qui appartient à l'HER B, situé sur la côte ouest, la plus densément peuplée. Les têtes des 4 derniers bassins versants susmentionnés appartiennent à l'HER G reposant principalement sur les unités métamorphiques de la chaîne centrale, alors que le bassin de la Dumbéa s'écoule sur sa partie haute sur l'unité ultramafique de l'HER E.

Les réseaux des miniers sont aussi apparus comme un facteur dans le choix du positionnement des stations de manière pertinente avec l'altération envisagée, toujours dans l'optique de bénéficier de données préexistantes.

Lors de la réunion de démarrage, le choix des stations a été discuté avec les maîtres d'ouvrage. Ainsi 3 stations ont été ajoutées sur la Rivière Coco et ses affluents: Taléa branches Nord et Sud, situés sur le massif de Koniambo entre Koné et Voh. Deux stations de référence initialement prévues sur la Kuébini ont été déplacées sur la Wadjana, situées sur le Plateau du grand Sud sur la côte Est car la Kuébini est susceptible d'être affectée par des travaux d'aménagement ultérieurs sur le site minier, charriant des apports terrigènes d'origine anthropiques.

Finalement, 64 stations ont été prospectées: 23 stations sont considérées comme des références, 19 stations sont considérées sous l'influence d'un impact anthropique d'origine domestique et/ou agricole, 18 stations sous l'impact de la mine et 4 stations sont sous l'influence haline des marées (Annexe I).

#### **4.1.1.1 Difficultés rencontrées**

Une des difficultés est de discriminer la part de l'altération anthropique et naturelle, comme l'érosion des sols due au décapage minier ou au lessivage naturel, renforcé par la disparition du couvert végétal par les feux, les cochons sauvages et le broutage par les cerfs. La Figure 2 Figure 2: Paysage minier sur la route Kouaoua-Canala (HER G).ci-dessous illustre une situation rencontrée en Nouvelle-Calédonie, où l'origine du décapage est évidemment anthropique et fait consensus.



**Figure 2: Paysage minier sur la route Kouaoua-Canala (HER G).**

Que ce soit les stations de référence ou impactées, il est possible que les classes de qualité attribuées *a priori* (référence, altération domestique et/ou agricole, impact de la mine) soient imparfaites. Les résultats des mesures physico-chimiques guideront l'appréciation envisagée.

On compte 4 stations sous influence haline de manière avérée d'après leur conductivité très élevée (>1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), NER21, TCH21, DUM11 relevées lors de cette campagne et DIA31 d'après des résultats de la DAVAR enregistrant des conductivités bien supérieures à 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Annexe II). Pour 4 autres, YAH21, NER11, DIA21, et TIW31 un doute subsiste malgré une conductivité relativement basse au moment de la première visite, respectivement, de 450, 330, 70,5 et 107,7  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en période de flux (marée montante) pour YAH21 et TIW31. Ces incertitudes reposent sur des indices d'influence marine comme la présence de la mangrove à proximité, de terriers de petits crabes (identifiés comme *Varuna litterata*, décrits comme diadromes, Marquet et *al.*, 2003), ou des effets de marnage visibles. Ces informations spécifiques au site et aux influences littorales possibles sont consignées dans les fiches terrain avec les autres descripteurs qu'il est prévu de collecter à chaque relevé (annexe III). Les résultats des concentrations en chlorure et en sodium ainsi que les flores présentes permettent ensuite de lever le doute.

Le Tableau I rappelle les coordonnées des stations de prélèvement, leur correspondance par rapport aux stations de suivi préexistant, et la date et l'heure du prélèvement. Les figures 2 et 3 illustrent la répartition des stations.

#### 4.1.1.2 Nomenclature du code des stations

Les codes des stations sont attribués de manière à répondre aux exigences de lecture des données statistiques et à la standardisation des informations. Un numéro d'ordre à 5 caractères est utilisé.

Un code de 3 lettres et 2 chiffres a été attribué pour chacune des stations, la nomenclature est détaillée ci-dessous:

Nom du cours d'eau (3 lettres)	Station de prélèvement	N° de campagne
--------------------------------	------------------------	----------------

Exemple:

KAO	1	1
-----	---	---

KAO: Rivière des Kaoris

1: Station amont

1: Campagne 1



Le nom du cours d'eau en 3 lettres reprend les 3 premières lettres du nom du cours d'eau. Mais il y a de nombreuses exceptions:

- 2 cours d'eau possèdent les 3 mêmes premières lettres, la Wanebwayo et la Wano, alors respectivement notés WAN et WAO,
- s'il s'agit d'un bras du cours d'eau principal, comme la Dumbéa branche Nord notée DMN, ou la Taléa branche Sud, notée TLS,
- s'il s'agit d'un affluent anonyme sur les cartes d'un cours d'eau baptisé, alors le code commence par la lettre A, et est suivi de 2 lettres nommant le cours d'eau récepteur, comme l'affluent de la Dothio, nommé ADO,
- si le cours d'eau n'a pas de nom et se jette dans un cours d'eau tout aussi anonyme sur les cartes, le cas se pose parfois sur mines, alors le nom donné se base sur le nom de la station préexistante du minier, comme la station sur la mine de Kopeto, nommée EGL,
- sur carte, le cours d'eau est nommé seulement dans sa partie aval, pour connaître l'affectation du cours d'eau plus en amont au niveau du tronçon échantillonné, la méthode de rang de Strahler a été utilisée. Ainsi, les stations KAA sont définies comme appartenant au Mwe Kara Awi,
- la station BOG11, située sur le cours d'eau O Donarao, en amont de la Boghen et calée sur la station BOGH050 du réseau de suivi de la DAVAR, est alors considérée comme appartenant à la Boghen.

Le premier chiffre qui suit le nom correspond à la situation de la station le long du cours d'eau. Par défaut, le chiffre 1 est utilisé quand il y a une seule station sur le cours d'eau. Quand il existe plusieurs stations sur le cours d'eau alors la numérotation est croissante de l'amont vers l'aval. Le second chiffre est celui du numéro de campagne.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques  
Phase 1: Etude de faisabilité

**Tableau I: Position GPS, correspondance des stations avec celles des réseaux de suivi.**

HER	COMMUNE	COURS D'EAU	CODE STATION	Coordonnées (WGS84)		LOCALISATION / STATION ASSOCIEE (code DAVAR)	RESEAU DE SUIVI ACTUEL (BV = Bassin Versant)	PRELEVEMENT	
				X (longitude)	Y (latitude)			DATE	HEURE
D: Plaine du Grand Sud Plateau du sud < 500m Très arrosé Nappe de péridotite	Yaté	WADJANA	WAD11	165,70725	-21,311267	amont WAJA100R	Vale-NC	13/12/2012	15h20
			WAD21	166,2197	-21,943967	aval WAJA200		13/12/2012	14h30
		KUE	KUE11			3-A (code Valé)			
			KUE21			3-B (code Valé)			
			KUE31	166,97095	-22,325133	1-E (code Valé)		13/12/2012	9h00
	Mont-Dore	KUE NORD	KUN11			KA (code Valé)			
			BAN11	166,891233	-22,333817	6T (code Valé)		26/10/2012	11h00
		BAIE NORD bras nord	BNN11	166,893567	-22,332817	6-BNOR1 (code Valé)		26/10/2012	12h15
			BNS11	166,892533	-22,334533	6-AFF (code Valé)		26/10/2012	13h
		KAORIS	KAO11	166,894567	-22,284017	-		30/11/2012	17h20
			KAO21	166,863033	-22,292083	aval KAOR100R		13/11/2012	16h30
			RIVIERE DES LACS	RIL11	166,869683	-22,253333		1 (code Valé)	09/11/2012
		CREEK PERNOD	RIL21	166,847067	-22,1818	3 (code Valé)		09/11/2012	13H10
			PER11	166,843	-22,1807	5 (code Valé)		26/10/2012	17h30
	B: Plaine littorale Ouest Pénéplaine littorale Collinaire < 250m Peu arrosé Géologie hétérogène	Nouméa	YAHOUÉ	YAH11	166,501467	-22,1951		amont YAHOUÉC1	-
YAH21				166,487	-22,221	YAHO300	-	07/11/2012	13H10
Dumbea		DUMBEA	DUM11	166,448033	-22,15665	DUMB700	DAVAR BV de la Dumbea	24/10/2012	18h
			KAR11	166,385117	-22,092717	amont KARIK100	-	22/10/2012	17h20
Païta		KARIKOUÏE	KAR21	166,363517	-22,13755	amont KARIK400	-	22/10/2012	18h15
			LAF11	165,85945	-21,72605	LAFOA325	-	22/10/2012	15h00
La Foa		LA FOA	LAF21	165,798683	-21,717617	LAFO600	DAVAR BV de La Foa	22/10/2012	14h00
			FONWHARY	FON11	165,803383	-21,706433	aval FONW100	22/10/2012	12h15
Moindou		MOINDOU	MOI11	165,67585	-21,691617	aval MDOU550	21/10/2012	16h45	
			BOGHEN	BOG21	165,647383	-21,607917	aval BOGH325	DAVAR BV de la Néra	24/10/2012
Bourail		BOGHEN	BOG31	165,518033	-21,579117	BOGH600	24/10/2012	11h45	
			TENE	TEN11	165,554817	-21,51115	aval TENE050	23/10/2012	14h40
		NERA	NER11	165,502067	-21,572467	amont NERA100	24/10/2012	6h10	
			NER21	165,496167	-21,579917	aval NERA100	23/10/2012	17h	
		DOUENCHEUR	DOU21	165,47595	-21,549733	DOUE300	DAVAR BV de la Néra	23/10/2012	18h00
DOU31	165,495433		-21,564583	aval DOUE400	23/10/2012	17h30			
Poya	MWE KARA AWI	KAA11	165,26595	-21,35875	DOLREF (code SLN)	SLN	29/10/2012	11h20	
		KAA21	165,26355	-21,357917	DOL1 (code SLN)	29/10/2012	12h40		
		KAA31	165,260567	-21,35635	DOL2 (code SLN)	29/10/2012	13h10		
Pouembout	Affluent PEOUE	APE11	165,044117	-21,194717	K10-501 (code SLN)	SLN	27/11/2012	15h20	
		APA11	165,021333	-21,148233	PAP100 (code SLN)	26/11/2012	12h00		
	affluent PAPAINDA	EGL11	165,01445	-21,150333	EGL100 (code SLN)	26/11/2012	14h50		
		POUEBOUT	POU21	164,910983	-21,12105	aval POUE600	DAVAR BV de la Néra	20/10/2012	12h10
Kone	KONE	POU31	164,861317	-21,14245	POUE800	20/10/2012	10h30		
		KON21	164,85155	-21,06475	KONE950	DAVAR BV de la Kone	20/10/2012	14h30	
	TALEA branche sud	TLS11	167,005183	-22,28945	SW014 (code KNS)	KNS	19/12/2012	9h20	
TLN11		166,993017	-22,27745	SW012 (code KNS)	19/12/2012		7h30		
COCO (=TALEA)	COC11	164,759783	-20,971117	SW016 (code KNS)	19/12/2012		10h20		
Koumac	FRIDOLINE	FRI11	164,24475	-20,48575	aval FRIDOLINE CENTRE (code SLN)	SLN	15/11/2012	15h10	
		OUA11	164,2182	-20,4429	OUB01 (code SLN)	21/11/2012	9h50		
	OUMBAYE	OUA21	164,221183	-20,4405	Ouambaye (code SLN)	21/11/2012	11h50		

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

HER	COMMUNE	COURS D'EAU	CODE STATION	Coordonnées (WGS84)		LOCALISATION / STATION ASSOCIEE (code DAVAR)	RESEAU DE SUIVI ACTUEL (BV = Bassin Versant)	PRELEVEMENT	
				X (longitude)	Y (latitude)			DATE	HEURE
C: Collines schisteuses de la pointe Nord Pénéplaine littorale Collinaire < 250m Peu arrosé Schistes	Poum	<b>NOMAC</b>	<b>NOM11</b>	164,0825	-20,20875	NomacF1	-	27/10/2012	16h00
	Ouegoa	<b>DIAHOT</b>	<b>DIA21</b>	164,439367	-20,39495	amont DIA400	-	28/10/2012	10h30
			<b>DIA31</b>	164,435617	-20,378333	amont DIAH500	-	28/10/2012	8h45
		<b>TADE</b>	<b>TAD11</b>	164,453733	-20,404517	TADE100	-	28/10/2012	15h00
E: Massif du Panié Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé Schistes	Ouegoa	<b>DIAHOT</b>	<b>DIA11</b>	164,566917	-20,527133	aval DIA025	-	28/10/2012	12h45
	Hienghene	<b>TAO</b>	<b>TAO11</b>	164,773433	-20,987683	aval TAO050	-	17/11/2012	13h00
		<b>HIENGHENE</b>	<b>HIE11</b>	164,88165	-20,737533	aval HIEN200	-	17/11/2012	17h30
G: Cœur de la chaîne centrale Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé Unité Anté Sénonienne (socle de la chaîne centrale)	Bourail	<b>BOGHEN</b>	<b>BOG11</b>	165,7004	-21,539567	amont BOGH050	DAVAR BV de la Néra	24/10/2012	8h45
		<b>WA MENAO</b>	<b>MEN11</b>	165,507883	-21,430783	BouereqaouC1		23/10/2012	12h15
		<b>DOUENCHEUR</b>	<b>DOU11</b>	165,491667	-21,450433	amont DOUE050		23/10/2012	10h45
		<b>POUEMBOU</b>	<b>POU11</b>	165,01865	-21,112483	POUE100	DAVAR BV de la Pouembout	20/10/2012	12h45
	Kone	<b>KONE</b>	<b>KON11</b>	164,962467	-21,034283	KONE400	DAVAR BV de la Kone	21/10/2012	14h15
	Poindimié	<b>TIWAKA</b>	<b>TIW11</b>	165,104783	-20,908033	aval TIWA200	-	21/10/2012	13h15
			<b>TIW21</b>	165,176117	-20,887633	amont TIWA350	-	21/10/2012	11h15
		<b>TIW31</b>	165,21905	-20,898117	entre TIWA425 et TIWA450	-	21/10/2012	12h15	
		<b>TCHAMBA</b>	<b>TCH11</b>	165,285067	-21,041183	TCHA150	-	21/10/2012	7h45
			<b>TCH21</b>	165,34815	-21,0322	amont TCHA400	-	21/10/2012	9h30
	E: Massif ultramafique Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé Massif ultramafique	Dumbea	<b>DUMBEA branche nord</b>	<b>DMN11</b>	166,494	-22,128	aval DUMB050	DAVAR BV de la Dumbea	24/10/2012
Pororo		<b>WANEWAYO</b>	<b>WAN11</b>	166,197683	-21,601667	WANEWAYO (code SLN)	SLN	07/12/2012	11h00
Thio		<b>Affluent DOTHIO</b>	<b>ADO11</b>	166,19768	-21,601667	WELLINGTON (code SLN)		07/12/2012	15h00
Bouloupari		<b>Affluent WANO</b>	<b>AWA11</b>	166,213117	-21,919817	OPOUE nord (code SLN)		10/12/2012	11h00
		<b>WANO</b>	<b>WAO11</b>	166,2197	-21,943967	WANO aval (code SLN)		10/12/2012	15h00
		<b>MAMIE</b>	<b>MAM11</b>	166,887067	-22,0565	aval MAMIE200		-	13/12/2012

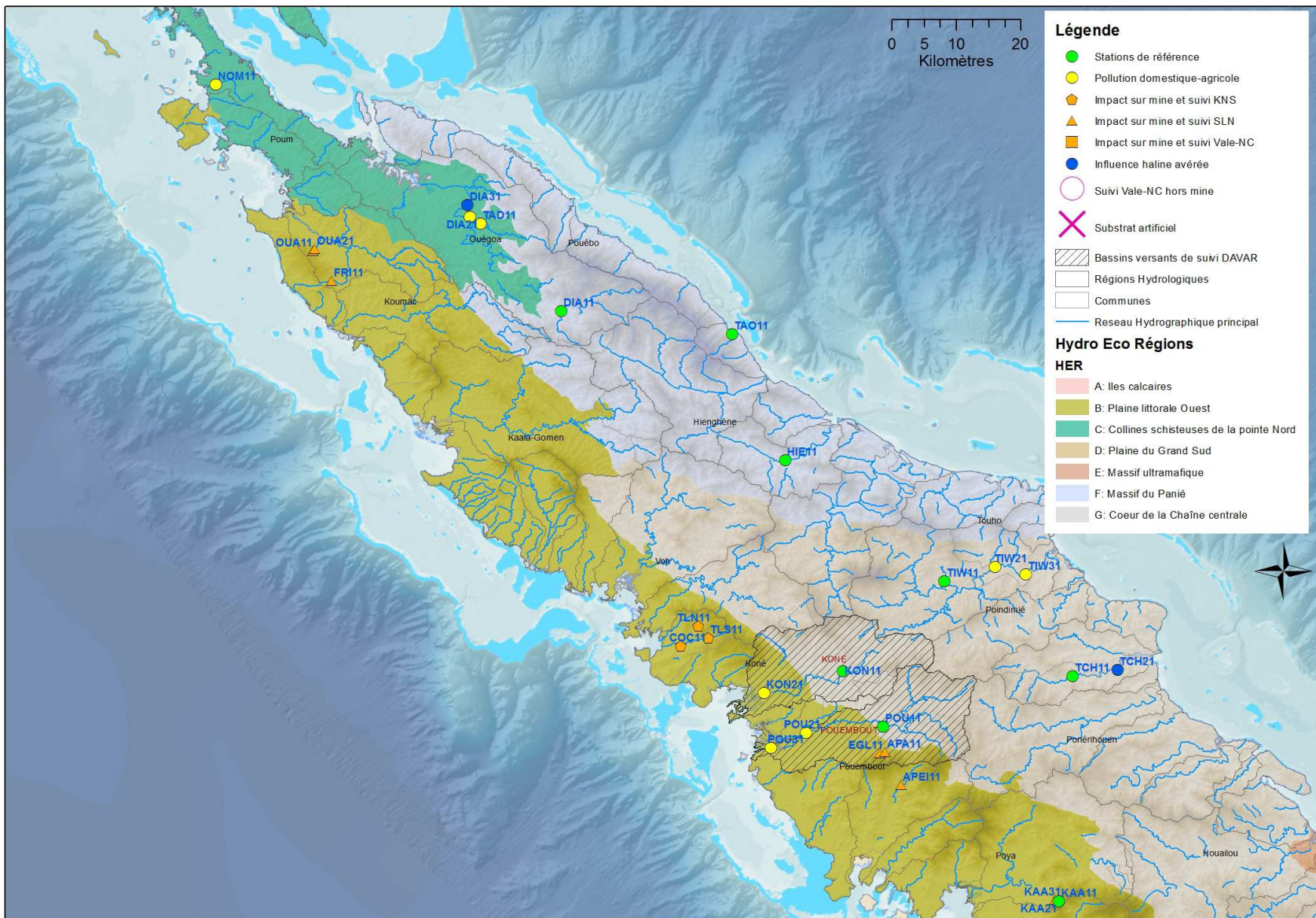


Figure 3: Carte du réseau des stations, région Nord.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques  
Phase 1: Etude de faisabilité

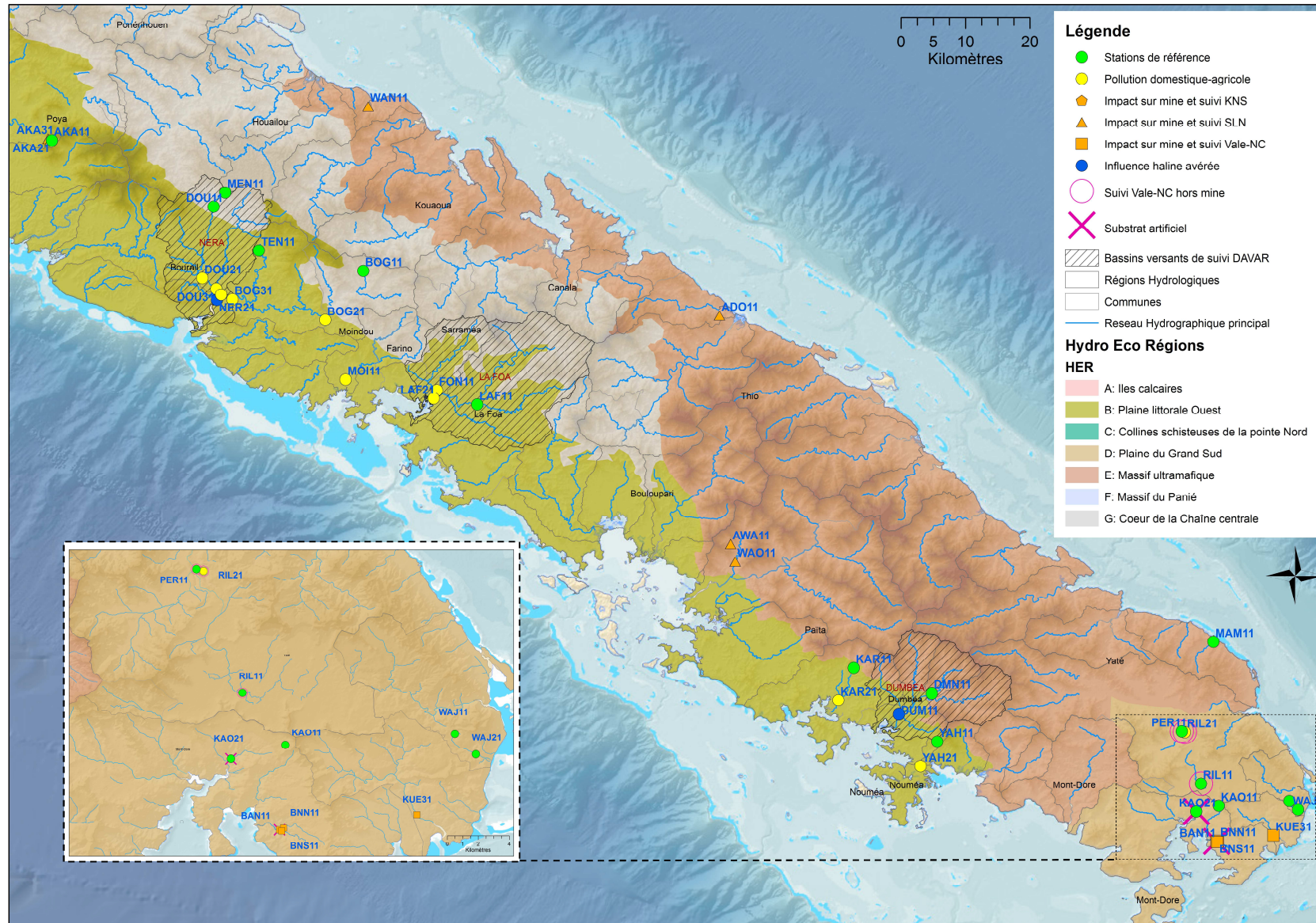


Figure 4: Carte du réseau des stations, région Sud.

## **4.1.2 Prélèvements de terrain**

### **4.1.2.1 Mesures *in situ* et prélèvements d'eau**

Les relevés de température, de conductivité, de concentration en oxygène dissous et de pourcentage en oxygène dissous, sont systématiquement effectués lors du prélèvement biologique à l'aide de sondes transportables.

Des prélèvements d'eau ont été effectués lors de l'échantillonnage des diatomées pour les stations ne rentrant pas dans le cadre d'un réseau de suivi actuel ou en cas d'incertitude sur le suivi (DMN11, MOI11 et FON11). En effet, il y avait une incertitude sur la localisation de la station DMN11 par rapport à la station de suivi, en raison des aléas du terrain dus à la recherche des itinéraires. Les stations MOI11 et FON11 ont été échantillonnées parce que jugées intéressantes du point de vue d'une dégradation apparente lors d'une tournée de prélèvement, sans savoir qu'elles étaient calées sur des stations de réseau. Deux stations n'ont pas été prélevées, TAO11 et HIE11 car considérées *a priori* déjà suivies et qui ne l'étaient finalement pas. Sur le réseau de la SLN<sup>5</sup> et de KNS<sup>6</sup>, certains paramètres préconisés pour la construction de l'indice, comme l'ammonium, et les phosphates, ne sont pas mesurés. Des prélèvements ont donc aussi été effectués. L'ensemble de ces stations est regroupé Annexe III.

Les échantillons sont conservés en glacières à 4 °C environ. Ils sont stockés dans une seule et même bouteille PET à bouchon pour tous les paramètres traités par un même laboratoire, tant que le volume est suffisant pour l'ensemble des analyses. Les processus de mise en solution des phases particulières n'est réduit que par la réduction du délai entre le prélèvement et le traitement de l'échantillon. La filtration des échantillons est réalisée par les laboratoires lors de la réception des échantillons.

Les prélèvements se font en respectant quelques consignes importantes:

- rincer 2 à 3 fois la bouteille (si elle ne contient pas de conservateur!),
- prélever dans la veine d'eau principale, hors d'une zone de remous, en amont de l'opérateur (et de tout autre perturbation passagère), au milieu de la colonne d'eau sur la station,
- remplir complètement la bouteille en évitant de piéger une bulle d'air,
- étiqueter l'échantillon pour identification.

---

<sup>5</sup> Société Le Nickel

<sup>6</sup> Koniambo Nickel SAS

#### 4.1.2.2 Le prélèvement des diatomées

La méthode de prélèvement s'inspire de la norme IBD (NF T 90-354) de décembre 2007 dont certaines recommandations sont rappelées ci-dessous. Ces préconisations visent à donner une bonne représentativité de la flore diatomique au niveau de la séquence échantillonnée afin de révéler au mieux la physico-chimie du cours d'eau à l'échelle du tronçon évalué. De plus, la norme permet de standardiser la méthode de prélèvement entre les opérateurs, étape préliminaire à l'analyse des résultats et source de variation entre les résultats finaux.

Les caractéristiques de la station de prélèvement (aspect de l'eau, régime hydraulique...) et le prélèvement en lui-même (type de substrat, hauteur d'eau au niveau du prélèvement, type de fixateur...) sont consignées sur la fiche station (Annexe IV).

De manière générale, les prélèvements ont été réalisés selon la norme:

- à l'étiage, en zone lotique,
- sur substrat dur naturel stable, immergé en permanence ou depuis 4 semaines au moins,
- dans la zone de courant principal,
- en zone éclairée et euphotique,
- un seul échantillon est réalisé par station pour un seul type de support,
- une surface minimale de 100 cm<sup>2</sup>, correspondant à au moins 5 pierres, doit être échantillonnée. La pression d'échantillonnage doit être augmentée lorsque les quantités de biofilm sont faibles (cours d'eau très oligotrophes, notamment sur substrats ultramafiques).
- L'échantillon récolté est immédiatement fixé au formol neutralisé (à 35%) pour un volume d'environ 10% celui de l'échantillon (soit 7 à 10 ml).

Le prélèvement de l'épilithon<sup>7</sup>, plutôt que d'autres microhabitats de diatomées fixées (l'épipsammon<sup>8</sup> ou l'épiphyton<sup>9</sup>) est discuté (Passy et *al.*, 1999). Cependant, le substrat dur se prête bien à l'échantillonnage en routine de façon standardisée, il est facilement disponible et pérenne et sera privilégié.

Par rapport à la métropole, la surface échantillonnée dans les conditions locales doit être plus élevée que celle préconisée dans la norme en raison de la relativement faible abondance du biofilm dans certains cas (substrats ultramafiques et eaux ultraoligotrophes).

---

<sup>7</sup> les espèces vivant sur substrat dur et inerte

<sup>8</sup> les espèces vivant à la surface des grains de sable

<sup>9</sup> les espèces vivant sur les végétaux aquatiques

La quantité de fixateur peut être augmentée en cas de présence de matière organique importante dans l'échantillon au moment du prélèvement.

La plupart des stations répondent à ces critères de prélèvement. L'ensemble de ces détails est renseigné sur la fiche station, compilé en annexe III, témoin de l'échantillonnage. Elle permet de situer dans l'espace et dans le temps le prélèvement et renseigne les caractéristiques principales de la station utiles à l'interprétation des données floristiques. Les fiches stations sont illustrées par un schéma et une série de photos.

Certains prélèvements n'ont pas été réalisés dans les conditions idéales mais restent toutefois dans les préconisations normatives:

- POU31, DIA31 et MOI11; prélèvements réalisés sur macrophytes,
- MEN11, TEN11, DOU11, KAO11; stations prélevées en zone ombragée,
- D'autres ont été faits « hors norme » et ces conditions particulières devront être prise en compte dans l'interprétation des données :
- FON11, NOM11; prélèvements en condition de tarissement du cours d'eau,
- PER11, TAO11, MAM11, WAD11, WAD21; prélèvements en condition de moyennes eaux, après des précipitations,
- NOM11; prélèvement sur plusieurs types de supports.

Le prélèvement s'effectue à l'aide d'une brosse à dents neuve. La face supérieure du substrat est frottée au-dessus d'une bassine, comme illustré par la Figure 5, préalablement rincée énergiquement dans l'eau de la rivière afin de la débarrasser d'un maximum de contamination diatomique exogène. La récolte sous forme de "jus" est récupérée dans un pilulier double capsules neuf. Il est étiqueté avec le nom de la station, la date et l'heure de prélèvement. L'échantillon est fixé au formol, quelques gouttes suffisent. La bassine est de nouveau rincée. La station est ensuite décrite en renseignant la fiche station, le point GPS est enregistré et des photos sont prises.



**Figure 5: Récupération du biofilm à l'aide d'une brosse à dents.**



## 4.1.3 Mesures de laboratoire

### 4.1.3.1 Les paramètres abiotiques: la physico-chimie

Les paramètres mesurés par les réseaux et préconisés pour la construction de l'indice sont regroupés dans le tableau II. Les méthodes de détection et les limites de quantifications sont décrites en Annexe VI.

**Tableau II: Analyses de laboratoire préconisées pour la construction de l'indice diatomique.**

	Mesures en laboratoire (en mg/l)	Réseaux de suivi				
		DAVAR	SLN	Vale-NC	KNS	Asconit/ Biotop
Descripteurs d'altération anthropique	Ammonium (NH <sub>4</sub> )	X		X		X
	Nitrates (NO <sub>3</sub> )	X	X	X		X
	Nitrites (NO <sub>2</sub> )			X		X
	Azote Kjeldahl (NTK)	X				
	N Total Dissous			X		X
	Phosphore Total Dissous	X		X		X
	Orthophosphates (PO <sub>4</sub> )	X		X		X
	Demande Biologique en Oxygène (DBO5)				X	X
	Demande chimique en Oxygène (DCO)	X		X	X	
	Matières En Suspension (MES)	X	X	X	X	X
Descripteurs de la géo- hydrochimie naturelle	Calcium dissous (Ca)	X	X	X		X
	Magnésium dissous (Mg)	X	X	X	X	X
	Chlorures dissous (Cl)	X	X	X	X	X
	Sodium dissous (Na)	X	X	X	X	X
	Sulfates (SO <sub>4</sub> )	X	X	X	X	X

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

Potassium dissous (K)	X	X	X	X	X
Aluminium dissous (Al)	X	X	X	X	X
Chrome dissous (Cr)	X	X	X	X	X
Cobalt (Co)		X	X	X	X
Fer dissous (Fe)	X		X	X	X
Nickel dissous (Ni)	X	X	X	X	X
Silicium dissous (Si)		X	X	X	X
Titre Alcalimétrique Complet (TAC) (en °f ou mg/l)	X		X		X

Entre réseaux et au sein d'un même réseau selon les années, les paramètres mesurés peuvent être différents comme décrit dans ce tableau. Cependant, certaines données peuvent être retrouvées par le calcul. La DBO5 peut être estimée d'après le rapport DCO/DBO5 proche de 2,5 dans les eaux naturelles et de 5 dans les eaux traités (Servais et *al.*, 1999b). Ce même type de problème s'est posé lors de l'établissement de l'indice diatomique à la Réunion ou aux Antilles. Dans l'état actuel des analyses multivariées employées, si une donnée manque dans une ligne de descripteurs, c'est tout le relevé qui est perdu pour l'analyse. La solution apportée est de reconstituer les valeurs manquantes en bonne intelligence et de conforter ultérieurement l'expertise faite en s'appuyant sur les résultats des analyses suivantes.

### **Les descripteurs d'altération anthropique**

Ces paramètres peuvent varier naturellement mais l'action de l'homme a une grande incidence sur leur évolution en termes d'amplitude et de vitesse de changement de concentrations.

**Ammonium:** l'azote réduit soluble se retrouve sous 2 formes: l'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et la forme non dissociée, en milieu basique, l'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ). Cette dernière forme est peu soluble et se retrouve alors à l'état gazeux (l'ammoniac), toxique pour les poissons par diffusion à travers les membranes. De plus, la dégradation de l'ammonium en nitrates en milieu oxydant abaisse la concentration en  $\text{O}_2$  du milieu. L'ammonium, issu des phénomènes d'ammonification (dégradation) de la matière organique (aval d'élevages ou de STEP<sup>10</sup>) ou de lixiviation d'engrais ammoniacés, est un témoin d'altération anthropique.

**Nitrates:** c'est la forme azotée issue de la minéralisation des matières organiques fermentescibles. Ses concentrations sont naturellement faibles en l'absence d'activité humaine, néanmoins très variable selon la saison et l'origine des eaux (Nisbet et Verneaux, 1970). Les principales sources de contamination des eaux de surface sont la lixiviation des engrais azotés et les effluents domestiques. Les diatomées répondent à ce paramètre en complément avec les orthophosphates, et entrent dans 7 classes de qualité trophique (Van Dam et al., 1994).

**Nitrites:** forme transitoire entre  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  lors du phénomène de nitrification, c'est un indicateur de l'intensité de minéralisation des matières organiques fermentescibles. Très toxique pour les poissons, il est normalement en concentration peu élevée.

**Azote Kjeldahl (AKJ):** il désigne la totalité de l'azote organique contenu dans une eau, incrémenté de l'azote ammoniacal ( $\text{NTK} = \text{N organique} + \text{N ammoniacal}$ ). Des valeurs élevées témoignent de rejets organiques excessifs, d'anaérobiose du milieu ou encore de présence de matières toxiques, ces 2 derniers phénomènes bloquant les processus d'oxydation de la matière organique.

**Azote (N) total dissous:** c'est l'ensemble de l'azote organique (nitrates et nitrites) et minéral, ce dernier incluant l'azote ammoniacal.

**Phosphore Total Dissous:** il comprend les molécules de phosphates minéraux (orthophosphates et polyphosphates) et les phosphates organiques.

---

<sup>10</sup> STation d'EPuration

**Orthophosphates ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ):** ce sont des sels minéraux de l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), ils sont issus de la dégradation des phosphates par les bactéries. En l'absence d'anthropisation, les concentrations sont très faibles et liées à la biogéochimie du terrain. En concentrations limitantes, ils sont très vite assimilés par les végétaux, ils peuvent donc passer inaperçus alors que le milieu est eutrophisé. La source principale de rejet est liée aux effluents domestiques (détergents, eaux usées), aux eaux usées d'élevage et à la lixiviation (moins forte que pour les nitrates) des engrais phosphatés. En complément avec les nitrates (Van Dam et *al.*, 1994), les diatomées répondent de façon très sensible à ce paramètre qui revêt une importance déterminante dans le processus d'eutrophisation des cours d'eau et des plans d'eau.

**DBO5 ( $\text{mg}(\text{O}_2)/\text{l}$ ):** la Demande Biologique en Oxygène, mesure la quantité d'oxygène consommée durant une incubation de 5 jours à 20 °C par les micro-organismes pour oxyder la matière organique. C'est donc une estimation de la quantité de matière organique biodégradable. Ce paramètre est souvent révélateur d'une altération anthropique par l'enrichissement du milieu en matières organiques. Les diatomées répondent aux différentes concentrations en matière organique, et sont réparties en 5 classes de qualité (Van Dam et *al.*, 1994).

**DCO ( $\text{mg}(\text{O}_2)/\text{l}$ ):** la Demande Chimique en Oxygène mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique contenue dans un échantillon, y compris la plus réfractaire. C'est donc une mesure approchée du carbone organique total.

**MES ( $\text{mg}/\text{l}$ ):** les Matières En Suspension comprennent les matières minérales et organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Influencées par le régime hydraulique, ses concentrations varient avec les saisons. Elles peuvent rendre compte d'une altération liée à l'érosion d'origine anthropique.

### **Les descripteurs de la géo-hydrochimie naturelle**

Ces paramètres, essentiellement liés aux conditions naturelles environnantes, peuvent toutefois s'avérer des marqueurs de dégradation anthropique pour des teneurs ou des variations hors normes.

**Calcium:** issu du lessivage des roches (composition des roches sédimentaires rencontrées), sa concentration est variable selon la nature du terrain traversé, sa concentration est faible sur terrain ultramafique.

**Magnésium:** de la même origine que le calcium, sa concentration est très forte sur substrat ultramafique.

**Dureté totale:** c'est un indicateur de la teneur en ions calcium et magnésium. En Nouvelle-Calédonie, le rapport calcium sur magnésium est très faible sur sol ultramafique.

**Chlorures et sodium:** descripteurs des influences halines à proximité du littoral. Une forte concentration peut aussi indiquer une pollution par des eaux usées domestiques (sels régénérant des détergents) ou d'usages industriels.

**Sulfates:** ils caractérisent une nature géologique régionale des terrains traversés par le cours d'eau ou certains effluents anthropiques. Issus de l'oxydation de sulfures présents dans les sols/roches/sédiments, présents naturellement dans certains vertisols<sup>11</sup> calédoniens (Podwojewsky, 1988). En quantité importante, ils marquent une intrusion marine.

**Potassium:** sa source principale est l'altération météoritique des roches contenant du potassium, comme le feldspath. Il peut aussi provenir du lessivage des sols amendés par des engrais. Sa teneur est relativement élevée en mer par rapport aux eaux de rivières.

**Aluminium, Chrome, Cobalt, Fer, Nickel:** ces éléments se trouvent en solution ou complexés, influençant leur biodisponibilité, selon entre autre, le pH de l'eau.

**Silicium:** le silicium se trouve sous forme  $H_4SiO_4$ , c'est une espèce dissoute neutre. Sa solubilité dépend du pH en milieu basique. Les sols ultramafiques sont très pauvres en silicium qui entre dans la composition de la paroi des diatomées. Cependant, les eaux des nappes et leur écoulement en surface sont concentrés en silicium. Il n'a pas été trouvé à ce jour dans la littérature de concentrations limitantes en Nouvelle-Calédonie par les précédentes recherches (Moser et al., 1999).

**Titre Alcalimétrique Complet:** le TAC (ou alcalinité totale) dose les carbonates, les bicarbonates et les hydroxydes. Il peut être rapporté au dosage des carbonates et hydrogénocarbonates qui sont les variables de l'alcalinité dont cette dernière espèce est largement majoritaire. Ils représentent surtout les sites les plus carbonatés arrivés à saturation en hydrogénocarbonates  $H_2CO_3^-$  et  $HCO_3^-$ . C'est un bon indicateur de conditions chimiques naturelles représentant bien le gradient entre des eaux peu minéralisées et acides et des eaux géochimiquement très minéralisées et plutôt basiques. Il peut aussi, dans les très fortes valeurs, représenter une forte altération anthropique alcalinisante (rejets basiques de certaines STEP, d'industries chimiques et agro-alimentaires...).

---

<sup>11</sup> sols riches en argile de type smectite, anciennement appelés «argile noire tropicale»

#### **4.1.3.2 Identification des diatomées**

##### **Traitement des échantillons**

Le traitement est effectué conformément à la norme NF T 90-354 de décembre 2007.

L'identification des diatomées étant basée sur l'examen microscopique du frustule siliceux, les échantillons sont traités à l'eau oxygénée H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bouillante (30 %) afin d'éliminer la matière organique contenue dans l'échantillon et l'intérieur des cellules de diatomées (le protoplasme) et à l'acide chlorhydrique (élimination des carbonates). Les culots obtenus sont ensuite rincés par 4 cycles de lavage/décantation à l'eau distillée pour enlever toute trace d'acide et d'eau oxygénée. Après déshydratation, une partie du culot est montée entre lame et lamelle dans une résine réfringente, le Naphrax (Northern Biological Supplies Ltd, Angleterre - Indice de réfraction = 1,74).

##### **Observations et inventaires des diatomées**

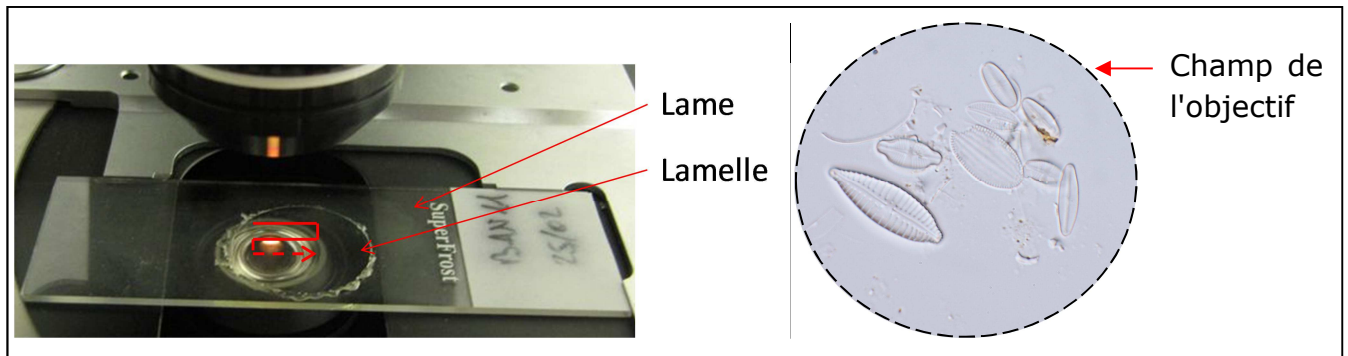
Les déterminations ont été effectuées en s'aidant de nombreuses flores disponibles détaillées en Annexe V.

Les valves sont comptées et déterminées au niveau spécifique ou infraspécifique, en microscopie photonique au grossissement x 1000 (microscope Olympus BX53). Le microscope est équipé du contraste interférentiel différentiel (DIC), cette technique d'éclairage permet une meilleure visualisation des petites espèces et des détails des ornements. Le microscope est équipé d'un appareil photographique (Canon EOS 550D) permettant la prise de vue des champs observés.

Les photographies sont ensuite traitées à l'aide du logiciel de retouche Adobe Photoshop Elements 8.0 afin d'isoler les valves d'intérêt et de réaliser des planches, facilitant la détermination des taxons. Les mesures effectuées sur les valves, longueur, largeur, nombre de stries sont réalisées à l'aide du logiciel d'analyses d'images ImageJ, préalablement étalonné grâce à une lame micrométrique qui porte un segment de 1mm, le micromètre objet, divisé en 100 parties égales. Ainsi, 2 traits consécutifs sont séparés par 10 µm.

L'identification des diatomées peut être soumise à un biais de l'opérateur pour des formes proches, ainsi qu'à l'attribution de noms différents pour le même taxon en raison de l'existence d'homonymie dans la base de données. Afin de réduire ces écarts, une intercalibration régulière a lieu entre les 3 opérateurs de cette étude, M. Julien Marquié (habilité Cofrac pour l'identification des diatomées), Mme. Florence Peres (expert diatomées) et M. Michel Coste (spécialiste international des diatomées). L'intercalibration s'effectue grâce à la circulation des planches des diatomées photographiées entre opérateurs lors des inventaires et peut être confirmées sur le matériel les opérateurs disposant chacun des échantillons prélevés.

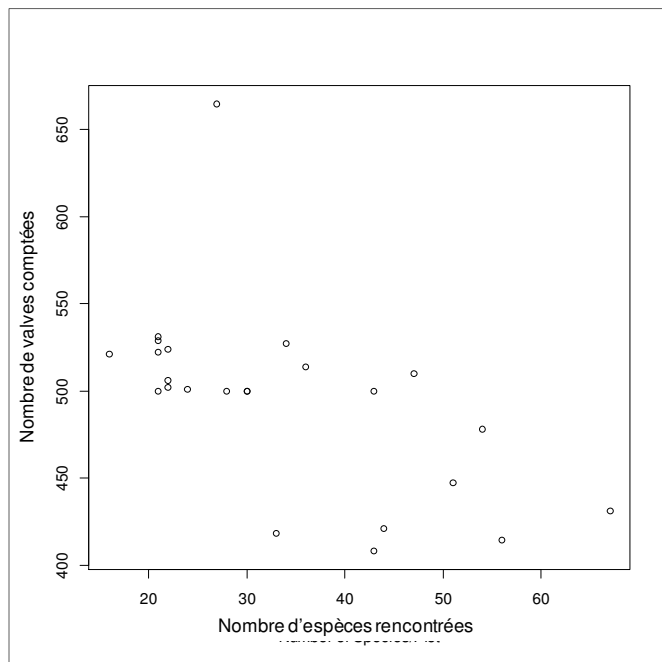
Un comptage par champs (balayage par transects et figuration d'un champ, Figure 6) est effectué sur 400 valves minimum afin de dresser un inventaire taxinomique. Les résultats sont exprimés par l'abondance relative (en ‰) de chaque taxon.



**Figure 6: Illustration schématique du balayage par transects au microscope et illustration d'un champ de l'objectif du microscope.**

L'effort de comptage minimum de 400 valves a été calqué sur l'indice métropolitain mais reste à définir pour la Nouvelle-Calédonie. Le graphique représentant la richesse spécifique en fonction du nombre total de valves comptées Figure 7 permet de vérifier que la richesse spécifique trouvée par relevé n'est pas limitée par la pression de comptage réalisée du moment qu'elle atteint ou dépasse 400 valves. En effet, le relevé à effectif compté le plus fort (plus de 650 valves) compte environ 26 taxons tandis que celui à 67 taxons a été trouvé avec guère plus de 400 valves comptées (environ 430). Il est trop tôt pour conclure, mais les premiers éléments collectés, agrégés dans la Figure 7, semblent illustrer qu'à partir de 400 à 500 individus, il ne se dégage pas de relation entre effectifs comptés et biodiversité du relevé.

Cela laisse penser, sous réserve de confirmation par l'établissement de courbes de tarissement sur divers relevés concernant des contextes variés de l'Ile, que cette pression de comptage serait correcte pour représenter la diversité taxinomique des relevés exploités jusqu'alors. Ces courbes de tarissement sont en cours d'élaboration, il s'agit de compter 1000 valves et d'observer l'abondance relative des nouveaux taxons apparaissant au cours de l'inventaire.



**Figure 7: Graphique de la richesse spécifique en fonction de la pression de comptage sur les 23 inventaires effectués (ronds blancs).**

## 4.2 Protocole expérimental: les substrats artificiels

La méthode d'extraction des minerais nickélifères en carrière implique le décapage des horizons superficiels afin d'atteindre les couches plus profondes, enrichies en nickel. Les eaux de ruissellement se chargent alors en éléments métalliques toxiques tels que le nickel, le cobalt et le chrome qui aboutissent dans les cours d'eau. Les mesures de concentrations de ces éléments par prélèvements d'eau ponctuels, n'intègrent pas l'évolution en continu de ces teneurs, ni leurs interactions avec les autres paramètres physico-chimiques. C'est dans cette perspective d'étude des effets conjugués des Eléments Traces Métalliques par l'analyse de la réponse de la population diatomique que la pose de substrats artificiels a été réalisée. Les diatomées offrent un bon modèle d'appréhension de ces effets:

- abondance, ubiquité, sédentarité, adhérence au substrat (périphyton),
- possibilité d'études quantitatives et qualitative sur le modèle,
- capacité d'accumulation des métaux au sein du biofilm et des cellules elles-mêmes et possibilité de doser ces concentrations,
- caractère intégrateur à plusieurs échelles de temps selon la pérennité des espèces au sein de la communauté.

La distribution et le développement des communautés diatomiques périphytiques sont influencés par de nombreux facteurs environnementaux, ce qui rend difficile



l'étude et l'interprétation du rôle de chacun (Lawrence et *al.*, 2004). Cependant, l'utilisation de substrats artificiels permet de s'affranchir de la variabilité de certains paramètres en les uniformisant. De fait, la nature du substrat est la même, l'accès à la lumière et la vitesse du courant peuvent être comparables en déposant les supports dans des zones similaires. Le temps d'exposition est maîtrisé, ce qui permet de bien relier flore mise en place sur les substrats et qualité d'eau intégrée sur l'épisode temporel échantillonné. De plus, des examens complémentaires à l'étude spécifique des communautés, comme l'abondance des organismes phototrophes par rapport à la biomasse totale et l'accumulation des métaux au sein du biofilm, renforcent la pertinence de l'utilisation des diatomées comme bioindicateur (Gold et *al.*, 2003, Duong et *al.*, 2010).

Le protocole de mise en place des cagettes et des mesures effectuées s'inspire de l'article de Duong et *al.*, 2010.

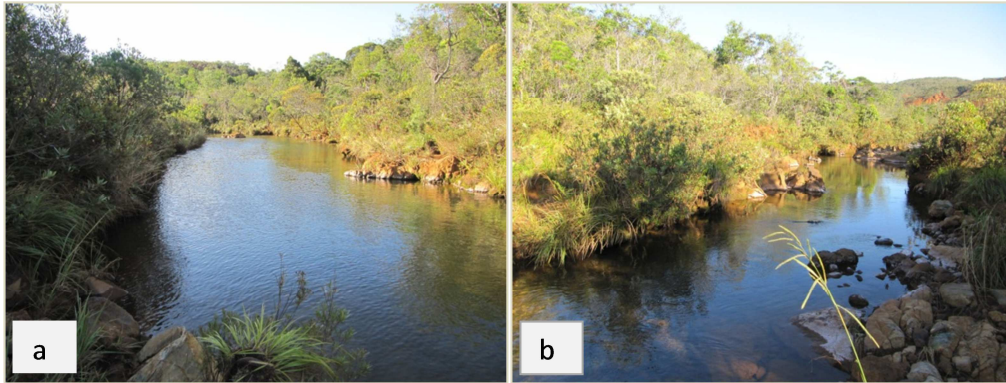
#### **4.2.1 Choix des stations**

Les critères de choix des stations ont été les suivants:

- accès au site relativement facile afin de pouvoir poser le matériel et suivre l'expérience à raison d'une visite toutes les 2 semaines,
- stations donnant lieu à un suivi des paramètres physico-chimiques (dans ce cas la nature et la fréquence des paramètres suivis sont à préciser avec Vale-NC),
- comparaison possible entre une station impactée par les rejets miniers et une station de référence non impactée:
- homogénéité des déterminants primaires, climat, relief, géologie de la zone d'étude,
- homogénéité au niveau des caractéristiques physiques de la station: vitesse du courant, ombrage, profondeur.

Ainsi, le cours d'eau impacté choisi est la Baie Nord environ 100 m en aval de la station BAN11 (équivalent 6-T) et la rivière des Kaoris comme référence, station KAO21 (environ 100 m en amont de KAOR200), bien qu'elle ne fasse pas partie d'un réseau de suivi en routine. Cette dernière fait partie du plan d'échantillonnage et représente la référence de l'HER D en contexte minier sur latérite, côte ouest pour cette étude.

Les stations sont illustrées ci-dessous:



**Figure 8: Station 6T (code Vale-NC), à l'aval de BAN11, a) vue amont vers aval, b) vue aval vers amont.**



**Figure 9: Station sur la rivière des Kaoris, vue d'ensemble.**

## 4.2.2 Mise en place des substrats artificiels

L'utilisation de substrat artificiel sur plaque de verre pour la récolte des diatomées est une technique connue (Lane et *al.*, 2003). Le montage effectué est illustré ci-dessous:



Figure 10: Cagettes et lames de verre fixées.

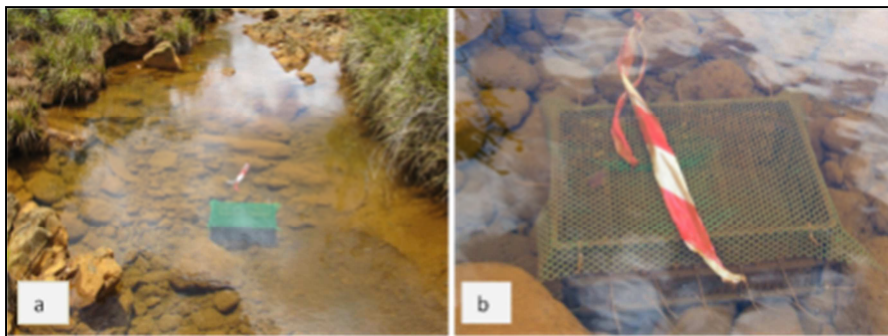


Figure 11: Fixation des cagettes sur la Baie Nord, 1er essai, station BAN11, a) à J+0, b) à J+17.

Les cagettes sont fixées à l'aide d'un fer à béton et d'une corde en polypropylène. Elles sont orientées de manière à ce que les lames sur la tranche, soient présentées parallèlement au courant afin d'éviter au maximum de la sédimentation sur le substrat.

En vue du traitement statistique des résultats, 4 cagettes ont été posées par stations, soit 4 réplicats.

## 4.2.3 Les paramètres mesurés

L'objectif est de déterminer s'il existe un impact du cours d'eau *a priori* pollué par les métaux sur la structure du biofilm diatomique comme cela a déjà pu être démontré dans d'autres études (Gold et *al.*, 2003, Morin et *al.* 2007, Duong et *al.*, 2010). Par biofilm on entend ici la fraction cellulaire et la matrice organique excrétée par l'ensemble du périphyton. Il est composé de bactéries, de champignons et d'algues telles que les diatomées, les chlorophycées et les cyanophycées. La matrice se compose des excréments de chacun, dont le mucilage excrété par les diatomées.

La récupération du biofilm se fait par grattage du substrat artificiel à l'aide d'une spatule comme illustré par la Figure 12.



**Figure 12: Récupération du biofilm par grattage du substrat artificiel.**

Les paramètres mesurés sur la composition floristique sont ceux habituellement décrits lors de la recherche d'altération par les pollutions métalliques (Morin et *al.*, 2007) ; biomasse, densité cellulaire, formes anormales (téatologiques), taille générale des espèces. Le dosage des concentrations en métaux au sein du biofilm estime l'accumulation de ces toxiques à l'échelle matricielle et cellulaire. La matrice semble avoir un rôle protecteur de détoxification en accumulant les toxiques sans les rendre biodisponibles (Duong et *al.*, 2010).

#### **4.2.3.1 Estimation de la production primaire**

La chlorophylle *a* est le paramètre le plus couramment pris en compte pour l'évaluation de la biomasse du phytoplancton. Ici, c'est le contenu pigmentaire des algues contenues dans le biofilm remis en suspension qui fait l'objet de dosages et constitue une mesure approchée de la production de biomasse algale. On distingue la chlorophylle *a* dite «active» (c'est-à-dire corrigée de la phéophytine *a*, aussi nommé phéopigment) et la chlorophylle *a* dite non corrigée (dite «globale» ou «brute»). Cette dernière représente la somme de la chlorophylle *a* et des phéopigments, ces derniers alors considérés comme les produits de dégradation de la chlorophylle *a* très instable. Leur différenciation dans la méthode de dosage par spectrophotométrie se fait par acidification selon la méthode de Lorenzen, utilisée dans la norme AFNOR NF T 90-117, d'après laquelle le dosage a été effectué ici. Néanmoins, cette méthode a ses limites car la chlorophylle *a* connaît d'autres formes de dégradations (phéophorbide *a* ou chlorophyllide *a*) et les spectres d'absorption de la phéophytine *a* et *b* (ce dernier est le produit de dégradation de la chlorophylle *b*) se chevauchent. La mesure des phéopigments n'est généralement pas utilisée en termes d'interprétation écologique mais plutôt pour corriger son interférence sur la chlorophylle *a*. Il est donc nécessaire de relativiser ces valeurs de chlorophylle «globale» plutôt que de les prendre comme des valeurs absolues.

### 4.2.3.2 Estimation de la biomasse organique

La mesure de biomasse organique nécessite 2 étapes successives comme décrit par la

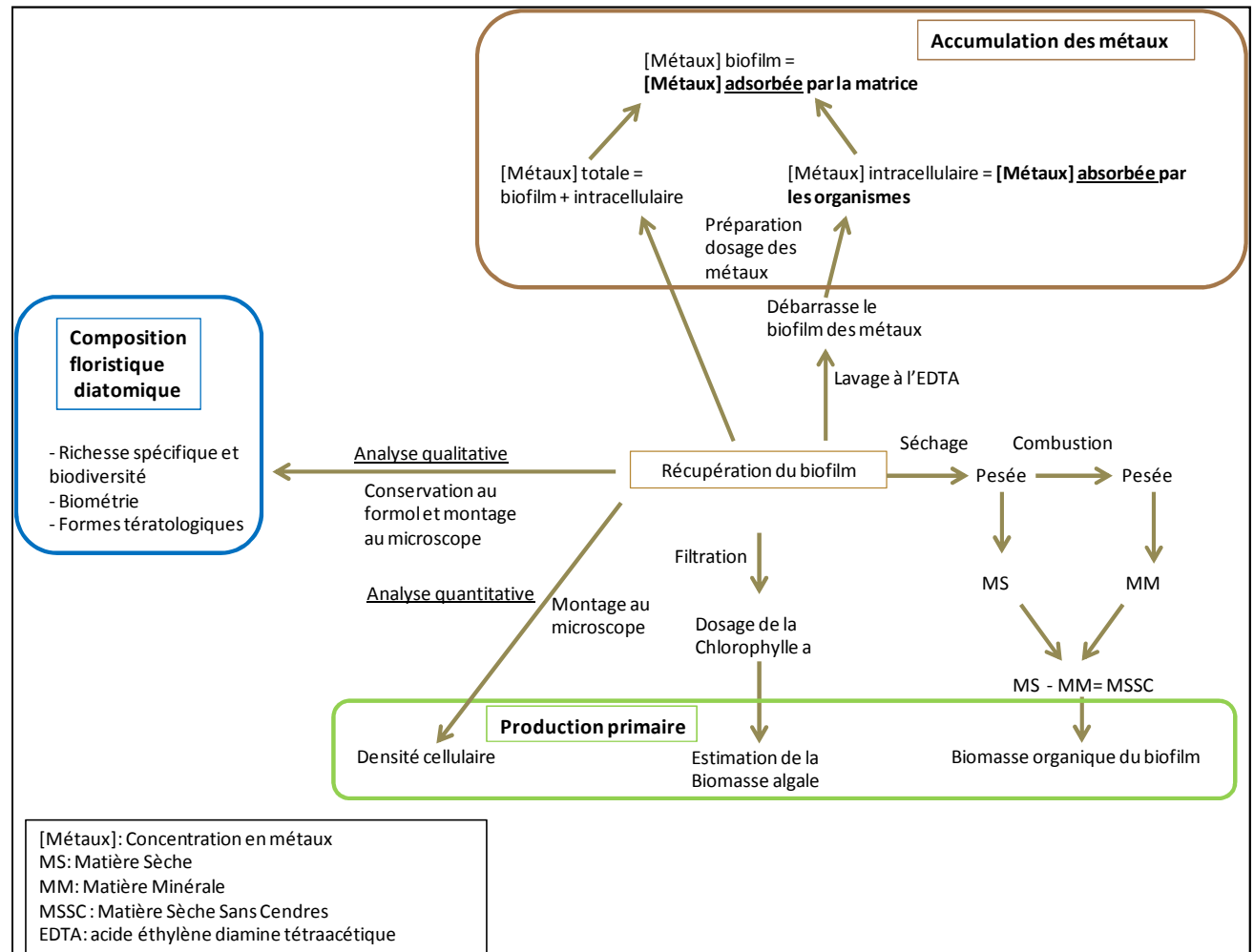


Figure 13, permettant de discriminer la fraction minérale et organique du biofilm. La première étape de séchage déshydrate le biofilm, laissant alors les minéraux et la matière organique desséchée. La phase de combustion volatilise la matière organique laissant seulement la fraction minérale. La différence de masse à la fin des deux phases représente la masse organique.

### 4.2.3.3 Estimation de la densité cellulaire des diatomées

Il s'agit de déterminer le nombre de diatomées par cm<sup>2</sup>, présentes sur le substrat artificiel.

Le volume prélevé est mesuré puis on cherche à rapporter la densité de diatomées présentes dans le volume de cet extrait à la densité présente sur la surface du support.

Ainsi, l'estimation de la densité cellulaire (cellules/cm<sup>2</sup>) de chaque échantillon sur la plaque de verre (surface de prélèvement) a été effectuée à partir de lames montées avec un volume connu de l'échantillon initial et en déposant un volume fixe sur lamelle selon le protocole suivant :

Un volume de 2 ml est prélevé dans les 8 ml de l'échantillon initial homogénéisé et déposé dans un tube à essai. Le volume du tube est ensuite ramené à 10 ml par dilution à l'eau déminéralisée. Une aliquote de 0,25 ml de ce mélange dilué est ensuite déposée sur une lamelle qui après évaporation est montée sur lame. Si la lamelle présente suffisamment de diatomées (même critère que pour la norme AFNOR (T90-354 Déc. 2007)), le comptage est effectué. Dans le cas contraire, une dilution ou une concentration (respectivement, pour une concentration trop ou pas suffisamment importante) est effectuée à partir du mélange initial dilué dans 10 ml d'eau déminéralisée, puis la manipulation est répétée.

L'estimation de la densité cellulaire est ensuite réalisée, au microscope photonique au grossissement x1000, en comptant 2000 valves de diatomées à l'aide de deux compteurs manuels afin d'obtenir, d'une part, les 2000 valves et, d'autre part, de déterminer le nombre de champs d'observation comptés, pour atteindre ces 2000 valves. Le nombre de frustules sur la lamelle est ensuite calculé à partir de ces données en ramenant le nombre de valves de diatomées par champs à la surface d'un champ et à la surface de la lamelle selon la formule suivante :

$$\text{Nbre de frustules sur lamelle} = \frac{\text{Nbre de frustules comptés en N champs} \times \text{Surface lamelle}}{\text{Surface comptage}}$$

$$\text{Surface lamelle} = 2,54 \text{ cm}^2$$

$$\text{Surface comptage} = \text{Surface 1 champ} \times \text{Nbre N de champs comptés}$$

$$\text{Surface 1 champ: pour objectif x220} = 0,0003801 \text{ cm}^2$$

Le nombre de frustules (=de cellules) dans l'échantillon initial est ensuite calculé à partir du nombre de frustules sur la lamelle et la dilution appliquée au volume d'échantillon utilisé pour préparer la lamelle.

$$\text{Nbre frustules dans l'éch. dilué} = \frac{\text{Nbre frustules sur lamelle} \times \text{Volume tube après dilution}}{\text{Volume déposé sur lamelle}}$$

$$\text{Nbre de frustules dans l'éch. Initial} = \frac{\text{Nbre frustules dans l'éch. Dilué} \times \text{Volume éch. initial}}{\text{Volume déposé dans le tube}}$$

$$\text{Volume déposé sur lamelle} = 0,25\text{mL}$$

On considère ensuite:

Le volume de l'échantillon initial et le volume déposé dans le tube. Le nombre de frustules dans l'échantillon initial est ensuite ramené à la concentration sur la plaque de verre de prélèvement de surface connue.

Ce nombre est ensuite ramené à la concentration sur la plaque de verre de prélèvement de surface connue.

$$\text{Concentration sur plaque de verre} = \frac{\text{Nbre frustules dans éch. initial}}{\text{Surface plaque de verre}}$$

$$\text{Surface plaque de verre} = 2080 \text{ cm}^2.$$

#### 4.2.3.4 Composition floristique diatomique

Les inventaires sont effectués selon la méthode décrite dans le paragraphe 4.1.3.2 Identification des diatomées.

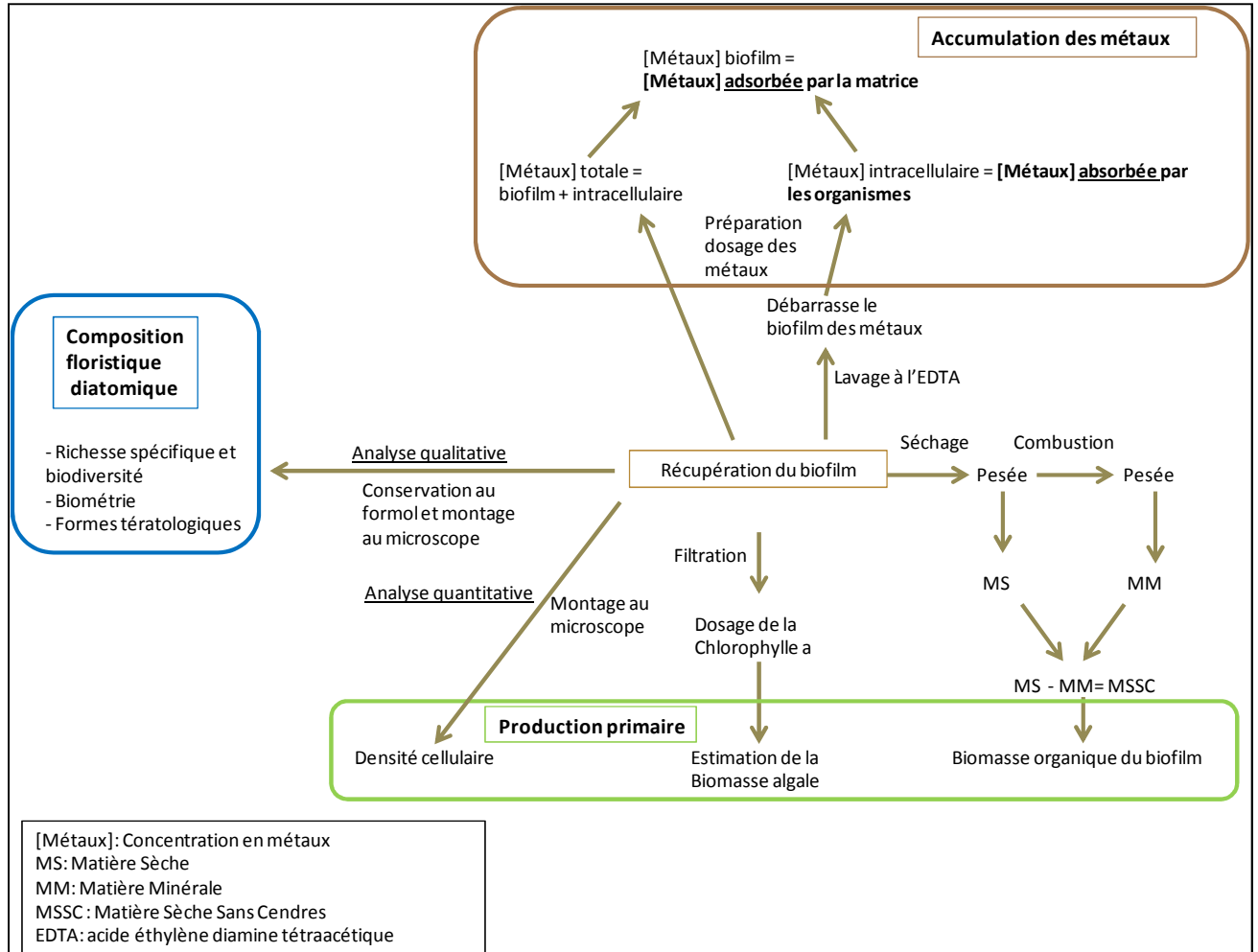


Figure 13: Protocole simplifié de la détection de l'impact des métaux sur le biofilm.

## 5 Résultats

Ce sont 64 stations sur lesquelles des échantillons de diatomées ont été prélevés lors de la première campagne de terrain qui s'est déroulée de la mi-octobre à la mi-décembre 2012. 23 stations sont considérées comme des références, 19 stations sont considérées sous l'influence d'un impact anthropique d'origine domestique et/ou agricole et 18 stations sous l'impact de la mine. Quatre stations se sont révélées soumises au régime des marées.

Le bilan du nombre des stations par HER est de:

- 10 stations pour l'HER D,
- 31 stations pour l'HER B,



- 4 stations pour l'HER C,
- 3 stations pour l'HER F,
- 10 stations pour HER G,
- 6 stations pour l'HER E.

Cette disparité apparente est le reflet de l'accessibilité aux stations, de la différence de densité de peuplement entre HER permettant de révéler un impact anthropique, de l'actuel réseau de surveillance de la DAVAR concentré sur l'HER B.

Les renseignements concernant chaque station sont consignés sur les fiches disponibles en Annexe IV.

L'accès au cours d'eau implique parfois de se rendre en tribu ou chez des particuliers. L'accueil réservé a toujours été bienveillant et le passage autorisé. La population locale est d'ailleurs assez renseignée sur l'écologie environnante et peut être une source d'information complémentaire.

## 5.1 Paramètres physico-chimiques

### 5.1.1 Résultats des mesures *in situ*

L'ensemble des résultats des mesures physico-chimiques relevées sur le terrain lors de la première campagne est présenté par la Figure 14, la Figure 15 et la Figure 16.

La précision des mesures est de:  $\pm 0,2$  °C pour la température,  $\pm 0,1$  % pour la saturation en O<sub>2</sub> dissous,  $\pm 0,2$  pour le pH,  $\pm 1$   $\mu$ S/cm pour la conductivité.

Le code couleur représente la classe de qualité pressentie;

- vert: référence,
- jaune: altération domestique et/ou agricole,
- orange: activité minière,
- bleu: influence haline avérée.

Les moyennes générales citées et les maxima et minima ne prennent pas en compte les stations sous influence haline avérée car les inventaires floristiques de ces stations ne rentreront pas dans la construction de l'indice diatomique.

Le détail des mesures collectées *in situ* est présenté sous forme de tableau en Annexe VII.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

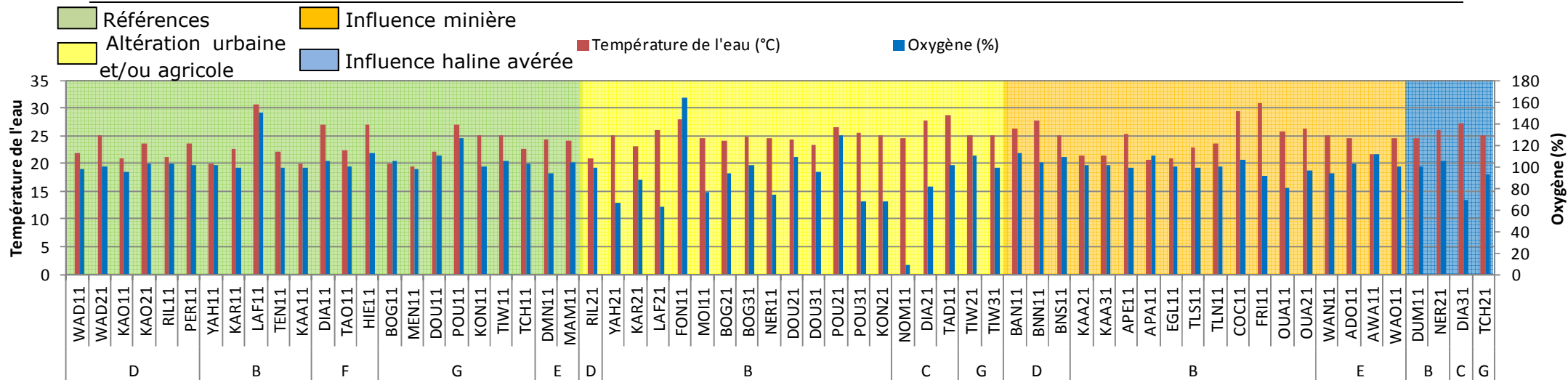


Figure 14: Température (°C) et pourcentage de saturation en O<sub>2</sub> dissous des différentes stations échantillonnées.

La moyenne des températures est de 24,4°C. Le minimum est relevé pour MEN11 avec 19,5°C, station en forêt humide et ombragée, et un maximum de 30,9°C pour FRI11, station prélevée vers 15h, en milieu ouvert, présentant une séquence lenticule à l'amont.

La teneur en pourcentage d'oxygène est la plus basse en moyenne pour les stations où une altération domestique et/ou agricole a été visée (88,1% en moyenne). Pour comparaison, les stations de référence et sous influence minière présentent une saturation en oxygène respectivement de l'ordre de 104,7% et 101%. Ce déficit peut traduire un déséquilibre dû à la décomposition de la matière organique en quantité excessive et à la consommation d'oxygène qui y est liée.

La plus faible valeur de 9,1 % est observée pour NOM11 où un biofilm bactérien est apparent sur la station et la vitesse du courant est faible : le milieu est proche de l'anaérobiose.

Les 4 valeurs les plus élevées sont enregistrées sur les stations de références LAF11 (150,0 %) et POU11 (125,9 %) ainsi que sur les stations subissant une altération non minière FON11 (164,0 %) et POU21 (129,1 %). Cette sursaturation peut être due à une activité photosynthétique intense due à une eutrophisation du milieu en raison d'apports excessifs en nutriments. D'ailleurs de la végétation aquatique (comme des algues) a été repérée.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

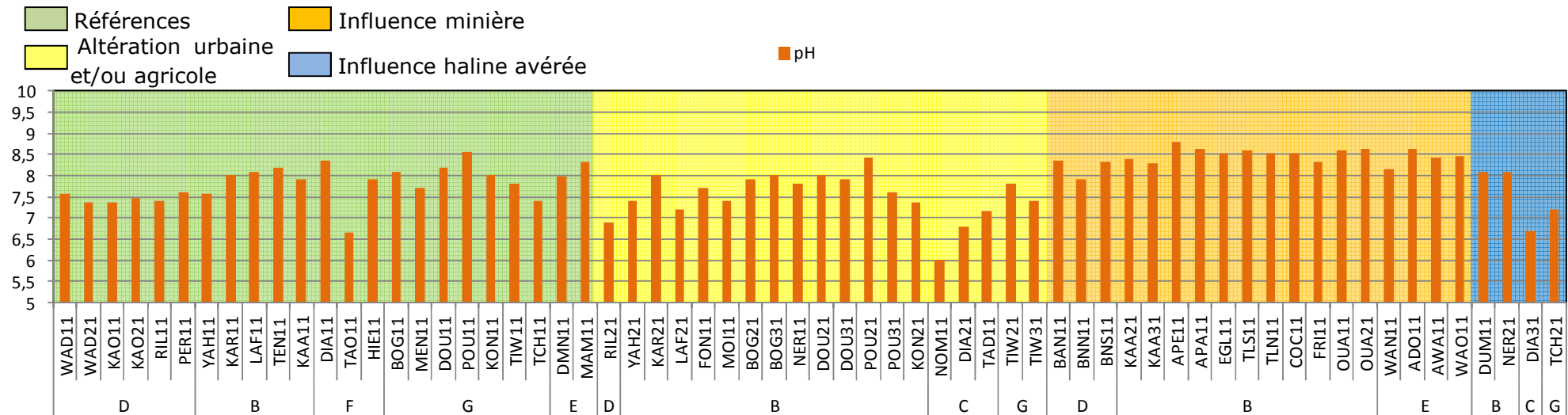


Figure 15: Valeurs de pH des eaux des différentes stations échantillonnées.

Les moyennes de pH entre les groupes de station, références (7,8), altérées (7,5) et sous influence minière (8,4), font apparaître le caractère basique des eaux circulant sur substrat ultramafique. A la station POU11, le pH relativement élevé de 8,6 peut être dû aux apports exogènes de ses affluents en provenance du massif de Kopeto, situé sur un klippe de péridotite.

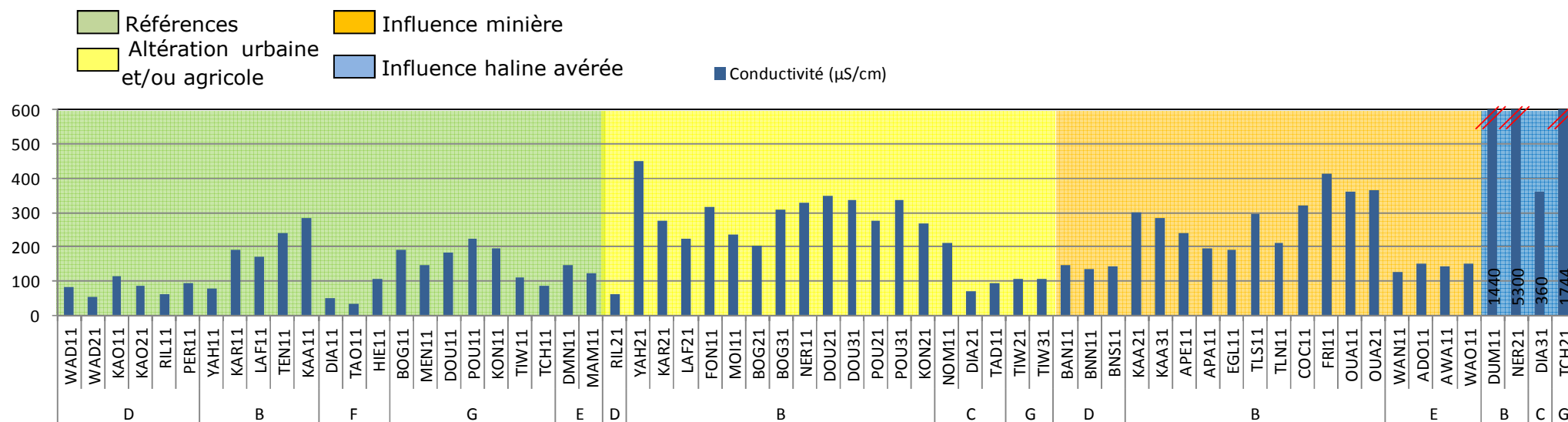


Figure 16: Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ ) des eaux des différentes stations échantillonnées.

Les moyennes entre les 3 groupes de stations (hors influence haline) sont de 132  $\mu\text{S/cm}$  (références), 240  $\mu\text{S/cm}$  (influence urbaine et/ou agricole) et 232  $\mu\text{S/cm}$  (mines). La conductivité de 360  $\mu\text{S/cm}$  mesurée à la station DIA31, révèle que même des stations sous influence haline peuvent avoir en marée basse, des conductivités comparables aux eaux douces au moment du prélèvement.

Les stations de références situées en tête de bassin, où les cours d'eau n'ont pas le temps de se minéraliser, présentent des conductivités plus faibles en moyenne que les stations altérées situées en aval. Les caractéristiques lithologiques influencent la teneur en sels dissous du cours d'eau. Ainsi, les différences de conductivité observées entre HER, indépendamment de la

classe de qualité envisagée, sont dues à la nature des roches traversées. Le maximum de 450  $\mu\text{S/cm}$  est relevé, à la station YAH21 sur le site à l'aval d'une station d'épuration de Nouméa, au lieu-dit du Pont des français, alors que la station de référence amont YAH11 enregistre une conductivité de 76  $\mu\text{S/cm}$ . Les rejets issus de la STEP sont ici responsables de cette augmentation de la conductivité. Bien que cette station ait été suspectée d'être sous influence haline, les données DAVAR permettent d'observer que la station connaît régulièrement une conductivité élevée sans toutefois atteindre un seuil de salinité correspondant à de l'eau saumâtre, valeurs s'échelonnant de 303 à 740  $\mu\text{S/cm}$  sur 6 mesures (Annexe II).

## 5.1.2 Analyse des données physico-chimiques

Les analyses des conditions abiotiques couvertes par le réseau de sites d'étude ont été réalisées à l'aide des données obtenues sur 42 sites (Annexe VIII) sur l'ensemble des 64 stations échantillonnées. Ces sites sont ceux pour lesquels les données sont les plus complètes pour les paramètres pris en compte. Ce sont donc les 35 stations échantillonnées lors de cette campagne de terrain, en Annexe III, et 7 stations provenant des données DAVAR (NER11, NER21, POU11, BOG31), VALE-NC (WAD21, BAN11, PER11). L'ensemble des sites seront pris en compte après un travail de reconstitution des données.

L'Analyse en Correspondances Principales (ACP), méthode exploratoire multivariée, constitue un outil intéressant pour la visualisation de la structure des données et des gradients. Il permet de vérifier le poids exercé par chaque paramètre dans l'inertie totale de l'analyse, d'examiner l'évolution des paramètres physico-chimiques entre eux et ainsi de dégager des groupes de stations représentatifs de conditions abiotiques particulières, qu'elles soient naturelles ou d'origine anthropique (sites oligotrophes amont, sites altérés, sites aval subissant une influence haline littorale, sites de cours d'eau ultramaïques, etc...). On peut ainsi faire ressortir l'influence plus précise de certains paramètres structurants.

Les données incomplètes sur la chimie du réseau n'ont pas permis de prendre en compte certaines variables à cette étape : DBO5, DCO, azote total, azote Kjeldahl, phosphates et hydrogénocarbonates. Il s'agit de descripteurs essentiellement liés à l'anthropisation, mais plutôt liés aux pollutions domestiques ou périurbaines, aux pollutions agricoles par les fertilisants, qui ne constituaient pas le centre d'intérêt principal de réseaux préexistants de surveillance liés à l'exploitation minière. La reconstitution des données incomplètes, ou le post-traitement de données à valeurs non numériques, seront réalisés par la suite sur des jeux de données plus complets. Les premières tendances dégagées à ce stade, présentées à titre d'illustration d'étape sur le travail en cours, seront confortées avec l'assise de l'étude complète.

Jusqu'ici, le classement envisagé des stations entre références et altérées n'a pas été modifié d'après l'analyse des données physico-chimiques, bien qu'une station de référence, LAF11, semble subir des perturbations en amont.

La Figure 17 présente les vecteurs en composantes principales des variables et la projection des sites sur les 4 premiers axes de l'analyse, qui portent une part dominante de l'information structurante contenue dans le jeu de données. Les axes 1 et 2 expliquent 40% de la répartition des paramètres entre eux et les axes 3 et 4 expliquent 23,4% de cette répartition. Ces 4 axes expliquent près de 65% de l'information structurante contenue dans l'analyse. Le croisement des axes 1 et 2, porteurs de plus d'information quant aux relations qu'entretiennent les paramètres entre eux, est donc principalement mobilisé pour exploiter l'analyse.

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

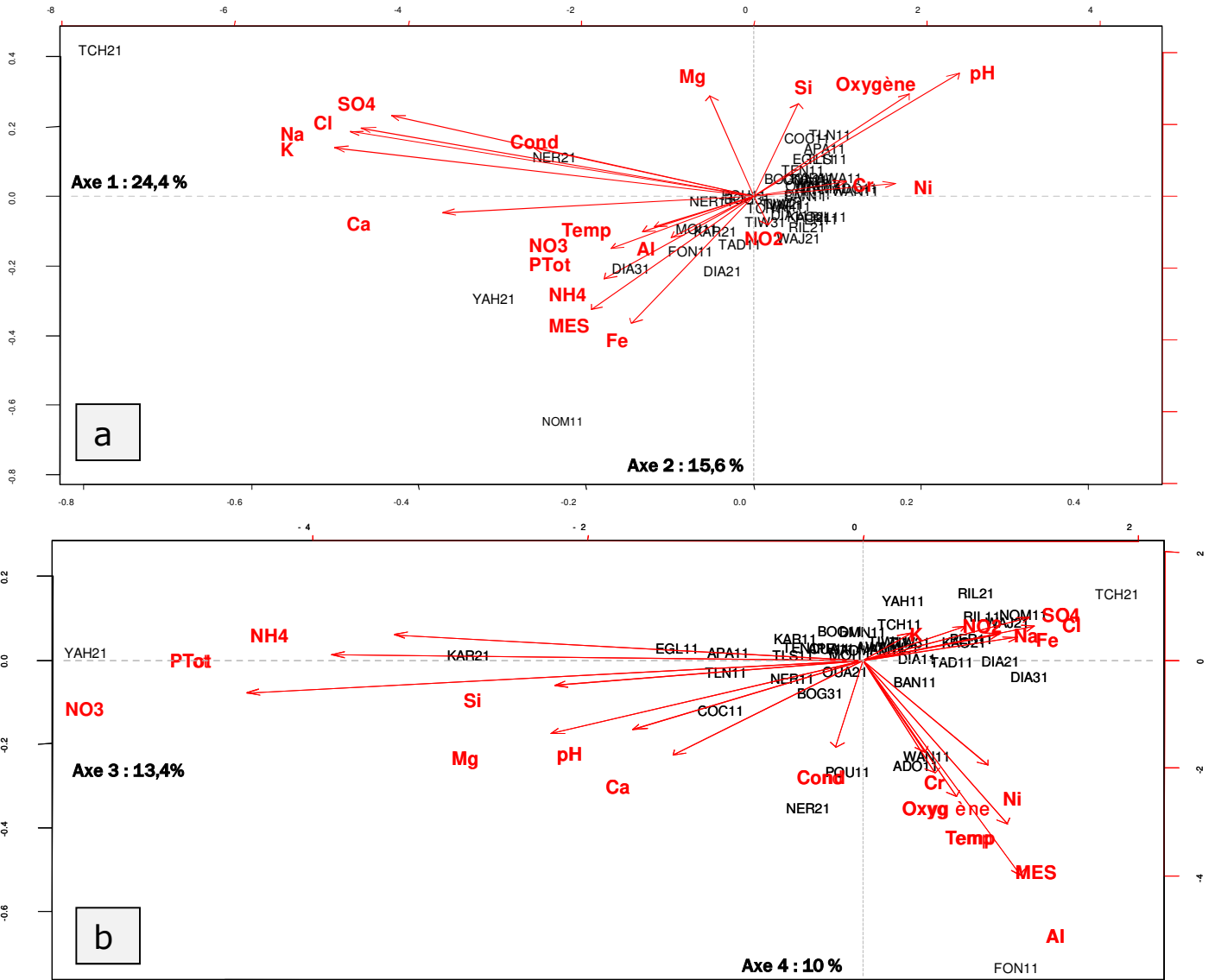


Figure 17: a) Croisement des axes 1 et 2 de l'ACP. b) Croisement des axes 3 et 4 de l'ACP.

La figure 18 illustre les principales informations structurantes contenues dans le croisement des Axes 1 et 2 Figure 17 a) :

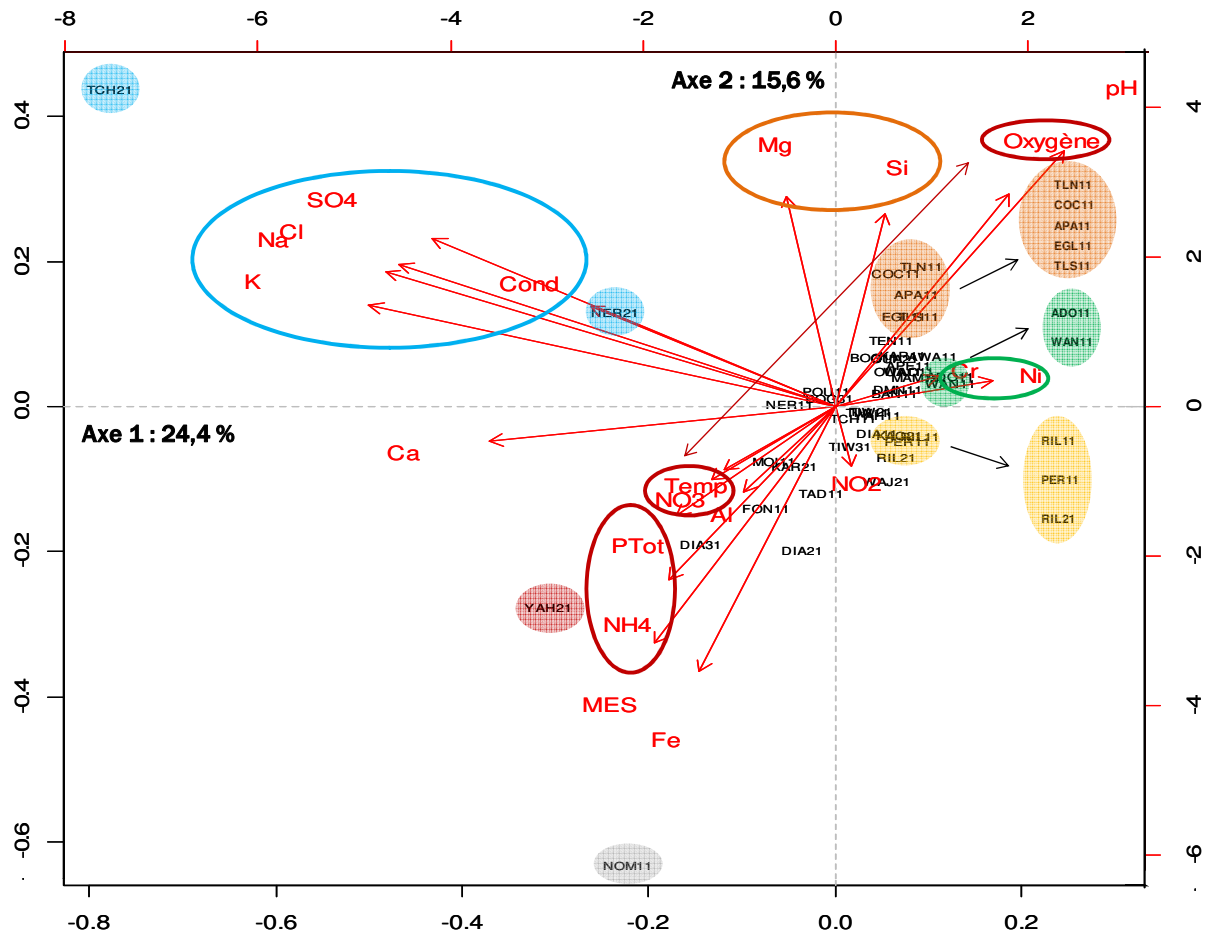


Figure 18: ACP de la projection des sites dans l'espace des données abiotiques sur les 2 premiers axes et mise en valeur de paramètres.

On peut distinguer au moins 3 groupes de paramètres évoluant ensemble;

Cercle bleu : sulfate, chlorure, sodium, potassium et avec une inertie moins importante, la conductivité, sont les variables de l'influence haline littorale. Elles mettent en évidence deux stations nettement sous influence haline, TCH21 et NER21. Lors d'analyses ultérieures, ces stations pourront être éliminées afin d'éviter cet effet de déséquilibre lié à des valeurs extrêmes, masquant des nuances plus fines de gradients pour ces mêmes paramètres. D'ailleurs, ces stations qui ont été prospectées en première campagne pour mesurer l'influence littorale et reconnaître les flores typiques de cette influence, ne seront pas échantillonnées lors des campagnes suivantes.

Cercle vert : les éléments métalliques nickel et chrome se rencontrent ensemble dans les eaux car ils sont issus des mêmes substrats géologiques, très concentrés dans les saprolites. Ils s'opposent logiquement à la teneur en calcium dont ces terrains sont très peu pourvus. Cette influence est captée, mais assez modestement, par ce premier croisement d'axes (inertie modérée des vecteurs de composantes

principales correspondants). Les sites qui ressortent sur ce premier croisement d'axes, ADO11 et WAN11, sont des sites en aval de mines dont l'exploitation des sols nickélicifères et chromifères est intense. Une telle exploitation induit le démantèlement des horizons supérieurs exposant au lessivage le contenu concentré d'horizons habituellement à l'abri. L'influence du Ni et du Cr est par contre une information très structurante du 2<sup>ème</sup> croisement d'axes (Axes 3 X 4), où ces vecteurs de composantes principales, en concordance avec une très forte influence des MES et de l'augmentation de la température, orientés vers le quart en bas à droite de la Figure 18 b), signent une érosion chargée en particules porteuses de ces métaux lourds. Cette inertie semble donc signer le décapage des horizons supérieurs des sols miniers, dont les éléments mis à nus sont lessivés et charriés dans les cours d'eau.

Cercle rouge : l'ammonium, les nitrates et le phosphore total sont des marqueurs de l'activité anthropique. Ils sont concentrés à l'aval des bassins versants, avec une bonne illustration apportée par la station YAH21 située en aval de station d'épuration. Ces paramètres traduisent un enrichissement trophique du milieu alors appauvri en O<sub>2</sub> dissous.

A l'opposé, on trouve des sites oligotrophes bien oxygénés de zone de piedmont de massifs ultramafiques, en orangé, les stations COC11, TLN11 et TLS11 à l'aval du Koniambo et les stations APA11 et EGL11 sur le Kopeto. Ces sites accumulent les produits du lessivage des sols, magnésium et silice, qui sont parmi les premiers éléments à migrer.

On remarque que 3 stations se distinguent (jaune) ; il s'agit des sites de la zone humide des Plaines du sud, RIL11 et RIL21, correspondant respectivement à l'amont et l'aval de la Rivière des lacs, ainsi que PER11, correspondant à l'aval du creek Pernod. Ces stations ultraoligotrophes se caractérisent par leur pauvreté en nutriments et en minéraux.



## 5.2 Résultats des inventaires floristiques

### 5.2.1 Etat d'avancement

A ce jour, 32 prélèvements de diatomées (correspondant à 32 stations) ont fait l'objet d'inventaires. L'effort d'inventaire initial a été concentré sur les sites des bassins versants s suivi par le réseau ORE DAVAR, dont la physico-chimie est normalement la mieux établie et qui connaissent un développement urbain et agricole relativement important. Un effort particulier a aussi été porté sur les sites des plaines du sud connaissant eux aussi un suivi physico-chimique par le minier Vale-NC, par l'intérêt privilégié que l'OEIL porte pour cette région et par l'existence d'inventaires antérieurs effectués pour une précédente étude (Hytec, 2012). L'ensemble des inventaires taxinomiques décrits dans ce rapport sont présentés en abondance relative ‰, en Annexe IX.

### 5.2.2 Généralités sur les espèces rencontrées

Pour des aspects pratiques, le nom des diatomées est réduit à un code de 4 lettres. La première lettre représente la première lettre du nom de genre, les 3 suivantes désignent l'espèce et/ou la sous-espèce et/ou la variété.

La Figure 19 représente l'abondance des taxons rencontrés par inventaire et le nombre d'inventaires dans lesquels ils ont été rencontrés.

L'ellipse violette souligne la présence de taxons très abondants mais décrits sur peu de sites. Cela traduit une écologie spécialisée chez ces espèces telles que *Achnantheidium catenatum* (ADCT) décrite comme une espèce de milieu lentique et relativement calcaire et que l'on retrouve sur les stations de La Foa (LAF11 et LAF21) et de Fonwhary (FON11), ou encore *Delicata delicatula* (DDEL), qui caractérise des milieux oligotrophes et que l'on rencontre abondamment dans les creeks sur substrat ultramafique, tels que la Baie Nord bras Sud (station BNS11) et la rivière des Kaoris (station KAO21) ou sous influence ultramafique, comme l'amont de la Karikouïé (station KAR11) et la Taléa (station TLN11). A l'inverse, l'ellipse bleue souligne des taxons très abondants et présents sur de nombreux sites. Ces taxons ont donc une écologie assez large, ils se rencontrent pour la plupart dans le reste du monde. Par exemple, *Nitzschia inconspicua* (NINC) et *Nitzschia palea* var. *palea* (NPAL) sont typiques de milieux dégradés dans le monde entier. On les trouve ici en forte proportion sur les stations de la Karikouïé à l'aval de Païta (KAR21) et sur la Douencheur, à l'amont de Bourail (station DOU21). L'espèce *Adlafia muscora* (AMUS) est une espèce tropicale souvent rencontrée dans les milieux tropicaux (Réunion, Antilles), que l'on retrouve ici fréquemment sur la Baie Nord ; sur son bras Nord (station BNN11) et à l'aval de la confluence (station BAN11). Le taxon *Cocconeis euglypta* (CEUG) est très souvent majoritaire dans les inventaires réalisés sur végétaux et sur substrat recouvert d'algues en cours d'eau modestement minéralisés ; on le rencontre dans nos relevés dans les stations MOI11 et POU31, respectivement

sur la Moindou et la Pouembout, où le prélèvement a eu lieu sur macrophytes. Sur si peu de relevés dépouillés, il est difficile d'appréhender la spécificité écologique locale de certains taxons à faible occurrence mais on peut déjà penser qu'ils soulignent des caractéristiques bien spécifiques du milieu tels que les substrats ultramafiques comme par exemple *Denticula elegans* (DELE) et *Delicata delicatula* (DDEL), retrouvés uniquement sur de tels substrats. Ces derniers se rencontrent majoritairement sur la Karikoulié station amont (KAR11) ainsi que sur la rivière des Kaoris.

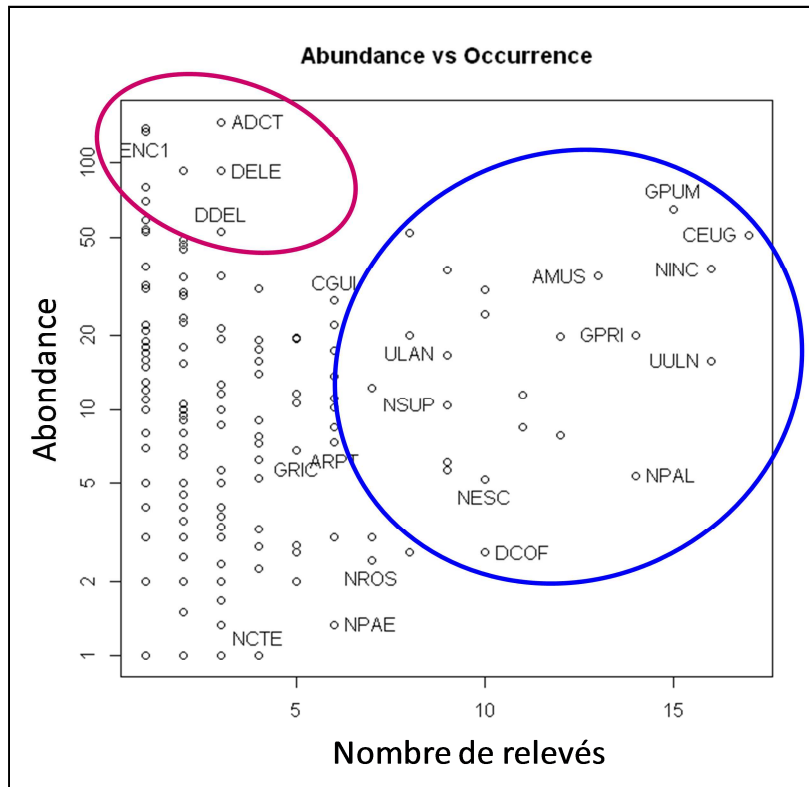


Figure 19: Abondance spécifique et occurrence au sein des inventaires illustrant la présence d'espèces ubiquistes (ellipse bleu) et d'espèces plus spécialisées (ellipse violette).

## Richesse taxinomique

La diversité d'une biocénose peut s'exprimer simplement par le nombre d'espèces présentes. La Figure 20 illustre la richesse taxinomique rencontrée dans 25 inventaires effectués lors de sa création.

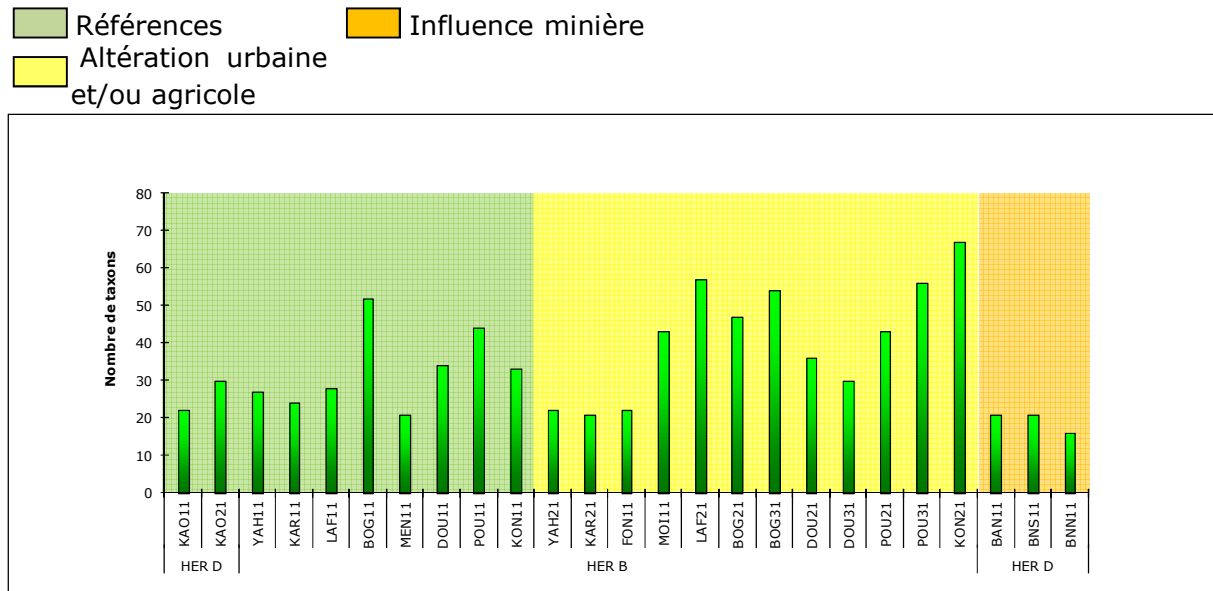


Figure 20: Richesse spécifique et types d'altérations envisagées.

Le plus grand nombre de taxons se rencontre plus fréquemment sur les stations altérées sous influence urbaine et/ou agricole. A titre d'exemple, la station KON21, située à l'aval de la Koné connaît la plus grande richesse spécifique avec 67 taxons, suivie par LAF21 (57 taxons), POU31 (56 taxons) et BOG31 (54 taxons), situées respectivement à l'aval de La Foa, de la Pouembout et de la Boghen.

Les trois stations sous l'influence d'un site industriel et d'une base vie, sur la Baie Nord, font partie des sites les moins riches: BNS11 (21 taxons) sur le bras sud, BNN11 (16 taxons) sur le bras nord et la station BAN11 (21 taxons), à l'aval de la confluence de ses 2 bras. Les autres stations les moins riches avec moins de 23 taxons sont les stations sur sites apparemment très dégradés par de l'activité urbaine et/ou agricole, KAR21, YAH21 et FON11, ainsi que deux stations sur sites de référence MEN11 et KAO11.

Une hypothèse envisageable de la tendance à retrouver plus d'espèces sur des sites moyennement altérés peut venir de l'accumulation de flores le long du continuum du cours d'eau pour ces stations situées en aval des bassins versants, de l'influence marine qu'elles peuvent subir et/ou du développement d'espèces plus résistantes alors que les plus sensibles de l'amont n'ont pas totalement disparues. En effet, les taxons influencés par l'altération se rajoutent à la diversité naturelle du cours d'eau, qui se maintient du fait d'un flux permanent de recolonisation depuis la zone amont. Les sites avec peu d'espèces peuvent en revanche être le signe d'une dégradation forte conduisant à la disparition totale des espèces les plus sensibles ou d'un milieu très oligotrophe. Dans ce dernier

cas, c'est la rareté des éléments nutritifs qui conduit à sélectionner les espèces les plus adaptées. La pauvreté de la flore sur substrat ultramafique de l'HER D, KAO11 et les stations sur la Baie Nord, peut être lié à l'endémisme fort présent sur ces substrats, abritant une microflore particulière, peu diversifiée et souvent oligotrophe. De la même manière, sur la station de référence MEN11, en tête de bassin de la Douencheur, s'est développée une microflore originale rare, comme par exemple une espèce de *Cocconeis*, notée jusqu'ici *Cocconeis sp.1*, car non encore décrite à ce jour, qui pourra faire objet d'une diagnose à l'aide du microscope électronique.

### **5.2.3 Variations naturelles et gradients amont-aval floristiques**

En vue d'une meilleure lisibilité, les graphiques suivants représentent les taxons principaux par station, c'est-à-dire, ceux dont l'abondance relative est supérieure ou égale à 5% dans les inventaires. L'ensemble des taxons minoritaires est regroupé dans la part "autres". En effet un code couleur ne serait pas appréciable pour décrire l'ensemble des taxons présents (environ 300) sur l'ensemble des inventaires. Le code couleur est conservé entre les taxons de chaque station. Le nom de station utilisé dans cette étude est accompagné par le nom de la station correspondante sur le réseau de suivi préexistant, station DAVAR, KNS ou Vale-NC.

L'analyse de ces inventaires se base sur les écologies connues des espèces ubiquistes de la littérature, et est donc sujette à caution dans le contexte calédonien. Néanmoins, la tendance de la plupart des taxons inféodés au contexte ultramafique du territoire est relativement bien décrite dans la littérature grâce aux campagnes effectuées précédemment (Moser et *al.*, 1999).

### 5.2.3.1 Bassin versant de la Yahoué

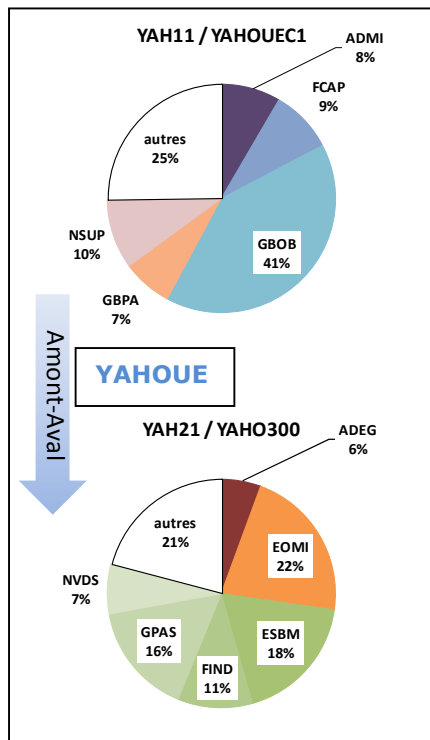


Figure 21: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Yahoué. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupés dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

Le peuplement amont présente des espèces caractéristiques de la zone tropicale telles que *Gomphonema brasiliense ssp.pacificum* (GBPA), laquelle est décrite comme vivant hors des substrats ultramafiques et *Gomphonema bourbonense* (GBOB), a été décrite à La Réunion. Les taxons *Fragilaria capucina* var. *capucina* (FCAP) et *Achnanthydium minutissimum* (ADMI) sont considérés comme peu sensibles à la pollution par la matière organique, ces derniers vivants dans des milieux bien oxygénés.

Le peuplement aval est dominé par le cortège *Eolimna minima* (EOMI), *Eolimna subminuscula* (ESBM), *Naviculadicta seminulum* (NVDS) et *Gomphonema parvulum var.parvulum f.saprophilum* (GPAS), typiquement saprophytes (écologie « métropole ») caractéristique des milieux dégradés par des apports en matière organique. L'écologie du taxon *Fallacia indifferens* (FIND) est incertaine bien que le genre soit coutumier des eaux dégradés.

Ces 2 peuplements illustrent l'apparition d'une pollution de nature organique et minérale le long du cours d'eau, très probablement due aux effluents de la STEP du pont des français.

### 5.2.3.2 Bassin versant de la Karikouïé

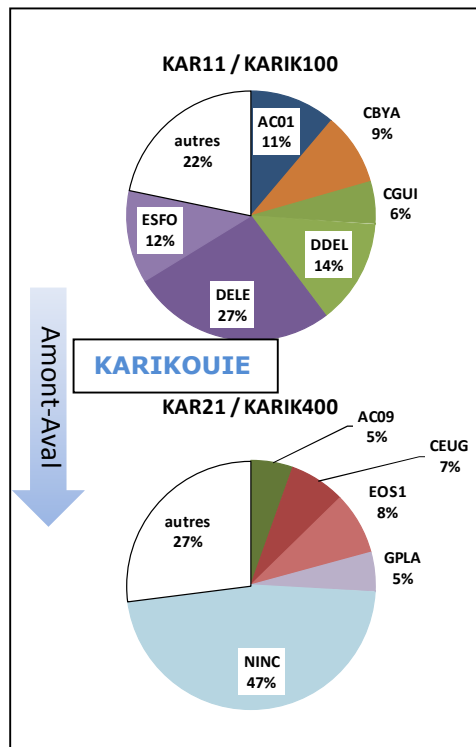


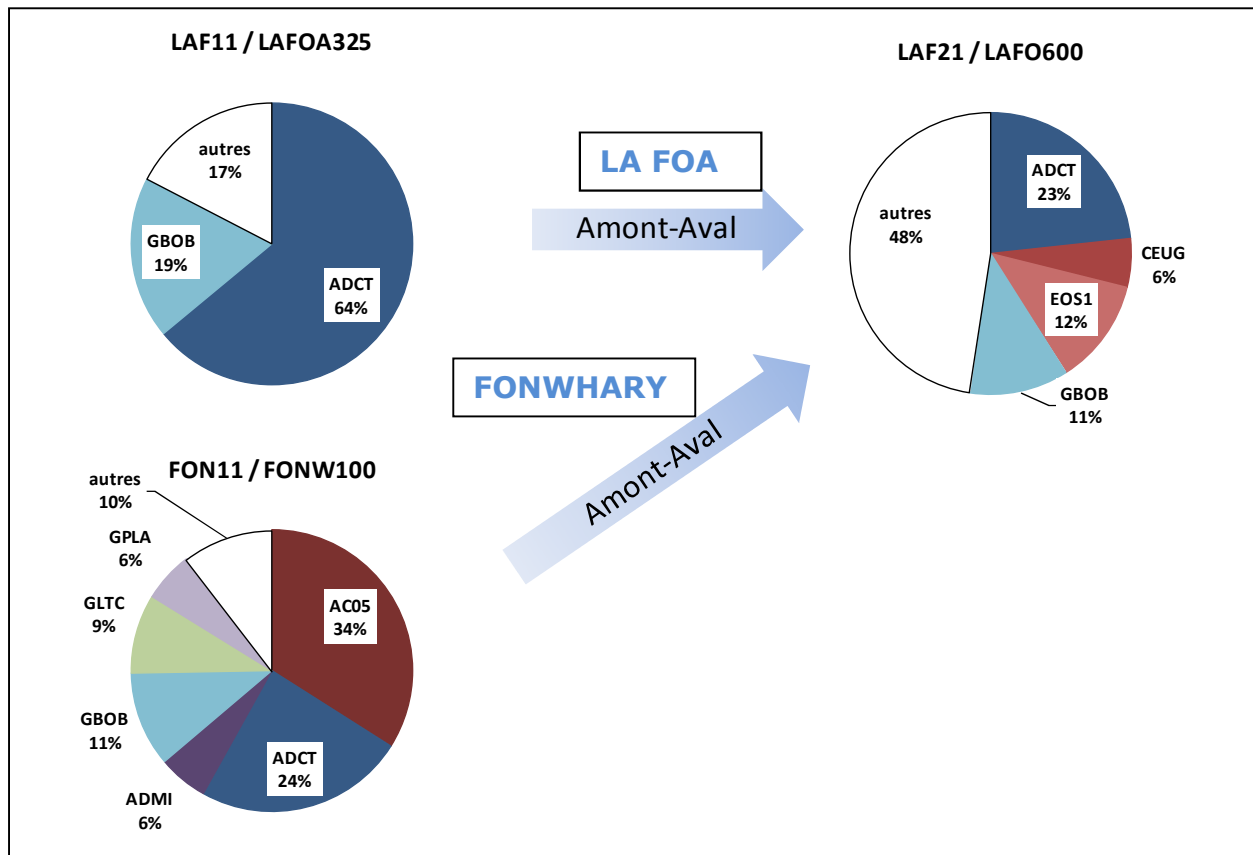
Figure 22: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement (sinon classe "autres") des inventaires taxinomiques le long de la Karikouïé. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

Le peuplement amont présente un cortège d'espèces majoritaires retrouvées sur substrat ultramafique telles que *Cymboppleura yateana* (CBYA) et *Encyonopsis subfonticola* (ESFO), décrites seulement en Nouvelle-Calédonie ou encore *Coxia guillauminii* (CGUI), dont le genre est endémique au territoire. Les taxons *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL) et *Denticula elegans* (DELE), sont plus largement répandus dans le monde mais semblent être ici inféodés aux eaux sous influence ultramafique.

Près de la moitié (47%) du peuplement aval est constitué par *Nitzschia inconspicua* (NINC), espèce eutrophe et ubiquiste dont la détermination reste toutefois à préciser à l'aide du microscope électronique à balayage. La présence de *Cocconeis euglypta* (CEUG), espèce opportuniste de milieux aux conditions hydrochimiques moyennes peut être lié à la présence d'algues sur le substrat. Le taxon *Eolimna* sp.1 (EOS1), est proche morphologiquement de *Eolimna minima* (EOMI) et de *Naviculadicta seminulum* (NVDS), et semble partager une écologie similaire, supportant des eaux polysaprobées et eutrophes, c'est-à-dire enrichies en matière organique et en sels minéraux.

A l'instar du gradient présenté précédemment, on observe une évolution du cortège vers des eaux dégradées correspondant à un enrichissement organique et minéral lié à des effluents urbains.

### 5.2.3.3 Bassins versants de La Foa



**Figure 23: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de La Foa et sur son affluent, la Fonwhary. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupés dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).**

La station LAF11 présente un cortège floristique majoritaire peu diversifié avec le taxon *Achnanthis catenatum* (ADCT) dominant le peuplement, tandis que le cortège à l'aval sur la station LAF21 est constitué par de plus nombreux taxons, en petits effectifs représentant 48% du peuplement. Le peuplement majoritaire de FON11 est constitué de 2 genres uniquement: *Gomphonema* (GPLA, GLTC, GBOB) et *Achnanthis* (ADM1, ADCT, AC05), respectivement 26% et 64%.

Le taxon ADCT est bien représenté sur les 3 stations du bassin versant de La Foa, représentant près d'un quart du peuplement sur les stations LAF21 (23%) et FON11 (24%) et près de deux tiers du peuplement sur la station amont LAF11 (64%). Ce taxon est décrit comme vivant dans des milieux lenticules et des eaux plutôt chargées en calcaire. Ces 3 cortèges partagent aussi le taxon GBOB, présent à plus de 10% sur les 3 stations. La présence de ces taxons en commun caractérise des eaux relativement similaires. Néanmoins, l'apparition d'*Eolimna sp.1* (EOS1) à l'aval (LAF21), parmi les espèces majoritaires pourrait traduire un enrichissement en nutriments. Néanmoins l'écologie d'*Eolimna sp.1* doit être précisée par l'ensemble du jeu de données.



### 5.2.3.4 Bassin versant de la Moindou

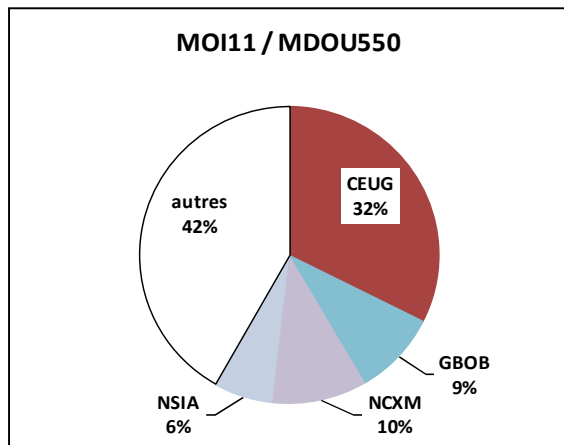


Figure 24: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques sur la Moindou. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

L'inventaire de la station de la Moindou illustre un prélèvement sur épiphytes, avec un cortège dominé par *Cocconeis euglypta* (CEUG) qui représente 32% du peuplement. On retrouve encore le taxon GBOB, qui semble assez ubiquiste. L'écologie du taxon *Navicula cruxmeridionalis* (NCXM) n'est pas renseignée, en revanche, *Navicula simulata* (NSIA) est décrite en métropole comme une espèce tolérant la pollution d'origine organique et minérale.

### 5.2.3.5 Bassin versant de la Nera

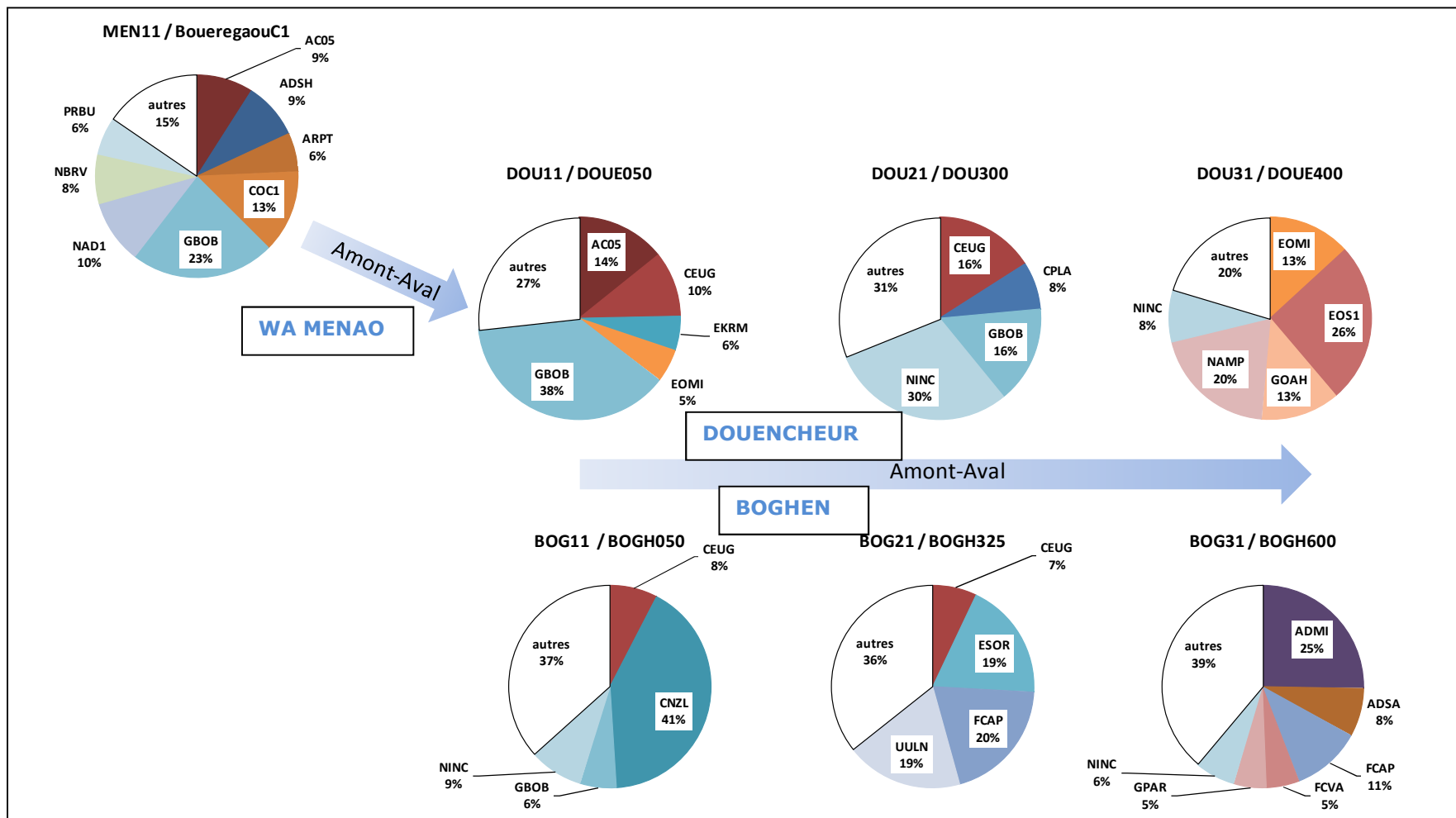


Figure 25: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Douencheur, de son affluent, la Wa Menao et de la Boghen. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupés dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

Les stations amonts, au niveau de l'affluent amont sur le Douencheur (MEN11) et sur la Boghen (BOG11) possèdent des taxons rares que l'on ne retrouve pas en aval, ni dans aucun autre inventaire réalisé à ce jour : il s'agit de *Cocconeis sp.1* (COC1) et *Cymbella novazeelandiana* (CNZL) qui représentent respectivement 13 et 41% du peuplement.

La présence de *Cocconeis euglypta* (CEUG) dans les stations DOU11 et DOU21, sur la Douencheur et BOG11 et BOG21 sur la Boghen, peut marquer la présence d'algues sur le substrat et donc des milieux riches en nutriments (en métropole). On peut le rencontrer même au niveau des stations amont, comme par exemple la station BOG11 dont le cortège compte 9% de *Nitzschia inconspicua* (NINC), espèce décrite comme eutrophe en métropole. Cette indication peut révéler un enrichissement en nutriment au niveau de cette station.

Au niveau de la Douencheur, la station la plus en aval (DOU31) présente un cortège spécifique caractéristique d'un enrichissement en matières organiques et en sels minéraux important avec la coexistence des taxons tels que *Eolimna minima* (EOMI), *Eolimna sp.1*(EOS1), *Nitzschia amphibia* (NAMP) et *Nitzschia inconspicua* (NINC). Cet enrichissement est visible dès la station intermédiaire (DOU21) par la présence de *Nitzschia inconspicua* (NINC) pour 30% du peuplement.

Ces informations seront confirmées s'il s'agit bien des mêmes taxons que ceux trouvés en métropole à l'aide du microscope électronique, et que leur écologie peut être transposée au contexte calédonien, à l'aide du croisement de leur occurrence avec les données physico-chimiques.

Au niveau de la Boghen, où le milieu semble enrichi dès l'amont et le gradient d'altération semble moins marqué le long du cours d'eau, le peuplement de BOG21 compte des taxons assez ubiquistes *Fragilaria capucina var.capucina* (FCAP) et *Ulnaria ulna* (UULN), qui tolèrent des valeurs élevées en matière organique et en sels minéraux d'après la bibliographie (Hofmann et al., 2011). Néanmoins, la présence d'*Achnanthisidium saprophilum* (ADSA) pour 8% du peuplement, à l'aval (BOG31), semble marquer une plus forte dégradation du cours d'eau liée aux effluents urbains et agricoles de cette région.

### 5.2.3.6 Bassin versant de la Talea

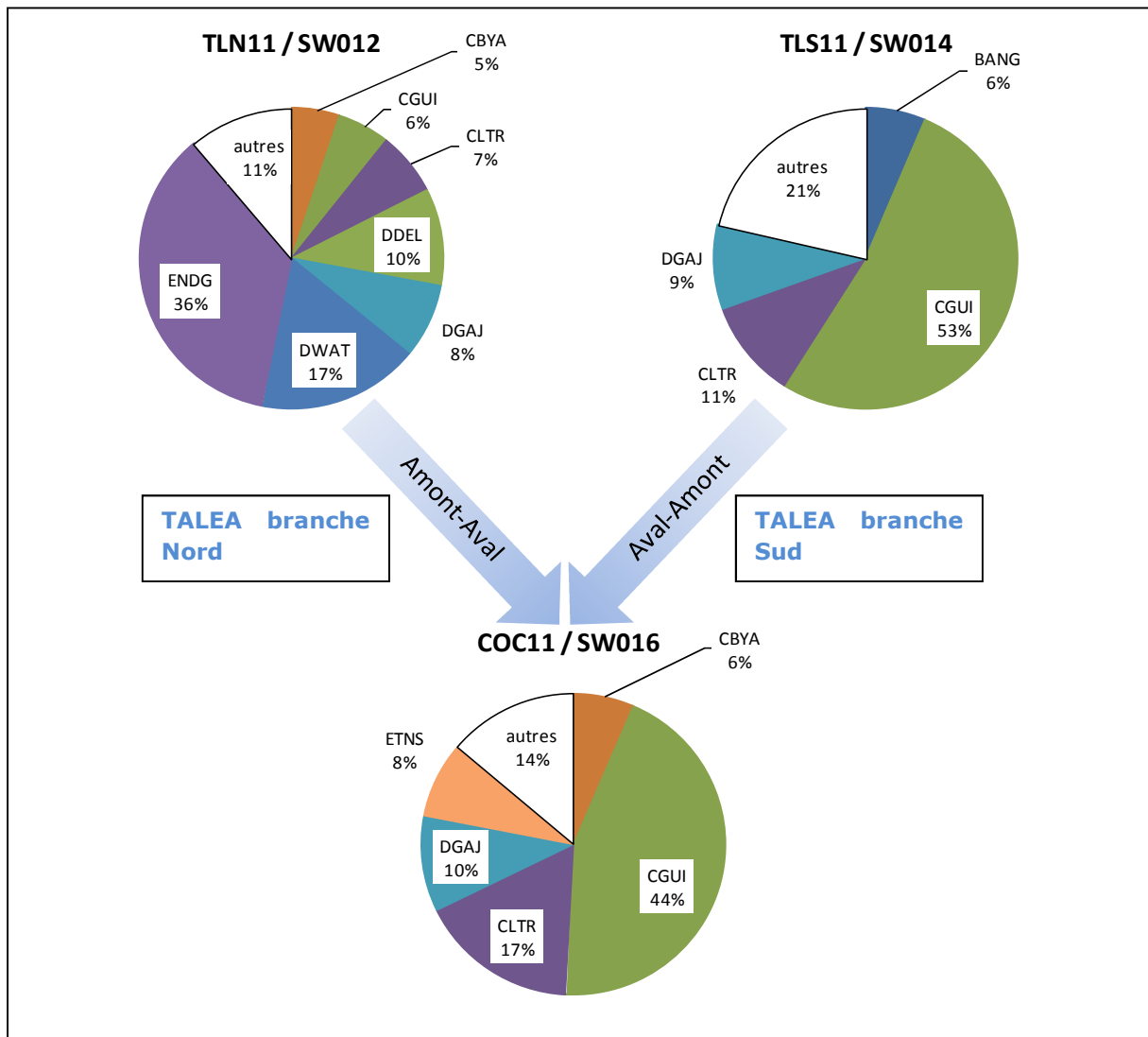


Figure 26: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Taléa, bras Nord et bras Sud et à la confluence, la Coco. Les taxons dont l'abondance relative est  $<5\%$  sont regroupés dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

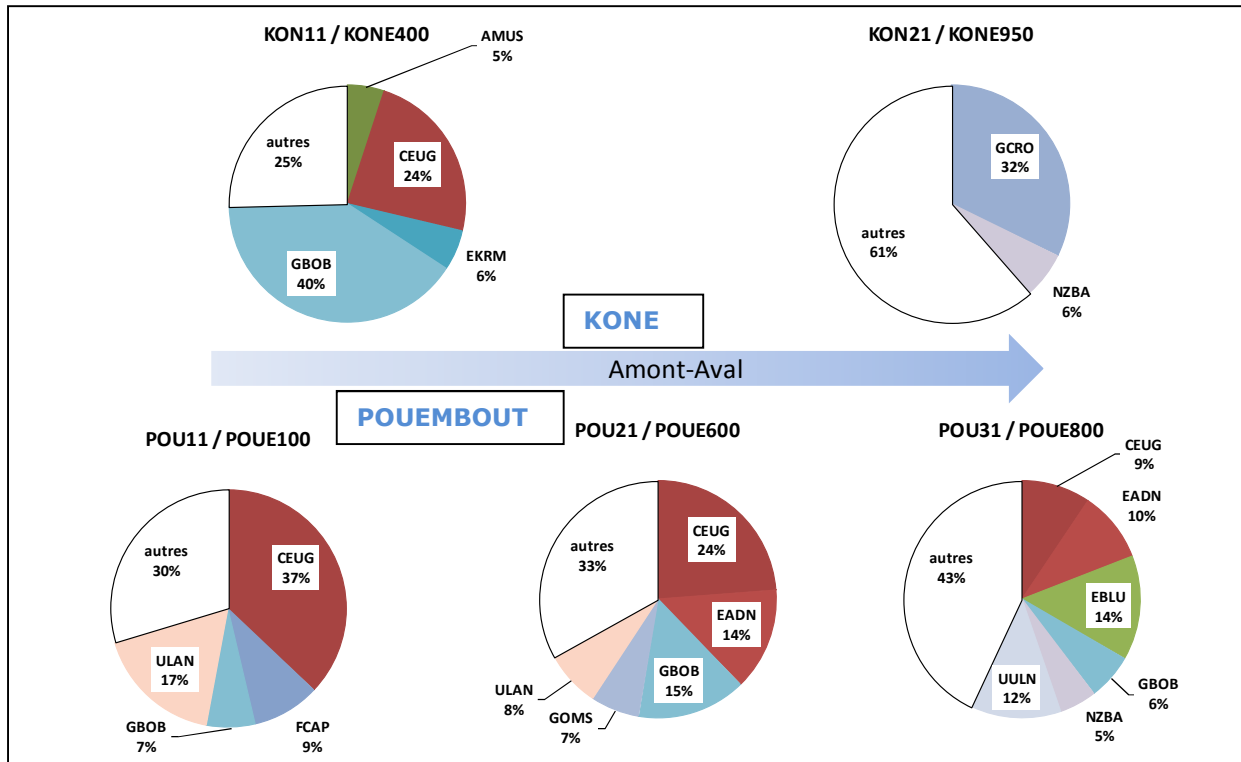
Les peuplements des stations du bassin versant de la Taléa sont typiques des cours d'eau sous influence ultramafique. Les taxons majoritaires sont exclusivement inféodés aux milieux ultramafiques calédoniens. On trouve ainsi *Coxia guillauminii* (CGUI), *Cymbella latarea* (CLTR), *Delicata gadjiana* (DGAI), et *Cymbopleura yateana* (CBYA), communs aux 3 stations.

Plus particulièrement, on trouve *Denticula watanabei* (DWAT) et *Encyonopsis degenerata* (ENDG) sur TLN11, *Brachysira angusta* (BANG) sur TLS11 et *Encyonema tenuissimum* (ETNS) sur COC11. Les stations TLS11 et COC11, sont dominées par *Coxia guillauminii* (CGUI), respectivement 53% et 44%, tandis que la station TLN11 est dominée par *Encyonopsis degenerata* (ENDG) (36%).

Le taxon *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL), à la station TLN11, n'a pas

été initialement décrit sur substrat ultramafique dans la littérature, où il caractérise des eaux oligotrophes et calcaires hors du territoire. Pourtant il n'a été retrouvé que sous l'influence de ce type de substrat jusqu'ici en Nouvelle-Calédonie, dans le cadre de ce programme, néanmoins, il est décrit comme cosmopolite par G. Moser (Moser, 1999).

### 5.2.3.7 Bassin versant de Kone-Pouembout



**Figure 27: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Kone et de la Pouembout. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).**

Au niveau de ce bassin versant de la zone VKP (Voh, Kone, Pouembout), les 2 stations amont rappellent les cortèges retrouvés sur les cours d'eau du bassin versant de la Nera (la Douencheur et la Boghen), avec la présence d'espèces telles que *Cocconeis euglypta* (CEUG) et *Gomphonema bourbonense* (GBOB). Ces 2 espèces se retrouvent sur les stations en aval de la Pouembout (POU21 et POU31).

L'apparition d'une nouvelle espèce, *Eunotia bilunaris* (EBLU) à la station POU31 peut être due à la nature du substrat, le prélèvement sur des végétaux ce qui conduit à la sélection d'une flore épiphytique.

Le peuplement à l'aval de la Kone, station KON21, connaît seulement 2 taxons majoritaires, *Gomphocymbella rossii* (GCRO) à 32%, dont l'écologie est méconnue et *Nitzschia bacata* (NZBA) qui caractérise des milieux plutôt dégradés. Le reste de la population est composé de taxons dont aucun atteint 5% du peuplement.

### 5.2.3.8 Bassin versant de la rivière des Kaoris et de la Baie Nord

Les inventaires des stations surlignées en jaune correspondent aux inventaires des prélèvements réalisés par Hytec en octobre 2011.

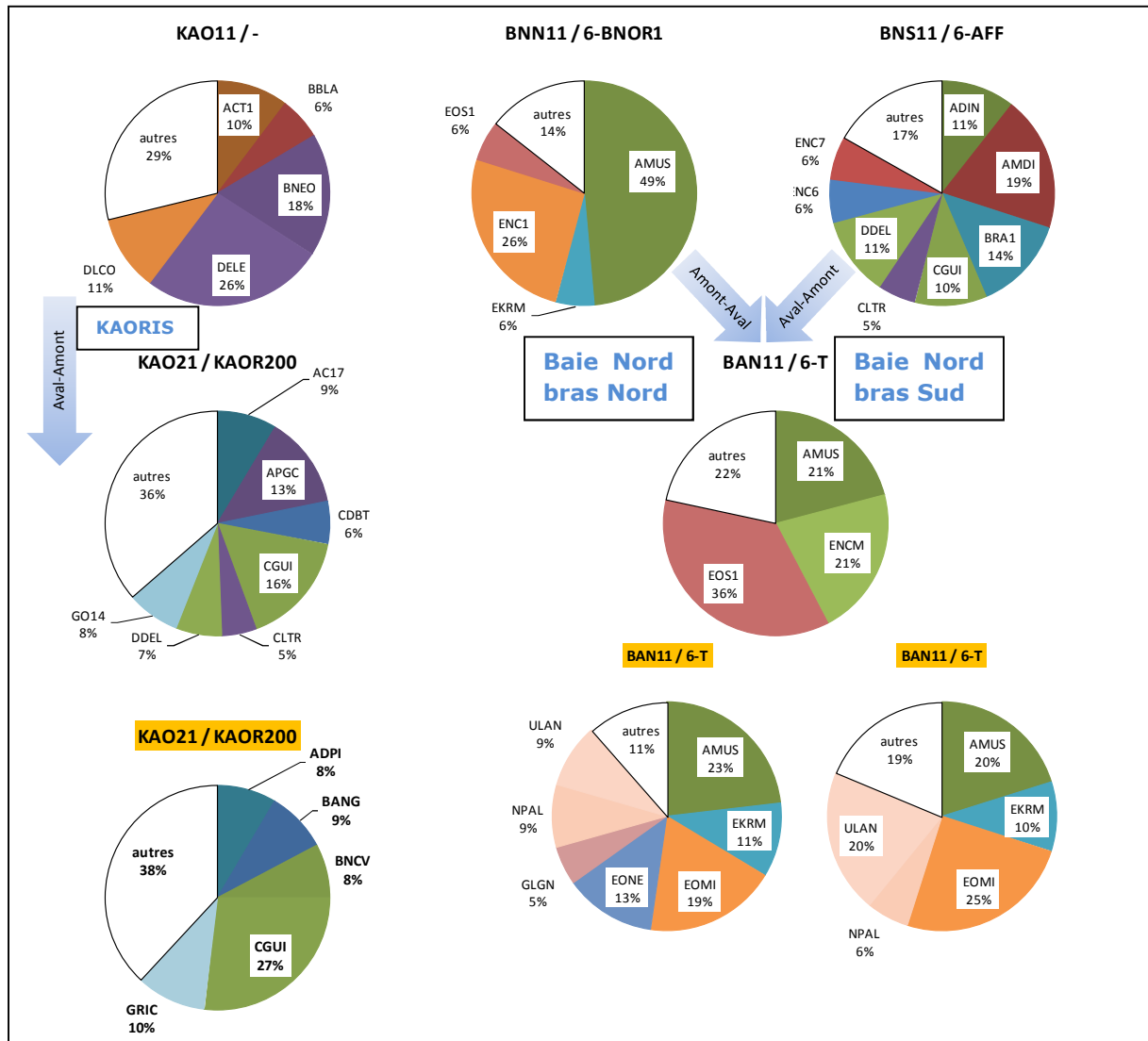


Figure 28: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la rivière des Kaoris et de la Baie Nord, et comparaison avec des inventaires de 2011, réalisés par Hytec (surlignés jaune). Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupé dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

Les stations amont et aval de la rivière des Kaoris présentent un cortège sans doute spécifique des substrats ultramafiques, même si certains taxons n'ont pas été déterminés à l'espèce (*Actinella sp.1*, ACT1, *Achnanthisdium sp.17*, AC17 et *Gomphonema sp.14*, GO14). En effet, ils ne se retrouvent que sur ce type de substrat.

La différence de flore sur ce gradient amont-aval, entre les stations KAO11 et KAO21, peut être liée au type de séquence prélevée: un plat lentique ombragé

contre un radier en milieu ouvert.

Par rapport à l'inventaire effectué 1 an auparavant par le bureau d'étude Hytec, la proportion de taxons majoritaires est similaire: la proportion du taxon endémique à la Nouvelle Calédonie, *Coxia guillauminii* (CGUI) est la plus forte dans les 2 inventaires et les espèces d'*Achnanthes* et d'*Achnanthidium*, *Achnanthes pirogueana* fo. *capitata* (APGC) dans l'inventaire 2012 et *Achnanthidium pirogueanum* (ADPI) dans l'inventaire 2011, sont relativement proches.

Au niveau du creek Baie Nord, le cortège de la station de l'affluent sud, BNS11, est composé de taxons inféodés au substrat ultramafique, tels que *Coxia guillauminii* (CGUI), *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL) et *Cymbella latarea* (CLTR), tandis que l'on observe la présence de taxons plus ubiquistes au niveau des stations du bras nord et de l'aval de la confluence, tels que *Eolimna sp.1* (EOS1) et *Adlafia muscora* (AMUS). L'écologie de ces dernières demeure incertaine bien que *Eolimna sp.1* (EOS1) semble liée à des eaux enrichies en nutriments.

Les inventaires de l'an passé, réalisés sur 2 prélèvements différents sur la même station (en duplicat), montrent que pour une station donnée, on retrouve sensiblement le même cortège floristique. Cela prouve la répétabilité de la mesure sur un même site. La présence de *Nitzschia palea* var. *palea* (NPAL) parmi ces inventaires, peut caractériser un enrichissement en matière organique et en sels minéraux.

On peut remarquer que les stations KAO21 et BNS11, qui ont des faciès similaires, partagent 3 taxons en commun parmi les taxons majoritaires, *Coxia guillauminii* (CGUI), *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL) et *Cymbella latarea* (CLTR), avec environ 25 à 30% d'abondance relative (28% pour KAO21 et 26% pour BNS11). Ces 2 stations proches d'un point de vue géochimique, se retrouvent proches d'un point de vue floristique.

### 5.2.3.9 Bassin versant de la Wadjana

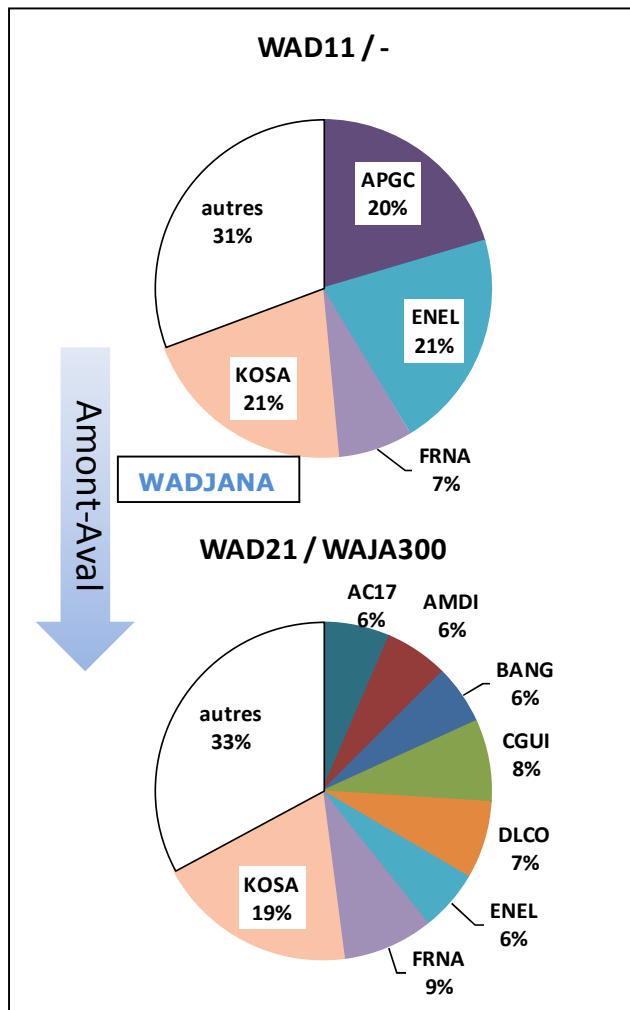


Figure 29: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement des inventaires taxinomiques le long de la Wadjana. Les taxons dont l'abondance relative est  $< 5\%$  sont regroupés dans la catégorie « Autres ». Le code des stations défini selon la nomenclature de la présente étude est accompagné par le code correspondant sur le réseau des partenaires (« code »/ « code partenaire »).

Les inventaires amont et aval sur la Wadjana possèdent des taxons majoritaires inféodés au substrat ultramafique. En revanche, alors que 3 taxons dominent nettement à la station WAD11, *Achnanthes pirogueana* fo. *capitata* (APGC) *Encyonema neocaledonicum* var. *leve* (ENEL) et *Kobayasiella saxicola* (KOSA), à la station WAD 21, le peuplement se caractérise par davantage de taxons moins abondants. Entre ces 2 stations, on retrouve *Kobayasiella saxicola* (KOSA) et *Frustulia nana* (FRNA), à l'écologie indéterminée, dans des proportions similaires, respectivement  $\sim 20\%$  et  $\sim 10\%$ . De l'amont vers l'aval, la proportion du taxon *Achnanthes pirogueana* fo. *capitata* (APGC) passe parmi les taxons minoritaires et la proportion d'*Encyonema neocaledonicum* var. *leve* (ENEL) baisse de 21% à 6%, au profit d'autres taxons, déjà présents à l'amont mais en proportion  $< 5\%$ , sauf pour *Diatomella lecohui* (DLCO), qui apparaît seulement à la station aval.



Il n'y a donc pas une apparition de nouveaux taxons à la station aval parmi les taxons majoritaires, mais plutôt un changement dans les proportions.

### **5.3 Croisement des données abiotiques et biotiques**

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) permet le croisement des données physico-chimiques (données abiotiques) des sites et des données d'inventaires (données biotiques) et révèle les correspondances entre les variables.

Les graphiques de la Figure 30 illustrent l'association de taxons typiques et des sites auxquels ils se rattachent. Ces groupes de taxons typiques se détachent d'un pool de taxons illustratifs de situations moyennes ou très communes pour le jeu de données, qui constituent un nuage dense au centre du graphique. Ces analyses prennent en compte tous les taxons au sein des inventaires sans discriminer les taxons majoritaires. Ces analyses ne prennent pas en compte les derniers inventaires effectués, à savoir, ceux du bassin versant de la Wadjana (WAD11 et WAD21) et de la Taléa (TLN11, TLS11 et COC11) car elles ont été réalisées avant ces comptages.

Les 4 stations KAO11, KAO21, KAR11 et BNS11 qui ressortent sur les axes 1 et 2 de l'AFC sont sous influence ultramafique. Parmi ces dernières, 2 ressortent aussi sur les axes 3 et 4 (BNS11 et KAR11). Les axes 3 et 4 portent une troisième station, MEN11, ellipse marron, qui se distingue aussi du pool principal et qui est cette fois hors influence ultramafique.

Les stations KAO11, KAO21 et BNS11 sont situées respectivement sur la rivière des Kaoris (KAO11 et KAO21) et sur l'affluent sud du creek Baie Nord (BNS11), au sein de l'HER D, les plaines du Sud.

Les inventaires singulièrement différents des stations amont et aval de la rivière des Kaoris, KAO11 et KAO21 ressortent ici pour former 2 pools de taxons distincts (respectivement, ellipse rouge et orange) mais qui connaissent tout de même la même inertie, ils se placent tous deux en haut à droite du graphique (Figure 30 a).

La station KAR11, ellipse violette, sur la station amont de la Karikouïé, en HER B possède aussi une association d'espèces typiques liée au substrat ultramafique, différente de celles rencontrées précédemment.

Ainsi, ces premiers résultats montrent qu'il n'y a pas un seul type de cortège floristique sur substrat ultramafique.

La station MEN11, située sur la Wa Menao, à l'amont de la Douencheur se détache en raison de l'apparition d'une flore unique par rapport à l'ensemble des inventaires effectués jusqu'ici (Figure 30 b). Cela peut être dû à l'isolement géographique de cette station ainsi qu'au caractère ombragé du site.

Il est intéressant de constater que les stations BNN11 et BAN11 sur la Baie Nord ont des cortèges floristiques plus communs, malgré le contexte naturel très similaire à la station BNS11, ellipse bleue. Cela peut être dû à des apports en matières organiques exogènes, que ne connaîtrait pas la station BNS11. De la même manière, la station KAR21, sur la Karikouïé, à l'aval de Paita ne se détache pas du groupe central de stations indiquant qu'elle possède une flore plus ubiquiste, notamment en raison des effluents anthropiques.

Ces résultats préliminaires montrent des associations floristiques typiques de substrats ultramafiques, sans être forcément homogènes entre HER. Les inventaires des sites impactés par une activité anthropique présentent une flore constituée de taxons plus ubiquistes au détriment d'espèces locales. Les communautés de diatomées se différencient bien selon les conditions d'environnement abiotique (notamment chimique), et confirment leur aptitude à marquer les altérations naturelles et anthropiques, aptitude nécessaire à la mise au point d'un bioindicateur pertinent.

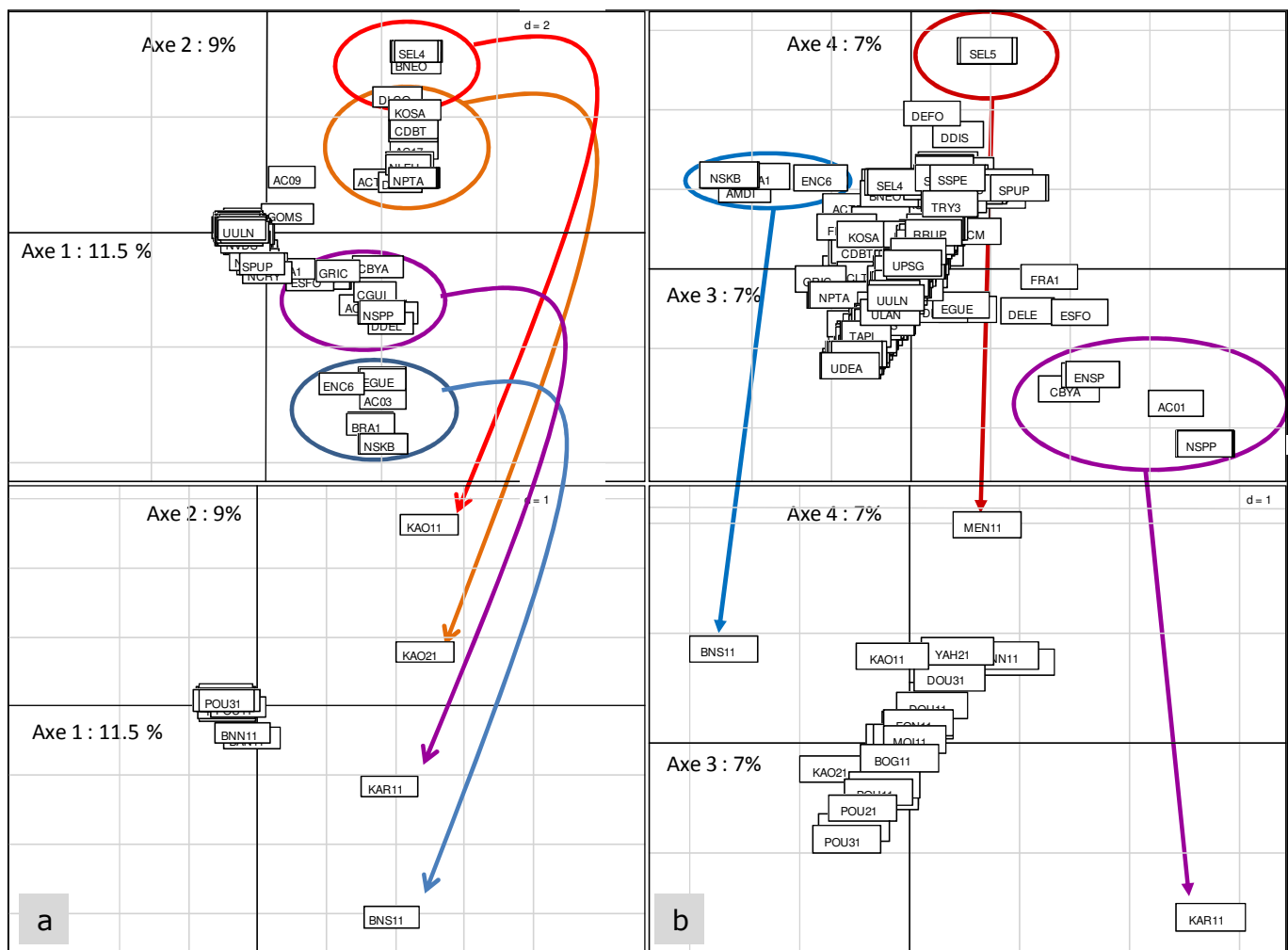


Figure 30: Représentation graphique des résultats de l'AFC sites-taxons, a) Croisement des axes 1 et 2, b) Croisement des axes 3 et 4.

## 5.4 Application de l'IBD

La Figure 31 illustre l'abondance des taxons pris en compte dans l'IBD au sein des inventaires effectués jusqu'ici. Le calcul de l'IBD, indice mis en place dans le contexte biogéographique de métropole, prend ici en compte seulement environ 50% des taxons identifiés en moyenne.

De manière générale, les stations qui possèdent le moins de taxons pris en considération par l'IBD, moins de 20%, sont situées sur substrat ultramafique, hormis BAN11 et BNN11 ou sont sous son influence proche (KAR11, COC11).

Les stations du creek Baie Nord, à l'aval du complexe industriel de Vale-NC de Prony, BAN11 et BNN11, sont jusqu'ici, les seules stations de l'HER D possédant plus de 20% de taxons compris dans l'IBD (respectivement 57% et 50%). Cela peut être dû à un enrichissement en matière organique en amont de ces stations. La station BNS11, située sur l'affluent sud de la Baie Nord, a une richesse floristique plus typique des milieux oligotrophes ultramafiques.

Sur la Karikouïé, au niveau de la station amont (KAR11), le pourcentage d'espèces comprises dans l'IBD est de 4%, contre 71% au niveau de la station aval (KAR21). Cette hausse le long du cours d'eau s'explique par la présence à l'aval d'une flore plus proche des peuplements métropolitains car la station est plus distante de l'influence ultramafique et davantage soumise aux effluents urbains.

Les stations des HER B et G comptent environ 50% ou plus de taxons fréquents excepté lorsque ces stations sont sous influence ultramafique (COC11, TLN11, TLS11 et KAR11).

La station considérée comme la plus dégradée par l'impact d'effluents urbains, (YAH21 dans l'HER B), présente le plus de taxons pris en compte dans l'IBD, avec près de 90% des taxons inclus dans la note (elle aurait une classe de qualité médiocre à mauvaise avec une note de 6,6/20 avec l'indice métropolitain).

Les sites où l'influence ultramafique semble moindre et/ou l'activité anthropique urbaine et/ou agricole est plus forte, présentent davantage de taxons répertoriés par l'IBD. Ces résultats apportent la confirmation que l'altération anthropique provoque une banalisation des flores, avec l'augmentation de la représentation d'espèces tolérantes que l'on a l'occasion de rencontrer un peu partout dans le monde. C'est le contraire pour les flores très spécialisées de milieux naturels particuliers, plus sujettes à endémisme ou à distribution strictement inféodée à ces conditions géoclimatiques spéciales.

Ces résultats montrent aussi clairement que l'indice IBD métropolitain ne peut pas être valablement utilisé dans le contexte biogéographique spécifique de la Nouvelle-Calédonie. D'une part, les taxons non pris en compte ont peut-être une

valeur bioindicatrice plus importante que les taxons plus largement répandus, et d'autre part, les taxons plus ubiquistes n'ont peut être pas la même valeur indicatrice dans ces conditions subtropicales.

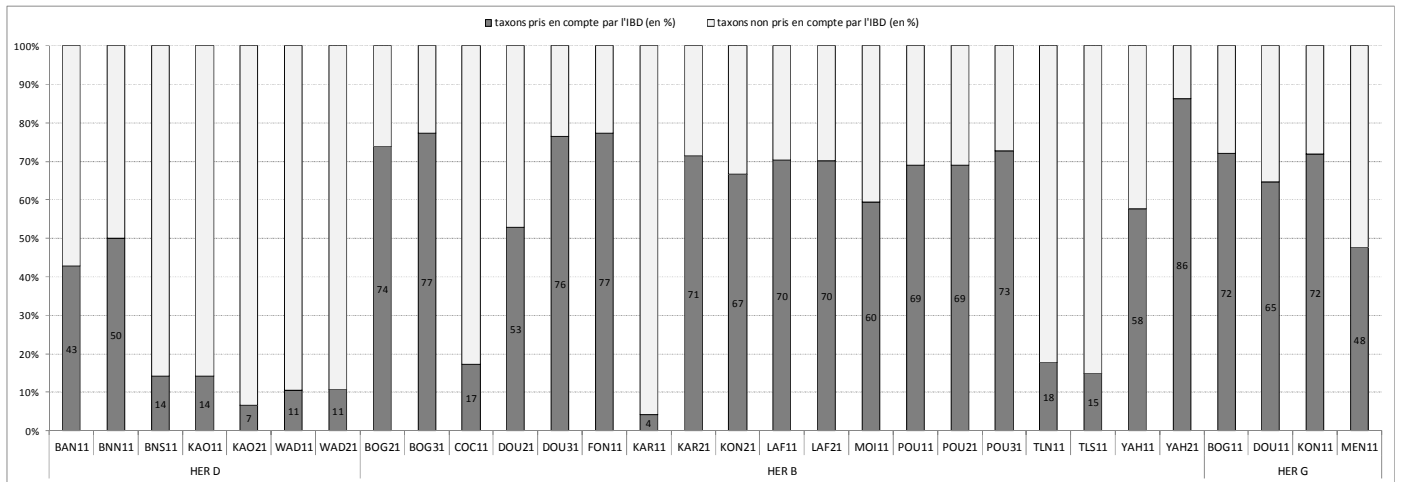


Figure 31: Représentation du pourcentage de taxons pris en compte dans l'IBD.

## 5.5 Résultats des substrats artificiels

Sur les 4 cagettes mises en place sur chacun des 2 sites, Bras Nord et Kaoris, 2 cagettes seulement pour chaque site ont pu être récupérées pour la suite de l'expérience en raison de l'engravement de la moitié d'entre elles. Ainsi, les données suivantes représentent les valeurs trouvées sur 2 cagettes. Le dosage des métaux est en cours de traitement à l'Unité Mixte de Recherche Environnement et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux de l'université de Bordeaux 1.

### 5.5.1 Production primaire

#### 5.5.1.1 Colonisation des substrats artificiels

La colonisation des lames après 54 jours d'immersion (du 16 janvier 2013 au 11 mars 2013) sur les deux rivières est illustrée par la Figure 32. Le dépôt est nettement plus important sur le substrat sur la Baie Nord que sur la Kaoris. Cette situation est conforme à ce qui est observé naturellement sur les galets dans le creek, un biofilm plus important sur le creek de la Baie Nord que sur la Kaoris.

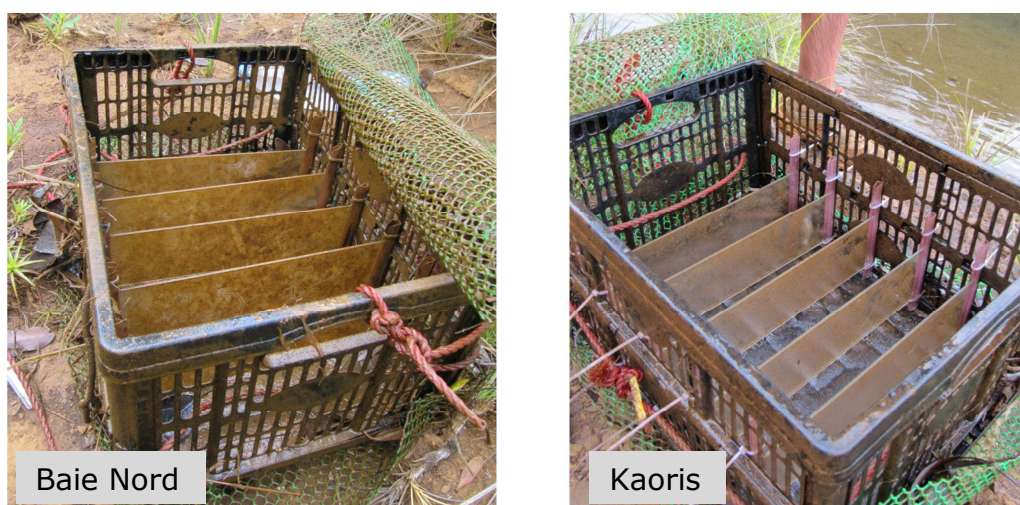


Figure 32: Colonisation des substrats artificiels sur les deux sites.

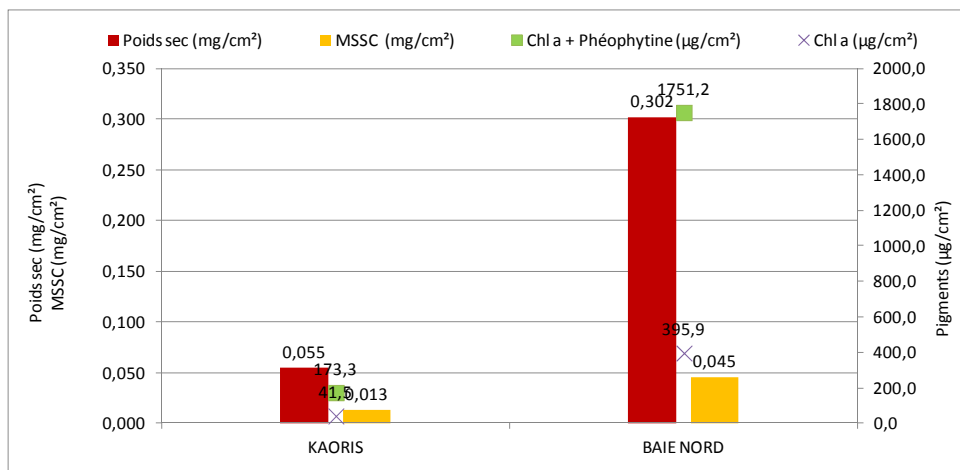
### 5.5.1.2 Biomasse et concentration en pigments

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente la moyenne de la densité en matière minérale et organique du biofilm obtenu sur les substrats artificiels et de la densité en pigments; chlorophylle *a* dite «active» et en chlorophylle *a* dite «globale», correspondant à la somme de la chlorophylle *a* et des phéopigments.

On peut observer que la part de la fraction minérale, correspondant au rapport du poids sec avec la MSSC est relativement importante dans le biofilm quelle que soit la station observée, respectivement 4 à près de 7 fois plus importante que la matière organique sur la rivière des Kaoris et la Baie Nord. L'écart type élevée des moyennes de la fraction minérale et organique du biofilm de la Baie Nord ne permet pas d'apprécier s'il existe une différence significative entre les deux stations pour ces paramètres.

Les pigments de chlorophylle *a* dite «active» contribuent en moyenne à un quart environ de la proportion de la chlorophylle *a* dite «globale» pour les 2 stations. La densité de pigments chlorophylliens, quelque soit le type de chlorophylle *a*, est en moyenne environ 10 fois plus élevée sur la Baie Nord que sur la rivière des Kaoris.

A ce stade et d'après ces résultats, il n'est pas possible d'affirmer statistiquement que la croissance du biofilm a été plus forte sur la Baie Nord que sur la rivière des Kaoris. Néanmoins, on peut dire que la concentration en pigments est plus importante. Ainsi, soit la biomasse algale est réellement plus importante au niveau de la Baie Nord, soit, la biomasse algale est similaire entre les 2 stations. Dans ce dernier cas, deux réponses physiologiques possibles vis-à-vis d'un stress seraient envisageables: une suraccumulation de pigments des algues de la Baie Nord ou un déficit en pigments des algues de la rivière des Kaoris. Les mesures de densité nous apporteront la réponse.



**Figure 33: Moyennes de la biomasse totale et organique du biofilm et de la densité en pigments sur 2 caquettes sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord. MSSC: Matière Sèche Sans Cendre.**

### 5.5.1.3 Densité cellulaire des substrats artificiels

Les comptages de numérations cellulaires, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, montrent des concentrations cellulaires (cellules/cm<sup>2</sup>) de 3362 cellules/cm<sup>2</sup> en moyenne pour la rivière des Kaoris et de 19353 à cellules/cm<sup>2</sup> en moyenne pour la Baie Nord. Les barres d'erreur représentent les écarts-types entre les deux cagettes analysées sur chaque station.

Ces résultats confortent ceux des analyses pigmentaires présentés en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. La densité de diatomées sur les substrats artificiels de la Baie Nord est en moyenne près de 6 fois plus élevée que sur la rivière des Kaoris. Ces numérations confirment que la croissance est réellement plus forte sur la Baie Nord, expliquant la concentration en pigments plus élevée.

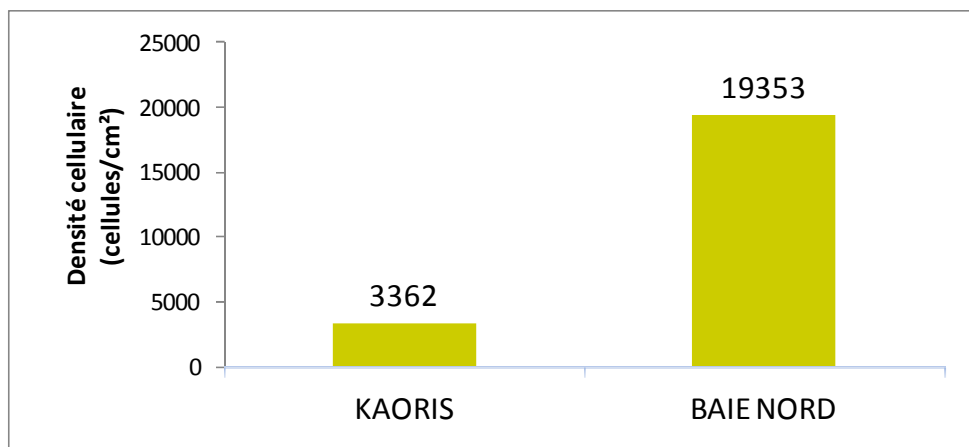


Figure 34: Moyennes des densité des diatomées sur 2 cagettes sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord.

### 5.5.1.4 Données floristiques

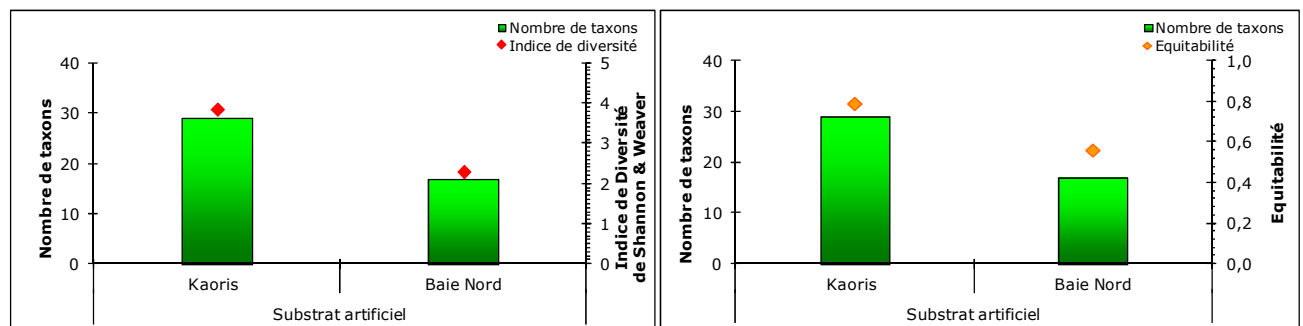
#### Richesse spécifique et diversité

L'indice de diversité, appelé aussi indice de Shannon, donne une note allant de 0 à 5, tendant vers l'accroissement de la diversité et l'équitabilité donne une note allant de 0 à 1, où 1 représente une équitabilité parfaite.

Le Tableau III et la Figure 35 montrent que la diversité taxinomique est presque 2 fois plus riche sur les Kaoris (29 taxons) que sur la Baie Nord (17 taxons). La population de la Baie Nord est peu diversifiée (Indice de Shannon (D')=2,3) et peu équilibrée (Equitabilité (E)=0,56), un taxon (*Encyonopsis microcephala*) domine le peuplement à 44% et deux autres comptent ensemble pour 40% (*Achnantheidium sp.14* et *Encyonopsis subfonticola*). La population des Kaoris est moyennement diversifiée (D'=3,85) mais bien équilibrée (E=0,79), il n'y a pas d'espèce dominant tout à fait le peuplement.

**Tableau III: Nombre de taxons, indice de diversité et équitabilité.**

Cours d'eau	Station	Nombre de taxons	Indice de diversité (D') de Shannon & Weaver	Equitabilité (E)	Nombre de genres	Effectif
KAORIS	Kaoris	29	3,85	0,79	16	400
BAIE NORD	Baie Nord	17	2,3	0,56	12	504

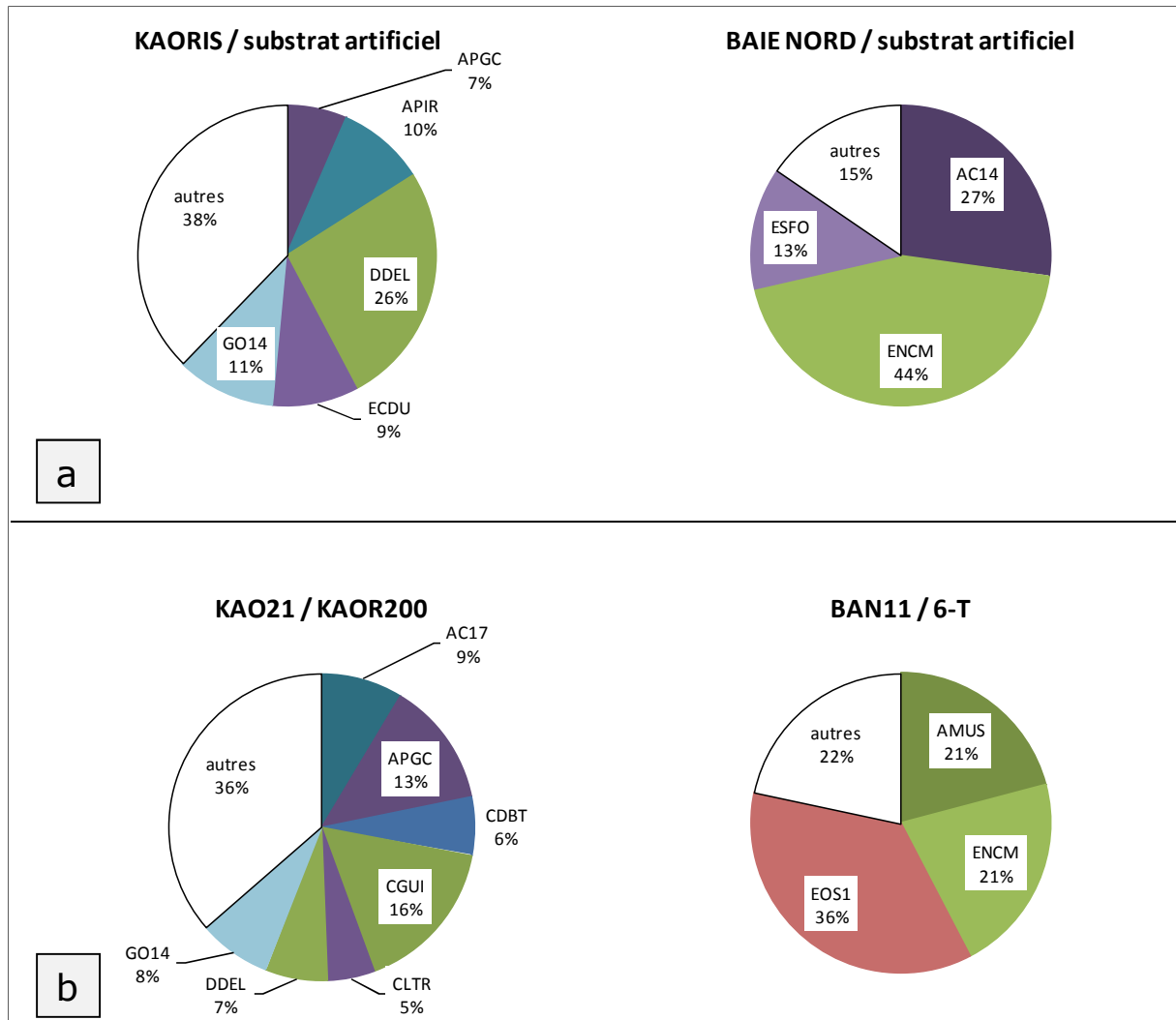


**Figure 35: Nombre de taxons, indice de diversité et équitabilité des inventaires des substrats artificiels sur la rivière des Kaoris et la Baie Nord.**



### **Inventaires taxinomiques**

De la même manière qu'au chapitre 5.2.3 Variations naturelles et gradients amont-aval floristiques, les taxons représentés Figure 36 sont les taxons majoritaires.



**Figure 36: Représentation des taxons dont l'abondance relative est  $\geq 5\%$  du peuplement (sinon classe "autres") des inventaires taxinomiques sur la rivière des Kaoris et sur la Baie Nord a) des substrats artificiels et b) de l'échantillonnage *in situ*.**

On ne retrouve aucun taxon en commun entre la station de référence sur la rivière des Kaoris et la station sur la Baie Nord, parmi les taxons majoritaires des relevés des substrats artificiels. Néanmoins, ces taxons sont tous inféodés au substrat ultramafique d'après les inventaires effectués jusqu'ici. Ces résultats laissent présager d'un forçage anthropique au niveau de la sélection des espèces de la Baie Nord car les deux stations ont été choisies pour leur homogénéité comme expliqué dans les matériels et méthodes. L'intensité et la nature de ce forçage n'est pas déterminé par cette seule expérience.

A titre comparatif, les relevés *in situ* équivalents aux stations des substrats artificiels sont rappelés ici. On observe 3 taxons en commun entre sites

équivalents: *Gomphonema sp14* (GO14), *Achnanthes pirogueana* fo. *capitata* (APGC) et *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL) pour la rivière des Kaoris, et un seul, *Encyonopsis microcephala* (ENCM) pour la Baie Nord, parmi les taxons majoritaires. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces différences, comme l'époque des relevés (fin octobre 2012 pour les relevés *in situ* et 11 mars 2013 pour les relevés sur substrat artificiel), la maturité du biofilm...

## 6 Conclusion

La première étape du programme a eu pour objectif de définir si les diatomées sont de bonnes « candidates » pour être utilisées en tant que bio-indicateurs dans le contexte calédonien. Cette étape a ainsi été nommée « étude de faisabilité » ce qui résume de façon très explicite les objectifs attendus.

Cette étude de faisabilité a été réalisée à partir d'une première campagne de prélèvement qui s'est déroulée d'octobre à décembre 2012. Au cours de cette première campagne de prélèvement, les diatomées de 64 stations ont été échantillonnées à travers toutes les hydroécorégions du territoire de la Grande Terre.

La méthode métropolitaine de prélèvement utilisée en routine et normalisée (AFNOR NF T 90-354) est applicable à la Nouvelle-Calédonie moyennant quelques adaptations décrites au chapitre Matériels et méthodes du présent document. La procédure de traitement des échantillons au laboratoire effectuée en routine en métropole est aussi utilisable sur ce territoire et a été appliquée dans le cadre de cette étude. Des lames d'observation ont ainsi facilement été fabriquées et leur examen a montré que tous les échantillons contiennent des diatomées en quantité suffisante.

A ce jour, 30 échantillons ont été analysés et inventoriés à l'aide de la bibliographie disponible. Dans chacun d'entre eux, un nombre suffisant d'individus (environ 500) a pu être compté, même si un certain nombre de taxons demeurent à ce jour indéterminés.

L'analyse exploratoire initiale des données physico-chimiques permet dans un premier temps de percevoir leur structure et de distinguer des groupes de stations présentant des similitudes pour certains paramètres. Ensuite, l'analyse des communautés par station a permis de déceler des tendances écologiques bien caractéristiques pour certains taxons. Notamment, la typicité des taxons inféodés au substrat ultramafique tels que *Coxia guillauminii* (CGUI), dont le genre est endémique à la Nouvelle-Calédonie, *Delicata delicatula* var. *delicatula* (DDEL), *Denticula elegans* (DELE) ou encore *Cymbella latarea* (CLTR) rencontrés presque exclusivement dans ce milieu. De plus, les cortèges floristiques répondent bien à l'enrichissement organique et minéral par la présence de taxons ubiquistes, à l'instar des flores retrouvées à l'aval de la STEP de la Yahoué, ou à l'aval de villages comme Païta.

La spécificité des taxons rencontrés sur le territoire ne permet pas en revanche d'utiliser valablement l'Indice Biologique Diatomées métropolitain. Les premiers résultats issus de la première campagne montrent clairement la nécessité de mise en place d'un indice propre à la Nouvelle-Calédonie.

L'analyse des résultats d'une expérience de colonisation du biofilm diatomique sur substrat artificiel n'a jusqu'ici pas encore permis de détecter la sensibilité du biofilm aux contaminants d'origine métallique lors de cette expérience. Des résultats de concentration en éléments métalliques dans le biofilm sont attendus. Cette analyse a cependant mis en évidence la réponse quantitative du biofilm sur substrat ultramafique à des apports en nutriments en milieu naturellement oligotrophe, ainsi qu'une réponse qualitative qui dans l'état actuel de nos connaissances reste encore difficilement interprétable et nécessite de renforcer la connaissance écologique des taxons présents.

Ces premiers éléments montrent que des réponses de la communauté diatomique au contexte géochimique et aux forçages anthropiques en Nouvelle-Calédonie existent et permettent de penser qu'il est possible de développer un bioindicateur basé sur ce compartiment biologique pour ce territoire.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

Asconit Consultants & Biotop Environnement, (2011). Définitions des HydroEcoRégions de Nouvelle-Calédonie dans le cadre des conseils de l'eau. Rapport du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie (Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales) et de la Province Sud (Direction de l'Environnement de la Province Sud). 40 pp.

Biotop, (2012). Suivi de la faune dulçaquicole de la ZES du Projet Koniambo suivi 2011 -2012.

Duong, T. T., Morin, S., Coste, M., Herlory, O., Feurtet-Mazel, A., & Boudou, A. (2010). Experimental toxicity and bioaccumulation of cadmium in freshwater periphytic diatoms in relation with biofilm maturity. *The Science of the total environment*, 408(3), 552-62. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.10.015.

Falasco E., Bona F., Badino G., Hoffmann L. & Ector L., (2009). Diatom teratological forms and environmental alterations: a review. *Hydrobiologia* 623: 1-35.

Gold, C., Feurtet-Mazel A., Coste M., & Boudou A., (2003). Effects of cadmium stress on periphytic diatom communities in indoor artificial streams. *Freshwater Biol.* 48:316-328.

Hofmann, G., Lange-Bertalot, H., Werum, M., (2013). Diatomeen im Susswasser-Benthos von Mitteleuropa. H. Lange-Bertalot ed, 908 p.

Hytec, (2012). Suivi comparatif de la qualité de certains cours d'eau du projet minier de Vale Nouvelle-Calédonie. Clémentine Flouhr.

Lane, C. M., Taffs, K. H., & Corfield, J. L., (2003). A comparison of diatom community structure on natural and artificial substrata. *Water*, 65-79.

Lange-Bertalot, H., (1979). Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova Hedwigia, Beiheft* 64: 285-304.

Lawrence, J. R., Chenier, M. R., Roy, R., Beaumier, D., Fortin, N., Swerhone, G. D. W., Neu, T. R., (2004). Microscale and Molecular Assessment of Impacts of Nickel, Nutrients, and Oxygen Level on Structure and Function of River Biofilm Communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(7), 4326-4339. doi:10.1128/AEM.70.7.4326.

Le Cohu, R. (1985). Ultrastructure des diatomées de Nouvelle-Calédonie. Première partie. *Ann. Limnol.* 21 (1): 3-12.

Mainguet, Y., (2012). Quel trésor sous terre?, Les Nouvelles calédoniennes, 19/11/2012, pp. 12-13.

Marquet, G., Keith, P., et Vigneux, E. (2003). Atlas des poissons et crustacés d'eau douce de la Nouvelle-Calédonie. Patrimoines naturels, MNHN, 58 :1-282.

Morin, S., Vivas-Nogues, M., Duong, TT., Boudou, A., Coste, M., Delmas, F. (2007). Dynamics of benthic diatom colonization in a cadmium/zinc-polluted river (Riou-Mort, France). *Fundam Appl Limnol*; 168:179-87.

Moser, G., Steindorf, A. & Lange-Bertalot, H. (1995). Neukaledonien Diatomeenflora einer Tropeninsel. *Bibliotheca Diatomologica*. 32: 1-340.

Moser, G., Lange-Bertalot, H. & Metzelin D. (1998). Insel der Endemiten Geobotanisches Phänomen Neukaledonien (Island of endemics New Caledonia - a geobotanical phenomenon). *Bibliotheca Diatomologica* 38: 1-464.

Moser, G. (1999). Die Diatomeenflora von Neukaledonien. *Systematik.Geobotanik.Ökologie Ein Fazit*. *Bibliotheca Diatomologica*. 43 - H. Lange-Bertalot & P. Kociolek (Ed.), J. Cramer, Berlin Stuttgart : 205 p.

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities, 403 (February), 853-858.

Nisbet M. & Verneaux J. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes, *Anales de limnologie T, 6, Fasc, 2*.

Passy, S. I., Yangdong Pan, Lowe R. L. (1999). Ecology of the major periphytic diatom communities from the Mesta River, Bulgaria. *International review of hydrobiology*. Vol. 84, no2, pp. 129-174 (3 p.). ISSN 1434-2944.

Podwojewsky, P. (1988). Les vertisols de Nouvelle-Calédonie. *Cah. ORSTOM, sér. Pedol., XXIV, n°4, 1988: 279-301*.

Prygiel, J., Whitton, B.A. & Bukowska, J. (1999): Use of algae for monitoring rivers III. Agence de l'Eau Artois-Picardie, Douai Cedex, Frankreich, 271 S.

Prygiel, J., Carpentier, P., Almeida, S., Coste, M., Druart, J.-claude, Ector, L., Guillard, D., et al. (2002). Determination of the biological diatom index ( IBD NF T 90 - 354 ): results of an intercomparison exercise. *Journal of Applied Phycology*, (September 1999), 27-39.

Servais, P., M., Seidl & J.M. Mouchel. (1999b). Comparison of parameters characterising organic matter in a combined sewer during rain events and dry weather. *Water Environmental Research*. 71 : 408-417.

Tison, J., Park, Y.-S., Coste, M., Wasson, J. G., 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(14), 3177-88.  
doi:10.1016/j.watres.2005.05.029

Van Dam, H., Mertens, A., & Sinkeldam, J. (1994). A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 28, 117-133.

Wasson, J.G, Chandesris, A., Pella, H. & Blanc, L. (2004). Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l ' Eau : l ' approche par Hydro-écorégion. 5ème séminaire REGLIS Mise en place de systèmes d`information à références spatiales (SIRS), Montpellier, 13-14 novembre 2003, 39-45.

Whitton, B.A., Rott, E. & Friedrich, G. (1991). Use of algae for monitoring rivers. Institut für Botanik, Universität Innsbruck.

## **8 ANNEXES**



Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

**Annexe I: Tableau des stations de prélèvements diatomiques et types de pollutions envisagées.**

<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d9ead3; border: 1px solid #ccc; margin-right: 5px;"></span> Références	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #fff2cc; border: 1px solid #ccc; margin-right: 5px;"></span> Influence minière
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #fff2cc; border: 1px solid #ccc; margin-right: 5px;"></span> Altération urbaine et/ou agricole	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d9ead3; border: 1px solid #ccc; margin-right: 5px;"></span> Influence haline avérée

CODE STATION	pollution envisagée	COURS D'EAU	LOCALISATION	COMMUNE	HER
WAD11	référence en contexte minier sur cuirasse, côte est	WADJANA		Yaté	
WAD21	référence en contexte minier sur laterite, côte est				
KUE11	influence minière	KUE	mine Vale-NC		D: Plaine du Grand Sud Plateau du sud < 500m Très arrosé Nappe de péridotite
KUE21					
KUE31					
KUN11					
BAN11					
BNN11					
BNS11					
KAO11	référence en contexte minier sur cuirasse, côte ouest	KAORIS		Mont-Dore	
KAO21	référence en contexte minier sur laterite, côte ouest				
RIL11	zone humide, milieu de tourbière, milieu lentique à l'amont (Lac en Huit)	RIVIERE DES LACS	Plaine des Lacs		
RIL21	pollution domestique, présence d'un camping en amont				
PER11	zone humide, milieu de tourbière	CREEK PERNOD			
YAH11	référence amont de YAH21, référence sud de HER B	YAHOUÉ	Yahoué	Nouméa	
YAH21	pollution domestique, urbaine, éventuelle influence haline				
DUM11	pollution domestique, urbaine, influence haline	DUMBEA	aval Dumbea	Dumbea	
KAR11	référence amont	KARIKOUÏE	amont Païta	Païta	
KAR21	pollution domestique, urbaine, agricole		aval Païta		
LAF11	référence amont de LAF21	LA FOA	amont La Foa	La Foa	
LAF21	pollution domestique, urbaine		aval La Foa		
FON11	pollution agricole	FONWHARY	Tiha		
MOI11	pollution domestique, urbaine	MOINDOU	dans Moindou	Moindou	
BOG21	référence amont de BOG31	BOGHEN	Vallée Belpatrone		
BOG31	pollution domestique, urbaine, agricole		Trou aux perruches		
TEN11	référence HER B	TENE	vers tribu Bouindi Assala		
NER11	pollution domestique, urbaine, éventuelle influence haline	NERA	amont Bourail	Bourail	B: Plaine littorale Ouest Pénéplaine littorale Collinaire < 250m Peu arrosé Géologie hétérogène
NER21	pollution domestique, urbaine, influence haline		aval Bourail		
DOU21	pollution domestique, urbaine, agricole	DOUENCHEUR	amont lointain Bourail		
DOU31	pollution domestique, urbaine, agricole		amont proche Bourail		
AKA11	référence HERB sur mine	Affluent MWE KARA AWI	mine Pinpin	Poya	
AKA21	influence minière				
AKA31					
APE11					
APA11	influence minière	Affluent PEOUE	mine Kopeto	Pouembout	
EGL11		affluent PAPAÏNDA			
POU21	pollution domestique, agricole faible (influence tribus)	POUEMBOUT	amont proche village		
POU31	pollution domestique, urbaine, agricole		Barrage à sel		
KON21	pollution domestique, urbaine	KONE	aval Kone		
TLS11	influence minière	TALEA branche sud	mine Koniambo	Kone	
TLN11					
COC11					
FRI11	influence minière	FRIDOLINE			
OUA11	influence minière, référence amont de OUA21	OUAMBAYE	mine Tiébaghi	Koumac	
OUA21	influence des rejets de Chromical, eau et boue accumulées d'anciennes carrières de chrome				
NOM11	pollution organique naturelle forte	NOMAC	route transversale VU4	Poum	
DIA21	pollution domestique, agricole, faible, éventuelle influence haline	DIAHOT	amont Manguine St-Ferdinand	Ouegoa	C: Collines schisteuses de la pointe Nord Pénéplaine littorale Collinaire < 250m Peu arrosé
DIA31	pollution domestique, agricole, influence haline		Fern Hill		
TAD11	pollution domestique, agricole faible (influence tribus)	TADE	amont confluence DIAHOT		
DIA11	référence amont DIAH21, référence HER F dans les terres	DIAHOT	Paimboas	Ouegoa	F: Massif du Panié Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé
TAO11	référence littorale	TAO	Tao		
HIE11	référence HER F dans les terres, éventuel influence tribus	HIENGHENE	amont Lewarap	Hienghene	
BOG11	référence amont de BOG21, référence HER G	BOGHEN	amont Katrikoin	Bourail	
MEN11	référence HER G	WA MENAO	Pothe		
DOU11	pollution domestique, agricole, faible (influence tribus)	DOUENCHEUR	Pothe		
POU11	référence amont de POU21	POUEMBOUT	amont lointain village	Pouembout	G: Cœur de la chaîne centrale Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé Unité Anté Sémonienne (socle de la chaîne centrale)
KON11	référence amont de KON21, référence HER G, limite de bassin	KONE	amont Poindah	Kone	
TIW11	pollution domestique, agricole faible (influence tribus)	TIWAKA	Bopope	Poindimié	
TIW21	pollution domestique, agricole faible (influence tribus), potentiels déversements de produits chimiques (agricoles, entretien...) sur la route		Pombeï		
TIW31	influence tribus et potentiels déversements de produits chimiques (agricoles, entretien...) sur la route		Tiwaka		
TCH11	référence amont TCH21, référence HER G	TCHAMBA	Tchamba		
TCH21	influence agricole, influence haline		aval confluence Nepwe Purua		
DMN11	référence amont de DUM11, limite HER B/HER E	DUMBEA branche nord	amont Trou des Nurses	Dumbea	E: Massif ultramaphique Chaîne centrale Montagneux > 500m Très arrosé
WAN11	influence minière zone littoral	WANEBWAYO	mine Poro	Poro	
ADO11	influence minière zone littoral	Affluent DOTHIO	mine Wellington	Thio	
AWA11	influence minière dans les terres	Affluent WANO	mine tontouta	Bouloupari	
WAO11		WANO			
MAM11	référence littorale	MAMIE	Unia	Yaté	

**Annexe II: Tableau de résultats de conductivité du réseau DAVAR.**

Cours d'eau	Code station campagne 1	Code station DAVAR	Préleveur	Date de prélèvement	Heure de prélèvement	Conductivité $\mu\text{S/cm}$
DIAHOT	DIA31	DIAH400	GINGER SOPRONER	04/01/1993	10:30	6890
			SITEE	04/10/1994	10:45	8700
YAHOUÉ	YAH21	YAHO300	GINGER SOPRONER	24/11/1992	16:00	740
			A2EP	16/11/1993	13:00	535
			A2EP	24/10/1994	09:00	452
			A2EP	21/11/1996	09:30	358
			A2EP	14/11/1997	11:30	303
			A2EP	09/11/1998	09:30	342,1

Ces mesures illustrent la détection d'une entrée maritime, grâce à la mesure de la conductivité, au niveau d'une station de prélèvement.

La station DAVAR DIAH400, de cette campagne est nettement sous influence haline alors que le doute subsiste à la station YAHO300.

Malgré l'ancienneté de ces données, elles restent d'actualité au moins au niveau du Diahot car le marnage n'a pas dû évoluer dans la mesure où aucun ouvrage conséquent n'a été construit sur le cours d'eau.

**Annexe III: Stations de prélèvement d'eau réalisés par Asconit/Biotop.**

<b>Stations échantillonnées</b>	
<b>ADO11</b>	<b>TCH21</b>
<b>APA11</b>	<b>TEN11</b>
<b>APE11</b>	<b>TIW11</b>
<b>AWA11</b>	<b>TIW21</b>
<b>BOG11</b>	<b>TIW31</b>
<b>COC11</b>	<b>TLN11</b>
<b>DIA11</b>	<b>TLS11</b>
<b>DIA21</b>	<b>WAN11</b>
<b>DIA31</b>	<b>WAO11</b>
<b>DMN11</b>	<b>YAH11</b>
<b>EGL11</b>	<b>YAH21</b>
<b>FON11</b>	
<b>KAO21</b>	
<b>KAR11</b>	
<b>KAR21</b>	
<b>MAM11</b>	
<b>MOI11</b>	
<b>NOM11</b>	
<b>OUA11</b>	
<b>OUA21</b>	
<b>RIL11</b>	
<b>RIL21</b>	
<b>TAD11</b>	
<b>TCH11</b>	

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

**Annexe IV: Fiches stations**

Cf. document joint.

**Annexe V: Flores disponibles pour la détermination, liste non exhaustive.**

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.

KRAMMER K. and LANGE-BERTALOT H., *Bacillariophyceae 5. English and French translation of the keys*. H. Ettl,

G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer ed., *Sübwasserflora von Mitteleuropa - Vol.5* (Spektrum

Akademischer Verlag, Berlin, 2000). 311 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, Afrocybella*. 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.

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.

Iconographia Diatomologica :

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.

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., *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.

REICHARDT E., Die Diatomeen (Bacillariophyceae) in Ehrenbergs Material von Cayenne, Guyana Gallica (1843).

H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.1 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1995). 99 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.

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.

#### Bibliotheca Diatomologica :

ZALOCAR DE DOMITROVIC Y. and MAIDANA N.I., Taxonomic and ecological studies of the Paraná River

*diatomflora (Argentina)*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.34 (J. Cramer, Berlin -

Stuttgart, 1997). 122 p.

FOGED N., Freshwater & Littoral diatoms from Cuba. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.5

(J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1984). 248 p.

HOFMANN G., Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. H. Lange-Bertalot

ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.30 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1994). 241 p.

KACZMARSKA I. and RUSHFORTH S.R., The diatom flora of Blue Lake Warm Spring Utah, USA. H. Lange-

Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.2 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1983). 49 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.

LANGÉ-BERTALOT H., 85 Neue taxa und über 100 weitere neu definierte taxa ergänzen zur Sübwasserflora von *Mittleuropa*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.27 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1993).

454 p.

LANGÉ-BERTALOT H., 85 Neue taxa und über 100 weitere neu definierte taxa ergänzend zur Sübwasserflora von *Mittleuropa - Talfen - Plates*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.27 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1993). 134 p.

LANGÉ-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.

LANGÉ-BERTALOT H. and MOSER G., *Brachysira*, Monographie der Gattung und *Naviculadicta* nov. gen.. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.29 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1994). 212 p.

LANGÉ-BERTALOT H. and KRAMMER K., *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen und Ergänzungen zu den *Naviculaceae*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.15 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1987). 289 p.

MOSER G., STEINDORF A. and LANGÉ-BERTALOT H., *Neukaledonien : Diatomeenflora einer Tropeninsel*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.32 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1995). 340 p.

MOSER G., LANGÉ-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., *Die diatomeenflora von Neukaledonien*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.43 (J.Cramer, Berlin - Stuttgart, 1999). 205 p.



Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

**Annexe VI: Tableau des méthodologies et limites de détection fournies par les laboratoires**

Lorsque la norme n'apparaît pas et que la méthode n'est pas précisée, alors la méthode utilisée est la même que la norme la plus récente décrite ici.

paramètre	unité	réseau	laboratoire	méthode	norme	LQ
Aluminium dissous (Al)	mg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 17294-2	0,001
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrométrie d'absorption atomique	NF EN ISO 15586	0,010
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Ammonium (NH <sub>4</sub> )	mg/l	ORE DAVAR	CDE	spectrométrie d'absorption moléculaire	NF T 90-015	0,01
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	colorimétrie par spectrophotomètre	EPA 10023	0,025
	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	mesure fluorométrique Holmes et al. (1999)		0,0015
Azote Kjeldahl (NTK)	mg/l de N	ORE DAVAR	CDE	dosage titrimétrique	NF EN 25663	0,5
	mg/l de N	ORE DAVAR	LAB'EAU	dosage titrimétrique	NF EN 25663	1
Calcium dissous (Ca)	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,25
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Chlorures dissous (Cl)	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,125
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	électrophorèse capillaire (CIA)		0,1
Chrome dissous (Cr)	µg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 17294-2	1
	µg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 15586	1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Cobalt (Co)	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Demande Biologique en Oxygène (DBO <sub>5</sub> )	mg/l d'O <sub>2</sub>	Asconit/Biotop	CDE	mesure manométrique oxitop	NF T 90-103	1
Demande chimique en Oxygène (DCO)	mg/l d'O <sub>2</sub>	ORE DAVAR	CDE	titration	NF T 90-101	5
	mg/l d'O <sub>3</sub>		LAB'EAU	méthode en tube fermé	ISO 15705:2002	0,1
Fer dissous (Fe)	µg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 17294-2	1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,01
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Magnésium dissous (Mg)	mg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,01
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Matières En Suspension (MES)	mg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	filtration/pesée différentielle	NF EN 872	1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	filtration/pesée différentielle	NF EN 872	2
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	filtration/pesée différentielle		1
N Total Dissous (NTD)	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotométrie		0,005
Nickel dissous (Ni)	µg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 17294-2	2
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,001
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	auto-analyseur à flux continu (Méthode Tréguer, Le Corre -1975)		0,001
Nitrates (NO <sub>3</sub> )	mg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,5
	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	auto-analyseur à flux continu (Méthode Raimbault et al.1990)		0,005
Nitrites (NO <sub>2</sub> )	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,01
	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	auto-analyseur à flux continu (Méthode Raimbault et al.1990)		0,005

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

paramètre	unité	réseau	laboratoire	méthode	norme	LQ
Orthophosphates (PO <sub>4</sub> )	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	auto-analyseur à flux continu (Méthode Tréguer, Le Corre -1975)		0,01
Phosphore Total Dissous (PTD)	mg/l	ORE DAVAR	CDE	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NE EN 1189	0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrométrie au molybdate d'ammonium	NF EN 6878	0,09
	µmol/l	Asconit/Biotop	IRD	auto-analyseur à flux continu (Méthode Tréguer, Le Corre -1975)		0,001
Potassium dissous (K)	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,05
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Silicium dissous (Si)	mg/l	ORE DAVAR/SLN	CDE	spectrométrie d'absorption moléculaire		0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	colorimétrie par spectrophotomètre	EPA 8185	1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,001
Sodium dissous (Na)	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,01
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)	NF EN ISO 11885	0,1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	spectrophotomètre d'émission par plasma à coupage inductif (ICP)		0,01
Sulfates (SO <sub>4</sub> )	mg/l	ORE DAVAR	CDE	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	mg/l	ORE DAVAR	LAB'EAU	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	mg/l	Asconit/Biotop	IRD	électrophorèse capillaire (CIA)		0,1

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

Annexe VII: Tableau des relevés des mesures physico-chimiques *in situ*.

	PHYSICO-CHIMIE - MESURES DE TERRAIN				
	Température de l'eau (°C)	Oxygène (mg/l)	Oxygène (%)	pH	Conductivité (µS/cm)
WAD11	21,9	8,6	97,8	7,6	82
WAD21	25,0	8,2	99,8	7,4	53
KA011	20,9	8,3	95,1	7,4	115
KA021	23,7	8,7	102,1	7,5	85
RIL11	21,2	9,0	102,5	7,4	61
PER11	23,5	8,4	101,5	7,6	95
YAH11	20,0	9,1	101,0	7,6	76
KAR11	22,7	8,5	99,0	8,0	192
LAF11	30,6	11,1	150,0	8,1	169
TEN11	22,2	8,4	98,3	8,2	241
KAA11	20,0	8,7	99,4	7,9	285
DIA11	27,0	8,4	105,4	8,4	48
TAO11	22,5	8,6	99,5	6,7	32
HIE11	27,0	9,0	112,0	7,9	107
BOG11	20,0	9,3	105,5	8,1	192
MEN11	19,5	8,5	97,5	7,7	148
DOU11	22,2	9,5	110,3	8,2	182
POU11	27,0	10,0	125,9	8,6	222
KON11	25,0	8,2	100,0	8,0	195
TIW11	25,0	8,5	105,0	7,8	111
TCH11	22,7	8,9	103,2	7,4	88
DMN11	24,4	7,8	94,1	8,0	145
MAM11	24,2	8,3	104,0	8,3	123
RIL21	21,0	8,6	98,5	6,9	60
YAH21	25,0	5,4	66,4	7,4	450
KAR21	23,0	7,7	88,0	8,0	277
LAF21	26,0	5,0	62,0	7,2	225
FON11	28,0	13,1	164,0	7,7	315
MOI11	24,5	6,3	76,0	7,4	235
BOG21	24,0	7,7	94,3	7,9	204
BOG31	24,9	8,3	101,0	8,0	309
NER11	24,5	6,2	73,8	7,8	330
DOU21	24,4	9,0	108,9	8,0	348
DOU31	23,4	8,0	94,6	7,9	337
POU21	26,6	10,5	129,1	8,4	277
POU31	25,5	5,6	67,7	7,6	335
KON21	25,0	5,4	67,4	7,4	269
NOM11	24,5	0,9	9,1	6,0	211
DIA21	27,8	6,4	81,0	6,8	70
TAD11	28,7	7,9	101,4	7,2	94
TIW21	25,0	9,1	110,5	7,8	106
TIW31	25,0	8,2	98,9	7,4	108
BAN11	26,2	9,0	112,1	8,4	146
BNN11	27,7	8,2	104,2	7,9	135
BNS11	25,0	8,9	108,3	8,3	141
KAA21	21,3	8,8	101,4	8,4	301
KAA31	21,3	8,7	101,3	8,3	284
APE11	25,4	8,1	99,4	8,8	239
APA11	20,7	9,8	109,7	8,6	196
EGL11	21,0	8,9	99,5	8,5	189
TLS11	22,8	8,5	98,9	8,6	295
TLN11	23,5	8,5	100,1	8,5	210
COC11	29,5	8,1	106,5	8,5	322
FRI11	30,9	6,8	91,3	8,3	413
OUA11	25,8	6,5	80,0	8,6	360
OUA21	26,4	7,8	96,8	8,6	365
WAN11	24,9	7,8	94,0	8,1	125
ADO11	24,5	8,6	102,9	8,6	152
AWA11	21,8	9,8	111,7	8,4	144
WAO11	24,6	8,3	100,0	8,5	150
DUM11	24,6	8,3	100,0	8,1	1440
NER21	26,1	8,5	105,2	8,1	5300
DIA31	27,3	5,5	69,4	6,7	360
TCH21	25,0	7,6	92,7	7,2	1744

référence
pollution domestique et/ou agricole
impact de la mine
influence haline avérée

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

Annexe VIII: Stations et données physico-chimiques décrites par l'ACP

Code station	Al (µg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	Cr (µg/l)	Fe (µg/l)	K (mg/l)	MES (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	Ni (µg/l)	NO <sub>2</sub> (mg/l)	Ptot (mg/l)	Si (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)
ADO11	9	0	6	390	4	0	4	1	18	3	0	28	0	0	9	14
APA11	0	0.224	5.78	5	11	0.173	0.86	1.401	39.965	2.795	0.002	1	0.003	0.004	16.502	1.87
APE11	0	0.421	6.31	41	8	0.193	0.55	0.732	2.854	3.186	0.002	0.005	0.004	0.004	17.881	5.88
AWA11	1	0	4	36	17	0	1	0	16	2	0	6	0	0	9	2
BAN11	16	1	16	8	39	0	2	0	14	8	0	8	0	0	8	5
BOG11	3	7	10	1	33	1	1	0	14	9	0	2	0	0	14	3
BOG31	5	9	10	7	122	1	3	1	25	8	0	6	0	0	12	4
COC11	0	0.421	8.39	12	3	0.125	0.26	0.177	46.295	3.135	0.002	5	0.004	0.01	31.636	2.73
DIA11	10	2.195	5.09	1	106	0.483	1.96	0.004	0.992	4.561	0.008	0	0.005	0.007	8.201	1.81
DIA21	83	3.509	8.63	1	446	0.863	3.28	0.002	1.668	6.286	0.003	0	0.092	0.015	7.335	3.76
DIA31	117	4.846	75.8	1	482	2.792	4.87	0.008	6.317	39.657	0.004	0	0.015	0.019	4.227	10.2
DMN11	0	0.22	5.1	4	1	0.072	0.2	0.254	17.854	2.858	0.001	3	0.004	0.002	11.336	1.5
EGL11	0	0.25	5.32	6	18	0.18	0.5	3.055	40.552	2.984	0.002	2	0.002	0.004	15.094	2.02
FON11	435	12	10	9	379	1	11	1	19	10	0	12	0	0	8	5
KAO21	3	0.8	10.7	7	86	0.1	1	0	6.58	5.78	0	15	0.001	0	5	1.7
KAR11	2	0.393	5.4	9	10	0.085	0.26	1.072	23.957	3.15	0.002	4	0.005	0.004	16.659	1
KAR21	4	4.544	8.69	3	59	0.524	2.2	4.151	30.614	6.244	0.222	4	0.006	0.073	16.393	3.52
MAM11	1	0.319	6.8	11	27	0.169	0.34	0.183	14.962	2.988	0	10	0.003	0.001	9.77	2.04
MOI11	26	12.933	14.96	1	189	1.469	2.2	0.255	13.946	12.46	0.014	0	0.006	0.017	11.578	6.49
NER11	19	15.509	12.7	2	44	0.807	2.07	0.006	28.721	10.166	0.001	2	0.005	0.022	16.059	4.1
NER21	36	16	96	4	87	2	6	1	32	60	0	5	0	0	16	18
NOM11	21	3.653	46.5	1	5158	0.998	12	0	5.342	23.594	0.102	1	0.007	0.002	5.508	7.9
OUA11	0	0.334	10.86	5	14	0.196	1.28	0.05	2.771	5.873	0.001	5	0.004	0.011	25.363	3.67
OUA21	1	1	9	16	7	0	1	0	25	5	0	4	0	0	12	4
PER11	1	0	9	1	183	0	1	0	6	4	0	16	0	0	3	2
POU11	121	10	10	4	162	1	4	1	20	10	0	5	0	0	13	8
RIL11	4	0	9	2	75	0	0	0	3	4	0	17	0	0	1	2
RIL21	3	0	8	2	82	0	0	0	4	3	0	8	0	0	2	2
TAD11	14	3.073	15.56	1	226	0.668	3.01	0.006	2.084	9.656	0.016	0	0.004	0.005	9.754	5.15
TCH11	11	5.833	20.6	2	72	0.738	0.93	0.001	2.154	7.367	0.001	0	0.002	0.014	13.784	5.8
TCH21	22	13.579	503.14	0	174	13.615	1.32	0.001	29.435	263.405	0.011	0	0.002	0.008	11.061	502.28
TEN11	6	3.204	8	7	17	0.276	0.82	0.009	28.33	4.359	0.002	3	0.004	0.009	17.601	3.1
TIW11	8	3.99	6.3	2	43	0.538	0.88	0.002	7.943	5.359	0.003	0	0.003	0.01	12.015	2.3
TIW21	10	3.874	6.6	2	58	0.558	1.18	0.025	7.332	5.449	0.001	0	0.002	0.009	11.106	1.7
TIW31	9	3.919	6.8	3	104	0.594	2.1	0.02	7.517	5.391	0.004	0	0.003	0.009	11.229	2.5
TLN11	1	0.392	7.05	7	8	0.11	0.26	0.174	43.428	3.292	0.001	8	0.004	0.007	29.21	2.13
TLS11	3	0.313	6.53	10	10	0.112	0.55	0.223	29.967	2.506	0.001	6	0.006	0.007	18.046	2.31
WAJ21	1	0.7	11.9	10	58	0.15	2	0	10.49	6.33	0	9	0.5	0	7	1.9
WAN11	1	1	6	435	29	0	2	1	18	4	0	35	0	0	9	16
WAQ11	0	0.167	3.45	22	13	0.165	0.68	0.394	17.251	2.032	0.001	4	0.004	0.002	11.264	1.62
YAH11	1	4.162	9.53	0	0	0.572	1.04	0.037	1.558	7.499	0.003	0	0.007	0.003	9.577	4.9
YAH21	6	18.014	31.66	0	15	4.174	2.37	9.257	18.134	33.895	0.183	1	0.017	2.022	10.31	17.26

Diatomées des rivières de Nouvelle-Calédonie : conception d'un atlas taxinomique et d'un indice de bioévaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des diatomées benthiques

Phase 1: Etude de faisabilité

---

**Annexe IX: Inventaire diatomique en abondance relative ‰.**



### Partenaires

