

# Cours d'eau des Antilles françaises



Office de l'eau  
Martinique  
7, avenue  
Condorcet  
97200 Fort de  
France



DEAL Martinique  
Pointe de Jaham  
BP 7212  
97274 SCHOELCHER  
CEDEX



DEAL Guadeloupe  
Cité Gaillard  
Chemin Bougainvillier  
97100 Basse Terre



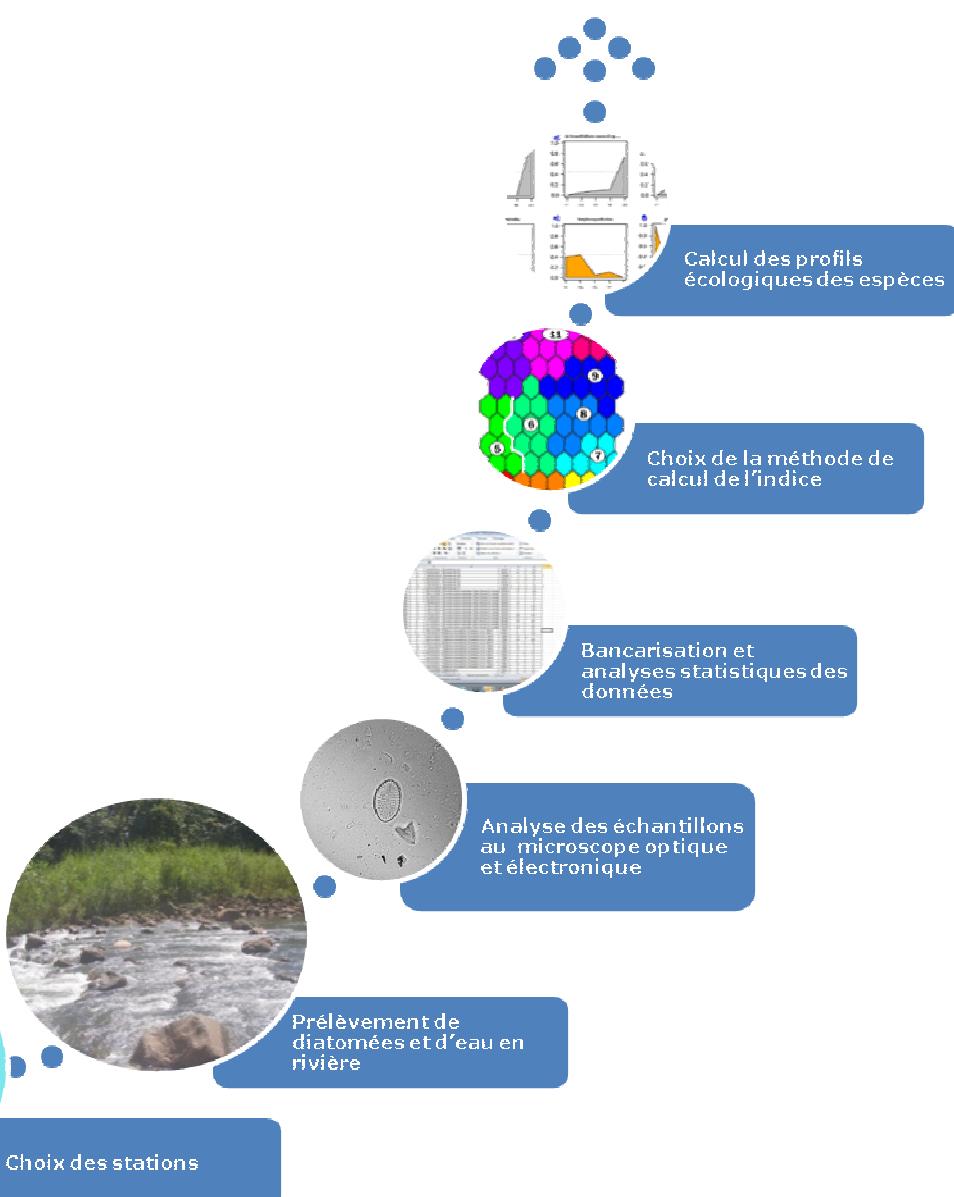
Immeuble Valkabois  
Z.A. Valkanaërs  
Route de Grande Savane  
97113 GOURBEYRE



## Programme d'étude et de recherche 2009-2012

### Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées : l'IDA

Rapport Final – VF (12/03/2013)



Co-auteurs : J. GUEGUEN, A. EULIN, E. LEFRANCOIS,  
S. BOUTRY, J. ROSEBERY, M. COSTE & F. DELMAS



**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final

**Principaux contacts :**

<b>Office de l'eau de la Guadeloupe</b>	Bernard Lubeth	
	Sophie Kanor	05 90 80 95 19
<b>DEAL de la Guadeloupe</b>	Pascale Faucher	05 90 99 35 78
	Sophie Glépin	05 90 99 35 63
<b>Office de l'eau de la Martinique</b>	Loic Mangeot	05 96 48 47 20
	Julie Gresser	
<b>DEAL de la Martinique</b>	Bruno Capdeville	05 96 71 25 06
	Corinne Figueras	05 96 71 63 54
<b>ASCONIT Consultants</b>	Anne Eulin-Garrigue	<a href="mailto:anne.eulin@asconit.com">anne.eulin@asconit.com</a>
	Estelle Lefrançois	<a href="mailto:estelle.lefrancois@asconit.com">estelle.lefrancois@asconit.com</a>
	Charlotte Verges	<a href="mailto:charlotte.verges@asconit.com">charlotte.verges@asconit.com</a>
<b>Irstea</b>	François Delmas	<a href="mailto:francois.delmas@irstea.fr">francois.delmas@irstea.fr</a>
	Michel Coste	<a href="mailto:michel.coste@irstea.fr">michel.coste@irstea.fr</a>
	Juliette Rosebery	<a href="mailto:juliette.rosebery@irstea.fr">juliette.rosebery@irstea.fr</a>
	Sébastien Boutry	<a href="mailto:sebastien.boutry@irstea.fr">sebastien.boutry@irstea.fr</a>
	Julie Guéguen	<a href="mailto:julie.queguen@irstea.fr">julie.queguen@irstea.fr</a>

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

# Introduction

La DCE (JOCE, Septembre 2000) a rendu obligatoire l'évaluation de l'Etat Ecologique pour les pays-membres de l'Union Européenne sur leur espace continental, mais aussi sur certains territoires ultramarins dont les DOM français.

Outre l'utilisation de la physico-chimie et des analyses chimiques, l'évaluation de l'Etat Ecologique doit se baser sur certains compartiments-clés de l'hydrosystème définis dans la DCE et notamment, en cours d'eau, les macro-invertébrés, les poissons, les diatomées benthiques. Or, si différentes méthodes nationales de bio-indication basées sur ces maillons pré-existent sur l'espace européen continental, les spécificités biogéographiques et climatiques des DOM nécessitent la mise au point de nouvelles méthodes adaptées à leur contexte et prenant en compte les espèces locales, souvent méconnues sur le plan taxonomique comme de leur écologie spécifique.

C'est dans le contexte d'absence de méthode de bio-indication diatomique utilisable sur place que ce programme de recherche et développement visant à la mise au point d'un indice diatomique adapté au contexte local a été initié par les DEAL Martinique et Guadeloupe ainsi que par les Offices de l'Eau de chaque île en 2009. Il est co-financé par chaque organisme porteur du projet, ainsi que par l'ONEMA. Le consortium composé d'ASCONIT Consultants et d'IRSTEA en a assuré la maîtrise d'œuvre et la réalisation, ces organismes ont également participé financièrement sous forme d'autofinancement d'une partie de leurs prestations.

Bien que démarrés séparément, les deux programmes ont été menés en concertation afin de permettre une convergence si les résultats obtenus l'exigeaient. L'analyse préliminaire des données a en effet montré la pertinence de réunir les deux jeux de données et de les traiter ensemble afin de créer un indice de bio-indication de la qualité de l'eau commun à la Martinique et à la Guadeloupe. Le présent rapport synthétise la méthodologie élaborée dans le but de créer cet indice de bio-indication commun. Il se compose de 2 parties : la première revient sur la conception du programme et sur les différentes phases d'acquisition des données. La seconde partie concerne plus particulièrement l'analyse des données préalablement acquises et la conception même de l'indice.

Conformément à la convention administrative qui lie les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre et ainsi qu'il a été précisé lors de la réunion technique du 4 mai 2012, ce rapport de synthèse s'accompagnera d'un guide méthodologique qui reprendra succinctement les étapes de l'élaboration de l'indice et qui détaillera les données floristiques nécessaires à la réalisation des inventaires dans le cadre de la mise en œuvre de l'IDA (Indice Diatomique des Antilles françaises).

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## SOMMAIRE

### Partie I : Conception du programme de recherche et présentation des différentes phases d'acquisition des données 1

#### I. Le programme de recherche..... 3

- A. Contexte et objectifs de l'étude ..... 3
- B. Le contenu et le fonctionnement du programme ..... 7
- C. Les intervenants ..... 8

#### II. L'acquisition des données ..... 10

- A. Synthèse des données existantes ..... 10
- B. Matériel et méthodes ..... 11
  - 1. Le plan d'échantillonnage ..... 11
  - 2. Les prélèvements de diatomées ..... 26
  - 3. L'inventaire des diatomées ..... 28
  - 4. Les prélèvements d'eau ..... 34
  - 5. Les analyses physico-chimiques de l'eau ..... 34
- C. Les résultats ..... 36
  - 1. Les conditions climatiques rencontrées au cours de l'étude ..... 36
  - 2. Les conditions hydrologiques rencontrées au cours de l'étude ..... 39
  - 3. Les données floristiques ..... 39
  - 4. Les données chimiques ..... 43

### Partie II : Elaboration de l'indice diatomique des Antilles Françaises 67

#### III. L'analyse de données : la démarche globale d'analyse..... 69

#### IV. Analyse exploratoire des données abiotiques et biologiques 72

- A. Analyse des données abiotiques, étude des gradients environnementaux ..... 72
  - 1. Matrice de chimie et ses descripteurs ..... 72
  - 2. Pré-traitement de la matrice de chimie ..... 76
  - 3. Analyse de l'auto-corrélation des variables abiotiques ..... 76
  - 4. Analyse en Composantes Principales complète (ACP) ..... 79
  - 5. Résultats de l'ACP complète ..... 80

B. Analyse des assemblages diatomiques, biotypologie .....	88
1. Utilisation de la SOM : aspects méthodologiques généraux .....	88
2. Mobilisation de la SOM pour l'élaboration de la biotypologie : .....	90
3. Analyse des résultats de la SOM, niveaux de coupes et analyse. ....	93
4. Analyse des résultats de la SOM : structure et écologie des assemblages-types .....	97
5. Utilisation de l'IndVal pour le repérage des espèces les plus typiques par cluster .....	108
6. Bilan de cette biotypologie, conséquences opérationnelles .....	113
C. Relations assemblages biologiques – environnement : Analyse Canonique des Correspondances complète .....	116
1. Aspects méthodologiques .....	116
2. Résultats.....	117
<b>V. Création de l'Indice Diatomique Antilles .....</b>	<b>120</b>
A. Crédit du gradient d'anthropisation .....	120
B. Crédit des classes de qualité.....	126
C. Crédit des profils écologiques.....	132
D. Crédit de l'indice.....	134
1. Sélection des taxa .....	134
2. Formulation de l'indice .....	135
3. Crédit des classes d'état biologique .....	135
4. Transformation des notes en EQR.....	141
<b>Partie III : Modifications du cadre interprétatif de l'IDA (Post-Copil du 14-12-2012)</b>	<b>155</b>
<b>VI. Modification de l'Indice Diatomique Antilles (Post-Copil) ..</b>	<b>157</b>
A. Regroupement des HERs.....	158
B. Crédit des classes d'Etat.....	160
C. Transformation des notes d'IDA en EQRs .....	167
D. Relation pression-impact exprimée en EQRs.....	171
<b>VII. Conclusions, perspectives .....</b>	<b>179</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>191</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : classification des taxons inventoriés en fonction de leur abondance .....	8
Tableau 2 : Liste des intervenants pour chaque phase du programme .....	9
Tableau 3 : Sites échantillonnés dans le cadre du pré-atlas réalisé par Loic Tudesque et Luc Ector .....	10
Tableau 4 : Code couleur associé aux types de stations échantillonnées .....	17
Tableau 5 : Liste des stations échantillonnées en Martinique .....	18
Tableau 6 : Liste des stations échantillonnées en Guadeloupe .....	20
Tableau 7 : Nombre de stations prélevées au cours des 5 campagnes de prélèvement ..	25
Tableau 8 : Nombre de couples « inventaires diatomiques/composition physico-chimique de l'eau » .....	25
Tableau 9 : code couleur associé aux types de stations échantillonnées.....	43
Tableau 10 : Matrice d'auto-corrélation de Pearson entre les descripteurs abiotiques analysés dans l'ACP complète.....	77
Tableau 11: Liste des espèces caractéristiques pour chacun des 9 groupes diatomiques identifiés sur la SOM de 104 cellules .....	109
Tableau 12 : Signalétique résumée des 9 biotypes diatomiques des Antilles et de leur écologie .....	114
Tableau 13 : Pourcentage d'inertie totale des axes contraints pour les axes 1, 2 et 3..	118
Tableau 14 : Tableau des corrélations de Pearson pour les paramètres "d'anthropisation" .....	121
Tableau 15 : Tableaux des valeurs propres des axes pour l'ACP (gauche) et l'ACC (droite) pour les axes contraints .....	123
Tableau 16: Tableau des contributions des sites sur les axes 1,2 et 3 pour l'ACP .....	123
Tableau 17 : Valeurs du gradient ACP pour le site GRL selon les campagnes .....	125
Tableau 18 : Valeurs du gradient CCA pour le site GRL selon les campagnes .....	125
Tableau 19 : Limites des classes d'états. ....	136
Tableau 20 : Boxplot et tableau des médianes des notes d'états de référence selon les différentes HER .....	142
Tableau 21 : Limite des classes d'états selon les différents HER. ....	146
Tableau 22 : Limites des classes d'états Post-Copil .....	161
Tableau 23 : Tableau des sites contenus dans chacune des cellules de la carte SOM ..	212

## LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Formule du Gradient Composite d'Anthropisation .....	122
Équation 2 : Formule du profil pour un taxon <i>sp</i> pour une classe de qualité donnée. ...	132
Équation 3: Formule de l'Indice Diatomique Antilles .....	135

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique des Antilles françaises .....	11
Figure 2 : Le relief et la pluviométrie de la Martinique .....	13
Figure 3 : Le relief et la pluviométrie de la Guadeloupe (source : Atlas national de la Guadeloupe) .....	14
Figure 4 : Hydro-écorégions de la Martinique et de la Guadeloupe (Irstea, mai 2004 pour la Guadeloupe, janvier 2005 pour la Martinique).....	15
Figure 5 : Carte des stations de prélèvement en Martinique et en Guadeloupe .....	23
Figure 6 : Carte des stations de prélèvement du réseau supplémentaire en Guadeloupe (Campagne 5).....	24
Figure 7 : Extrait de la base de données Access .....	29
Figure 8 : Extrait du fichier Excel « liste des photos acquises en MEB » .....	30
Figure 9 : Extrait du fichier excel "liste des noms d'espèces après harmonisation" .....	30
Figure 10 : Conditions météorologiques au cours des 5 campagnes de prélèvement réalisées en Martinique.....	37
Figure 11 : Conditions météorologiques au cours des 5 campagnes de prélèvement réalisées en Guadeloupe.....	38
Figure 12 : Distribution des familles de diatomées dans les peuplements de Martinique et de Guadeloupe .....	40
Figure 13 : Distribution des genres de diatomées dans les peuplements des Antilles Françaises .....	40
Figure 14 : Distribution comparative des genres de diatomées dans les peuplements de la Martinique et de la Guadeloupe. ....	41
Figure 15 : Répartition des taxons entre les 2 îles .....	42
Figure 16 : Box-plots des valeurs d'oxygène dissous mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS .....	44
Figure 17 : Box-plots des valeurs d'oxygène dissous mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC .....	45
Figure 18 : Box-plots des valeurs de conductivité mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS .....	46
Figure 19 : Box-plots des valeurs de conductivité mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC -Martinique et Guadeloupe .....	48
Figure 20 : Box-plots des valeurs de pH mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS.....	49
Figure 21 : Box-plots des valeurs de pH mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC.....	50
Figure 22 : Box-plots des valeurs de DBO5 mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS.....	51
Figure 23 : Box-plots des valeurs de DBO5 mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC.....	53
Figure 24 : Box-plots des valeurs de l'azote Kjeldahl (NKJ) mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS .....	54
Figure 25 : Box-plots des valeurs de l'azote Kjeldahl (NKJ) mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC .....	55
Figure 26 : Box-plots des valeurs de nitrates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS.....	56
Figure 27 : Box-plots des valeurs de nitrates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC.....	57
Figure 28 : Box-plots des valeurs d'orthophosphates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS .....	58
Figure 29 : Box-plots des valeurs d'orthophosphates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC .....	59
Figure 30 : Box-plots des valeurs de phosphore total mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS .....	60

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Figure 31 : Box-plots des valeurs de phosphore total mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC .....	61
Figure 32 : Définition des faciès minéraux selon le diagramme de Piper .....	62
Figure 33 : Faciès minéral synthétique des stations des réseaux de surveillance et de référence en Martinique et en Guadeloupe .....	63
Figure 34 : Faciès cationique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe .....	64
Figure 35 : Faciès anionique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe .....	65
Figure 36 : Faciès minéral synthétique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe .....	66
Figure 37 : Organigramme de la démarche d'analyse de données réalisée .....	70
Figure 38 : Physionomie des composantes principales de l'ACP complète .....	81
Figure 39 : Projection dans l'ACP complète : a) des relevés du programme ; b) de la vocation des sites d'étude.....	83
Figure 40 : Figuration résumée de la structuration des principaux gradients abiotiques dans l'ACP complète.....	84
Figure 41 : Positionnement relatif des relevés sites x dates de Guadeloupe et de Martinique dans l'ACP complète.....	85
Figure 42 : Distribution des relevés (sites x dates) des Antilles dans l'ACP complète en fonction : a) de la saison ; b) de la vocation du réseau.....	87
Figure 43 : Procédure générale d'utilisation de la SOM pour le repérage biotypes diatomiques des Antilles sur sites naturels et altérés.....	89
Figure 44 : Apprentissage de la biotypologie des flores diatomiques Antillaises réalisé sur la base d'une SOM de 104 unités virtuelles .....	92
Figure 45 : Examen successif des niveaux de coupe de la SOM pour 4, 5, 7 et 9 clusters .....	94
Figure 46 : Assise géographique des clusters au niveau de coupe 9 clusters .....	95
Figure 47 : Découpage biotypologique de la SOM et projection des clusters dans l'espace des données abiotiques de l'ACP complète .....	98
Figure 48 : Variables générales de forçages naturels.....	102
Figure 49 : Variables de forçage naturel géochimique .....	103
Figure 50 : Variables caractéristiques d'enrichissement anthropique .....	104
Figure 51 : Résumé des gradients environnementaux structurant les relevés biologiques en biotypes diatomiques dans la SOM .....	107
Figure 52 : Projection de profils dans la SOM : taxons sténoèces et euryèces.....	111
Figure 53 : Projection dans la SOM de profils de taxons typiques de biotypes.....	112
Figure 54 : Cercles des corrélations sur le premier plan factoriel (axe 1 et 2) de l'analyse canonique des correspondances (CCA) sur tous les paramètres à disposition .....	117
Figure 55 : Projection des espèces dans l'analyse canonique des correspondances. L'espace de projection est défini par les axes 1 et 2 (premier plan factoriel). .....	118
Figure 56 : Cercles des corrélations sur le deuxième plan factoriel (axe 1 et 3) de l'Analyse Canonique des Correspondances sur tous les paramètres à disposition .....	119
Figure 57 : Cercles de corrélations des axes 1 et 2 des analyses ACP restreinte (gauche) et CCA (droite) pour les paramètres anthropiques .....	122
Figure 58 : Projection des sites dans l'ACP (couleur rouge pour le site GRL).....	124
Figure 59 : Projection des sites dans l'ACC avec une couleur rouge pour le site GRL ...	124
Figure 60 : Schéma du Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation (ACP+ACC) .....	125
Figure 61 : Boxplots des gradients ACP (gauche), gradient ACC (centre) et gradient GCMA (droite).....	126
Figure 62 : Méthodologie pour la discréétisation du gradient composite. ....	127
Figure 63 : Boxplot du GCMA (Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation) selon les différentes classes de qualités. Les chiffres sur la gauche représentent le nombre de sites par classe. Les lettres sont les noms des classes. ....	128
Figure 64 : Boxplot du paramètre NO3 (mg/L) selon les classes de qualités (attention, les valeurs sont transformées) .....	130

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final

Figure 65 : Boxplot du paramètre P04 (mg/L) selon les classes de qualités (attention, les valeurs sont transformées) .....	130
Figure 66 : Cartes de qualité des sites pour la Guadeloupe (gauche) et la Martinique (droite) à partir du GCMA pour la campagne 3 (Hivernage 2010).....	131
Figure 67 : Profils de qualité d'espèces typiques : NACD à gauche, très bon état ; ADEG à droite, très mauvais état. ....	132
Figure 68 : Exemples de profils. Noir : Espèces-cibles synonymes d'altération anthropique. Violet : Profils espèces halines. Gris : Toutes autres espèces.....	133
Figure 69 : Illustration de la discréétisation du vecteur des notes d'état.....	136
Figure 70 : Histogramme du nombre de sites dans les différentes classes d'états. Les couleurs de chaque barre correspondent à la couleur associée des classes d'états. Rouge : « Très Mauvais État », Orange : « Mauvais État », Jaune : « État Moyen », Vert : « Bon État », Bleu : « Très Bon État ».....	137
Figure 71 : Histogrammes des nombres de sites par classes d'états selon les îles : Guadeloupe (gauche), Martinique (droite) .....	137
Figure 72 : Boxplot des notes d'états avec les différentes classes d'états. Les nombres sur la gauche représentent le nombre de sites par classe. Les lettres sur la droite représentent les classes d'états.....	138
Figure 73 : Notes de l'indice (IDA) en fonction du Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation (GCMA). .....	139
Figure 74 : Cartes d'état des sites selon les campagnes pour la Martinique .....	140
Figure 75 : Cartes d'état des sites selon les campagnes pour la Guadeloupe .....	141
Figure 76 : Analyse en Composantes Principales restreinte (descripteurs d'anthropisation), avec projection des HERs en couleurs.....	142
Figure 77 : Carte des notes d'états pour les sites de Martinique corrigés par les EQRs selon les HERs.....	144
Figure 78 : Carte des notes d'états pour les sites de Guadeloupe corrigés par les EQRs selon les HERs.....	145
Figure 79 : Cartes des abondances relatives de l'espèce NINC en 4 classes en Martinique lors des 5 campagnes .....	147
Figure 80 : Cartes des abondances relatives de l'espèce NINC en 4 classes en Guadeloupe lors des 5 campagnes .....	148
Figure 81 : profils de qualité comparés de <i>Nitzschia inconspicua</i> (NINC) et <i>Achnanthidium exiguum</i> (ADEG).....	148
Figure 82 : Comparaison des boxplots des variables naturelles aux sites où les espèces ADEG et NINC sont respectivement présentes. ....	150
Figure 83 : Comparaison des box-plots des variables d'anthropisation aux sites où ADEG et ou NINC sont respectivement présentes .....	152
Figure 84 : a) projection des HERs dans l'ACP complète ; b) aperçu du positionnement des sites de références des HERs 2G (MSD, en vert) et 3M (PIL, VAU, en mauve).....	158
Figure 85 : Projection des nouvelles HERs regroupées (« Volcan » et « Plaine ») dans l'ACP complète. ....	159
Figure 86 : Discréétisation des notes d'indice utilisant la variante adéquate d'IDA par regroupement d'HERs Post-Copil, en classes d'Etat .....	160
Figure 87 : Discréétisation du vecteur des notes d'indice prenant en compte les nouvelles HERs regroupées (Post-Copil) .....	161
Figure 88 : Barplot des nombres de sites par classe d'état.....	162
Figure 89 : Barplot des nombre de sites par classe d'état en fonction du type d'HERs , volcan (gauche) ou plaine (droite) .....	163
Figure 90 : Boxplot des notes d'indice. Les couleurs représentent les classes d'état après discréétisation du vecteur. Les chiffres à gauche représentent le nombre de sites par classe et les lettres à droite sont les noms des différentes classes .....	163
Figure 91 : Notes d'IDA en fonction des valeurs du gradient d'anthropisation (GCMA).164	164
Figure 92 : Nouvelle carte d'état de la Martinique à partir des notes d'IDA, selon la méthodologie « post-copil ».....	165
Figure 93 : Nouvelle carte d'état de la Guadeloupe à partir des notes d'IDA, selon la méthodologie « Post-Copil » .....	166

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Figure 94 : Comparaison des valeurs de PO4 dans chacune des classes avant (gauche) et après (droite) la modification par le regroupement selon HER volcan et plaine. ....	167
Figure 95 : Boxplot des notes des sites de référence selon les HERs « Volcan » et « Plaine » .....	168
Figure 96 : Carte des classes d'état pour la Martinique avec la correction par les EQRs	169
Figure 97 : Carte des classes d'état pour la Guadeloupe avec la correction par les EQRs selon les HERs « Volcan », « Plaine ».....	170
Figure 98 : Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et EQR (équivalents de qualité écologique). Echelle de couleurs selon classes d'état. ....	171
Figure 99 : Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) selon l'HER regroupée « Plaine » (bleu) et « Volcan » (rouge).....	172
Figure 100 : Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) pour les sites l'HER regroupée « Plaine » .....	173
Figure 101 : Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) pour les sites l'HER regroupée « Volcan » (rouge) .....	174
Figure 102 : Pourcentage de taxons d'alerte par classe d'état (croix rouges : sans NINC ; cercles blancs : avec NINC).....	176
Figure 103 : Carte d'état biologique pour les sites supplémentaires de Guadeloupe (Campagne 5). Les classes d'état sont créées avec les même limites que pour l'ensemble du jeu de données .....	205

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Liste des taxons inventoriés selon leur abondance relative .....	193
Annexe 2 : Méthodologies et limites de quantification proposées par les laboratoires ..	201
Annexe 3 : Conditions hydrologiques en Guadeloupe durant le programme.....	203
Annexe 4 : Carte du plan d'occupation du sol en Guadeloupe .....	204
Annexe 5 : Carte d'état biologique des sites supplémentaires de Guadeloupe.....	205
Annexe 6 : Sites et cellules dans la carte SOM .....	207
Annexe 7 : Conditions environnementales des 9 biotypes diatomiques Antillais repérés dans la carte SOM .....	213
Annexe 8: Localisation des biotypes diatomiques selon les campagnes de terrain .....	217
Annexe 9 (1): Profils de distribution des taxons dans la SOM .....	220
Annexe 10 : Liste des taxons d'alerte.....	234
Annexe 11 : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA .....	235
Annexe 12 : Représentation des profils de qualité des taxons de l'IDA .....	241
Annexe 13 : Valeurs non transformées des boxplots du paramètre PO4 selon les classes d'états .....	249
Annexe 14 : Cartes d'états en prenant en compte l'espèce NINC dans la liste des espèces cibles .....	251

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**Partie I :**  
**Conception du programme de recherche**  
**et présentation des différentes phases**  
**d'acquisition des données**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## I. LE PROGRAMME DE RECHERCHE

### A. Contexte et objectifs de l'étude

La Directive 2000/60/CE (DCE) du Parlement Européen et du Conseil, adoptée le 23 octobre 2000 et transcrite en droit français par la Loi n° 2004-338 du 21 avril 2004 (JOCE 2000, **Référence 19** : Jari Oksanen, F. Guillaume Blanchet, Roeland Kindt, Pierre Legendre, Peter R. Minchin, R. B. O'Hara, Gavin L. Simpson, Peter Solymos, M. Henry, H. Stevens and Helene Wagner (2012). vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-3. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Référence 20), établit le cadre de la politique communautaire dans le domaine de l'eau et définit les objectifs environnementaux à atteindre pour l'ensemble des eaux. Pour les eaux de surface, l'objectif environnemental principal est le bon état des eaux au plus tard en 2015.

Pour suivre l'évolution de l'état des eaux au cours des différents plans de gestion et les résultats obtenus par la mise en œuvre des mesures, la DCE demande que les Etats membres conduisent des programmes de surveillance de l'état des eaux (article 8). Ces programmes doivent permettre de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque district hydrographique. La DCE définit le bon état d'une eau de surface quand son état chimique et son état écologique sont au moins bons. L'état chimique est destiné à vérifier le respect des normes de qualité environnementale (NQE) fixées par des directives européennes. Cet état chimique comporte 2 classes, « respect » ou « non respect » des NQE. Il est défini sur la base de concentrations de 41 substances chimiques (8 substances dangereuses de l'annexe IX de la DCE et 33 substances prioritaires de l'annexe X de la DCE). L'état écologique intègre des paramètres biologiques et des paramètres chimiques (polluants spécifiques) ainsi que des paramètres physico-chimiques et hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques. Il se décline en cinq classes (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais). La DCE ne définit pas précisément la nature et les valeurs seuils de ces paramètres, cette définition revient à chaque état membre. En France, les premiers éléments d'interprétation de la notion de bon état ont été définis par la circulaire du 18 juillet 2005.

La biologie devient donc essentielle dans le suivi et l'évaluation de l'état. En effet, l'U.E. recommande l'utilisation de **compartiments biologiques-clés pertinents** prédéfinis par **grand type de masse d'eau** (ex : cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition, eaux littorales...) qui contribuent donc, au même titre que l'Etat Physico-Chimique (descripteurs "classiques" de physico-chimie et de chimie) et que l'Etat Chimique (liste européenne de substances toxiques), au diagnostic de l'Etat Ecologique et au rapportage européen de son évolution au niveau national.

L'avantage de ces maillons biologiques-clés est qu'ils permettent d'obtenir une information beaucoup plus intégrée dans le temps de l'état de la masse d'eau que des données d'échantillonnage ponctuel de physico-chimie et de chimie de l'eau, en fonction de leur temps d'intégration caractéristique.

Pour mémoire, les durées indicatives d'intégration temporelle de certains maillons-clés largement utilisés sont les suivants : diatomées, 2 à 3 mois ; macrophytes, 6 mois, avec une possibilité d'influence interannuelle d'événements hydrologiques exceptionnels ; invertébrés, de quelques mois à plusieurs années pour les espèces au plus long cycle de vie ; poissons, intégration sur quelques années.

Un autre changement important que la DCE a amené dans la philosophie de surveillance des milieux aquatiques est que l'état de l'eau n'est donc plus évalué principalement par rapport aux différents usages spécifiques dont ils font l'objet (potabilisation de l'eau, baignade etc...), comme cela était pratiqué usuellement (par exemple dans le cadre du SEQ eau), mais au regard du seul fonctionnement biologique des systèmes aquatiques.

En effet, les hydrosystèmes naturels doivent en priorité fournir des conditions de vie acceptables aux organismes qui les peuplent pour pouvoir être considérés comme en Bon Etat Ecologique, et les maillons biologiques-clés préconisés par la DCE constituent ainsi des sentinelles importantes permettant de mesurer si les hydrosystèmes fonctionnent bien ou sont impactés par les activités anthropiques.

Enfin, cette Directive édicte que l'évaluation de état écologique se fait en mesurant l'**écart par rapport à la situation de référence adéquate**. L'état écologique est jugé d'autant plus mauvais que les valeurs des paramètres biologiques s'éloignent des conditions de référence, qui correspondent à des milieux non ou très peu perturbés.

Dans le cas des cours d'eau, les éléments de qualité biologique à intégrer dans l'évaluation de l'état écologique ont été choisis pour permettre d'obtenir une vision globale de leur fonctionnement en prenant en compte la quasi-totalité de la chaîne trophique soit :

- le phytoplancton (pertinent seulement dans le cas des systèmes aval ralentis de larges dimensions)
- les diatomées
- les macrophytes (sauf en petits cours d'eau torrentiels)
- les macro-invertébrés
- les poissons

Ainsi les diatomées benthiques des cours d'eau<sup>1</sup> constituent l'un des maillons biologiques-clés identifiés par l'Union Européenne pour diagnostiquer l'état Ecologique des cours d'eau dans tous les Etats-Membres.

Elles sont aussi un compartiment biologique retenu depuis les années 90 pour suivre la qualité des cours d'eau en routine sur les bassins hydrographiques Français, dans le cadre des réseaux de surveillance et avec le concours des Agences de Bassin et des Services Déconcentrés du Ministère en charge de l'Environnement (actuelles DREALs).

---

<sup>1</sup> Les diatomées benthiques sont des algues microscopiques, unicellulaires appartenant aux Chromophytes (algues brunes). Ces algues sont considérées comme un des bio-indicateurs des eaux courantes les plus pertinents grâce notamment à leur sensibilité aux conditions du milieu et à la rapidité de leur cycle de développement (de quelques heures à quelques jours). Elles peuvent être récoltées facilement dans une large gamme de milieux, contrairement aux invertébrés. Les diatomées sont utilisées en routine comme indicateur de la qualité des cours d'eau dans le cadre des réseaux de mesure nationaux depuis les années 1970. Les communautés de diatomées benthiques permettent l'évaluation de la pollution, en fonction de leur sensibilité ou leur tolérance à la pollution, notamment organique, azotée et phosphorée. Elles sont connues pour réagir aux altérations de la qualité des eaux par des modifications qualitatives et quantitatives des peuplements, telles que : la régression du nombre de taxons et la baisse de la diversité spécifique (pollutions toxiques), le remplacement des formes les plus sensibles par des espèces plus résistantes ou indifférentes, la prolifération d'espèces présentant des affinités pour un type d'altération (formes saprophiles ou hétérotrophes pour les pollutions organiques, halophiles pour les contaminations salines), la diminution de la taille des espèces et présence de formes anomalies (formes tératogènes).

L'histoire des indices diatomiques en France date des années 1970 avec la mise au point d'une grille d'évaluation de la qualité des eaux spécifique au bassin de la Seine (Coste et Leynaud, 1974). Puis vint en 1978-1979, la première version de l'Indice de Polluosensibilité Spécifique, l'IPS (Coste, 1982, Référence 12), réactualisé en permanence au fur à mesure des avancées taxonomiques et qui reste un des indices de référence dans des programmes scientifiques à large extension géographique (tous les taxons du relevé étant pris en compte). Cet indice a aussi été adopté comme méthode nationale par quelques pays européens, et comme partie intégrante de l'Etalon Européen d'intercalibration, l'ICM (Kelly et al, 2007, Référence 22). Beaucoup d'autres indices existent, comme l'IDG (Indice Diatomique Générique) (Rumeau et Coste, 1988), d'utilisation simple car utilisant une taxonomie au genre mais conduisant par contrecoup à des imprécisions de diagnostic liées à l'hétérogénéité écologique de certains genres, ou l'IDAP (Indice Diatomique Artois-Picardie) (Prygiel et Coste, 1996) qui n'est applicable qu'à une zone géographique limitée.

A l'échelle de l'Europe, de nombreux autres indices basés sur des philosophies parfois comparables (indices permettant de diagnostiquer divers types d'altération des eaux), parfois très différentes (indices dédiés à un seul type de gradient anthropique), ont été conçus dans divers Etats-membres, par exemple le Trophic Diatom Index ou TDI (Kelly et Whitton, 1995, Référence 23), le Trophic Index ou TI (Rott et al 1999, Référence 38) et le Saprobic Index ou SI (Rott et al, 1997, Référence 37)...

Pour faire face aux besoins des réseaux de surveillance nationaux, une étude Inter-Agences a été lancée à partir de 1994, visant à la mise au point d'une méthodologie pratique, basée sur une liste fermée de taxons et utilisable en routine par les différentes catégories d'intervenants (DIRENs, Agences de l'Eau, Bureaux d'Etude) sur l'ensemble du territoire français métropolitain. Elle a abouti en 1996 à la production de la première version de l'IBD ou Indice Biologique Diatomées. Une description détaillée de la mise au point de cet indice a été donnée (Lenoir et Coste, 1996, Référence 29). Depuis, cette V1 de l'IBD basée sur 209 taxons vrais ou regroupés a été normalisée (version dite "IBD 2000" normalisée AFNOR NF-T 90-354 -2000) et employée en routine sur les réseaux français jusqu'à la fin 2009.

Une version améliorée de cet indice (Coste et al, 2009, Référence 11) s'appuyant sur une révision de la norme précédente (norme AFNOR N FT 90-354 révisée -2007, Référence 1), dite "IBD 2007", est désormais employée en routine dans les réseaux depuis 2010. S'appuyant sur une liste plus importante de taxons (816 taxons vrais dont 120, sujets à des déformations tératologiques, peuvent se voir affecter un profil spécifique "altéré" lorsque c'est le cas) et sur un nombre très substantiel de relevés (plus de 7000, contre 836 pour la V1 de l'IBD 2000), elle a grandement résolu quelques problèmes spécifiques d'application régionale répertoriés pour la version précédente.

L'IBD 2007 permet donc de définir et d'évaluer en routine le bon état écologique des cours d'eau de la France métropolitaine (Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement et Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement).

Bien que la DCE ait également vocation à s'appliquer dans les meilleurs délais, la situation est beaucoup plus complexe dans les DOM-TOM en termes de connaissance taxonomique et hydro-écologique, ainsi que pour la mise au point d'outils de diagnostic pertinents dans le contexte biogéographique local. En effet, du fait de l'isolement géographique et du climat, la flore des diatomées est encore insuffisamment connue et suivie pour que les indices diatomiques mis en place en Europe continentale puissent y être utilisés de manière optimale.

Ce n'est que très récemment, à la demande de l'Office de l'Eau Réunion, qu'un premier indice diatomique mis au point spécifiquement pour la mise en application dans un DOM a été mis au point par le même consortium Asconit-Irstea. L>IDR (Indice Diatomique Réunion, **Référence 5**), créé depuis début 2012, est d'ores et déjà passé dans une phase d'utilisation de routine dans le cadre des réseaux de surveillance. Deux autres indices biologiques, un indice macroinvertébrés benthiques et un indice Poisson, y sont également en cours de finalisation.

La reconnaissance des espèces pouvant être spécifiquement rencontrées dans les cours d'eau Guadeloupéens et Martiniquais ainsi que la détermination de leurs préférences écologiques (conditions géoclimatiques naturelles, influence de l'altération anthropique) est donc apparue comme un préalable incontournable à la **mise au point d'un indice diatomique permettant le diagnostic de l'état écologique des masses d'eau Antillaises**. Parallèlement, l'élaboration d'outils adaptés à la mise en œuvre de cet indice en routine s'est révélée tout aussi indispensable, en particulier, l'élaboration d'un atlas regroupant et synthétisant l'information nécessaire à la détermination taxonomique des espèces intégrées au futur indice.

Le présent programme réalisé en collaboration entre le Bureau d'Etudes ASCONIT et l'IRSTEA (ex-Cemagref) s'est appuyé sur 2 montages contractuels :

- Un programme Martinique, mis en place à l'initiative conjointe de la DEAL et de l'ODE Martinique, intitulé "**Conception d'indices de bio-évaluation de la qualité écologique des rivières de la Martinique à partir des diatomées**", qui a débuté en Juin 2009 pour une durée de 3 ans ;
- Un programme Guadeloupe intitulé "**Conception d'un indice de bio-indication de la qualité de l'eau de la Guadeloupe à partir des diatomées benthiques**", qui a débuté en Novembre 2009 pour une durée de 3 ans.

Ces deux contrats ont également été soutenus en partie par l'ONEMA et ont fait l'objet de cofinancements partiels de la part d'Asconit et de l'Irstea.

Ce programme de recherche comporte les objectifs spécifiques suivants :

- L'amélioration des connaissances des communautés de diatomées benthiques des rivières tropicales insulaires de la Guadeloupe et de la Martinique : description taxonomique des diatomées dominantes des milieux lotiques prospectés, en vue d'une connaissance de la biodiversité de ces milieux ; description et éléments de distribution spatiale de nouvelles espèces de diatomées.
- La définition des classes de qualité et les profils écologiques des espèces de diatomées dominantes, afin d'établir un bio-indicateur diatomique spécifiquement adapté aux cours d'eau guadeloupéens et martiniquais. Ce bio-indicateur devra permettre d'établir des diagnostics et des suivis fiables de la qualité biologique de ces milieux.
- La réalisation d'un guide iconographique des diatomées des rivières guadeloupéennes et martiniquaises utilisable par tous les experts et gestionnaires compétents pour l'identification des espèces diatomiques rencontrées dans ces cours d'eau et pour une mise en application facilitée de l'indice proposé. Cet outil est central pour la mise en œuvre d'un suivi pérenne. Il contiendra les clefs de détermination et la classification des différents taxons, leur répartition, leurs exigences écologiques, la liste des taxons ainsi identifiés.

## B. Le contenu et le fonctionnement du programme

Les conventions de recherche et de développement établies en Martinique et en Guadeloupe définissent les principales orientations des études et le contenu du programme de recherche qui a débuté en 2009. Celui-ci peut se décomposer en 4 unités fonctionnelles :

- La synthèse des données existantes pour la Guadeloupe, la Martinique et sur la zone Caraïbes.
- L'acquisition des données *in situ*

L'acquisition des données a été réalisée au cours de 4 campagnes d'échantillonnage entre novembre 2009 et mai/juin 2011, soit 2 campagnes en période d'hivernage et 2 en période de carême.

Ces données ont été enrichies par les résultats de l'analyse des échantillons de diatomées et d'eau prélevés dans le cadre de la DCE en période de carême 2009 en Martinique. Les échantillons prélevés à cette période étant inexploitables en Guadeloupe, faute de cohérence entre les prélèvements d'eau et de diatomées, une 5<sup>ème</sup> campagne de prélèvement a été programmée et réalisée en octobre 2011 en Guadeloupe.

L'analyse préliminaire des données qui a permis d'établir les grandes lignes de conception de l'indice a été réalisée avant la disponibilité des données issues de cette 5<sup>ème</sup> campagne. Ces données ont cependant été intégrées ensuite dans le jeu de données servant à la définition des profils écologiques des espèces et au calcul de l'indice.

Dans chacune des 2 îles, les prélèvements de diatomées ont été effectués dans les stations du réseau de surveillance et dans des stations complémentaires préalablement définies pour permettre d'appréhender la plus grande diversité possible de conditions environnementales pour chaque île. Parallèlement aux prélèvements de diatomées, des prélèvements d'eau ont été réalisés dans ces stations complémentaires. En plus des mesures *in situ*, 21 paramètres physico-chimiques ont été analysés. Ces descripteurs abiotiques de la qualité des eaux constituent une base indispensable pour la définition des classes de qualité des eaux superficielles et des caractéristiques écologiques des espèces inventoriées. Les résultats des mêmes paramètres physico-chimiques, mesurés dans les stations du réseau de surveillance, ont été intégrés aux données.

- L'inventaire des nouveaux relevés, la description des taxons et la bancarisation des données

Le matériel diatomique ainsi prélevé a été inventorié au fur et à mesure. Les planches iconographiques ont été constituées pour chaque taxon identifié au cours des différentes campagnes et dans chacune des îles. Ces taxons ont été décrits, y compris en microscopie électronique lorsqu'ils sont suffisamment abondants, et une clé de détermination a été élaborée. Tous ces éléments doivent permettre une large utilisation de l'Indice Diatomique ainsi créé.

Pour mémoire, les taxons ont été classés en fonction de leur abondance comme cela avait été précisé dans la convention technique (**Tableau 1**). Si tous les taxons inventoriés pourront être illustrés en microscopie optique, les efforts d'illustration en microscopie électronique dépendront de cette classification et de la fréquence ou de l'occurrence de chacun d'entre eux.

**Tableau 1 : classification des taxons inventoriés en fonction de leur abondance**

Catégorie	Abondance dans au moins 1 inventaire
<b>Taxons dominants</b>	Supérieure ou égale à 100%
<b>Taxons principaux</b>	Comprise entre 50 et 99%
<b>Taxons secondaires</b>	Comprise entre 10 et 49%
<b>Taxons rares</b>	Inférieure à 10%

La liste de tous les taxons déterminés au cours de l'étude, classés par abondance relative décroissante, est donnée en **Annexe 1**.

- La caractérisation de l'indice et la détermination des traits écologiques

C'est au cours de cette phase de l'étude, qu'ont été définis les assemblages d'espèces, les caractéristiques écologiques des espèces indicielles ainsi que les classes de qualité des eaux superficielles de la Martinique et de la Guadeloupe. La mise en relation des données recueillies par des analyses bio-statistiques a ensuite permis d'étudier la pertinence d'un Indice Diatomique Martiniquais, Guadeloupéen ou Antillais et de choisir la solution la plus performante (IDA avec une variante « Plaine » et une variante « Volcan »).

## C. Les intervenants

Toutes les étapes du projet ont été réalisées grâce à une collaboration étroite et synergique entre ASCONIT Consultants et l'IRSTEA. La partie relative à l'acquisition des données et aux déterminations-comptages sur inventaires a été menée principalement par ASCONIT Consultant. L'expertise des taxons sur base bibliographique mondiale et sur iconographies photoniques et MEB a été discutée et partagée entre les deux organismes, ce chantier de moyen terme restant encore évolutif pour des taxons sous numéro ou se référant à des taxons existants, mais avec certaines différences visibles. La partie analyse des données et conception de l'indice a principalement été prise en charge par l'équipe de biomathématiciens de l'Irstea, avec des retours d'expertise d'Asconit à chaque étape en fonction de leur connaissance du terrain, des types de pollutions présentes aux sites et des taxons qu'on y rencontre.

Le **Tableau 2** en page suivante détaille les rôles de chaque personne ayant participé au projet.

**Tableau 2 : Liste des intervenants pour chaque phase du programme**

Phases du projet	ASCONIT Consultants		Irstea	
	Martinique	Guadeloupe	Martinique	Guadeloupe
<b>Conception de la méthodologie</b>	Anne EULIN-GARRIGUE Florence PERES Nicolas BARGIER		François DELMAS Michel COSTE	
<b>Prélèvements des échantillons</b>				
- <b>Camp1</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS	Michel COSTE	
- <b>Camp2</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS	François DELMAS	Michel COSTE
- <b>Camp3</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS	Gwilherm JAN	François DELMAS
- <b>Camp4</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS	Sylvia MOREIRA	Gwilherm JAN
- <b>Camp5</b>		Estelle LEFRANCOIS		Sylvia MOREIRA
<b>Acquisition des données floristiques et recherche taxonomique</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS		Michel COSTE
<b>Synthèse des données chimiques</b>	Anne EULIN-GARRIGUE	Estelle LEFRANCOIS		
<b>Illustration des taxons en microscopie électronique</b>	Anne EULIN-GARRIGUE, Estelle LEFRANCOIS et René LECOHU (Université Paul Sabatier) à l'issue de la première campagne	Estelle LEFRANCOIS, Anne EULIN- GARRIGUE		Michel COSTE
<b>Conception de l'indice</b>	Anne EULIN-GARRIGUE et Estelle LEFRANCOIS		Julie GUEGUEN Sébastien BOUTRY Michel COSTE Juliette ROSEBERY François DELMAS	

## II. L'ACQUISITION DES DONNÉES

### A. Synthèse des données existantes

La flore des diatomées des Antilles Françaises a fait l'objet de 3 séries de travaux distincts : En 1952, Bourrelly et Manguin ([Référence 4](#)) ont étudié les algues des eaux douces de la Guadeloupe et de ses dépendances dont les diatomées. Le matériel avait été récolté lors de la mission de P. Allorge en 1936. Soixante-huit échantillons avaient été récoltés et analysés. Ils étaient issus de biotopes aussi diversifiés que les rivières, des zones de mangroves, des cascades, des mares, des mousses, des suintements. Huit cent espèces d'algues avaient été décrites dont 430 taxons de diatomées. Parmi ces 430 taxons, 124 étaient issus d'eaux douces type cours d'eau et cascades.

En 2000, la DIREN de la Guadeloupe a financé une nouvelle étude concernant les communautés de diatomées de la Guadeloupe. Ces travaux sont confiés au Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann (Luxembourg). Un pré-atlas des diatomées de la Guadeloupe, réalisé par Loïc Tudesque et Luc Ector ([Référence 47](#)) a été livré en 2002 (Les diatomées ont été prélevées sur 26 sites répartis sur 15 rivières (voir **Tableau 3** ci-dessous). Dix-neuf de ces sites sont identiques ou très proches de ceux étudiés dans le cadre de l'étude actuelle.

**Tableau 3 : Sites échantillonnés dans le cadre du pré-atlas réalisé par Loïc Tudesque et Luc Ector**

Cours d'eau	sites
Rivière Moustique Sainte-Rose	Amont Aval
Grande Rivière à Goyave	Amont Intermédiaire Aval
Rivière Bras David	Amont
Rivière Moustique Petit-Bourg	Amont Aval
Grande Rivière de Capesterre	Amont Aval
Rivière Grande Anse	Amont Aval
Rivière Rouge	Amont
Rivière aux Herbes	Amont Intermédiaire Aval
Rivière des Pères	Intermédiaire Aval
Rivière Saint-Louis	Amont
Grande Rivière de Vieux-Habitants	Amont Intermédiaire Aval
Rivière Grande Plaine	Amont Aval
Rivière Quatre Bras	Amont
Ravine des Coudes	En Grande Terre
Rivière Saint-Louis	A Marie-Galante

Suite à ce travail, un pré-atlas iconographique des rivières de Guadeloupe rassemble une liste floristique de 205 taxons dont 34 dominants sur la base de 85 inventaires.

Depuis, dans le cadre de l'application de la DCE, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées par ASCONIT Consultants entre 2005 et 2009. Au total 59 échantillons ont été analysés en Martinique et 121 en Guadeloupe. Les inventaires réalisés recensent 208 taxons en Martinique et 253 en Guadeloupe. Notons cependant que ce nombre d'espèces est probablement surestimé. En effet, du fait de l'absence de document de référence facilitant la diagnose et harmonisant l'encodage des taxons, les erreurs de diagnose ont été majorées et certains taxons ont pu être encodés de différentes manières selon la date et l'intervenant taxonomique.

## B. Matériel et méthodes

### 1. Le plan d'échantillonnage

#### a. Le contexte géographique des 2 îles

La Guadeloupe et la Martinique appartiennent aux Petites Antilles situées sur l'arc antillais.

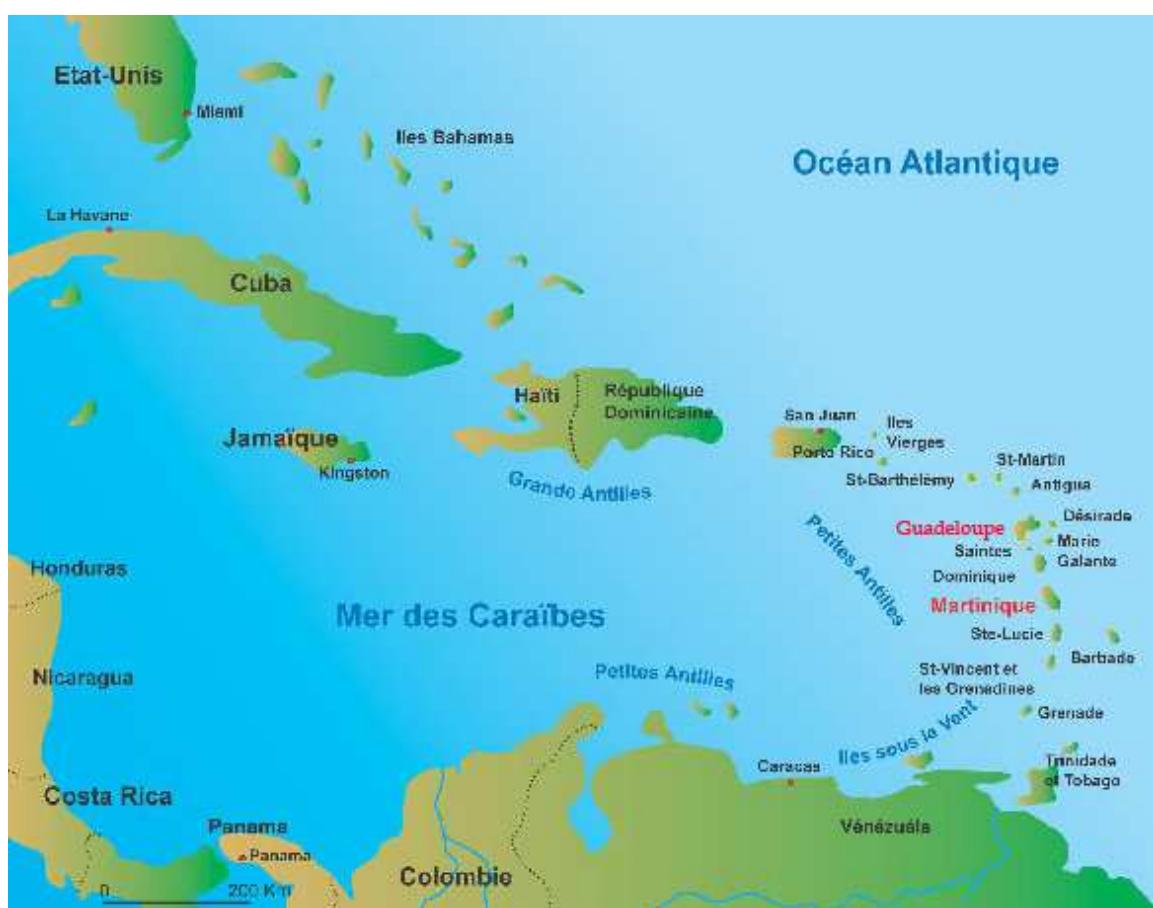


Figure 1 : Situation géographique des Antilles françaises

La Martinique et la Basse-Terre de la Guadeloupe, seule partie de l'île concernée par l'étude, sont toutes deux volcaniques, bien que le volcanisme de la Guadeloupe soit un peu plus actif.

En Martinique, le relief est plus marqué au nord de l'île où se situent la Montagne Pelée et les Pitons du Carbet, tandis que le sud de l'île est caractérisé par les mornes de faible altitude. Les cours d'eau de montagne sont donc également situés au nord de l'île où la pluviométrie est plus importante. Les cours d'eau du sud ont des débits beaucoup moins importants et tous ne sont pas pérennes.

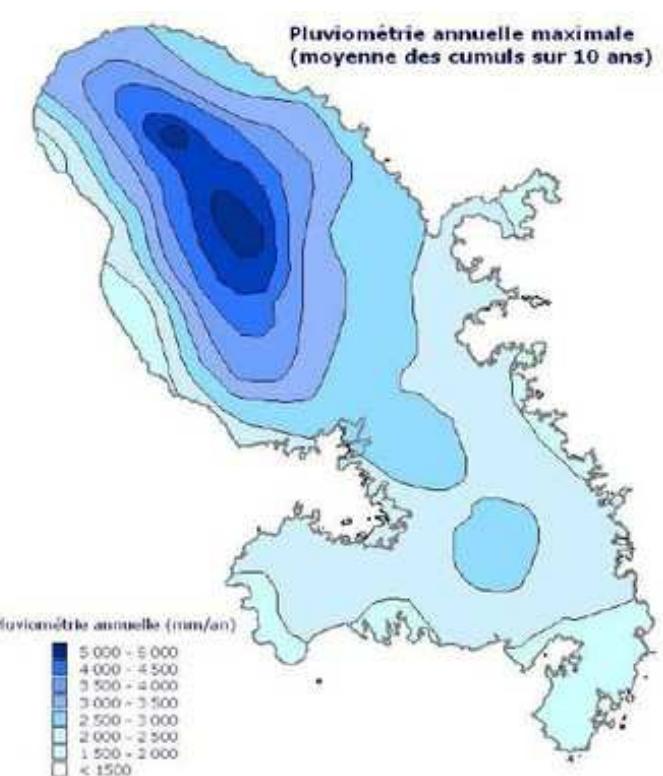
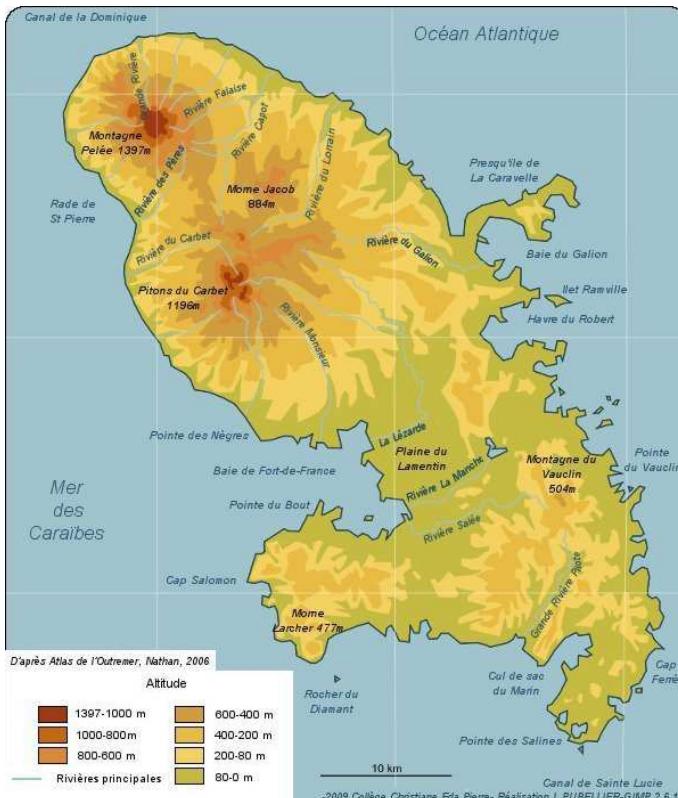


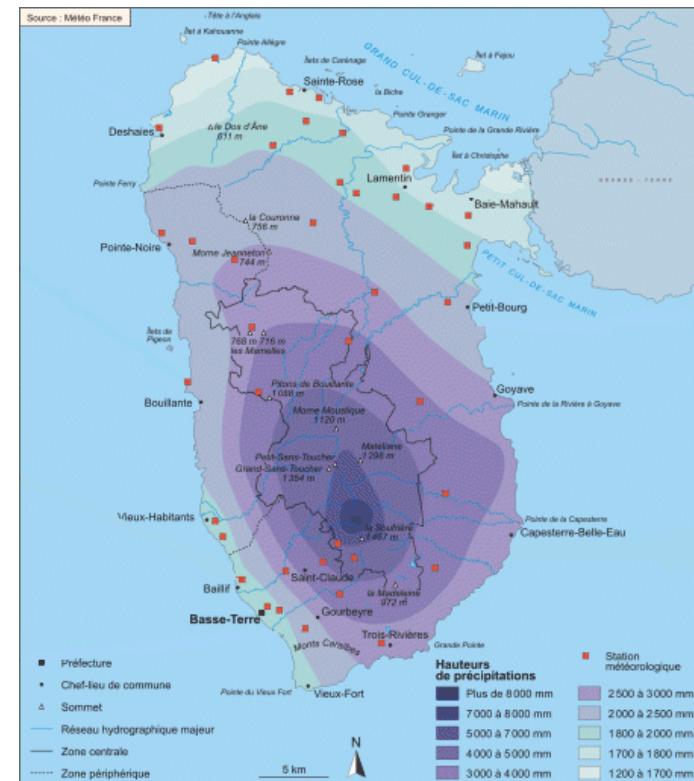
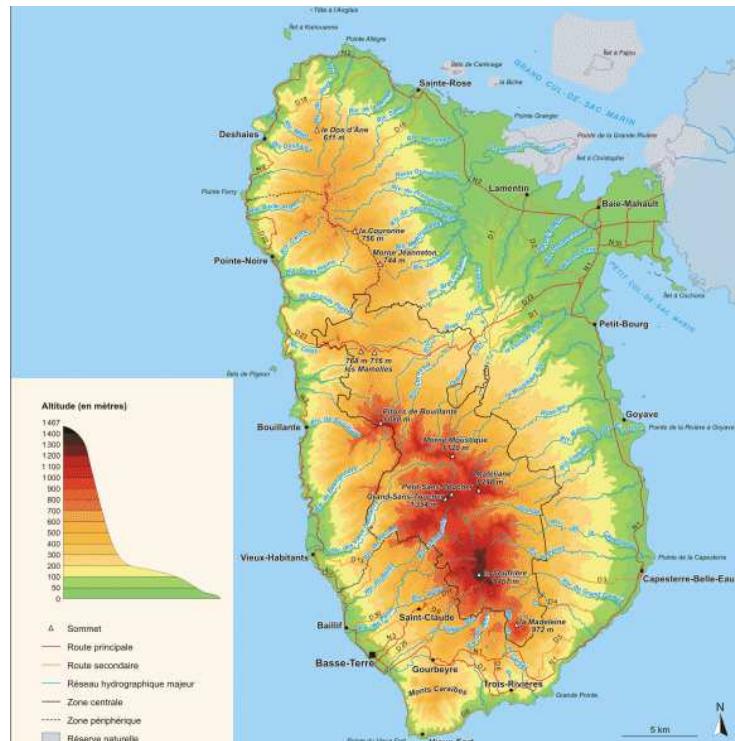
Figure 2 : Le relief<sup>2</sup> et la pluviométrie<sup>3</sup> de la Martinique

<sup>2</sup> Atlas de l'Outremer, Nathan 2006

<sup>3</sup> <http://www.observatoire-eau-martinique.fr/leau-en-martinique/le-climat-1/le-climat>

# Rapport final

En Guadeloupe, les volcans qui se sont succédé au fil du temps, ont créé un chaîne de montagne du nord au sud. Le relief augmente du nord (les volcans les plus anciens) au sud, où se situe la Soufrière (point culminant de l'île à 1467m), encore en activité. La façade Est de l'île est exposée aux vents dominants : les alizés qui sont des vents chauds et humides d'est à nord-est. Cette « côte au vent » est la plus arrosée et a subit une érosion plus importante créant une petite zone de « Plaine » entre les reliefs et le littoral. Au contraire, la « côte sous le vent » de l'île (façade Ouest) reçoit beaucoup moins de pluie, suite à un effet de Foehn marqué qui assèche les masses d'air avant qu'elles ne passent de l'autre côté du relief. L'érosion y est beaucoup moins importante et les cours d'eau ont des faciès turbulents pratiquement jusqu'à leur embouchure.



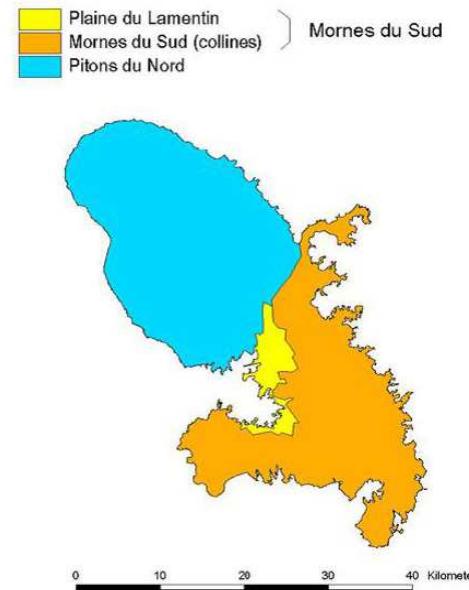
**Figure 3 : Le relief et la pluviométrie de la Guadeloupe (source : Atlas national de la Guadeloupe<sup>4</sup>)**

<sup>4</sup> <http://atlas.parcsnationaux.org/guadeloupe/sommaire.asp>

Les deux îles sont soumises à un climat tropical humide caractérisé par deux saisons fondamentales : une saison sèche (le Carême de février à avril) et une saison humide (l'hivernage de juillet à octobre) au cours de laquelle les pluies sont fréquentes et intenses. Ces deux saisons sont séparées par deux intersaisons plus ou moins marquées. C'est également au cours de l'hivernage que des perturbations prenant naissance dans la zone Est de l'océan atlantique et se développant au-dessus de l'océan atteignent les Antilles, pouvant donner lieu à des phénomènes météorologiques extrêmes. Les périodes de prélèvements ont été fixées dans le but d'illustrer ces deux grandes saisons climatiques. Les conditions météorologiques spécifiques ayant été réellement observées pendant les campagnes de prélèvement de l'étude, pas toujours conformes aux tendances saisonnières habituelles, font l'objet du paragraphe II-C-1.

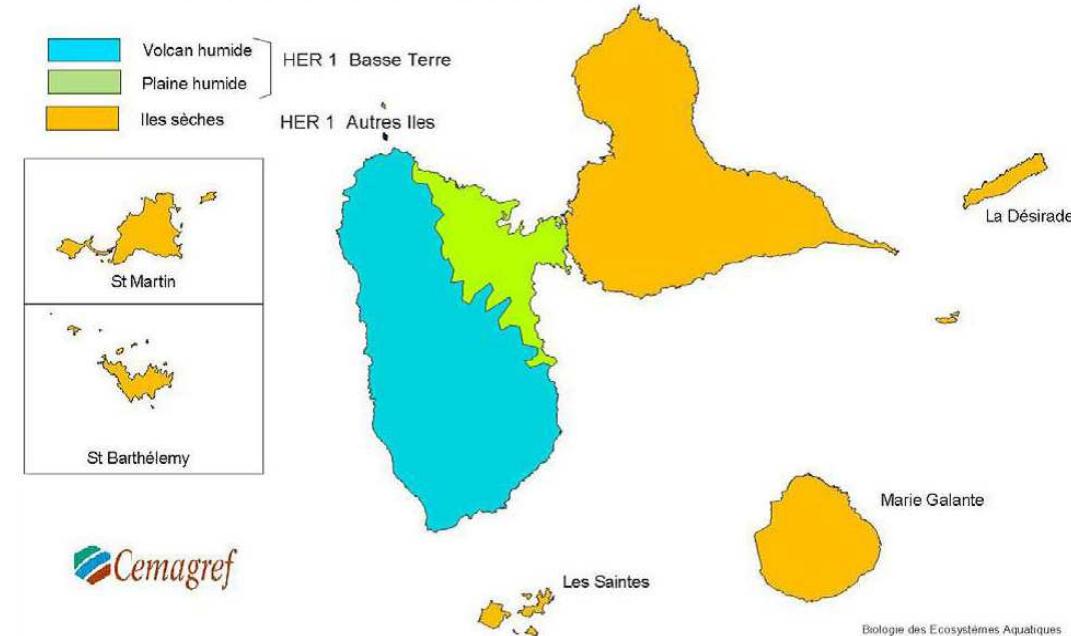
Ces caractéristiques géographiques et climatiques ainsi que la géologie et l'hydrographie ont donné lieu à une régionalisation des écosystèmes aquatiques (**Figure 4**).

### Hydro-écorégions de la Martinique



Bioologie des Ecosystèmes Aquatiques  
Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative  
12/2004

### Hydro-écorégions de la Guadeloupe



**Figure 4 : Hydro-écorégions de la Martinique et de la Guadeloupe (Irstea, mai 2004 pour la Guadeloupe, janvier 2005 pour la Martinique)**

Les hydro-écorégions « Pitons du nord » en ce qui concerne la Martinique et « Volcan humide » pour la Guadeloupe sont assortis d'une zonation amont/aval des cours d'eau. En Guadeloupe, celle-ci repose essentiellement sur la distribution relative des poissons et des crustacés. Cette zonation a ensuite été reprise par analogie en Martinique sans étude des compartiments biologiques (Chandesris et al., 2005, Référence 9). Cette stratification altitudinale n'apparaît pas très pertinente pour le peuplement diatomique. En effet, comme à la Réunion, la partie aval des cours d'eau n'est pas suffisamment importante pour qu'une flore spécifique puisse s'y développer. Le débit, l'hydrodynamisme et la faible longueur totale de la plupart des cours d'eau, le plus souvent adossés à un relief conséquent, soutiennent le flux d'espèces provenant de l'amont, et même l'altération prend difficilement l'ascendant sur la flore naturelle des bassins versants. A terme, cette typologie devra vraisemblablement être reconsidérée.

### b. Le principe du choix des stations

Les stations échantillonnées dans le cadre de cette étude sont constituées des stations appartenant aux réseaux de surveillance et de référence de chaque île. Elles sont complétées par un réseau complémentaire, élaboré selon 2 objectifs : être le plus représentatif de la diversité géographique des 2 îles et notamment des différentes hydro-écorégions et aussi rendre compte le mieux possible de toutes les conditions de pollution rencontrées dans les îles afin de mettre en évidence les taxons caractéristiques de ces conditions extrêmes et leur *preferenda* écologiques.

Ces sites complémentaires se répartissent en 7 catégories :

- Les stations très préservées, indemnes de toute pollution. Elles ont été choisies parmi les stations du réseau de référence. Ont été privilégiées les stations situées à l'amont de cours d'eau étudiés dans leur portion aval.
- Les stations caractéristiques de conditions environnementales particulières comme la Rivière Rouge en Guadeloupe, située en altitude et certainement très influencée par sa proximité avec le volcan.
- Les stations exposées à une pollution par les pesticides. Elles ont été choisies parmi les stations des réseaux « Pesticides » en Martinique et « GREPP » (Groupe Régional d'Etude des Pollutions par les produits Phytosanitaires) en Guadeloupe. Cependant certaines stations du réseau de surveillance sont elles aussi impactées par les pesticides. De même, les stations retenues, parce qu'elles sont impactées par les pesticides, font souvent aussi l'objet d'autres pollutions anthropiques.
- Les stations soumises à une pollution domestique sévère (zone de rejet des stations d'épuration)
- Les stations soumises à des pollutions domestiques diffuses. De nombreuses masses d'eau de Guadeloupe subissent une pollution diffuse mais sévère du fait de la forte concentration de population le long des cours d'eau et de la défaillance voire de l'absence de réseau d'assainissement. Ces stations ont été choisies en côte sous le vent car cette portion de l'île est particulièrement démunie en infrastructure d'assainissement. D'autre part, les conditions bioclimatiques y sont particulières.
- Les stations impactées par une pollution industrielle de type agroalimentaire, notamment les distilleries et les élevages porcins ou de Ouassous.
- Les stations exposées à une pollution industrielle autre (déchetterie, usines de fabrication de béton, de peinture, scierie, usine métallurgique, station d'essence).

Un code couleur a été associé à chaque type de station (**Tableau 4**).

**Tableau 4 : Code couleur associé aux types de stations échantillonées**

type de station	code couleur
station du RCS	vert
station du Réseau de Référence	bleu clair
conditions particulières	olive
station du réseau "Pesticides" et "GREPP"	jaune
pollution domestique	rouge
pollution diffuse	orange
pollution agro-alimentaire	rose
pollution industrielle autre	marron

En Martinique, ces stations ont été choisies en concertation entre ASCONIT, l'Office de l'Eau et la DEAL. En Guadeloupe, ASCONIT, l'Office de l'Eau et la DEAL ont été assistés de Sylvain Chopin (Direction de l'Agriculture et des Forêts, Service de la Police de l'eau), de Véronique Le Clézio et de Guillaume Gerbier (Services Vétérinaires) et de Dominique Monti (Université Antilles Guyane).

Ces stations ont été choisies dans le but de représenter un seul type de pression (pollution organique ou présence de pesticides par exemple). Cependant, cette dichotomie des pressions s'avère être théorique et seules quelques stations situées directement au niveau d'un rejet de STEP sont représentative d'un seul type de pollution. La carte du plan d'occupation des sols de la Guadeloupe en **Annexe 4** illustre la complexité des pressions naturelles et anthropiques auxquelles sont soumis les cours d'eau.

Certaines stations ont été abandonnées ou au contraire ajoutées au cours de l'étude afin de respecter au mieux les objectifs fixés. Lors de sa participation à la 3<sup>ème</sup> campagne de prélèvement en Guadeloupe, François Delmas a évoqué la nécessité de compléter le pool de stations prélevées en Guadeloupe par des stations permettant d'aborder des conditions encore plus dégradées ou bien l'amont et l'aval éloigné de stations altérées déjà prélevées, afin de mieux apprécier l'impact des altérations sur la flore diatomique et de pouvoir situer de manière plus précise le positionnement écologique des communautés et espèces à différentes intensités de gradients d'altération anthropique. Ces stations ont constitué le réseau supplémentaire prélevé uniquement lors de la 5<sup>ème</sup> et dernière campagne.

Les **Tableau 5 et 6** pages suivantes récapitulent les stations prélevées au cours des campagnes réalisées en Martinique et en Guadeloupe.

**Tableau 5 : Liste des stations échantillonnées en Martinique**

	<b>Massé d'eau</b>	<b>Nom station</b>	<b>Code SANDRE</b>	<b>Code Asconit</b>	<b>Type DCE</b>	<b>Camp.0</b>	<b>Camp.1</b>	<b>Camp.2</b>	<b>Camp.3</b>	<b>Camp.4</b>
						<b>Juin.2009</b>	<b>Nov.2009</b>	<b>Mai 2010</b>	<b>Oct./Nov.2010</b>	<b>Avril 2011</b>
Stations des réseaux DCE	Lorrain	Séguineau	08205101	LOS	enquête	X	X	X	X	X
	Grande Rivière Pilote	Aval Bourg Rivière Pilote	08813102	PIB	enquête	X	X	X	X	X
	Monsieur	Pont de Montgéraid	08412102	MOM	enquête	X	X	X	X	X
	Case Navire	Case Navire (bourg Schœlcher)	08302101	CBN	enquête	X	X	X	X	X
	Grand Rivière	Stade de Grand Rivière	08102101	GRS	Surveillance	X	X	X	X	X
	Lorrain	Amont confluent Pirogue	08203101	LOP	Surveillance	X	X	X	X	X
	Carbet	Fond Baise	08322101	CAF	Surveillance	X	X	X	X	X
	Lézarde	Palourde Lézarde	08501101	PAL	Surveillance/Référence	X	X	X	X	X
	Petite Rivière	Brasserie Lorraine	08533101	PRB	Surveillance ACER	X	X	X	X	X
	Anse Céron	RD 10 Habitation Céron	08015101	ACR	Surveillance ACER	X	X	X	X	X
	Capot	Pr AEP-Vivé-Capot	08115101	CAV	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Bezaudin	Pont RD24 Sainte-Marie	08213101	BER	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Galion	Grand Galion	08225101	GAG	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Oman	Dormante	08824101	OMD	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Rivières des Coulisses	Petit Bourg	08803101	COP	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Lézarde	PONT RN1	08521102	LEP	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Lézarde	Gué de la Désirade	08521101	LEG	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Lézarde	Pont Belle-Île	08504101	PLB	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Madame	Pont de Chaines	08423101	MAC	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Roxelane	Saint Pierre (ancien pont)	08329101	ROS	Surveillance et opérationnel	X	X	X	X	X
	Grand Rivière	Trou Diabresse	08101101	GRD	Référence	X	X	X	X	X
	Lorrain	Trace des Jésuites	08201101	LOR	Référence	X	X	X	X	X
	Galion	Gommier	08221101	GAL	Référence	X	X	X	X	X
	Grande Rivière Pilote	Beauregard	08811101	PIL	Référence	X	X	X	X	X
	Case Navire (Duclos)	Tunnel Didier	08301101	CAN	Référence	X	X	X	X	X
	Carbet	Source Pierrot	08320101	CAR	Référence	X	X	X	X	X
	Vauclin	Pont D5 - La Broue	08703101	VAU	Référence	X	X	X	X	X
	Anse Céron	Amont prise canal Habitation Céron	08014101	CER	Référence	X	X	X	X	X

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées

Rapport final

		Masse d'eau	Nom station	Code SANDRE	Code Asconit	Camp.1 Nov.2009	Camp.2 Mai 2010	Camp.3 Oct./Nov.2010	Camp.4 Avril 2011
Autres stations complémentaires	Conditions géochimiques particulières	Blanche	Pont de l'Alma	08511101	BLA	X	X	X	X
		Couleuvre		08015102	COC	X	X	X	X
		Grande Ravine	2 choux	08320102	CAD	X	X	X	X
		Paquemar	Paquemar	non codée	PAQ		X	X	X
		Absalon	Absalon	non codée	ABS		X	X	X
	Réseau pesticides	Deux courants	Pont Séraphin	08616101	DCS	X	X	X	X
		Basse Pointe	Amont Bourg Basse Pointe	08105101	BPB	X	X	X	X
		Rouge	Pont RN sur Rouge	08209101	ROR	X	X	X	X
		Capot	Pont McIntosh	08113101	CAM	X	X	X	X
		Simon	Fontane	08623101	SIF	X	X	X	X
		Pocquet	Pocquet RN1	08107101	POR	X	X	X	X
	STEP	Canal de Ducos	STEP Ducos 1	08548101	CDS	X	X	X	X
		Carbet	STEP Carbet	08322104	CAS	X	X	X	X
		Ravine	STEP Ste Luce 2	08828101	FHS	X	X	X	X
		Ravine	STEP Vauclin 2	08624102	GCS	X	X	X	X
		La Tracée	STEP Gros Morne 2	08223101	LTS	X	X	X	X
		Fond Lahaye	STEP Schoelcher 2	08303101	FLS	X	X	X	X
	Domestique diffus	Fond St Jacques	station utilisé dans plan Chlordecone	08215101	SJF	X	X	X	X
		Desroses	quartier Desroses	08613101	DES	X	X	X	X
	Pollution industrielle de type agro-alimentaire	Petite Pilote	Distillerie La Mauny/ 3 Rivières	08812103	PPM	X	X	X	X
		Roxelane	Distillerie Depaz	08329102	ROD		X		X
		La Tracée	Deynel (confiture+ jus de fruit)	08223102	LTD	X	X	X	X
		Deux Courants	Abattoir de volailles	08616102	DCA	X	X	X	X
		François	Porcherie SOPODA Morne Rouge	08113102	FRP	X	X	X	X
	Pollution industrielle autre	Galion	Siapoc peinture	08225102	GAS	X	X	X	X
		Capot	Centre stockage déchet Le Poteau	08115102	CAP	X	X	X	X
		Longvilliers	Station TOTAL	08402102	LOT	X	X	X	X

Tableau 6 : Liste des stations échantillonées en Guadeloupe

		Masse d'eau	Nom station	code station ASCONIT	code masse d'eau	code station SANDRE	Camp1 Nov.2009	Camp2 Mai2010	Camp3 Nov.2010	Camp4 Mars2011	Camp5 Oct.2011	
Réseau DCE Surveillance	stations représentatives des masses d'eau, suivies dans le cadre du programme de contrôle de surveillance	Grande Rivière de Capesterne aval	pont RN1	CAA	FRIR16	07008015	X	X	X	X	X	
Réseau DCE Référence		Rivière du Grand Carbet	pont RN1	GCP	FRIR18	07009010	X	X	X	X	X	
		Rivière Bras David aval	INRA	BDI	FRIR02	07012120	X	X	X	X	X	
		Rivière Bras David amont	maison de la Forêt	BDM	FRIR41	07012220	X	X	X	X	X	
		Rivière du Galion	amont embouchure	GAP	FRIR23	07016001	X	X	X	X	X	
		Rivière Grande Anse amont	Moscou	GAM	FRIR45	07017650	X	X	X	X	X	
		Grande Rivière à Goyave aval 1	amont SIS Bonne-Mère	GGA	FRIR05	07021016	X	X	X	X	X	
		Rivière Grande Plaine aval	amont pont RN2	GPA	FRIR32	07022008	X	X	X	X	X	
		Rivière aux Herbes	Choisy	HEC	FRIR24	07023495	X	X	X	X	X	
		Rivière la Lézarde aval	Diane	LED	FRIR08	07026037	X	X	X	X	X	
		Rivière Moustique Petit-Bourg aval	pont RN1	MPP	FRIR10	07028005	X	X	X	X	X	
		Rivière Moustique Petit-Bourg amont	Trianon	MPT	FRIR09	07028110	X	X	X	X	X	
		Rivière des Pères	amont embouchure	PEE	FRIR25	07032002	X	X	X	X	X	
		Grande Rivière de Vieux Habitants aval	amont embouchure	VHE	FRIR28	07044007	X	X	X	X	X	
		Grande Rivière de Vieux Habitants amont	amont gué	VHG	FRIR27	07044250	X	X	X	X	X	
Stations complémentaires Réseau DCE Référence	conditions préservées	Rivière du Plessis	Vanibel	PLV	FRIR26	07046295	X	X	X	X	X	
		Rivière Nogent aval	pont RN1	NOA	FRIR36	07047007	X	X	X	X	X	
		Rivière du premier Bras aval	Severin	PBS	FRIR04	07048110	X	X	X	X	X	
		Rivière Bras de sable aval	Chaudé	BSC	FRIR03	07049040	X	X	X	X	X	
		Rivière la Rose aval	Rose-Jardin d'eau	ROJ	FRIR12	07050012	X	X	X	X	X	
		Grande Rivière de Capesterne amont	La Digue	CAP	FRIR40	07008185	X	X	X	X	X	
		Rivière du Galion	Bassin bleu	GAB	FRIR01	07016600	X	X	X	X	X	
		Grande Rivière à Goyave amont	amont prise d'eau	GGP	FRIR15	07021219	X	X	X	X	X	
		Rivière Moustique Ste Rose aval	Débauchée	MSD	FRIR23	07045020	X	X	X	X	X	

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**

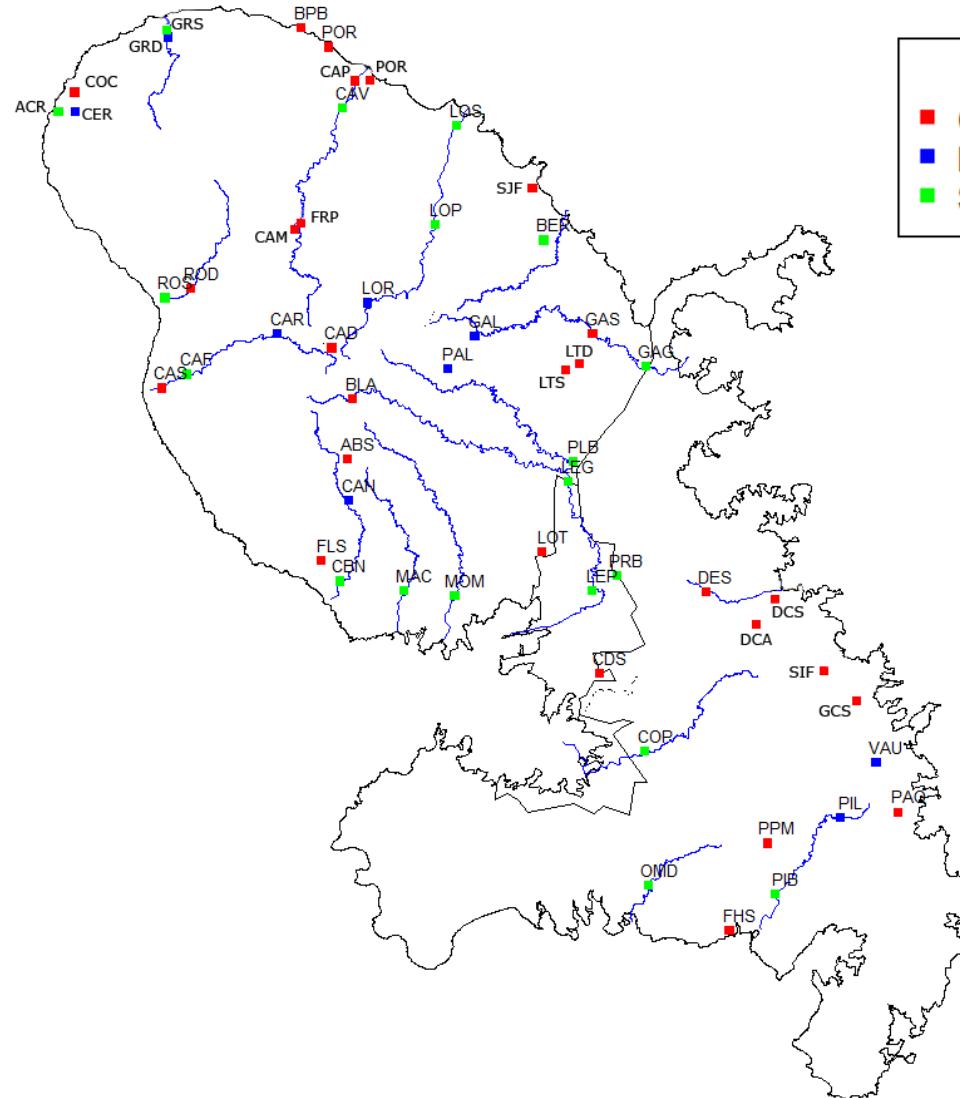
**Rapport final**

		Masses d'eau	Nom station		code masse d'eau	code station SANDRE	Camp1 Nov.2009	Camp2 Mai2010	Camp3 Nov.2010	Camp4 Mars2011	Camp5 Oct.2011
Autres stations complémentaires	conditions particulières	Rivière Rouge	Matouba	ROM			X	X	X	X	X
		Rivière Sarcelle	pont D33	SAP				X			
	Réseau GREPP	Rivière Moustique Ste Rose aval	amont embouchure	MSA	FRIR40	07045008	X	X	X	X	X
		Rivière Grande Anse aval	amont pont D6	GAA	FRIR22	07017005	X	X	X	X	X
		Rivière aux Herbes	Marché	HEM	FRIR24	07023005	X	X	X	X	X
	Pollution domestique (STEP)	Rivière Baret	Bellevue	BAB			X	X	X	X	X
		Ravine Grand Boucan	La Boucan	GBB				X	X	X	X
		Ravine de Onze Heure	Petit-Bourg	OHP				X	X	X	X
		Petite Rivière à Goyave	pont D33	PGG	FRIR14			X	X	X	X
		Rivière du Pérou aval	Petit Pérou	PEP	FRIR17			X	X	X	X
		Rivière aux Herbes	les Yuccas	HEY	FRIR24			X	X	X	X
	Pollution diffuse	Rivière Petite Plaine	gué	PPG	FRIR26		X	X	X	X	X
		Rivière de Beaugendre	pont RN2	BEP	FRIR29			X	X	X	X
		Rivière du Plessis	pont RN2	PLP	FRIR33			X	X	X	X
	pollution industrielle de type agro-alimentaire	Ravine Saint-Nicolas	Montebello	SNM			X				
		Canal issu Caférière	Longuetateau	CCL				X	à sec	X	à sec
		Rivière Moustique Petit-Bourg aval	Duquerry	MPD	FRIR10			X	X	X	X
		Rivière Sens	Bisdary	SEB				X	X	X	X
		Ravine bleue	aval élevage de Ouassous	RBA				X	X	X	X
		Rivière Petite Plaine amont	Confiturerie	PPC	FRIR47				X	X	X
		Ravine Carrière	Bonne-Mère	CAB		en carême uniquement		X		X	X
	pollution industrielle autre	Rivière Salée	Espérance	SAE			X	X	X	X	X
		Ravine Grossou	ZA Lamentin	GRL				X	X	X	X
		Petite Rivière à Goyave	pont RN1	PGP	FRIR10			X	X	X	X
		Rivière Moustique Petit-Bourg aval	pont D33, station lavage	MPS	FRIR14			X	X	X	X

## Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées

### Rapport final

		Masse d'eau	Nom station		code masse d'eau	code station SANDRE	Camp1 Nov2009	Camp2 Mai2010	Camp3 Nov2010	Camp4 Mars2011	Camp5 Mars2011
stations supplémentaires	comparaison avec GBBg5	Ravine Grand Boucan	aval éloigné STEP	XBA							X
		Ravine Grand Boucan	amont STEP	XBM							X
	comparaison avec HEYg5	Rejet STEP Les Yuccas	rejet direct	XHY							X
	comparaison avec PPCg5	Rejet confiturerie	rejet direct	XPC							X
	pollution agro-alimentaire	Ravine aux avocats	Choisy	XRA							X
	comparaison avec PPGg5	Rejet step Goyave	rejet direct	XSG							X
	comparaison avec SAEg5	Rejet bassins CSDND	sortie tuyau	XSI							X
	pollution agro-alimentaire	affluent Grande Rivière de Vieux habitants	amont du gué	XVH							X
	comparaison avec PEPg5	Rejet STEP Pérou	rejet direct	XSP							X



**RESEAUX**

- Complémentaire
- Référence
- Surveillance

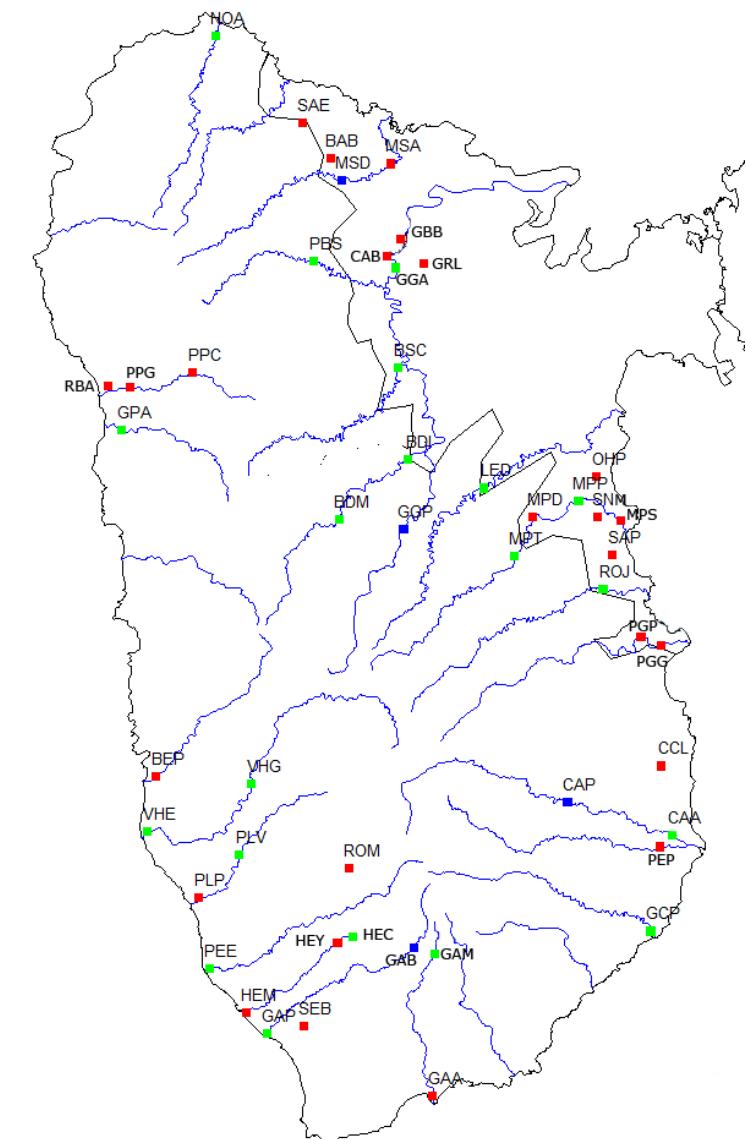
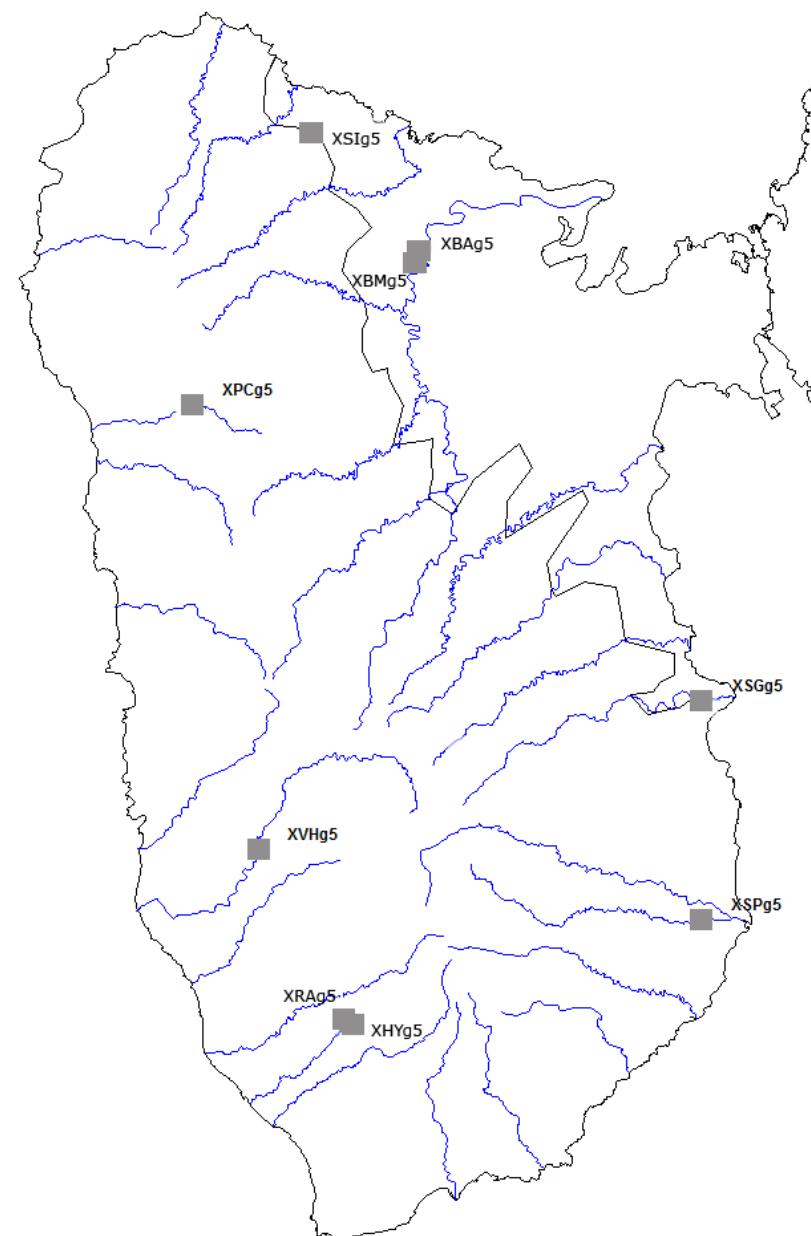


Figure 5 : Carte des stations de prélèvement en Martinique et en Guadeloupe

c. Les campagnes de prélèvement

Les campagnes de prélèvement ont été réalisées soit en période de carême soit en période d'hivernage afin de pouvoir apprécier l'influence saisonnière sur les communautés diatomiques et de pouvoir ainsi déterminer la période idéale de prélèvement dans le cadre d'une mise en œuvre en routine de l'indice. Les cartes des stations de prélèvements de l'étude sont données en **Figure 5** page précédente. Le **Tableau 7** en page suivante reprend le nombre de stations prélevées en fonction des campagnes. Cinq campagnes ont été analysées dans chacune des 2 îles. La campagne 0 (Camp0) en Martinique correspond à la campagne annuelle réalisée dans le cadre du réseau de contrôle de surveillance. Elle ne comporte pas de station du réseau complémentaire. En Guadeloupe, cette campagne a été remplacée par une 5<sup>ème</sup> campagne réalisée en hivernage 2011. Celle-ci s'est vue enrichie de 9 stations supplémentaires (Erreur ! Référence non valide pour un signet. ci-dessous).



**Figure 6 : Carte des stations de prélèvement du réseau supplémentaire en Guadeloupe (Campagne 5)**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**Tableau 7 : Nombre de stations prélevées au cours des 5 campagnes de prélèvement**

<b>Stations</b>	<b>Camp0</b>	<b>Camp1</b>	<b>Camp2</b>	<b>Camp3</b>	<b>Camp4</b>	<b>Camp5</b>	<b>Total</b>
	Carême 2009	Hivernage 2009	Carême 2010	Hivernage 2010	Carême 2011	Hivernage 2011	---
<b>Martinique</b>	28	52	55	54	55	---	244
<b>Guadeloupe</b>	---	45	47	46	46	55	239
<b>TOTAL relevés Antilles</b>							483

Les paramètres physico-chimiques *in situ* ont été mesurés lors des prélèvements de diatomées, conformément au guide technique pour « le prélèvement d'échantillons en rivière – Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques »<sup>5</sup>. Les prélèvements d'eau en vue d'analyse de 21 paramètres chimiques au laboratoire ont été réalisés directement pour le compte des Offices de l'Eau dans les stations du réseau de surveillance et par ASCONIT pour les stations des réseaux complémentaires et supplémentaires. Les paramètres analysés, méthodes et seuils de quantification au laboratoire sont récapitulés en **Annexe 2**.

#### **d. Bilan des échantillons analysés**

En Guadeloupe, certains échantillons prélevés se sont révélés être inexploitables

- soit par manque de matériel (Rivière Grande Plaine aval lors des campagnes 1 et 3, Ravine Grossou lors de la campagne 5 après un curage du site)
- soit par la localisation erronée du site de prélèvement d'eau (Rivière aux Herbes à Choisy lors des campagnes 1, 2 et 3)

Le nombre de couple « inventaires diatomiques/composition physico-chimique de l'eau » exploitable est de fait inférieur au nombre d'échantillons prélevés (**Tableau 8**).

Tableau 8 : Nombre de couples « inventaires diatomiques/composition physico-chimique de l'eau »

	<b>Camp0</b>	<b>Camp1</b>	<b>Camp2</b>	<b>Camp3</b>	<b>Camp4</b>	<b>Camp5</b>	
	Carême 2009	hivernage 2009	carême 2010	hivernage 2010	Carême 2011	hivernage 2011	Total échantillons
<b>En Martinique</b>	28	52	55	54	55		244
<b>En Guadeloupe</b>		43	45	43	46	54	231
<b>TOTAL couples Antilles</b>							475

<sup>5</sup> Agence de l'Eau Loire Bretagne & Gay Environnement (2006) : Le prélèvement d'échantillons en rivière – Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques.

De plus, dans certaines stations de Guadeloupe, les prélèvements n'ont pas toujours été réalisés au même endroit :

- dans la station Moustique Petit-Bourg aval, les prélèvements de diatomées étaient effectués à l'aval du pont de la RN1 alors que les prélèvements d'eau étaient réalisés sous le pont de la D33, soit plus en aval, sur le site de la station Moustique Petit-Bourg aval, pont D33-station de lavage (MPS). Le site de prélèvements d'eau a été modifié à partir de la campagne 4 pour une meilleure corrélation entre les résultats des analyses diatomiques et chimiques de l'eau. Le peuplement diatomique prélevé lors de la campagne 1 a néanmoins été associé aux analyses chimiques de l'eau prélevée plus à l'aval. En ce qui concerne les campagnes 2 et 3, des prélèvements de diatomées ont été réalisés à la station MPS et ce sont ceux-ci qui ont été associés aux analyses chimiques de l'eau. Pour les campagnes 4 et 5, les prélèvements de diatomées et d'eau ont été réalisés au même endroit pour chacun des 2 sites.
- Sur les stations situées sur la Grande Rivière de Vieux-Habitants, respectivement à l'amont et à l'aval du cours d'eau, les sites de prélèvement d'eau et de diatomées ont été modifiés pour un meilleur ajustement à partir de la 4<sup>ème</sup> campagne.
- Les modifications hydro-morphologiques importantes de la station située sur la Grande Rivière à Goyave amont, amont prise d'eau, entre les 2 premières campagnes ont entraîné une modification des sites de prélèvements (Les prélèvements d'eau et de diatomées étant réalisés au même endroit).
- Dans la Rivière du Pérou, les prélèvements de diatomées et d'eau ont toujours été réalisés conjointement soit :
  - o A la confluence du rejet de la STEP et de la Rivière du Pérou lors des Campagnes 1 et 5,
  - o Directement dans le rejet de la STEP lors des Campagnes 3 et 4,
  - o Dans la veine centrale de la Rivière du Pérou lors de la Campagne 2.
- Les prélèvements de la Rivière Moustique Petit-Bourg à Duquerry ont été réalisés directement à l'aval du rejet de l'élevage de porc lors des campagnes 1 et 2 et quelques dizaines de mètres à l'aval à partir de la campagne 3.
- Les prélèvements de la Rivière du Plessis, pont RN2 (PLP), ont été décalés de l'aval direct du pont de la RN à quelques dizaines de mètres à l'aval à partir de la campagne 2.

## 2. Les prélèvements de diatomées

### a. Méthode de prélèvement

Les prélèvements ont été réalisés conformément à la norme NF T 90-354 de décembre 2007, dont certaines recommandations sont rappelées ci-dessous. Compte-tenu des caractéristiques particulières liées à l'environnement tropical insulaire et au peuplement diatomique des Antilles Françaises ainsi qu'aux objectifs de cette étude, des adaptations se sont avérées nécessaires. Elles sont précisées en « remarque ».

- Le prélèvement en faciès lotique est préconisé en priorité, même si ce n'est pas le faciès dominant du site. Les récoltes ainsi réalisées minimisent l'effet de dérive-dépôt des diatomées sur les substrats. Les milieux lenticules ne sont prospectés que par défaut et l'on privilégiera les supports verticaux dans ce cas de figure.

**Remarque :** *Dans le cas particulier de cette étude, les zones impactées des cours d'eau ont été privilégiées, même si leur faciès n'était pas lotique. Les substrats ont été délicatement rincés dans le courant afin d'éliminer au maximum les dépôts de sédiments et de valves provenant de l'amont du cours d'eau.*

- Un seul échantillon est réalisé par station quel que soit le nombre de supports prospectés. L'échantillonnage ne doit être effectué que sur un seul type de support pour toute la station.

La nature des supports à échantillonner est hiérarchisée comme suit :

- o Support dur naturel le plus stable possible (blocs en priorité, puis galets, et enfin cailloux),

**Remarque :** *Compte tenu du caractère torrentiel des cours d'eau de la Guadeloupe et de la Martinique (transport solide important) une attention particulière a été portée au choix des supports afin de s'assurer qu'ils aient une stabilité maximale même lors de forts événements hydrauliques et qu'ils aient été immergés toute l'année.*

- o Support dur artificiel (piles de pont, quais,...),
- o Support végétal, si les deux précédents font défaut (expression de végétaux ou raclage des feuilles et des tiges).

- Aucun prélèvement sur support meuble (sable, vases,...) ni sur bois n'a été réalisé.
- La surface à échantillonner afin d'obtenir une flore diatomique représentative est d'environ 100 cm<sup>2</sup> minimum, quel que soit le nombre et la nature des supports prospectés et la technique d'échantillonnage utilisée. Dans certain cas, cette surface pourra être étendue à 1000 cm<sup>2</sup> (cours d'eau très pauvre en algues). Généralement, l'échantillonnage est réalisé sur 5 substrats différents (20 cm<sup>2</sup> par substrat).

**Remarque :** *L'abondance, globalement faible, des diatomées aux Antilles françaises est relativement variable d'une saison à l'autre et encore plus d'un cours d'eau à un autre. La surface échantillonnée a donc été adaptée à l'abondance estimée de matériel biologique. Néanmoins, le nombre de substrats prélevés a toujours été supérieur à 10 (parfois 20 ou plus) pour une surface minimale de l'ordre de 1000 cm<sup>2</sup>.*

- L'échantillon ainsi récolté sur le terrain est conditionné immédiatement par fixation au formol neutralisé (10 %). Quelquefois, la quantité de formol peut être augmentée en fonction de la quantité de matière organique récoltée afin de s'assurer de sa bonne conservation.
- La description générale de la station, le schéma de la station ainsi que des photos sont consignés dans les fiches remplies lors de chaque prélèvement de diatomées (Compte-rendu d'intervention de chaque campagne).
- Les paramètres *in situ* (Température de l'eau, concentration en O<sub>2</sub>, taux de saturation en O<sub>2</sub>, pH, conductivité) ont été mesurés et consignés dans la fiche terrain lors de chaque prélèvement de diatomées.

**Remarque :** Dans certains cas, les mesures des paramètres *in situ*, les prélèvements d'eau et de diatomées n'ont pas été réalisés dans la veine centrale du chenal principal du cours d'eau mais à proximité du point de rejet ciblé, ou dans son sillage (Rivière du Pérou, Petite Rivière à Goyave à l'aval des STEP, Rivière du Carbet à l'aval de la STEP, Roxelane à l'aval de la distillerie Depaz).

### 3. L'inventaire des diatomées

#### a. Le traitement des échantillons

Les échantillons de la première campagne ont été envoyés au laboratoire de l'agence ASCONIT de Toulouges où la préparation et le montage des lames de diatomées ont été réalisés 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 le protoplasme et, le cas échéant, à l'acide chlorhydrique (élimination des carbonates). Ils sont ensuite centrifugés et les culots sont rincés plusieurs fois à l'eau distillée pour enlever toute trace d'eau oxygénée.

Le traitement de cette première campagne s'est révélé insuffisant pour réaliser une analyse dans des conditions optimales. C'est pourquoi, tous les prélèvements suivants, que ce soit en Martinique comme en Guadeloupe, ont été traités au laboratoire de Martinique. Des aménagements du protocole décrit dans la norme ont été mis au point progressivement pour améliorer la qualité des lames : après un traitement prolongé avec l'eau oxygénée concentrée à froid, 2 cycles complets de traitement à l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à chaud + Acide chlorhydrique sont systématiquement réalisés avant les rinçages successifs.

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).

Une partie aliquote des échantillons traitée a été conservée dans l'éthanol en vue d'archivage, une autre partie a été conditionnée en vue de l'examen en microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons.

#### b. La lecture des lames

Chaque préparation a été examinée au microscope (Leica DMLB en Martinique et OLYMPUS BX51 en Guadeloupe) avec un grossissement x1000 sous objectif à immersion. Les observations sont réalisées en contraste de phase et en fond clair. Après un balayage exhaustif de la lame afin d'identifier le plus d'espèces possibles, un comptage par champs (balayage par transect) est effectué sur au moins 400 valves afin de dresser un inventaire taxonomique. Le nombre de valves à examiner devra faire l'objet d'une validation par le comité de pilotage de l'étude en fonction de l'analyse statistique des comptages par tranche de 100 valves qui ont été effectués sur 6 rivières de Martinique et de Guadeloupe.

#### c. La bancarisation des données

Les inventaires ainsi réalisés ont été compilés dans une base de données spécifique d'OMNIDIA. Cette base a préalablement été incrémentée par les espèces encore indéterminées et numérotées, au fur et à mesure de leur création.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Ce logiciel permet ensuite d'extraire les résultats des inventaires pour chaque station, exprimés par l'abondance relative (en %) de chaque taxon.

**d. L'acquisition des illustrations en microscopie optique et électronique**

Toutes les espèces de diatomées inventorierées sur une préparation ont été photographiées au moins en 1 exemplaire. Ces photographies sont ensuite compilées afin de réaliser une planche illustrative de l'inventaire de la station. Les meilleures photographies de chaque taxon seront ensuite réunies pour illustrer les **fiches taxons** qui synthétiseront toutes les données disponibles pour le taxon concerné. Pour chaque photographie réalisée, le nom, la taille (longueur, largeur), le nombre des stries et de fibules, le nom de la station, la campagne de prélèvement et le n° de la photographie sont compilés dans une base Access.

N°	code taxon	new code taxon	code statut	campagne	date	longu.	nom photo	taux repixel	commentaire	dossier
4179 GDEC	GDEC	PGPg2	MAI2010		19	1130002	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4180 EOS2	EOS9	PGPg2	MAI2010		6	1130003	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4181 EOS2	EOS9	PGPg2	MAI2010		11	1130005	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4182 EOS2	EOS9	PGPg2	MAI2010		14	1130007	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4183 EOS2	EOS9	PGPg2	MAI2010		7	1130008	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4184 EOS2	EOS9	PGPg2	MAI2010		14	1130012	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4185 NA25	NA25	PGPg2	MAI2010		8	1130012-15	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4186 CBAC	CBAC	PPCg2	MAI2010		20	1130017	500ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(6)	
4187 NVD1	NVD1	HECg2	MAI2010		7	1130002	520ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(7)	
4188 ENC3	ENC3	LEDg2	MAI2010		44	1130004	520ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(7)	
4189 ENC3	ENC3	LEDg2	MAI2010		47	1130006	515ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(7)	
4190 NGRE	NGRE	PEEG2	MAI2010		19	1130008	520ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(7)	
4191 EOS2	EOS9	NOAg2	MAI2010		8	1160001	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4192 SSTG	SSTG	BSGg2	MAI2010		12	1160002	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4193 EOCO	EOCO	ROJg2	MAI2010		11	1160004-5	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4194 FCRP	FCRP	ROJg2	MAI2010		25	1160009	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4195 CRA1	CRA1	ROJg2	MAI2010		17	1160011	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4196 GO40	GO40	MSDg3	NOV2010		29	1160012	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4197 LSAX	LSAX	MSAg3	NOV2010		18	1160014	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4198 GANG	GANG	GBBg3	NOV2010		21	1160015-16	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4199 NAR1	NAR1	GBBg3	NOV2010		7	1160017	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4200 EOS3	EOS3	OHPg3	NOV2010		7	1160018	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4201 DIA1	DIA1	PPCg3	NOV2010		23	1160022	460ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4202 PI19	PI19	PPCg3	NOV2010		18	1160024	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4203 SID1	SID1	PPCg3	NOV2010		14	1160026	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	
4204 DIA8	DIA8	PPCg3	NOV2010		20	1160028-29	480ppm	photo def	corrections EOS4-NVDS-NVD1(8)	

**Figure 7 : Extrait de la base de données Access**

Après avoir fait un premier bilan des espèces à illustrer en microscopie électronique en priorité (taxons dominants et/ou ayant un intérêt particulier), les échantillons ont été sélectionnés et préparés en vue des examens en microscopie électronique. Quelques gouttes de ces échantillons ont été déposées sur des lamelles. Après séchage, la concentration en diatomées a été appréciée au microscope optique au grossissement x40, et, le cas échéant, corrigée. Ces lamelles ont ensuite été métallisées (dépôt d'un fine couche de métal conducteur composé d'un mélange d'or et de palladium) avant d'être examinées en haut vide au microscope électronique. Plusieurs microscopes électroniques ont été utilisés :

- **Quanta 250 (FEI Company, Eindhoven, The Netherlands)**<sup>6</sup> de l'université Antilles Guyane, par ASCONIT. Les paramètres utilisés sont :
  - o puissance : 20kv,
  - o taille des spots : 3,
  - o mode : secondary electron,
  - o vitesse d'acquisition des images : 100 à 200µs.
- **ZEISS EVO 50 (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Allemagne)** de la plate-forme CREMEM de l'Université Bordeaux 1, par Michel Coste et Elisabeth Sellier dans le cadre de l'expertise taxonomique réalisée par l'IRSTEA.
- **JEOL-JSM 6700F (JEOL Ltd., Tokyo, Japan)** avec la collaboration de R. Le Cohu, C. Deshayes et S. Le Blond-Duplouy (Université Paul Sabatier, Toulouse).

Les photos ainsi acquises ont été listées dans un fichier Excel.

<sup>6</sup> Matériel financé par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, la Région Guadeloupe et l'Europe (FEDER)

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

A	B	C	D	E	F	G	H	I
	nom taxons ou taxon supposé ou genre	vue int ou ext (I/E) ; valvaire ou connective ( / )	station	n° photo	exploitable (O/N)	date	MAJ fiches taxons	Remarques
1								
395	395 EOMI-EO04	E	GRLq4	11	O	02/05/2012	01/06/2012	
396	396 Achnanthidium sp. VsR	E	GRLq4	12	O	02/05/2012	01/06/2012	
397	397 EO53-EO05	E	GRLq4	13	O	02/05/2012	01/06/2012	
398	398 CMLF	I	GRLq4	14	O	02/05/2012	12/06/2012	
399	399 BRA4-BNE1	E	GPAq4	1	O	02/05/2012	01/06/2012	
400	400 ACH2-AD19 VsR	E	GPAq4	2	O	02/05/2012	01/06/2012	
401	401 ACH2-AD19 VsR	E	GPAq4	3	O	02/05/2012	01/06/2012	
402	402 ACH2-AD19 VsR	E	GPAq4	4	O	02/05/2012	01/06/2012	
403	403 GEXL-G055	E	GPAq4	5-8	O	02/05/2012	01/06/2012	
404	404 BNEO-BNE2	E	GPAq4	9	O	02/05/2012	01/06/2012	
405	405 ACH2-AD19 VR	E	GPAq4	10	O	02/05/2012	01/06/2012	
406	406 BRA4-BNE1	I	GPAq4	11	O	02/05/2012	01/06/2012	
407	407 NFIC	E	GPAq4	12	O	02/05/2012	14/06/2012	
408	408 BRA2-BR01	E	GPAq4	13	O	02/05/2012	01/06/2012	
409	409 ACH2-AD19 VR	E	GPAq4	14	O	02/05/2012	01/06/2012	
410	410 EO53-EO05	E	XSGq5	1	O	03/05/2012	01/06/2012	
411	411 EO53-EO05	E	XSGq5	2	O	03/05/2012	01/06/2012	
412	412 EO53-EO05	E	XSGq5	3	O	03/05/2012	01/06/2012	
413	413 NPAL-NP01	E	XSGq5	4	O	03/05/2012	12/06/2012	
414	414 Luticola	I	XSGq5	5	O	03/05/2012		
415	415 NPAL-NP01	I	XSGq5	6-7	O	03/05/2012	12/06/2012	
416	416 CEUG VsR	E	XSGq5	8	O	03/05/2012	25/06/2012	
417	417 ND02	I	XSGq5	9	O	03/05/2012	11/06/2012	
...	...	...	...	...	...	02/05/2012	14/06/2012	

**Figure 8 : Extrait du fichier Excel « liste des photos acquises en MEB »**

#### e. L'harmonisation des données

Bien que la même méthodologie ait été respectée, les inventaires floristiques ont été réalisés indépendamment dans chacune des 2 îles, par 2 opérateurs distincts. Chaque espèce indéterminée a été numérotée. Les jeux de données ont été confrontés à la fin de la phase d'acquisition des données floristiques. Les photos des espèces indéterminées ont été examinées et un numéro commun leur a été attribué lorsque cela était possible. En cas de doute, les lames ont été revues conjointement par les 2 opérateurs ce qui a permis de trancher la plupart des cas litigieux. Si le doute persistait, 2 numéros d'espèces distincts ont été conservés. Un tableau listant les noms et numéros définitifs attribués à chaque taxon inventorié à l'issu de cette phase d'harmonisation a été établi (figure ci-dessous). Tous les noms et numéros des espèces inventoriées ont également été mis à jour dans les bases de données OMNIDIA.

	code OMNIDIA	code MQ	commentaires MQ	code GP	commentaires GP	à retravailler	code def
1	ABIN			/			ABIN
2	AINF						AINF
3		ARPT		ARPU			ARPU
4	ADCT						ADCT
5	ADEG						ADEG
6	ASHU						ADSH
7		/		LHUN			LHUN
8	PLBI						PLBI
9		PLF1		/			PLF1
10		PLF2		PLFR			PLFR
11	PRBU						PRBU
12	PRST			/			PRST
13		PTS1	genre Platessa ou cf. AFUG	AC12	genre Platessa ou cf. AFUG		PTS1
14		/		AC13	cf. Platessa holsatica		PTS2
15		/		AC11	cf. Kolbesia gessneri		KOL1
16		ADC1		/			AD01
17		ADC2		/			AD02
18		ADC3		/			AD03
19		ADC4		/			AD04
20		ADF1	Groupe ADMI	/			AD05
21		ADF5	Groupe ADMI	ADMI			AD06
22		ADF2	Groupe ADMI	/			AD07
23		ADF3	Groupe ADMI	/			AD08
24		ADF4	Groupe ADMI	/			AD09
25		ADF6	Groupe ADMI	/			AD10
26				ACH1			AD11
27				ACH3			AD12
28		/		ACH4			AD13
29		/		ACH6			AD14
30		/		ACH8	cf. ADSA		AD15
31		/		ACH9			AD16
32		/		AC10	cf. ADRI		AD17
33		/		AD18	cf. ADEU		AD18
34		/	Groupe ADMI	ACH2			AD19
35	AMUS			ADMS			AMUS
36		/					ADMS

**Figure 9 : Extrait du fichier excel "liste des noms d'espèces après harmonisation"**

**f. Bibliographie d'appui à la détermination taxinomique**

Les principaux ouvrages à visée taxinomique et écologique consultés au cours de cette étude sont :

**Süßwasserflora von Mitteleuropa :**

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

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

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

**Diatoms of Europe :**

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

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

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

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

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.

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final

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 Oberroligozän in Böhmen. H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.8 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 1999). 203 p.

RUMRICH U., LANGE-BERTALOT H. and RUMRICH M., Diatomeen der Anden, Von Venezuela bis Patagonien/Tierra del Fuego. H. Lange-Bertalot ed., Iconographia Diatomologica - Vol.9 (A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, 2000). 673 p.

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 :**

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.

LANGE-BERTALOT H. and KRAMMER K., Achnanthes, eine Monographie der Gattung mit Definition der Gattung *Cocconeis* und Nachträgen zu den *Naviculaceae*. H. Lange-Bertalot ed., Bibliotheca Diatomologica - Vol.18 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1989). 389 p.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final**

LANGE-BERTALOT H. 85 Neue Taxa und über 100 weitere neu definierte Taxa ergänzend zur Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/1-4. Bibliotheca Diatomologica - Vol.27 (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1993).

MOSER G., LANGE-BERTALOT H. and METZELTIN D., Insel der Endemiten. Geobotanisches Phänomen Neukaledonien. Bibliotheca Diatomologica - Vol. 38. H. Lange-Bertalot ed. (J. Cramer, Berlin - Stuttgart, 1998) 464 p.

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

**Autres livres ou ouvrages :**

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

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

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

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

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

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

SIMONSEN R., 1987. Atlas and Catalogue of the Diatom Types of Friedrich Hustedt. Ed. J. Cramer, Berlin-Stuttgart. Vol.1-3

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

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

D'autres articles ont été utiles à la détermination de certaines espèces. Leur liste est fournie à la fin du rapport avec les autres références bibliographiques.

## 4. Les prélèvements d'eau

Les prélèvements d'eau ont été réalisés conformément au guide technique pour « le prélèvement d'échantillons en rivière – Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques »<sup>7</sup>.

Les prélèvements d'eau des stations du RCS ont été organisés et supervisés par les offices de l'eau. Les prélèvements de diatomées sur ces stations ont été programmés le plus simultanément possible. Lorsqu'un délai était inévitable, les prélèvements d'eau ont toujours été antérieurs aux prélèvements de diatomées.

Les prélèvements d'eau concernant les stations du réseau complémentaire ont été réalisés par ASCONIT, en même temps que le prélèvement des diatomées.

## 5. Les analyses physico-chimiques de l'eau

### a. Méthodes d'analyse et limite de quantification (LQ)

Vingt-et-un paramètres physico-chimiques ont été considérés comme pertinents pour définir les conditions environnementales du peuplement diatomique.

Ces analyses ont été réalisées par 4 laboratoires : Le Laboratoire Départemental d'Analyse de Martinique et de la Drome pour les stations du RCS Martinique, le Laboratoire des Pyrénées pour la 1<sup>ère</sup> campagne des stations du RCS de la Guadeloupe, l'Institut Pasteur pour les 4 campagnes suivantes, le laboratoire d'hygiène et sécurité de Lyon Carso pour les stations des réseaux complémentaires de Martinique et de Guadeloupe.

Les méthodes d'analyse et les limites de quantification de chaque laboratoire et pour chaque paramètre sont résumées dans un tableau fourni en **Annexe 2**.

### b. Le test inter-laboratoire

Lors du comité de pilotage d'octobre 2010 en Guadeloupe, des problèmes de méthode d'acheminement des échantillons et d'analyse (limite de quantification) ont été soulevés. Un essai de comparaison des résultats des analyses physico-chimiques a été mis en œuvre afin de mesurer l'impact de ces différences sur les valeurs mesurées. Deux stations ont été choisies, l'une très contaminée (Ravine Grand Boucan, à l'aval de la STEP de La Boucan, GBB), l'autre très préservée (Grande Rivière à Goyave amont, amont prise d'eau, GGP).

<sup>7</sup> Agence de l'Eau Loire Bretagne & Gay Environnement (2006) : Le prélèvement d'échantillons en rivière – Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques.

Ces 2 stations ont été prélevées par les préleveurs habituels de chaque laboratoire (Tech'Eau pour l'Institut Pasteur de la Guadeloupe et Asconit pour le Laboratoire Carso en métropole), totalement simultanément, lors de la campagne 3 (novembre 2010). Les échantillons ont été acheminés selon le protocole habituel pour chaque laboratoire : directement pour l'Institut Pasteur, congelés puis envoyés par CHRONOPOST en moins de 48h pour le laboratoire Carso.

Un test de Wilcoxon<sup>8</sup> pour échantillons appareillés a été pratiqué sur les données issues de l'analyse des paramètres physico-chimiques effectuée sur la Grande Rivière à Goyave d'une part, sur celle issue de l'analyse effectuée sur la Ravine Grand Boucan d'autre part et enfin sur l'ensemble du jeu de données.

Lorsque l'on met en œuvre ce test sur les échantillons issus de la Grande Rivière à Goyave ou sur l'ensemble des données, la différence entre les échantillons est significative au seuil 5%. Cela signifierait que les différences entre les valeurs mesurées par chacun des laboratoires n'est pas acceptable. Au contraire, les résultats seraient significativement similaires si on ne considère que les échantillons issus de la rivière contaminée. Ces résultats contradictoires ne permettent donc pas de conclure, il faudrait réaliser ce test sur l'ensemble des données pour apprécier efficacement la robustesse de notre jeu de données.

---

<sup>8</sup> logiciel XLSTAT

## C. Les résultats

### 1. Les conditions climatiques rencontrées au cours de l'étude

Les tableaux ci-dessous (**Figure 10** et **Figure 11**) récapitulent les conditions climatiques observées dans chacune des 2 îles et les conséquences qu'elles ont pu avoir sur le déroulement des campagnes de prélèvement des diatomées.

	Précipitations quotidiennes au Lamentin et total mensuel	Commentaires	Le déroulement de la campagne de prélèvement				
<b>Campagne 0 du 11/06/2009 au 07/07/2009</b>	<p>juin-09</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Total mensuel</th> </tr> <tr> <td>216</td> </tr> </thead></table> <p>mois normale</p> <p>juil-09</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Total mensuel</th> </tr> <tr> <td>182</td> </tr> </thead></table> <p>mois normale</p>	Total mensuel	216	Total mensuel	182	<p>Le seul épisode pluvieux important est celui du 15 juin car il a donné, en un jour, la moitié du cumul mensuel ou presque. Il est tombé plus de 100 mm d'eau en 24 heures sur les versants atlantiques de Ste-Marie à Macouba, en passant par Morne-Rouge, ainsi que sur les mornes du St Esprit au Robert. Suite à cet épisode, la pluviométrie mensuelle dépasse généralement la normale de 30 à 40%, voire 60% et plus vers Rivière Pilote et Basse Pointe. Seules les régions de St Pierre et du Morne des Cadets sont légèrement déficitaires ou proches de la normale comme à Fort de France.</p> <p>Une différence apparaît entre le côté atlantique, excédentaire, et le côté caraïbe, déficitaire. En effet, l'excédent le plus important atteint les 77% sur les communes du Robert et du François, tandis que le déficit descend jusqu'à -22% à Fort de France. En fait, seules les régions allant de St Pierre à Fort de France, Lamentin, en passant par St Joseph et le Morne des Cadets sont moins arrosées qu'habituellement. Toutes les autres régions reçoivent plus de pluie, grâce notamment au passage de l'onde tropicale, les 17 et 18 juillet.</p>	<p>La campagne de juin/juillet 2009 avait pour but d'étudier la flore diatomique en carême : saison sèche et basses eaux. La période d'avril à juin 2009 a été particulièrement arrosée en Martinique avec des épisodes pluvieux notoires fin avril et début mai générant des crues importantes.</p> <p>Cependant, les prélèvements de fin juin/début juillet ont été réalisés dans de bonnes conditions météorologiques, malgré des niveaux d'eau élevés pour un carême.</p> <p>Les conditions de prélèvements ont donc été très hétérogènes (excédent pluviométrique côté Atlantique et déficit côté Caraïbes) pour cette campagne de carême 2009.</p>
Total mensuel							
216							
Total mensuel							
182							
<b>Campagne 1 du 15/10/2009 au 18/11/2009</b>	<p>oct-09</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Total mensuel</th> </tr> <tr> <td>283</td> </tr> </thead></table> <p>mois normale</p> <p>nov-09</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Total mensuel</th> </tr> <tr> <td>267</td> </tr> </thead></table> <p>mois normale</p>	Total mensuel	283	Total mensuel	267	<p>Il faut attendre la dernière semaine d'octobre pour que la saison des pluies redémarre efficacement.</p> <p>Cependant, il n'est tombé que la moitié de la quantité d'eau habituelle sur une grande partie du département. Le sud de l'île, Rivière pilote, ainsi que le François, et Fonds St Denis semblent moins déficitaires (-27%). Le plus remarquable de l'année 2009 est que ce manque de pluie perdure depuis juillet. C'est la 1ère fois depuis 1933 que le déficit enregistré à Fort de France et la plaine du Lamentin est aussi important. Les plus forts cumuls se produisent le 6 octobre sur le nord de l'île en raison d'un temps orageux. L'onde tropicale qui a traversé les Antilles du 26 au 28 octobre a apporté de fortes pluies orageuses et plus durables.</p>	<p>Cette campagne de fin 2009 avait pour but d'étudier la flore diatomique en hivernage : saison des pluies et hautes eaux.</p> <p>Les stations de référence ont été prélevées les 15, 16 et 19 octobre 2009. Les stations de surveillance et du réseau complémentaire ont été échantillonées du 10 au 18 novembre 2009.</p> <p>Il s'avère que cette campagne de prélèvement s'est déroulée dans des conditions relativement sèches et chaudes sans épisodes pluvieux notoires. Le déficit hydrique des mois d'octobre et de novembre 2009 est nettement plus marqué dans le nord de l'île.</p>
Total mensuel							
283							
Total mensuel							
267							

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

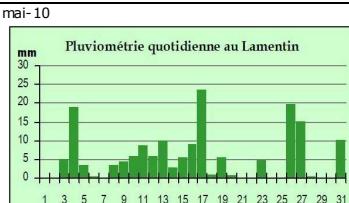
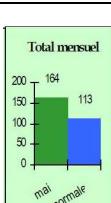
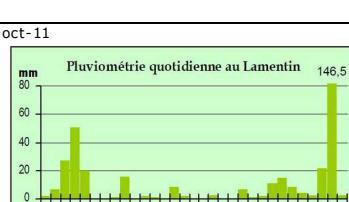
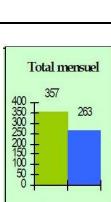
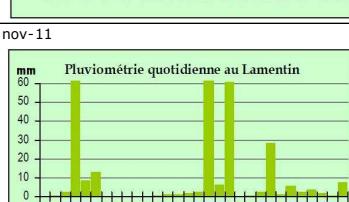
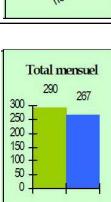
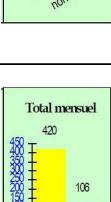
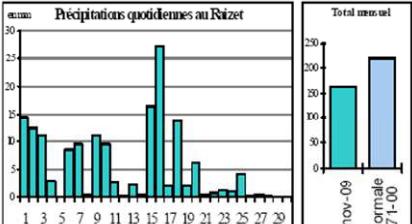
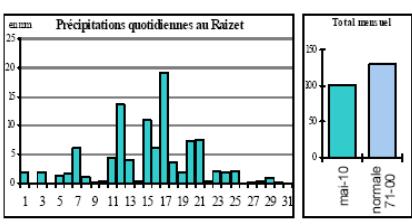
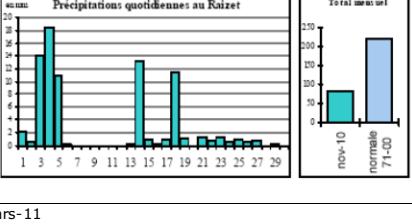
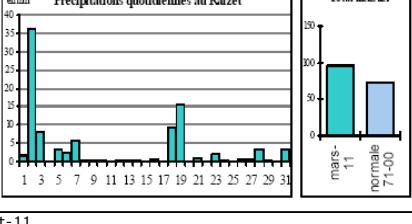
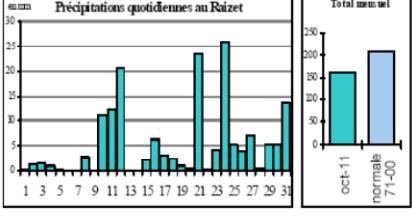
<b>Campagne 2</b> <b>du 27/04/2010 au 26/05/2010</b>	 <b>mai-10</b> <b>Pluviométrie quotidienne au Lamentin</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jour</th> <th>Pluie (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>18</td></tr> <tr><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>5</td></tr> <tr><td>11</td><td>10</td></tr> <tr><td>13</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>10</td></tr> <tr><td>17</td><td>22</td></tr> <tr><td>19</td><td>5</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>18</td></tr> <tr><td>27</td><td>18</td></tr> <tr><td>29</td><td>0</td></tr> <tr><td>31</td><td>10</td></tr> </tbody> </table>  <b>Total mensuel</b> <b>mai</b> 164 mm <b>normale</b> 113 mm	Jour	Pluie (mm)	1	0	3	18	5	2	7	0	9	5	11	10	13	10	15	10	17	22	19	5	21	0	23	0	25	18	27	18	29	0	31	10	La campagne de avril/mai 2010 avait pour but d'étudier la flore diatomique en carême : saison sèche et basses eaux. Les stations de référence ont été prélevées du 27 avril au 4 mai 2010. Les stations de surveillance et du réseau complémentaire ont été échantillonées du 18 au 26 mai 2010.
Jour	Pluie (mm)																																			
1	0																																			
3	18																																			
5	2																																			
7	0																																			
9	5																																			
11	10																																			
13	10																																			
15	10																																			
17	22																																			
19	5																																			
21	0																																			
23	0																																			
25	18																																			
27	18																																			
29	0																																			
31	10																																			
<b>Campagne 3</b> <b>du 18/10/2010 au 10/11/2010</b>	 <b>oct-11</b> <b>Pluviométrie quotidienne au Lamentin</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jour</th> <th>Pluie (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>50</td></tr> <tr><td>5</td><td>20</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>10</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>20</td></tr> <tr><td>27</td><td>20</td></tr> <tr><td>29</td><td>80</td></tr> <tr><td>31</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>  <b>Total mensuel</b> <b>oct</b> 357 mm <b>normale</b> 283 mm	Jour	Pluie (mm)	1	0	3	50	5	20	7	0	9	10	11	0	13	0	15	0	17	0	19	10	21	0	23	0	25	20	27	20	29	80	31	0	Le mois de mai 2010 montre une pluviométrie excédentaire qui permet de réserver, petit à petit, le déficit cumulé depuis août 2009. Ainsi, les pluies de l'intersaison donnent en moyenne 40 à 60% d'eau en plus que d'habitude. Le Sud est proportionnellement un peu moins arrosé, ainsi que le Centre Atlantique, vers le Robert et le François, plus conforme à la normale. Avec le retour des premières ondes tropicales, on note une légère recrudescence des épisodes pluvieux de plus de 10 mm d'eau.
Jour	Pluie (mm)																																			
1	0																																			
3	50																																			
5	20																																			
7	0																																			
9	10																																			
11	0																																			
13	0																																			
15	0																																			
17	0																																			
19	10																																			
21	0																																			
23	0																																			
25	20																																			
27	20																																			
29	80																																			
31	0																																			
<b>Campagne 4</b> <b>du 04 au 13/04/2011</b>	 <b>nov-11</b> <b>Pluviométrie quotidienne au Lamentin</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jour</th> <th>Pluie (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>60</td></tr> <tr><td>5</td><td>10</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>60</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>60</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>10</td></tr> <tr><td>27</td><td>0</td></tr> <tr><td>29</td><td>0</td></tr> <tr><td>31</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>  <b>Total mensuel</b> <b>nov</b> 290 mm <b>normale</b> 267 mm	Jour	Pluie (mm)	1	0	3	60	5	10	7	0	9	0	11	60	13	0	15	0	17	0	19	60	21	0	23	0	25	10	27	0	29	0	31	0	En ce mois d'octobre 2010, la Martinique a subit des intempéries : - soit par les épisodes orageux du 3 au 5, qui ont engendré des crues, - soit par le passage le 30 octobre de louragan Tomas au niveau de l'île de St Vincent qui a généré des quantités de pluies importantes sur le sud de l'île. L'excédent pluviométrique se situe autour de 35 à 45% pour la plupart des communes. Par contre, le sud de la Martinique se démarque par un fort excédent de l'ordre de 70%.
Jour	Pluie (mm)																																			
1	0																																			
3	60																																			
5	10																																			
7	0																																			
9	0																																			
11	60																																			
13	0																																			
15	0																																			
17	0																																			
19	60																																			
21	0																																			
23	0																																			
25	10																																			
27	0																																			
29	0																																			
31	0																																			
<b>Campagne 4</b> <b>du 04 au 13/04/2011</b>	 <b>avr-11</b> <b>Pluviométrie quotidienne au Lamentin</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jour</th> <th>Pluie (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>7</td><td>10</td></tr> <tr><td>9</td><td>45</td></tr> <tr><td>11</td><td>5</td></tr> <tr><td>13</td><td>5</td></tr> <tr><td>15</td><td>10</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>45</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>15</td></tr> <tr><td>27</td><td>65</td></tr> <tr><td>29</td><td>25</td></tr> <tr><td>31</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>  <b>Total mensuel</b> <b>avr</b> 420 mm <b>Normal</b> 106 mm	Jour	Pluie (mm)	1	0	3	5	5	5	7	10	9	45	11	5	13	5	15	10	17	0	19	45	21	0	23	25	25	15	27	65	29	25	31	0	Si la fréquence des jours de pluie reste normale, par contre certains épisodes donnent de grosses quantités d'eau dépassant très largement le seuil des 30 mm par jour. Les pluies du 17 au 19 novembre sont particulièrement abondantes. En 3 jours, il s'est déversé sur certaines zones, la moitié de ce qu'il tombe habituellement en novembre. Pourtant la pluviométrie se rapproche des normales avec une petite tendance excédentaire sur la côte atlantique et la plaine du Lamentin, et plutôt un faible déficit sur la façade caraïbe.
Jour	Pluie (mm)																																			
1	0																																			
3	5																																			
5	5																																			
7	10																																			
9	45																																			
11	5																																			
13	5																																			
15	10																																			
17	0																																			
19	45																																			
21	0																																			
23	25																																			
25	15																																			
27	65																																			
29	25																																			
31	0																																			

Figure 10 : Conditions météorologiques au cours des 5 campagnes de prélèvement réalisées en Martinique

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

	Précipitations quotidiennes au Raizet et total mensuel	Commentaires	Le déroulement de la campagne de prélèvement
<b>Campagne 1 du 25/11/2009 au 08/12/2009</b>	nov-09  	Les 3 premières semaines de novembre sont marquées par des pluies abondantes. Les 19 et 20 novembre, des pluies torrentielles ont lieu en altitude sur la façade est du massif de la Soufrière entraînant des glissements de terrain. Suite à cette période pluvieuse, une période beaucoup plus sèche s'instaure jusqu'à la fin du mois. Les pluies reprennent en décembre particulièrement sur la côte au vent et sous le vent au sud de Mahault, épargnant plutôt le nord de la Basse-Terre.	Les épisodes pluvieux n'ont pas perturbé le bon déroulement de la campagne. Les niveaux d'eau étaient moyens à hauts mais aucune crue n'a été observée.
<b>Campagne 2 du 27/05/2010 au 06/06/2010</b>	mai-10  	Les cumuls de pluies sont normaux pour la saison dans le nord de la Basse-Terre bien que les pluies soient concentrées les 7, 12, 16, 17 et 21 mai. L'épisode pluvieux des 16 et 17 a perturbé la campagne de prélèvement d'eau du réseau de contrôle de surveillance. La côte au vent est plutôt déficitaire en eau alors que le sud de la Basse-Terre est, lui excédentaire. Au contraire du mois de mai globalement déficitaire, le mois de juin est nettement excédentaire mais les épisodes de pluie intense n'ont démarré qu'à partir du 11/06/2010.	Les prélèvements de diatomées ont démarré 10 jours après les épisodes pluvieux. La période de décrue s'est poursuivie au long de la campagne.
<b>Campagne 3 du 18 au 29/11/2010</b>	nov-10  	Le mois de novembre 2010 a été particulièrement sec. Seulement 5 jours de pluie ont été recensés par les stations de mesure : les 3, 4, 5, 14 et 18.	Bien que le mois de novembre 2010 ait été un des mois de novembre les plus secs observés en Guadeloupe, en particulier après le 18/11/2010, la couverture nuageuse est restée importante sur les montagnes tout au long de la campagne. Plusieurs épisodes de crues modérées et de courte durée ont été observés entraînant des changements fréquents de l'organisation de la campagne.
<b>Campagne 4 du 14 au 23/03/2011</b>	mars-11  	La pluviométrie de ce mois de mars est très contrastée. La Basse-Terre est plutôt globalement excédentaire à l'exception de la côte sous le vent du massif de la Soufrière qui connaît une forte sécheresse.	Les conditions météorologiques ont été très favorables au bon déroulement de la campagne. Les conditions hydrologiques se caractérisent par un étage franc.
<b>Campagne 5 du 11 au 19/10/2011</b>	oct-11  	La répartition des pluies est assez hétérogène ce mois-ci car des épisodes pluvieux ont été essentiellement concentrés sur 4 jours (12, 21, 24 et 31 octobre). La Guadeloupe est globalement déficitaire en eau en particulier les sommets.	Les conditions météorologiques ont été dans l'ensemble favorables à l'exception du 12 octobre où de nombreuses crues ont été observées. Seules 3 stations de la côte sous le vent ont pu être échantillonées ce jour là. Bien que les autres gros épisodes pluvieux se soient produits après la fin de la campagne, celle-ci a été relativement perturbée par des crues imprévisibles ou de très lents retours à la normale (Rivière Grande Anse encore légèrement turbide 3 jours après une crue).

**Figure 11 : Conditions météorologiques au cours des 5 campagnes de prélèvement réalisées en Guadeloupe**

## 2. Les conditions hydrologiques rencontrées au cours de l'étude

Les conditions hydrologiques disponibles en Guadeloupe, pendant la période de l'étude, ont été extraites de la Banque HYDRO et sont illustrées par les figures en **Annexe 3**. Néanmoins la fragmentation des données rend difficile toute interprétation des données de débit mesuré. En Martinique, les données disponibles ne peuvent illustrer les conditions hydrologiques rencontrées au cours de l'étude.

En pratique les conditions hydrologiques ont été appréciées empiriquement au moment des prélèvements et consignées dans les fiches terrain, elles-mêmes compilées dans chaque compte-rendu de terrain.

Selon ces relevés, les prélèvements de Guadeloupe ont été réalisés en période de moyennes eaux au cours des 3 premières campagnes à l'exception de ceux effectués sur la Rivière Moustique Sainte-Rose aval (Débauchée) et Grande Rivière à Goyave amont (amont prise d'eau) qui ont eu lieu lors de la décrue au cours de la 3<sup>ème</sup> campagne. La Rivière Baret apparaissait en période d'étiage lors de cette 3<sup>ème</sup> campagne. Cependant le débit de cette rivière dépend essentiellement des rejets de la STEP. La 4<sup>ème</sup> campagne a bien été réalisée en période d'étiage. Deux assecs ont été signalés : le Canal issu Caférière lors des campagnes 2 et 4 (en période de carême). Le niveau des eaux observés lors de la 5<sup>ème</sup> campagne était moyen sur toutes les stations du RCS mais beaucoup plus variable sur les stations du réseau complémentaire : La plupart des stations ont été également estimées en moyennes eaux à l'exception de :

- la Grande Rivière à Goyave amont (amont prise d'eau), la Rivière Moustique Sainte-Rose aval (amont embouchure), la Rivière Moustique Petit-Bourg à Duquerry, la Ravine bleue et la Petite Rivière à Goyave (Goyave et pont RN1) considéré en « décrue »
- au contraire la Grande Rivière de Capesterre amont (La Digue), la Rivière Rouge, la Grande Rivière à Goyave aval 1 et la Ravine Grand Boucan ont été prélevées alors que le niveau de leurs eaux montaient.

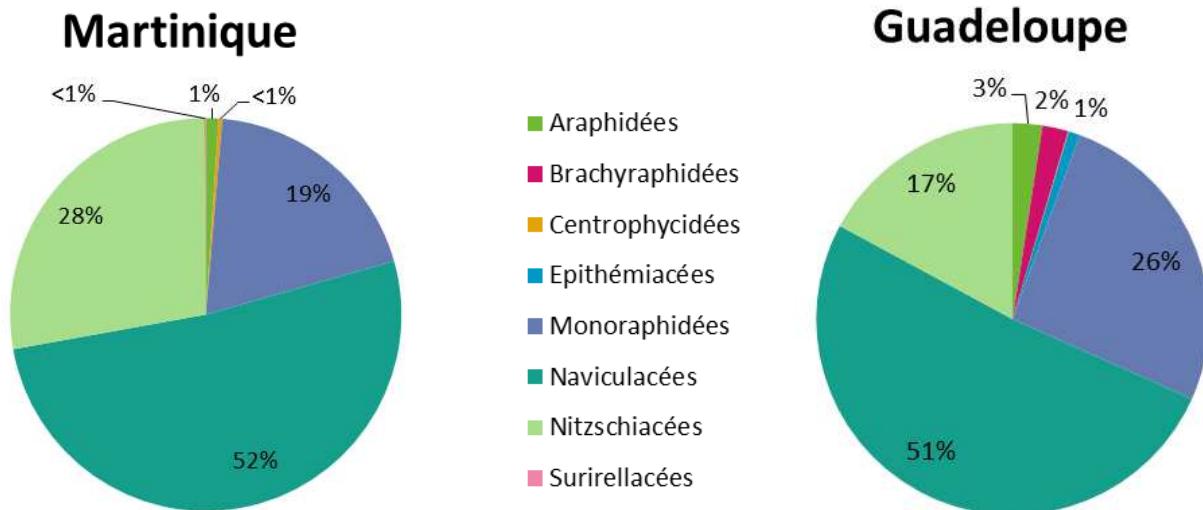
En Martinique, les campagnes 1, 2 et 4 se sont déroulées en période d'étiage à moyennes eaux ; la campagne 3 (hivernage 2010) a été marquée par des conditions hydrologiques de moyennes à hautes eaux.

## 3. Les données floristiques

La synthèse des jeux de données guadeloupéen et martiniquais a permis de dresser la liste des taxons présents sur chacune des 2 îles.

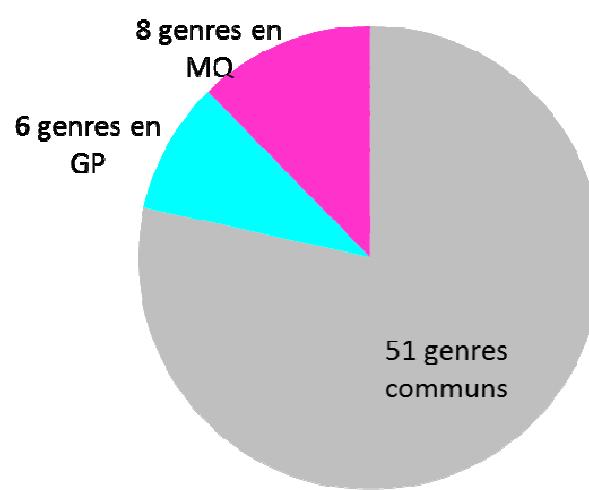
Toutes les familles de diatomées sont représentées bien que les Naviculacées, les Nitzschiacées et les Monoraphidées dominent les peuplements en Martinique comme en Guadeloupe.

Comme l'illustre la Figure 12 page suivante, la famille des Nitzschiacées est légèrement mieux représentée en Martinique. Les familles des Araphidées, des Brachyraphidées et des Epithémiacées, bien que nettement moins abondantes, sont mieux représentées en Guadeloupe qu'en Martinique. Au contraire, ce sont les familles des Centrophycidées et des Surirellacées qui sont un peu plus fréquemment observées en Martinique qu'en Guadeloupe.



**Figure 12 : Distribution des familles de diatomées dans les peuplements de Martinique et de Guadeloupe**

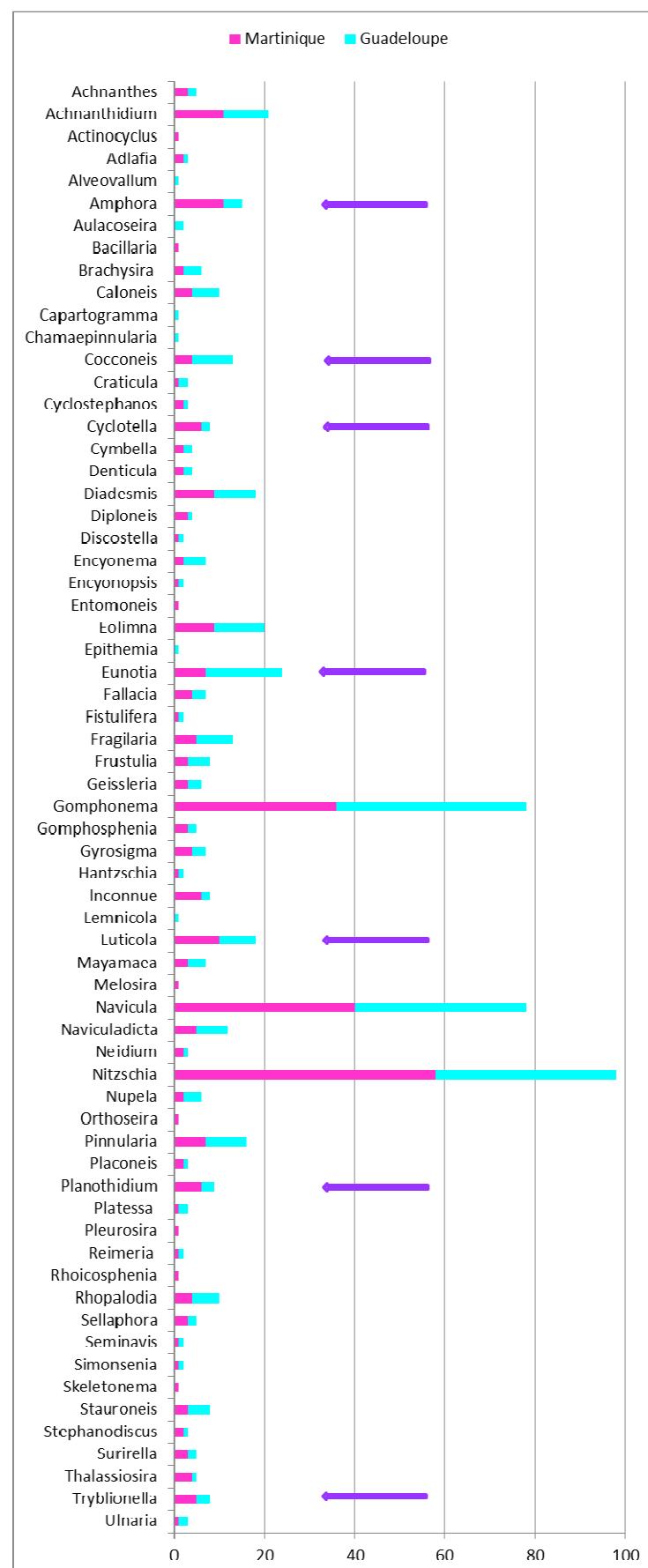
Ces familles de diatomées se répartissent en 65 genres dont 51 sont communs aux 2 îles (Figure 13).



**Figure 13 : Distribution des genres de diatomées dans les peuplements des Antilles Françaises**

Ces 65 genres sont inégalement représentés entre la Martinique et la Guadeloupe. On observe notamment que les genres *Amphora*, *Cyclotella*, *Luticola*, *Nitzschia*, *Planothidium* et *Tryblionella* sont mieux représentés en Martinique. Au contraire, ce sont les genres *Cocconeis*, *Eunotia*, *Rhopalodia* et *Stauroneis* qui sont les plus abondants en Guadeloupe (figure ci-dessous).

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

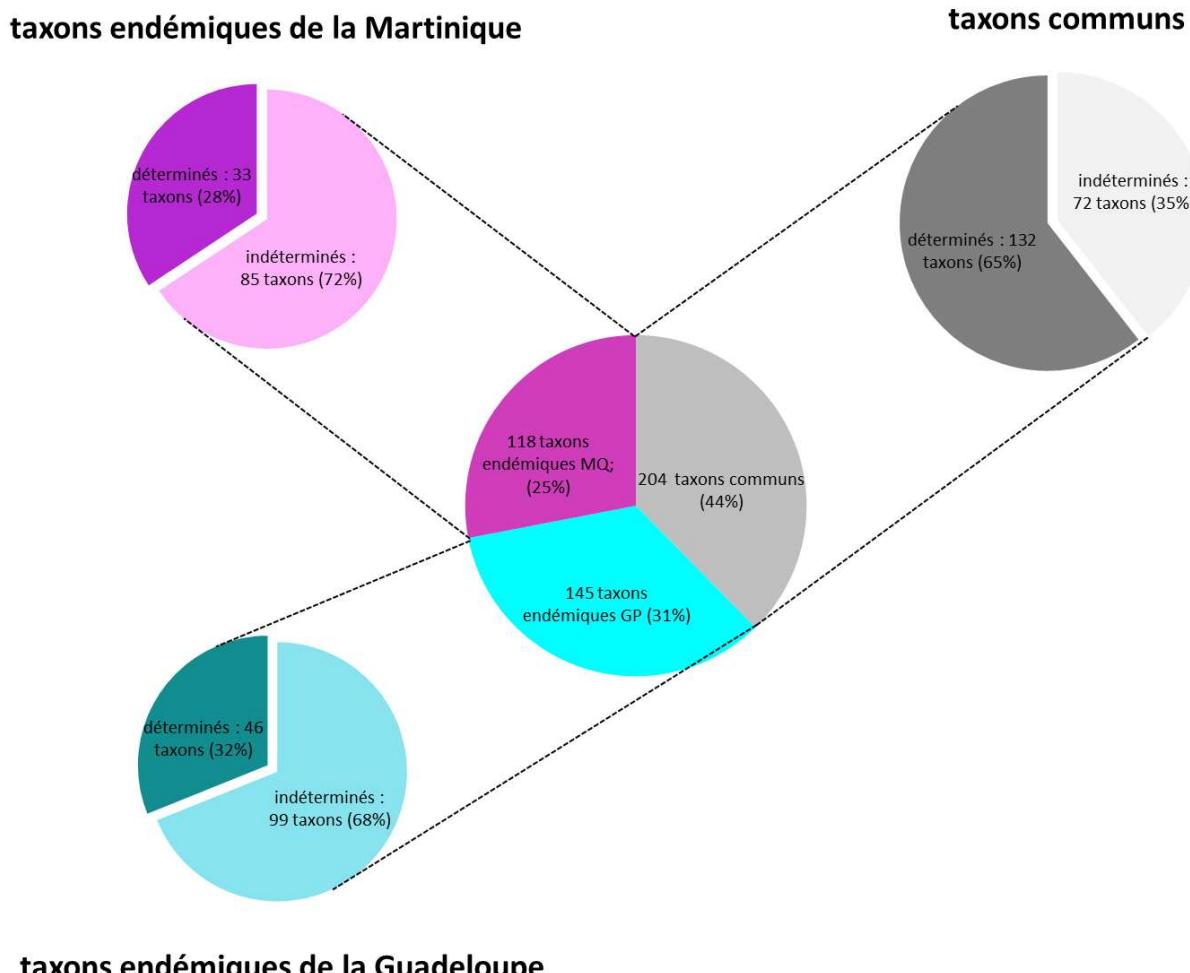


**Figure 14 : Distribution comparative des genres de diatomées dans les peuplements de la Martinique et de la Guadeloupe.**

Au total **467 taxons** ont été inventoriés et répertoriés au cours de l'étude : 108 taxons dominants (abondance  $\geq 10\%$ ), 38 taxons principaux (abondance comprise entre 5 et 9,9%), 135 taxons secondaires (abondance comprise entre 1 et 4,9%) et 186 taxons rares dont l'abondance est inférieure à 1%. De plus une cinquantaine de taxons ont été observés et photographiés au cours de l'analyse des échantillons sans pour autant faire partie des inventaires.

La liste exhaustive des taxons inventoriés et classés selon leur classe d'abondance est fournie en **Annexe 1**.

Parmi ces taxons, tous ne participeront pas au calcul de l'indice. Suite aux analyses de données réalisées par l'Irstea, il a été jugé pertinent de ne considérer que les taxons présents dans au moins 3 relevés et parmi ceux-ci, uniquement ceux dont l'abondance est supérieure à 2,5% dans au moins 1 relevé. De plus les espèces considérées comme halines (espèces inventoriées uniquement dans les stations sous influence marine) ont été soustraites de la liste des taxons potentiellement indicIELS. Les taxons indicIELS ainsi retenus sont au nombre de **177** au total : 100 taxons dominants soit tous les taxons dominants à l'exception de *Nitzschia frustulum* forme 3 et de 7 espèces halines, 37 taxons principaux soit tous sauf *Skeletonema* sp1 et 40 des 135 taxons secondaires. Aucun taxon rare n'a été retenu puisque par définition leur abondance ne dépasse jamais 1%. Les taxons indicIELS sont surlignés dans la liste des taxons classés selon leur abondance fournie en **Annexe 1**.



**Figure 15 : Répartition des taxons entre les 2 îles**

La **Figure 15** page précédente illustre la répartition des taxons entre les 2 îles : Parmi les 467 taxons inventoriés, 204, soit 44%, sont communs aux 2 îles tandis que respectivement 25% et 31% de la communauté est « endémique » de la Martinique et de la Guadeloupe.

*Remarque : L'endémicité des taxons se définit ici par rapport à l'île jumelle et non pas par rapport à la métropole ou un quelconque autre continent. Elle reste toute relative car il est assez fréquent qu'un taxon identifié dans une des 2 îles soit identifié au hasard d'un nouvel échantillon dans l'autre île. Les chiffres d'«endémisme» sont donc susceptibles d'évoluer et de se réduire au fur et à mesure des futures acquisitions.*

Alors que la proportion de taxons indéterminés est de 72% parmi les taxons « endémiques » de la Martinique et de 68% parmi ceux de la Guadeloupe, cette proportion est bien moindre (35%) parmi les taxons communs.

Parmi les 177 taxons indicuels, la proportion de taxons indéterminés jusqu'à présent (53%) reste supérieure à celle de taxons parfaitement identifiés (47%).

Chaque taxon indiciel fait l'objet d'une fiche complète dans le guide méthodologique.

## 4. Les données chimiques

Les résultats bruts des analyses physico-chimiques sont consignés en annexe.

Bien que le but ultime de ces analyses soit de construire le profil indiciel de chaque espèce, elles permettent également de caractériser les stations étudiées.

Les figures suivantes permettent d'illustrer les valeurs mesurées pour quelques paramètres caractéristiques des principales altérations (oxygène dissous, conductivité, pH, DBO5, NKJ, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub> et Ptot) et de comparer les stations entre elles.

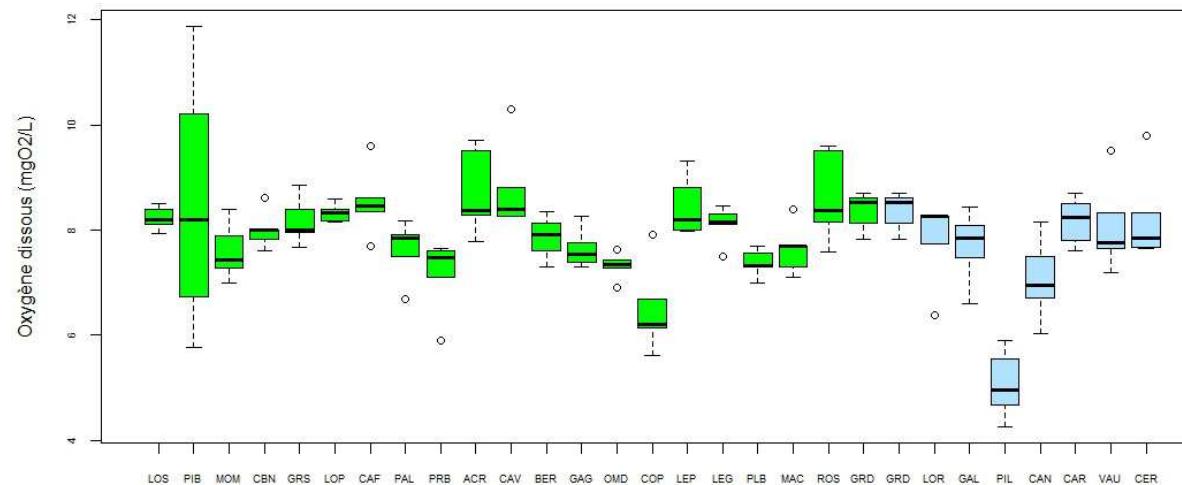
Les couleurs attribuées renvoient à la catégorie de la station (**Tableau 9**).

**Tableau 9 : code couleur associé aux types de stations échantillonnées**

type de station	code couleur
station du RCS	vert
station du Réseau de Référence	bleu clair
conditions particulières	vert olive
station du réseau "Pesticides" et "GREPP"	jaune
pollution domestique	rouge
pollution diffuse	orange
pollution agro-alimentaire	rose
pollution industrielle autre	orange clair

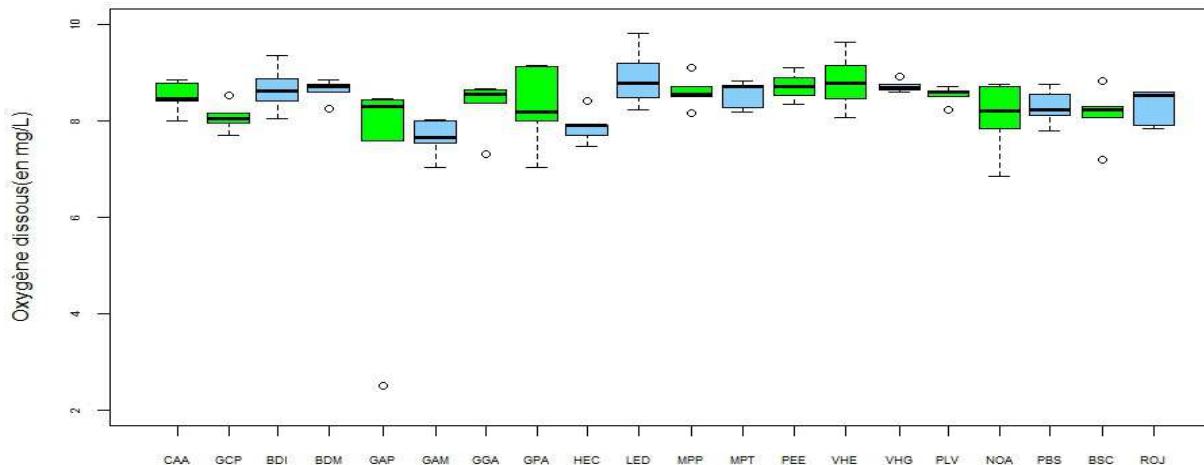
**a. L'oxygène dissous ( $O_2$ )**

**MARTINIQUE**



Les valeurs d'oxygène dissous des stations des réseaux de Surveillance et de Référence sont globalement plus variables en Martinique qu'en Guadeloupe. En outre, on note une légère désoxygénéation des stations Beauregard de la Grande Rivière Pilote (station de référence du sud de la Martinique avec un débit très faible et beaucoup de litière végétale) et Petit-Bourg sur la Rivière des Coulisses (station RCS en aval de bassin versant) lors des 5 campagnes de prélèvement à l'exception de la campagne 4 (avril 2011).

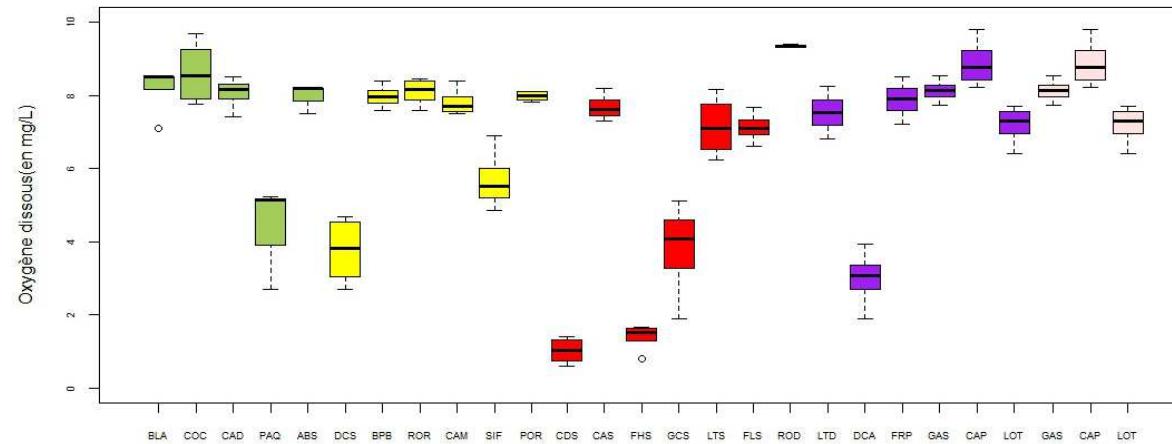
**GUADELOUPE**



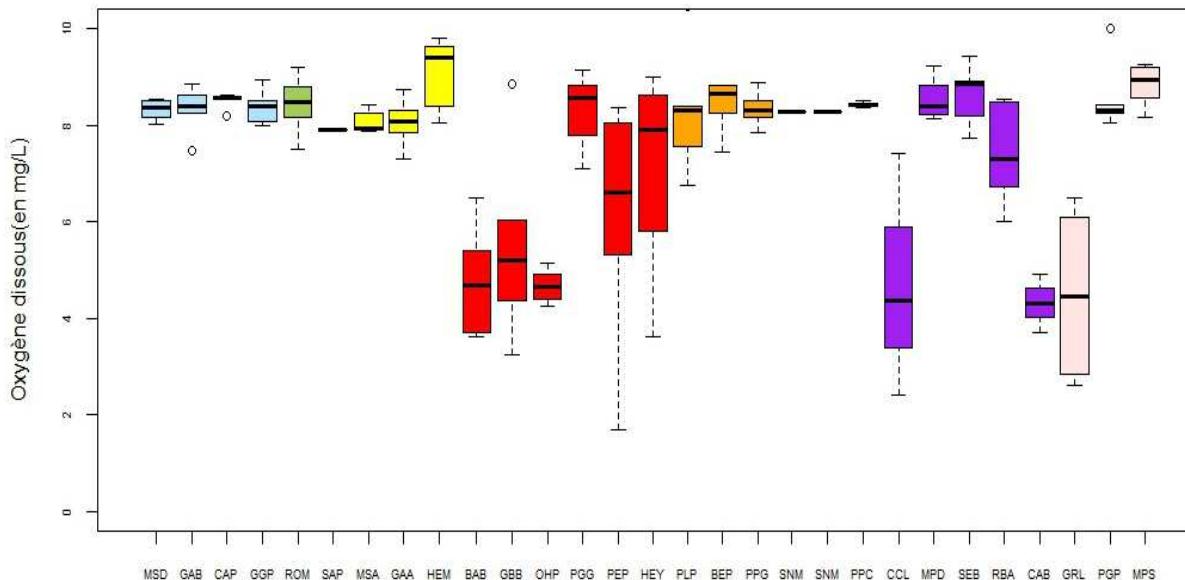
**Figure 16 : Box-plots des valeurs d'oxygène dissous mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**MARTINIQUE**



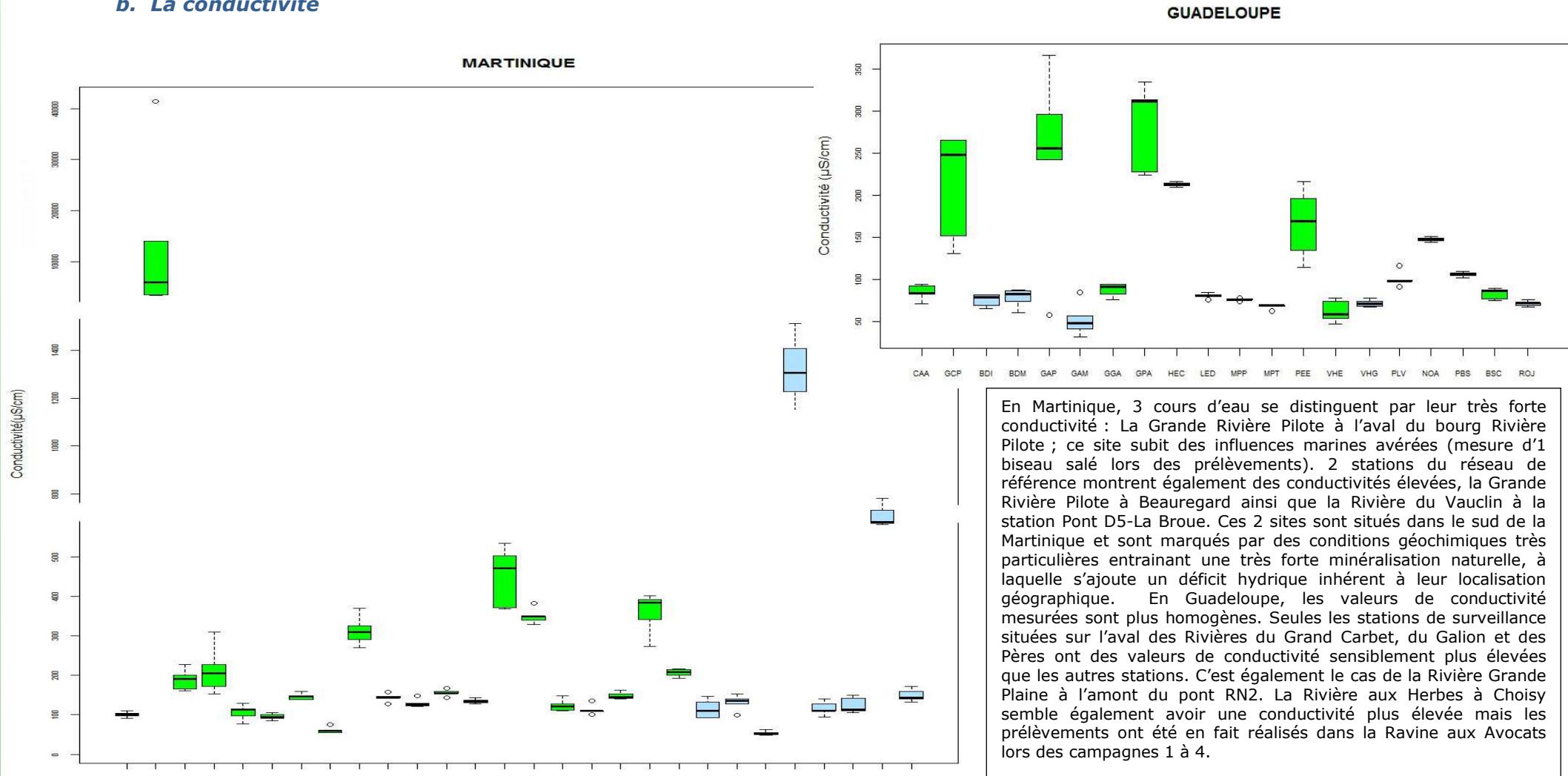
**GUADELOUPE**



On observe une désoxygénation de certaines stations du réseau complémentaire essentiellement parmi les stations situées à l'aval des STEPs en Martinique comme en Guadeloupe mais également à l'aval des rejets agro-alimentaires et industriels en Guadeloupe et à l'aval de l'abattoir de volailles en Martinique. Certaines stations martiniquaises choisies pour leurs conditions géochimiques particulières (Rivière Paquemar - Mornes du sud) ou parmi le réseau « Pesticides » ont également des valeurs d'oxygène dissous anormalement basses.

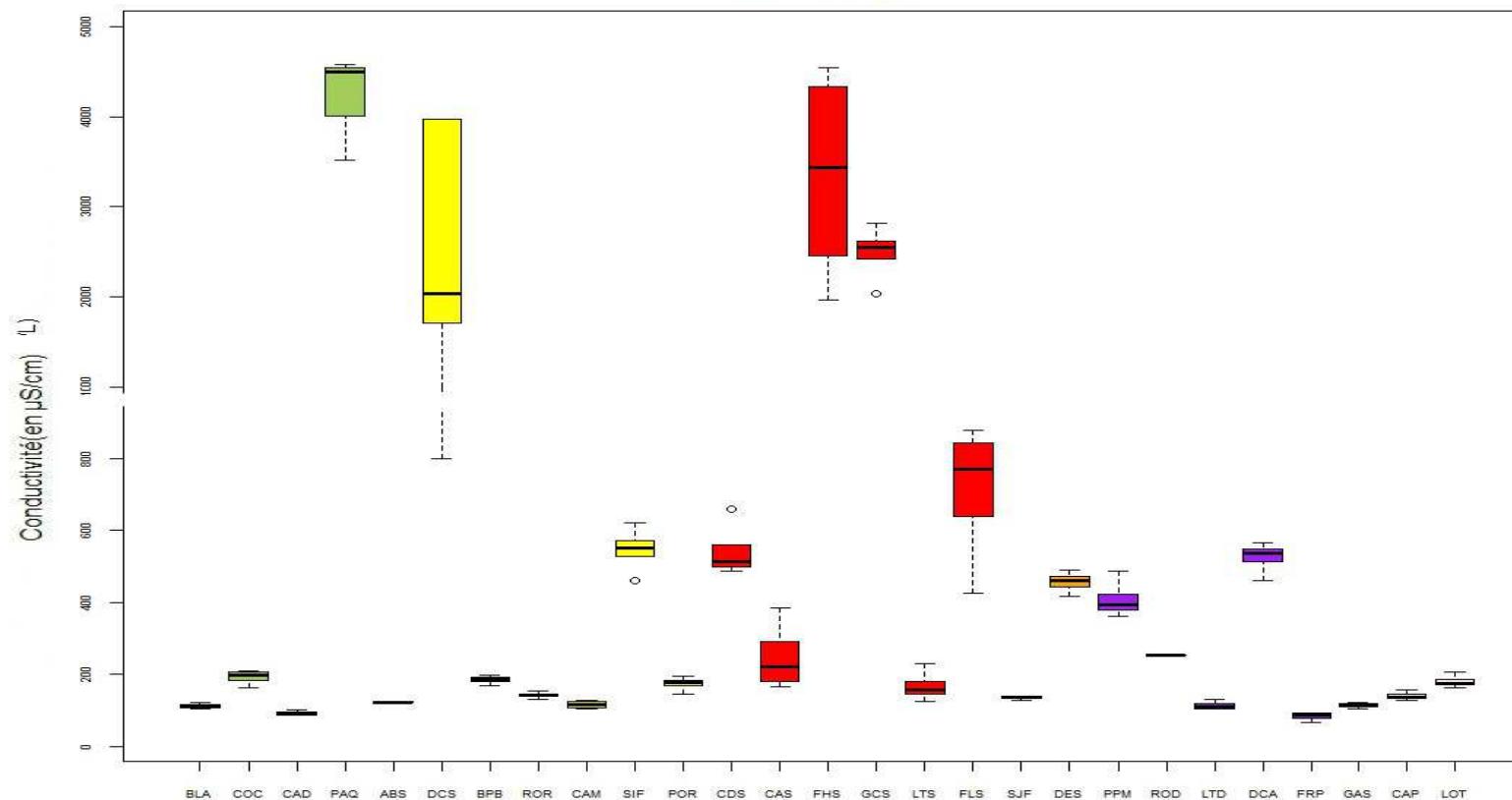
**Figure 17 : Box-plots des valeurs d'oxygène dissous mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

**b. La conductivité**



**Figure 18 : Box-plots des valeurs de conductivité mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**

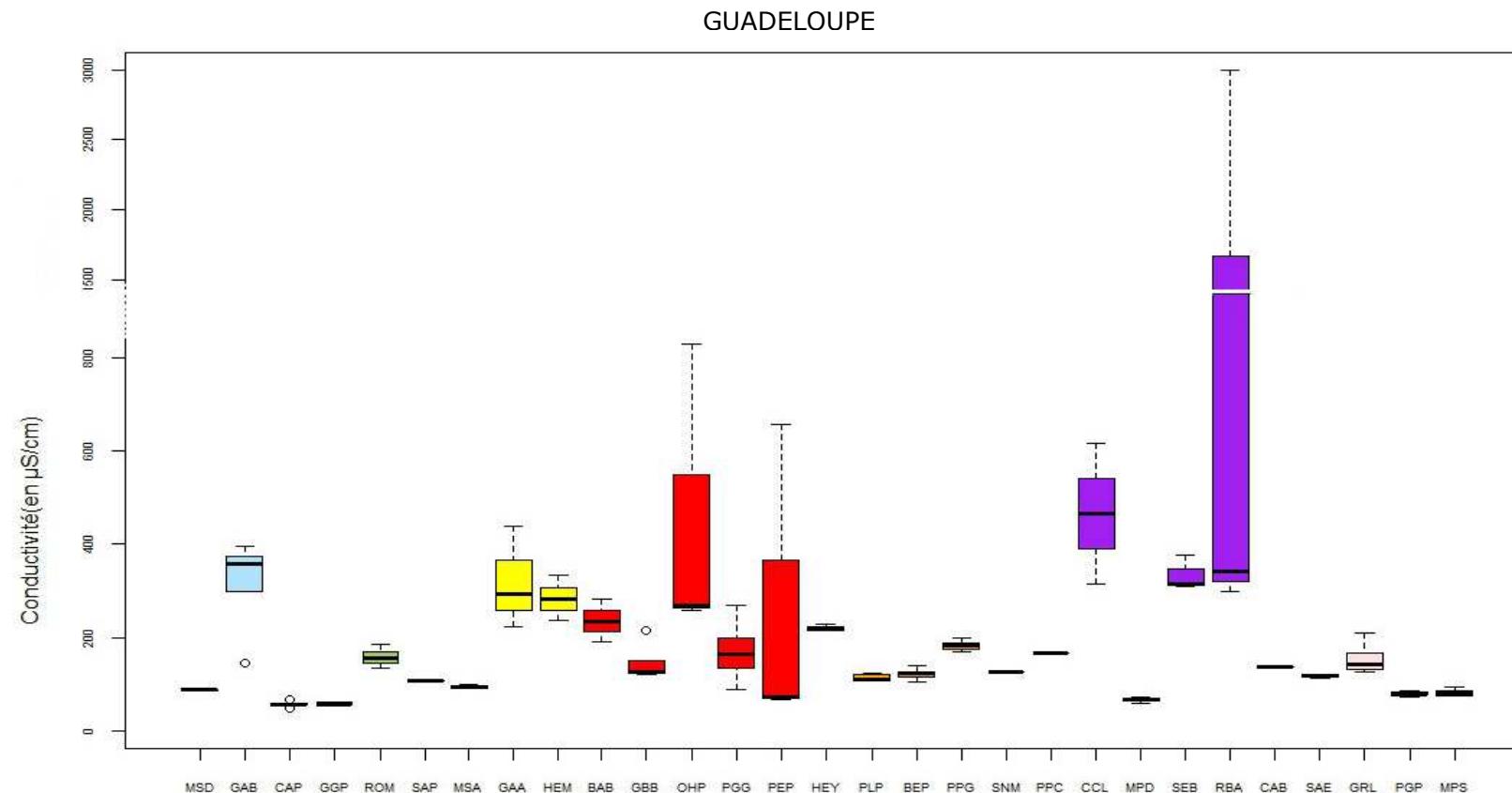
**MARTINIQUE**



Certains sites se démarquent, en Martinique, comme la station sur la Rivière Paquemar (PAQ), située dans les mornes du sud de la Martinique à 50m d'altitude, dans 1 contexte non anthropisé. Le fonds géochimique, associé à de faibles précipitations, génère dans ces milieux de très fortes minéralisations naturelles.

La Rivière Deux Courant (réseau pesticides), située au François et en aval de bassin versant, est sous influence haline (inversion prononcée du courant observé lors des prélèvements à marée montante).

Les autres sites montrant des conductivités anormalement élevées sont indicateurs de pollutions : Rivière Simon (réseaux pesticides/eutrophisation), Canal de Ducos et Rivière Fond Lahaye (STEP), Rivière Desroses (pollutions diffuses), Petite Rivière Pilote (distillerie La Mauny), Rivière Deux Courants (abattoir de volailles).



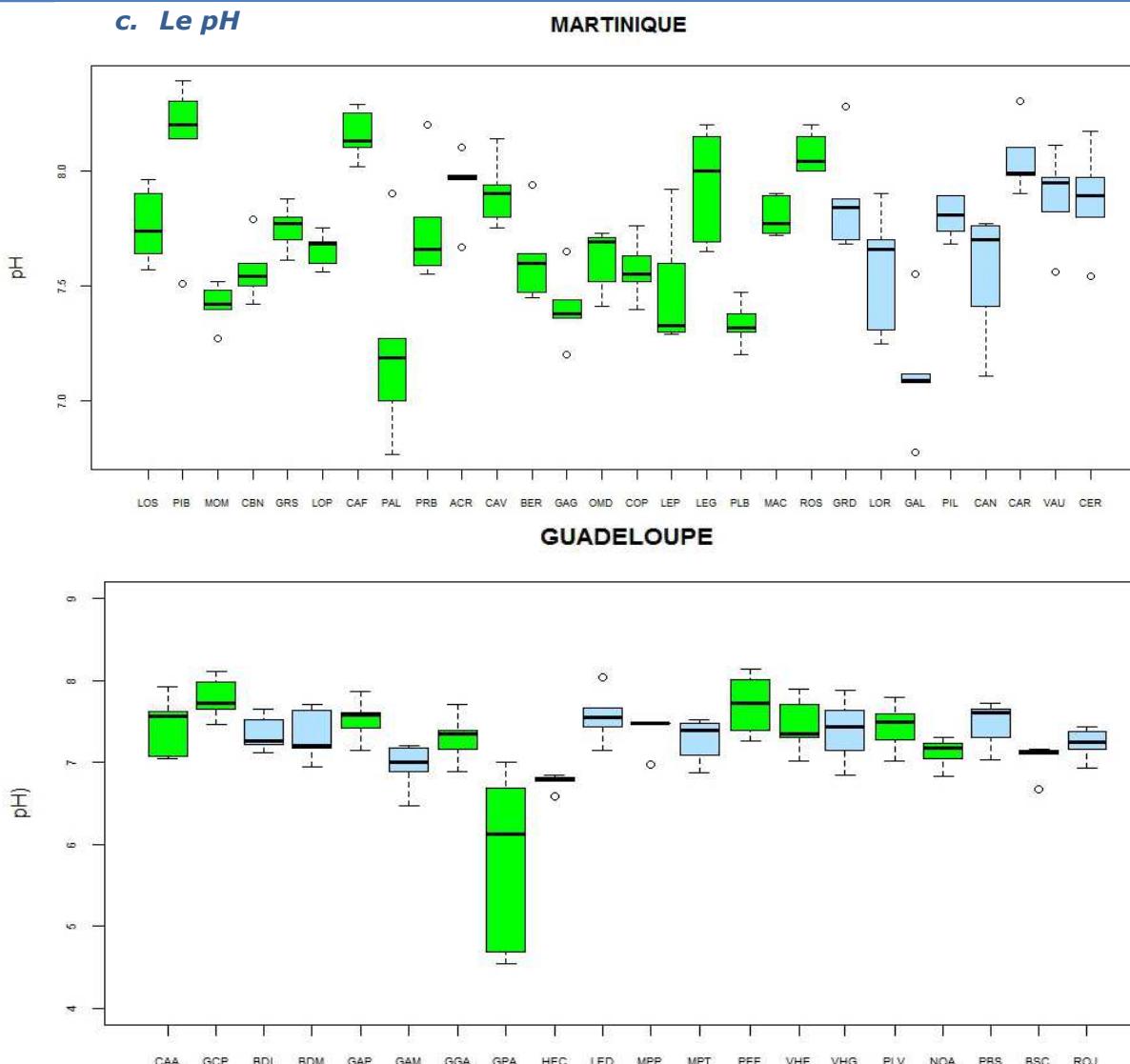
**Figure 19 : Box-plots des valeurs de conductivité mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC –Martinique et Guadeloupe**

En Guadeloupe, les valeurs de conductivité les plus fortes sont observées dans la plupart des stations situées à l'aval des STEP ou des rejets d'industries agroalimentaires.

Deux des stations du réseau GREPP (Rivière Grande Anse aval et Rivière aux Herbes) se distinguent également. Elles sont situées à l'aval des cours d'eau et subissent des pollutions diffuses.

La Rivière du Galion (Bassin bleu) est caractérisée par une conductivité naturelle assez élevée, liée à sa forte minéralité.

c. Le pH



Les valeurs de pH mesurées sont, pour la plupart, situées entre 7 et 8,5 en Martinique comme en Guadeloupe.

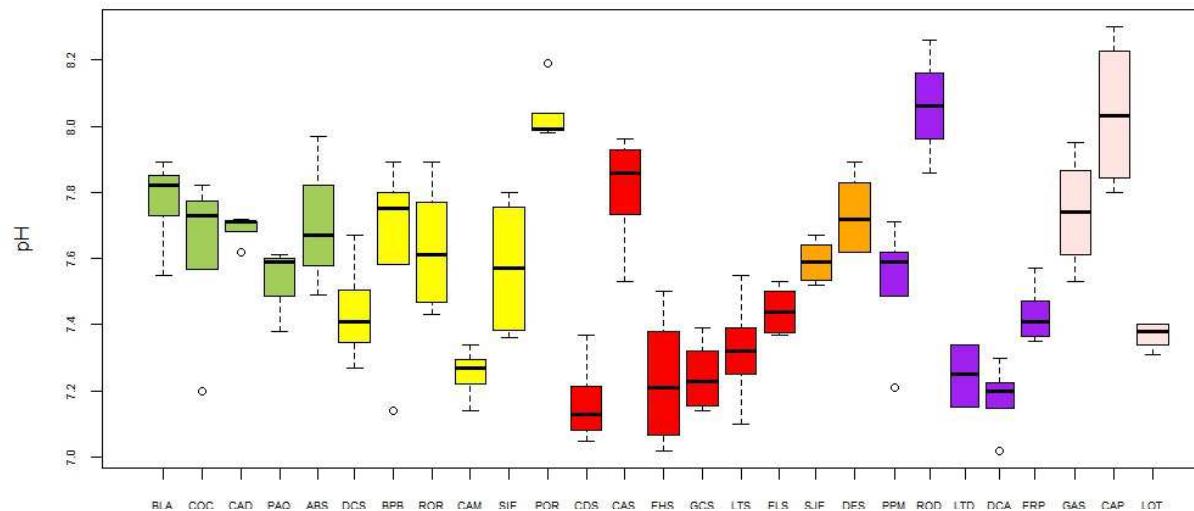
Deux cours d'eau se distinguent en Martinique par un pH proche de la neutralité : la Rivière Lézarde à Palourde (RCS/référence) et la Rivière du Galion (référence).

Seule la Rivière Grande Plaine aval se distingue avec des valeurs parfois très acides.

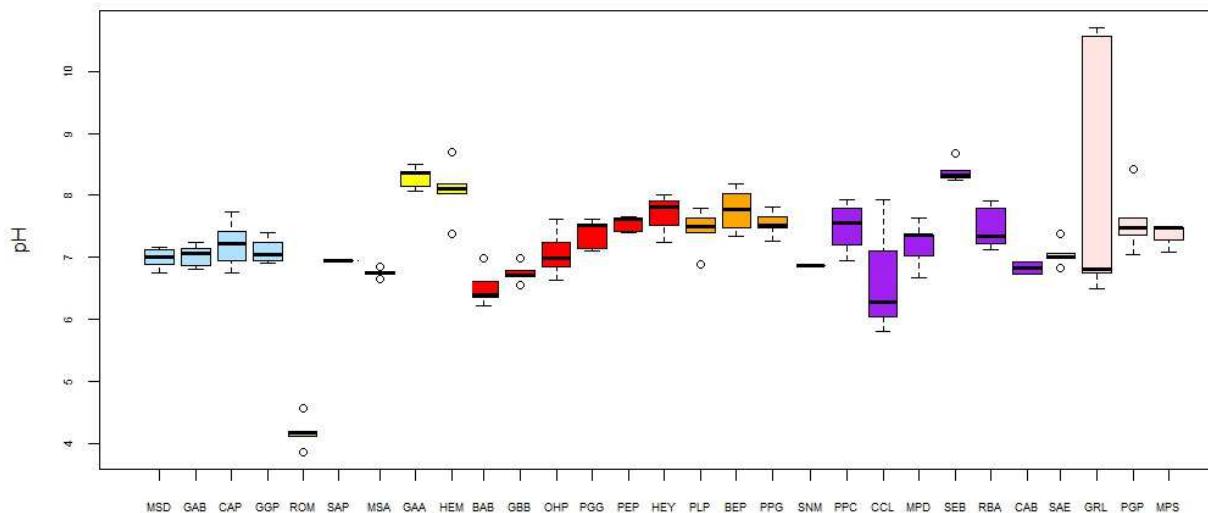
Figure 20 : Box-plots des valeurs de pH mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**MARTINIQUE**



**GUADELOUPE**

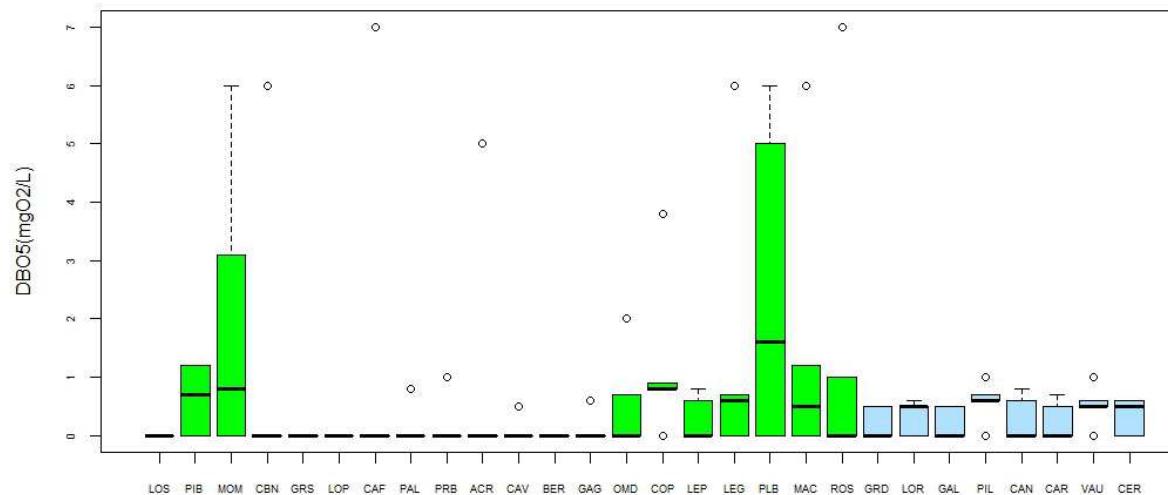
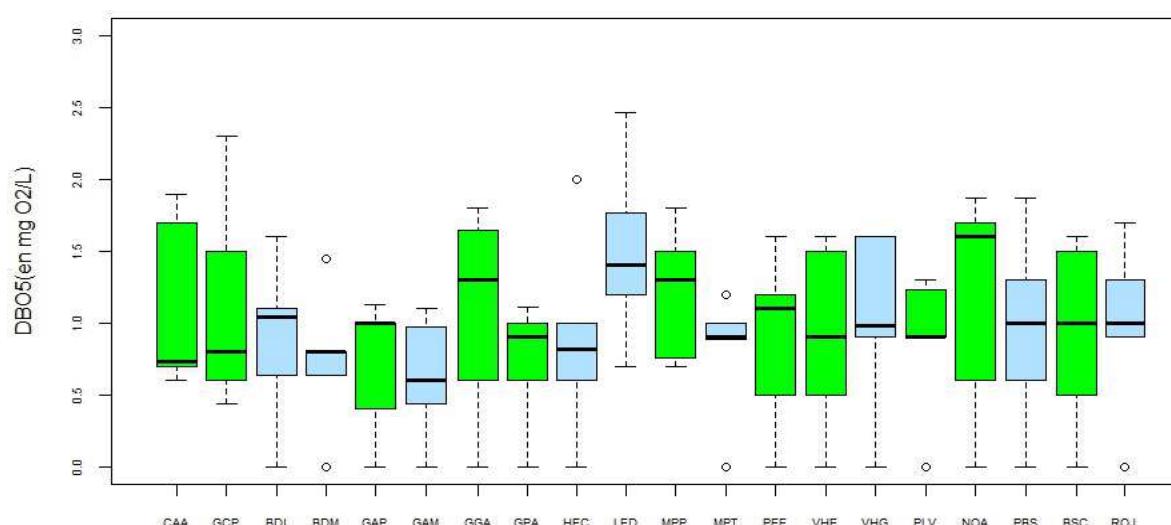


Dans le réseau complémentaire, les valeurs de pH mesurées sont également situées entre 7 et 8,5 dans la grande majorité des stations de la Martinique et de la Guadeloupe.

La Rivière Rouge, située en altitude, sur le flanc de la Soufrière est nettement plus acide.

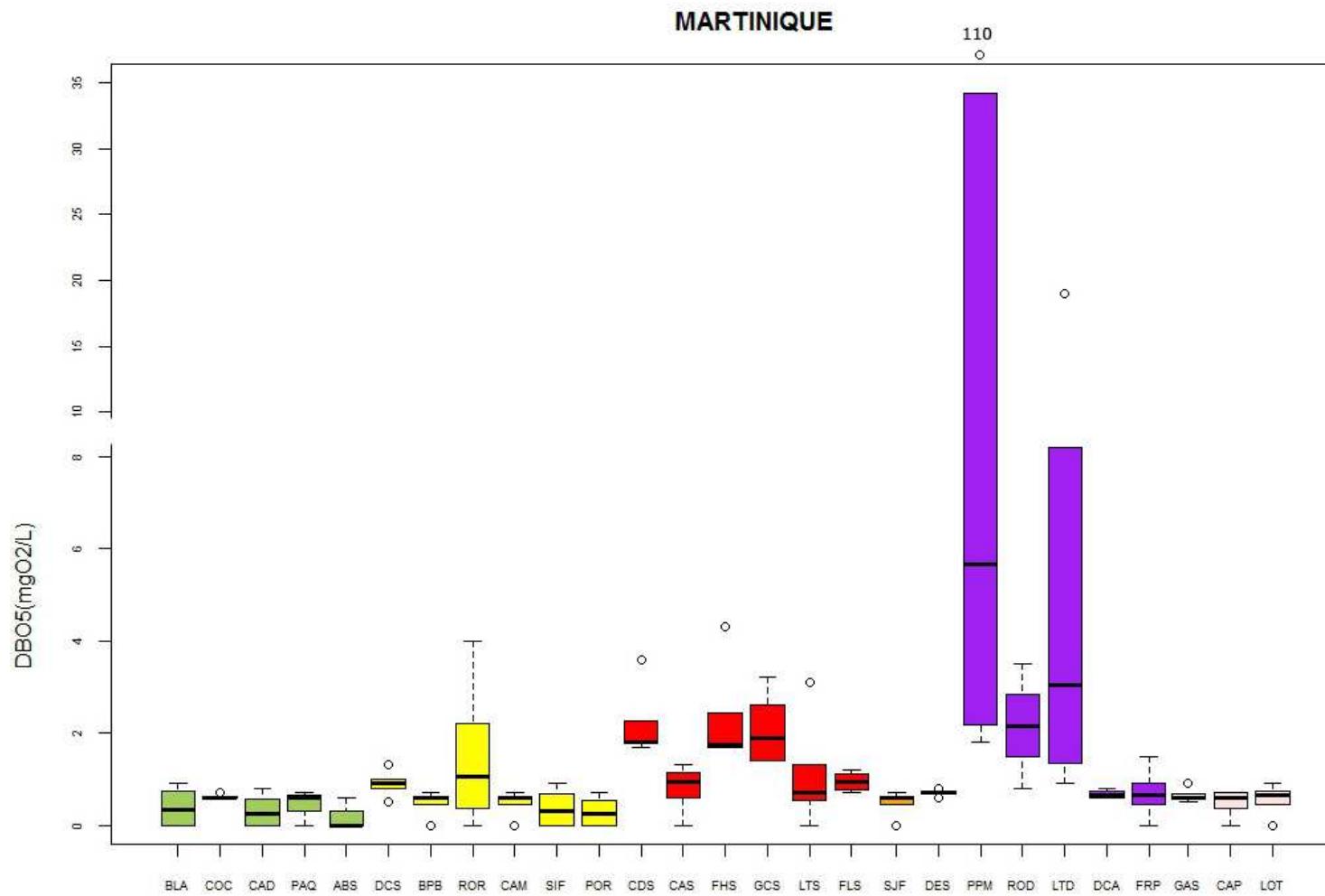
Au contraire, les eaux de la Ravine Grossou peuvent être très alcalines. Ce phénomène se produit quotidiennement lors des rejets de la cimenterie qui jouxte la ravine.

**Figure 21 : Box-plots des valeurs de pH mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

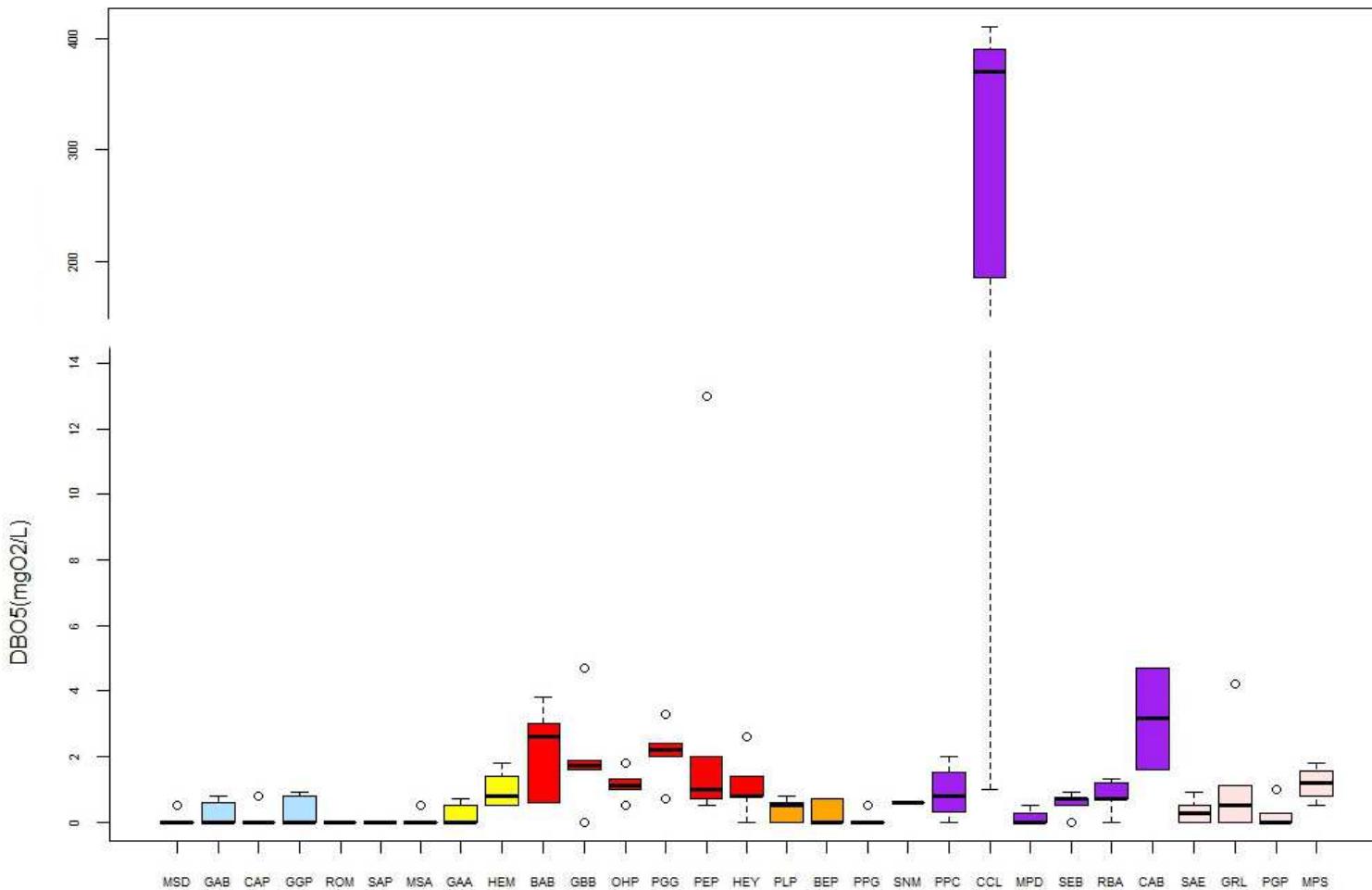
**d. La DBO5****MARTINIQUE****GUADELOUPE**

Les valeurs de DBO5 mesurées dans les réseaux de surveillance et de référence de Guadeloupe et de Martinique sont globalement comparables et assez faibles (<2,5mgO<sub>2</sub>/L). Selon Nisbet et Verneaux, ces valeurs correspondent à une classe de qualité de l'eau acceptable (sous réserve de l'absence de pollution chimique inhibant la DBO5 et biaisant ainsi les résultats. On remarque cependant que la plupart des stations du réseau de surveillance de la Martinique ont présenté une valeur plus élevée au cours des 5 campagnes de prélèvement. Les rivières Monsieur (Pont de Montgéraud) et Lézarde (Gué de la Désirade) semblent généralement plus impactées par la présence de matière organique oxydable.

**Figure 22 : Box-plots des valeurs de DBO5 mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**



## GUADELOUPE



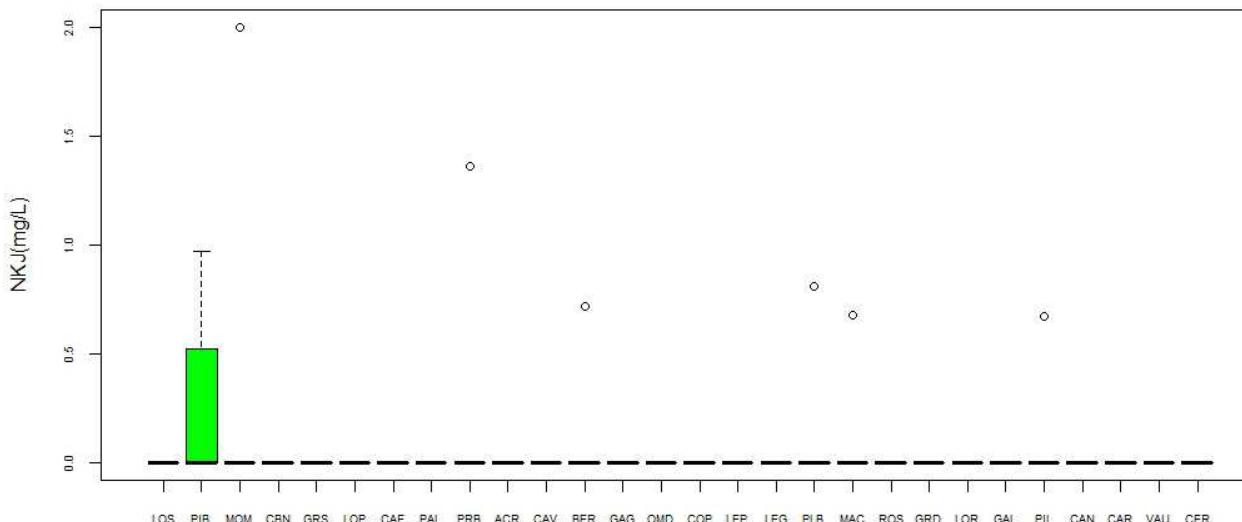
La distribution des valeurs de DBO5 mesurées dans les réseaux complémentaires présentent des profils comparables en Martinique et en Guadeloupe : Elles sont légèrement plus élevées dans les stations situées à l'aval des STEP mais le sont nettement plus dans les stations subissant des rejets d'industries agroalimentaires (distilleries, confiserie), dépassant ainsi le seuil de 6 mgO<sub>2</sub>/L au-delà duquel Nisbet et Vernaux considèrent que la qualité des eaux est clairement dégradée.

**Figure 23 : Box-plots des valeurs de DBO5 mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

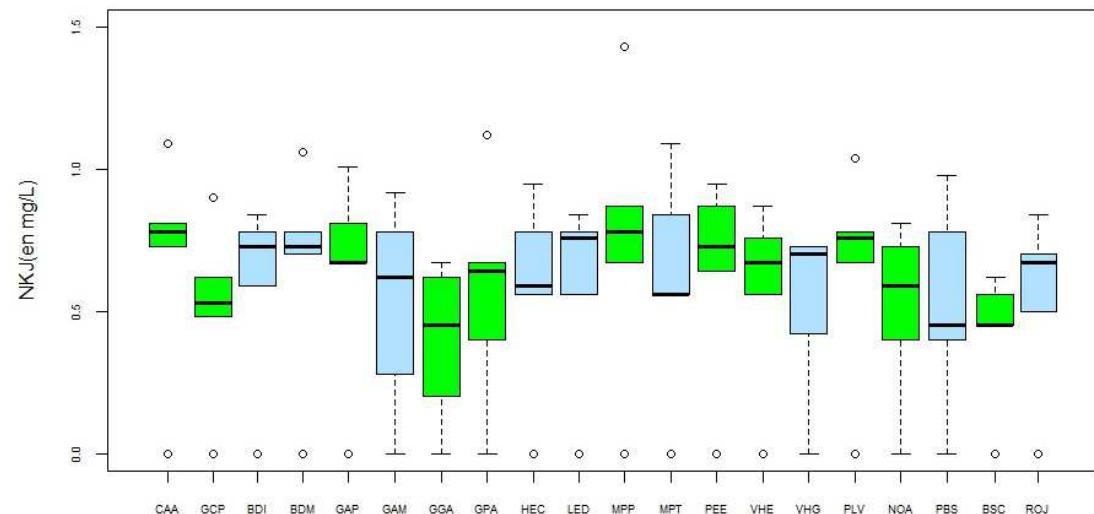
**e. L'azote Kjeldahl**

La méthode de Kjeldahl permet de doser les quantités d'azote organique oxydable présente sous forme de molécules azotées ou d'acide aminés et d'azote ammoniacal présentes dans le milieu. 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. La plupart des valeurs mesurées dans les stations des réseaux de Surveillance et de Référence de la Martinique sont nulles ou inférieures au seuil de quantification. Elles restent très faibles et inférieures à 1 mg/L dans la Grande Rivière Pilote à l'aval du bourg Rivière Pilote et inférieures à 1,5 mg/L dans l'ensemble des stations de la Guadeloupe.

MARTINIQUE

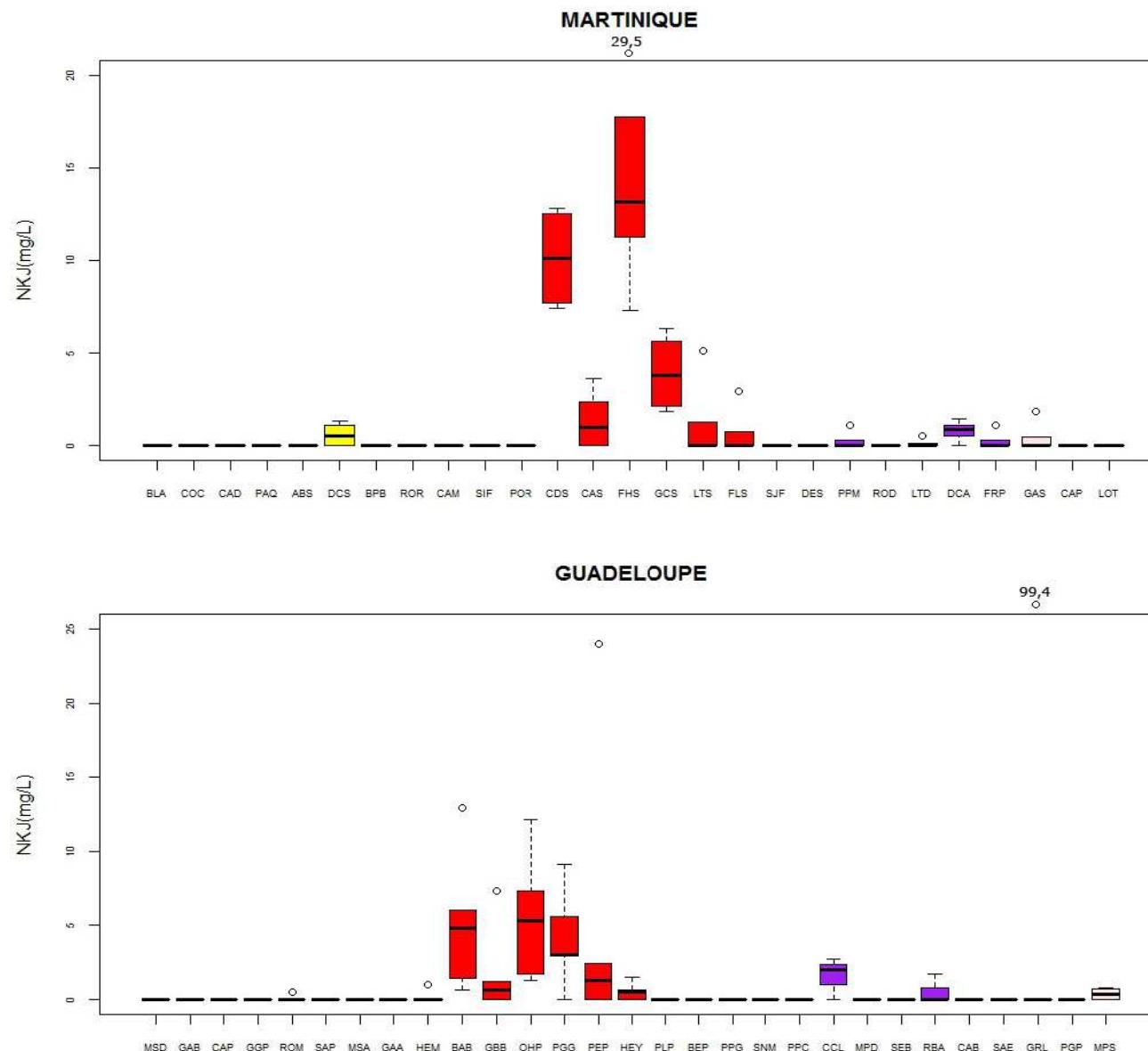


GUADELOUPE



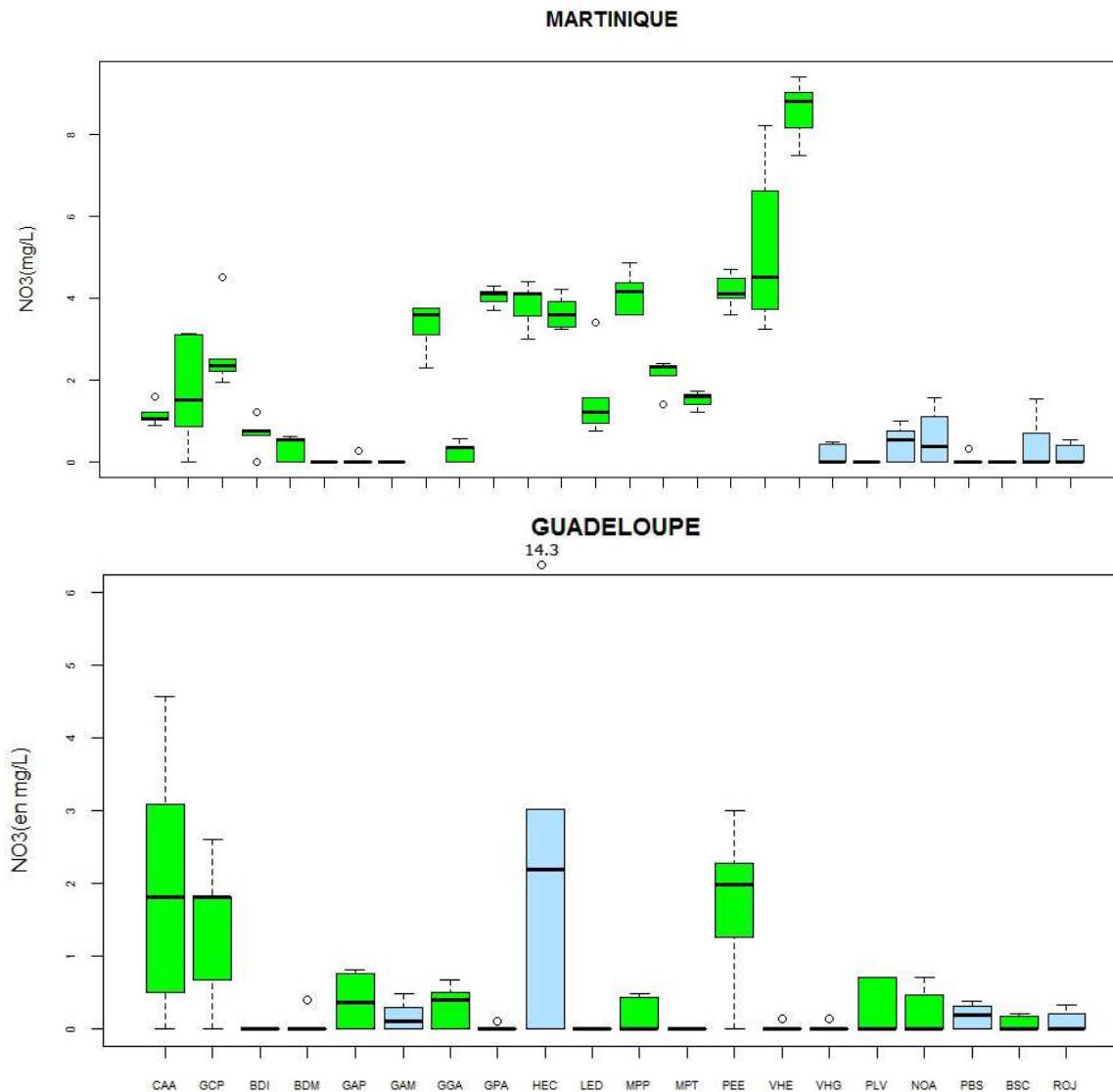
**Figure 24 : Box-plots des valeurs de l'azote Kjeldahl (NKJ) mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**



Seules les stations situées à l'aval des STEPs ont des valeurs d'azote Kjeldahl élevées. Une valeur élevée a également été mesurée dans la Ravine Grossou en Guadeloupe lors de la campagne 5, qui a eu lieu après le curage du cours d'eau et à l'aval de l'abattoir de volaille en Martinique.

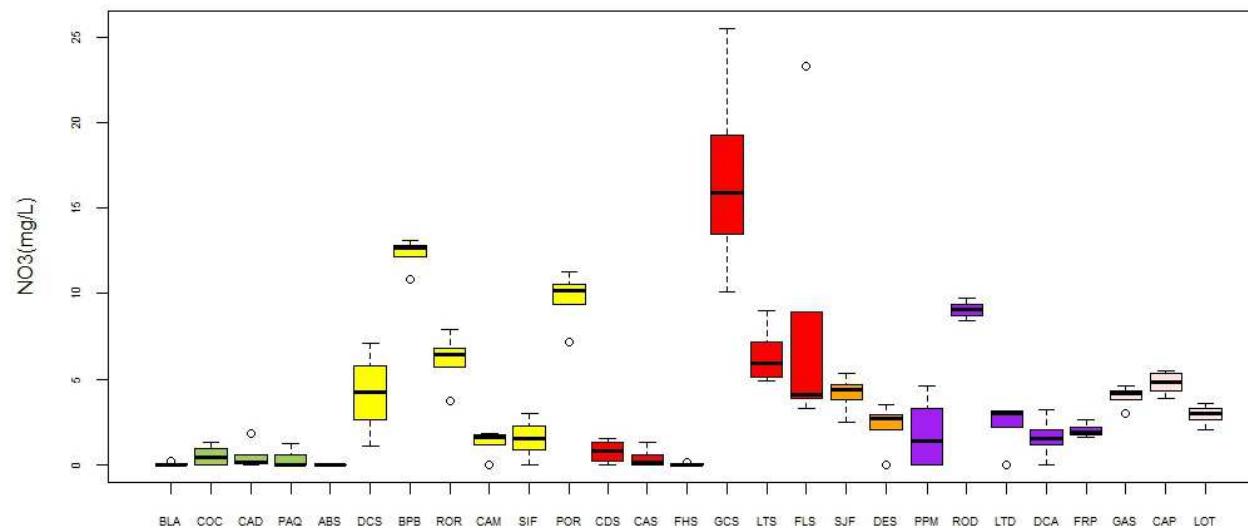
**Figure 25 : Box-plots des valeurs de l'azote Kjeldahl (NKJ) mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

**f. Les nitrates**

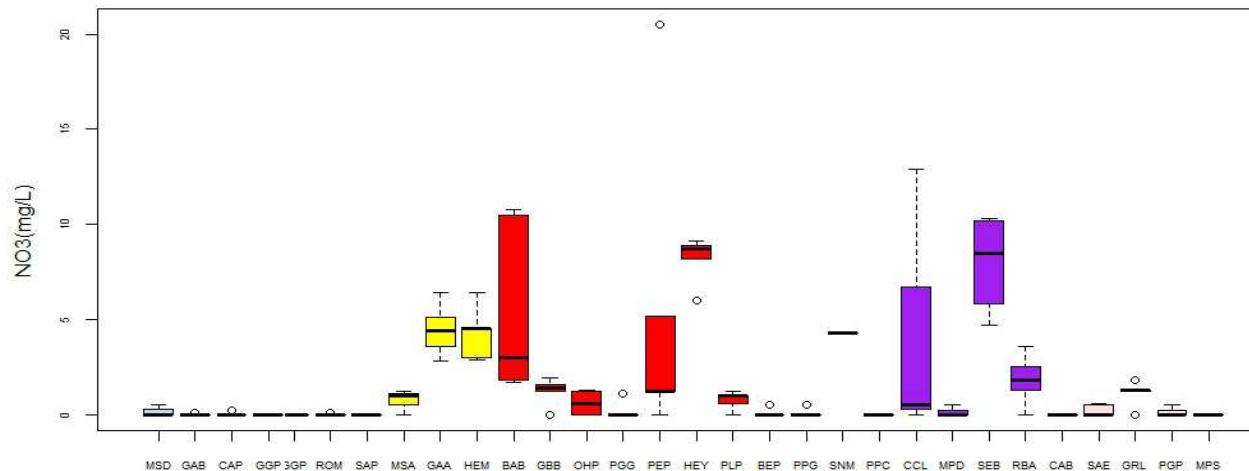
Selon Nisbet et Verneaux, le taux de nitrates des eaux naturelles non polluées est très variable selon la saison et l'origine des eaux : Il peut varier de 1 à 15 mg/L et une concentration de 2 ou 3 mg/L est tout à fait normale. Les valeurs observées dans les réseaux de surveillance et de référence sont de cet ordre-là. On observe cependant une différence globale entre les valeurs mesurées dans les stations de Référence et celles mesurées dans les stations de Surveillance. Les valeurs observées dans les rivières Madame et Roxelane sont de l'ordre de celles mesurées dans les stations du réseau complémentaire. Les valeurs sont souvent plus faibles dépassant rarement 3 mg/L. La valeur observée dans la Rivière aux Herbes à Choisy a été mesurée au cours de la campagne 5, soit réellement dans la Rivière aux Herbes.

**Figure 26 : Box-plots des valeurs de nitrates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**

**MARTINIQUE**



**GUADELOUPE**



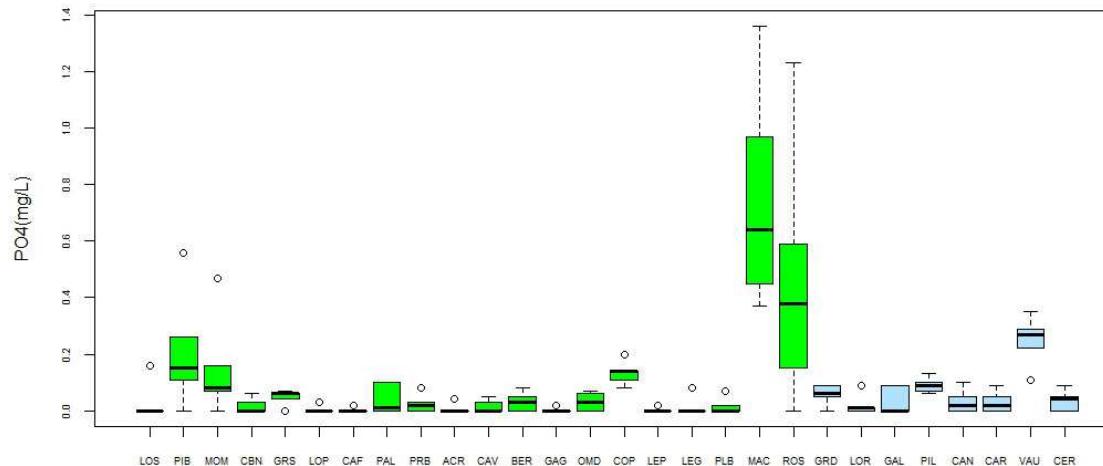
Les valeurs mesurées sur les réseaux complémentaires sont globalement plus élevées que celles mesurées dans les réseaux de Surveillance et de Référence, en particulier dans les stations situées en aval des STEP, dans les réseaux « Pesticides » (stations situées à l'aval des bassins versants subissant aussi une pollution diffuse) et à l'aval des rejets des industries agroalimentaires.

Les stations choisies pour leurs caractéristiques géochimiques particulières comme les stations de Référence en Guadeloupe ont au contraire des valeurs très faibles à inférieures au seuil de quantification.

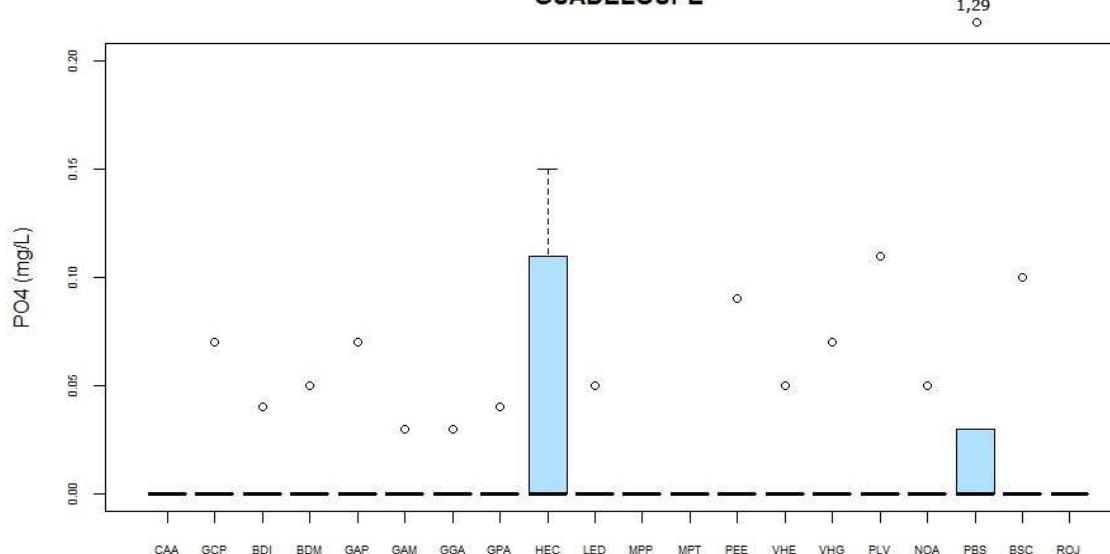
**Figure 27 : Box-plots des valeurs de nitrates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

**g. Les orthophosphates**

MARTINIQUE



GUADELOUPE

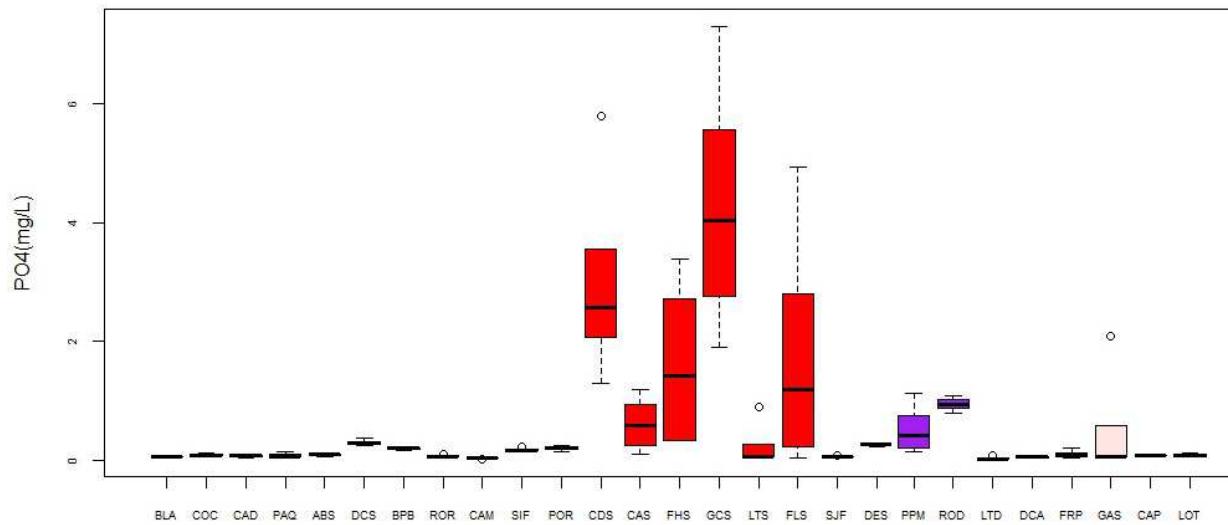


Nisbet et Verneaux considèrent que la présence de phosphates dans les eaux naturelles à des concentrations supérieures à 0,1 ou 0,2 mg/L est l'indice d'un enrichissement en molécules phosphatées dont l'origine peut être multiple : métabolisme humain, produits de nettoyages, rejets industriels, rejets agricoles ou naturels entraînés par les eaux de ruissellement. L'excès de composés phosphorés et azotés, ou eutrophisation, entraîne un déséquilibre des écosystèmes. Ces seuils sont dépassés dans les rivières Monsieur et Roxelane et, plus modérément, dans les rivières Grande Rivière Pilote et Vauclin. En Guadeloupe, les valeurs d'orthophosphates dépassent rarement le seuil de quantification et pratiquement jamais le seuil de d'eutrophisation à l'exception d'une valeur mesurée dans la Rivière du Premier Bras à l'amont de la distillerie Séverin. Excepté ces rivières, les valeurs mesurées sont caractéristiques d'eaux oligotrophes en ce qui concerne la Guadeloupe et d'eaux de productivité moyenne en ce qui concerne la Martinique.

**Figure 28 : Box-plots des valeurs d'orthophosphates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS**

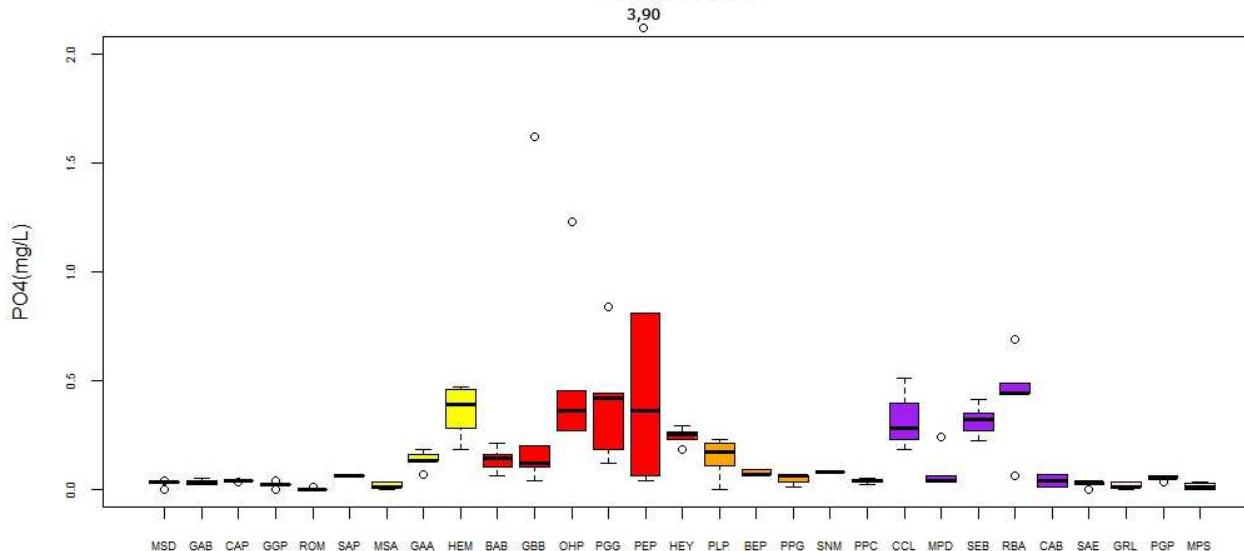
**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**MARTINIQUE**



Les stations concernées par des valeurs d'orthophosphate anormalement élevées sont les mêmes que celles qui subissent des apports de nitrates. Ces stations subissent donc une nette eutrophisation d'origine anthropique.

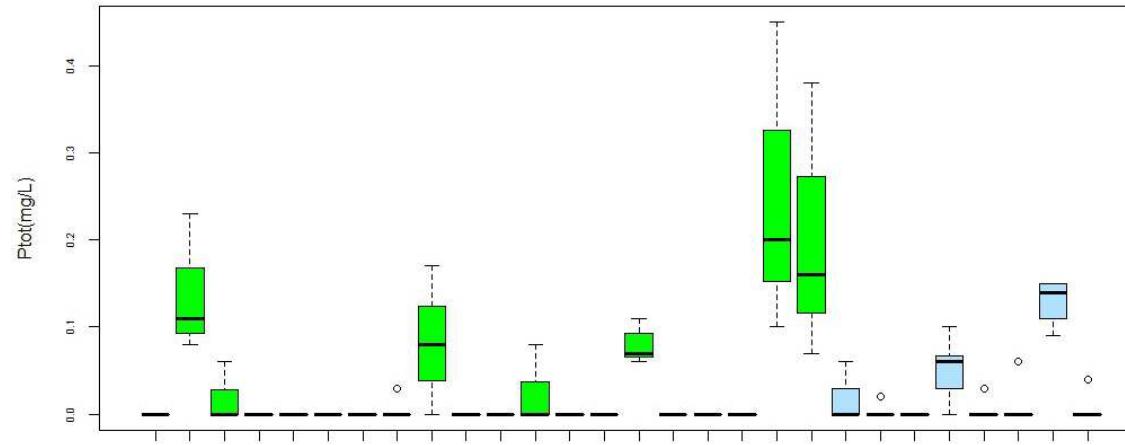
**GUADELOUPE**



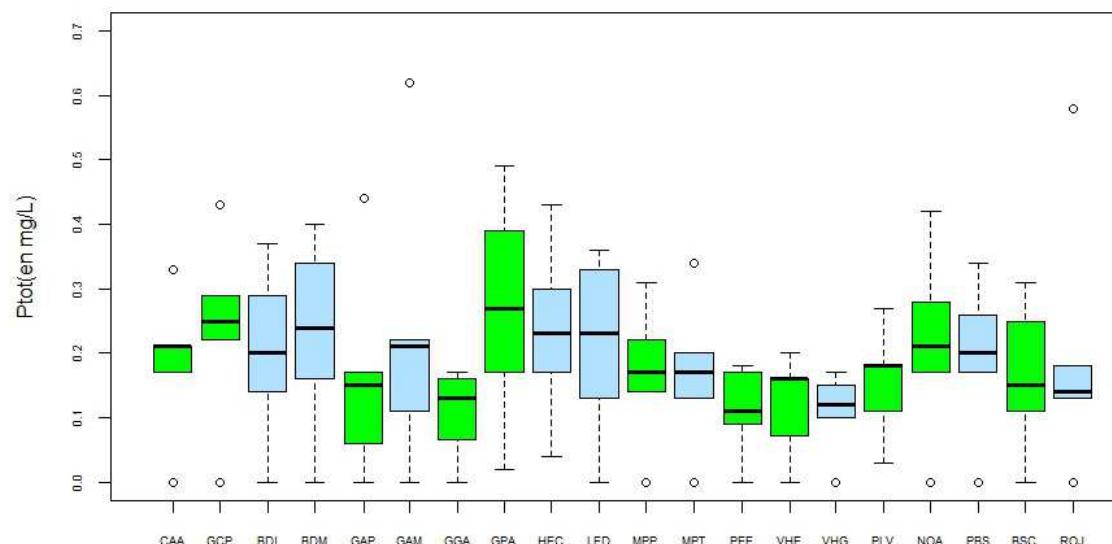
**Figure 29 : Box-plots des valeurs d'orthophosphates mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

*h. Le phosphore total*

MARTINIQUE

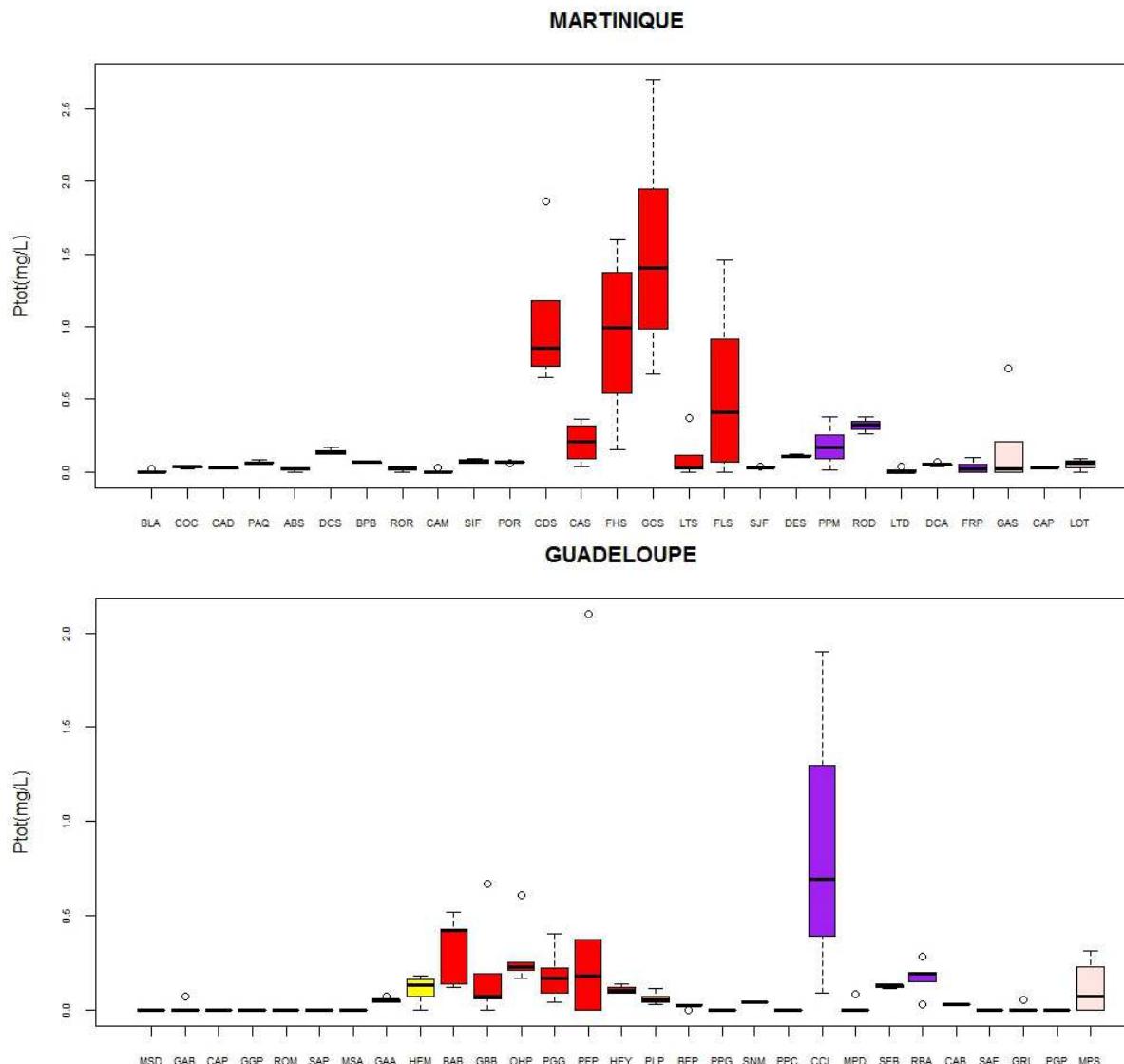


GUADELOUPE



Le phosphore total regroupe le phosphore inorganique (polyphosphates et orthophosphates) et le phosphore organique (phospholipides, esters, polynucléotides, ATP....). Les valeurs de phosphore total mesurées dans les stations du RCS (Surveillance et Référence) de la Guadeloupe sont souvent inférieures au seuil de quantification et atteignent, au plus, 0,6 mgP/L. Les valeurs observées en Martinique sont du même ordre de grandeur.

Figure 30 : Box-plots des valeurs de phosphore total mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RCS



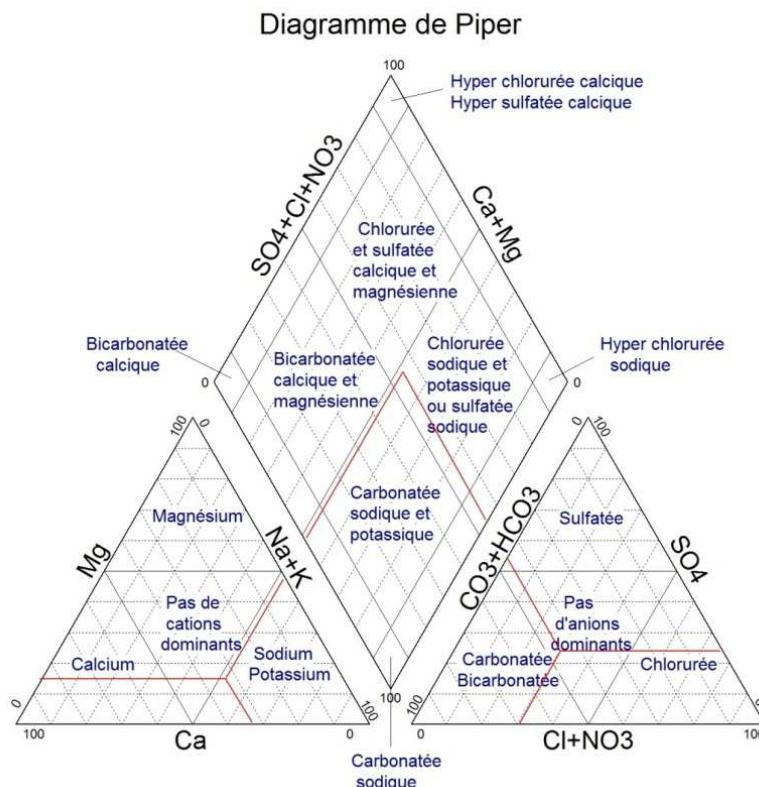
Comme pour les nitrates et les orthophosphates, les stations les plus impactées par le phosphore total sont les stations situées à l'aval des STEP et des industries agroalimentaires des 2 îles. Les stations du réseau « Pesticides » de la Martinique semblent moins impactées par le phosphore total que par les orthophosphates ce qui signe une origine plutôt terrigène (agricole et naturelle) du phosphore dans ces stations. En revanche, la Rivière aux Herbes (Marché) de la Guadeloupe est impactée par le phosphore total autant que par les orthophosphates. Même si cet enrichissement a une origine agricole et naturelle, les nombreux rejets (domestiques et STEP) que reçoit le cours d'eau sont également en cause dans son eutrophisation.

**Figure 31 : Box-plots des valeurs de phosphore total mesurées au cours des cinq campagnes de prélèvement dans le RC**

### i. Les minéraux

Les teneurs en minéraux mesurées dans les cours d'eau sont souvent le reflet de son fond géochimique. Aussi la variabilité des valeurs est faible d'une campagne à l'autre. La moyenne des 5 (4 en ce qui concerne le RC de la Martinique) valeurs mesurées pour chaque paramètre a donc été calculée.

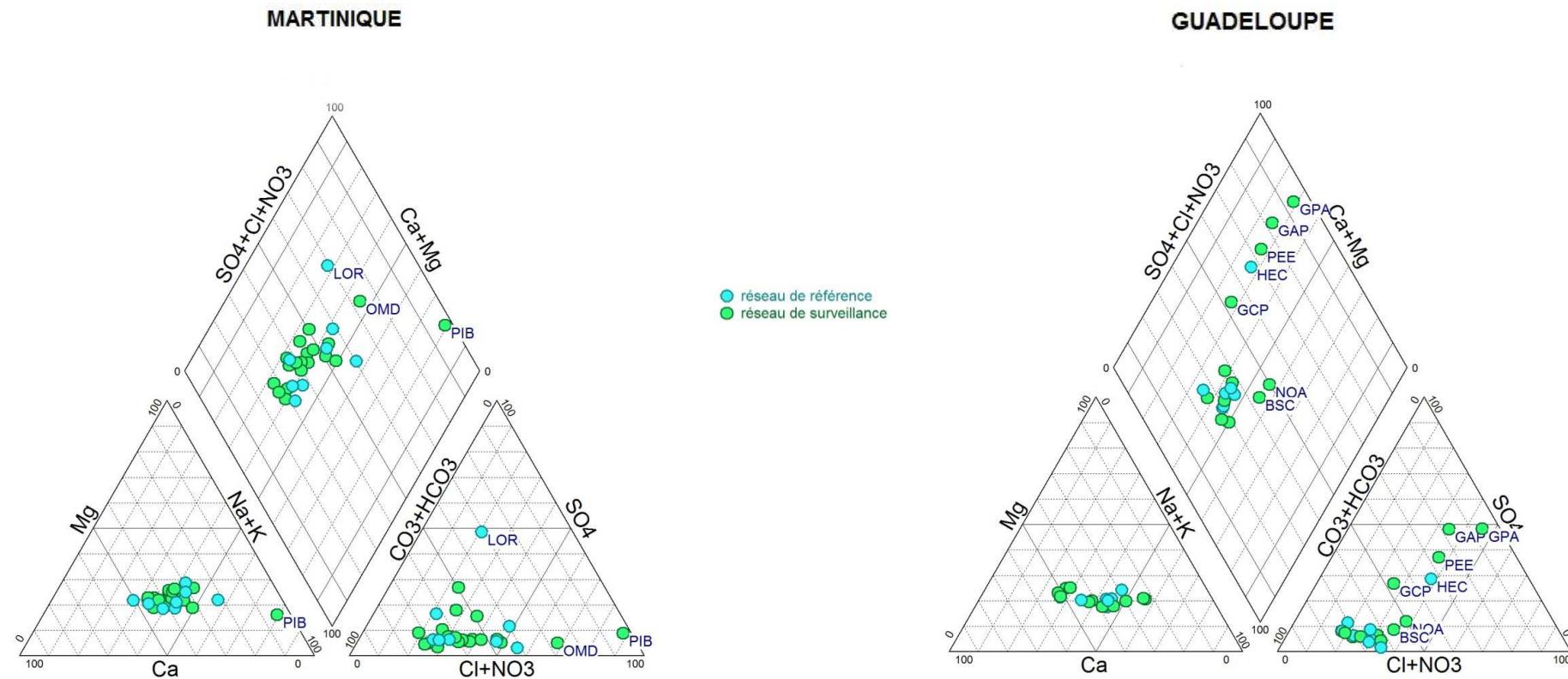
Les résultats sont présentés sous la forme de diagrammes de Piper<sup>9</sup> (figure ci-dessous) permettant ainsi de définir le faciès minéral des masses d'eau étudiées.



**Figure 32 : Définition des faciès minéraux selon le diagramme de Piper**

<sup>9</sup> "D I A G R A M M E S" version 5.8 (05/07/2012) :

Logiciel d'hydrochimie multi-langage en distribution libre - Roland SIMLER Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.



**Figure 33 : Faciès minéral synthétique des stations des réseaux de surveillance et de référence en Martinique et en Guadeloupe**

En Martinique, les eaux de la plupart des cours d'eau étudiés sont plutôt bicarbonatées calciques et magnésiennes. La Rivière du Lorrain (Trace des Jésuites) se distingue par des eaux plus riches en sulfates (eaux sulfatées calciques et magnésiennes). La Rivière d'Oman à Dormante montre des eaux chlorurées calciques et magnésiennes alors que la Grande Rivière Pilote à l'aval du bourg de Rivière Pilote montre des eaux chlorurées sodiques et potassiques.

En Guadeloupe, les eaux de la plupart des cours d'eau étudiés sont plutôt bicarbonatées calciques et magnésiennes. Cinq cours d'eau se distinguent : La Rivière du Grand Carbet, la Rivière aux Herbes (à Choisy ainsi que la Ravine aux Avocats), la Rivière des Pères et la Rivière du Galion (Moscou) et la Rivière Grande Plaine aval. Leurs eaux sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes. Les 4 premiers cours d'eau cités prennent leur source à proximité du dôme de la Soufrière. Quant à la Rivière Grande Plaine aval, elle est sûrement sous influence de l'ancienne activité volcanique de cette zone.

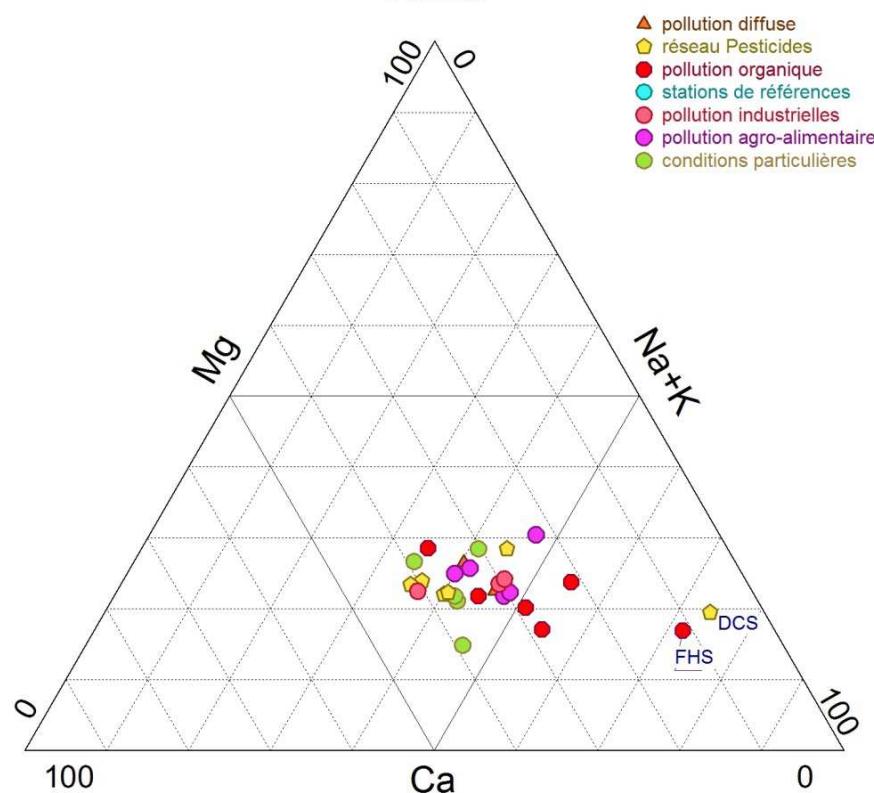
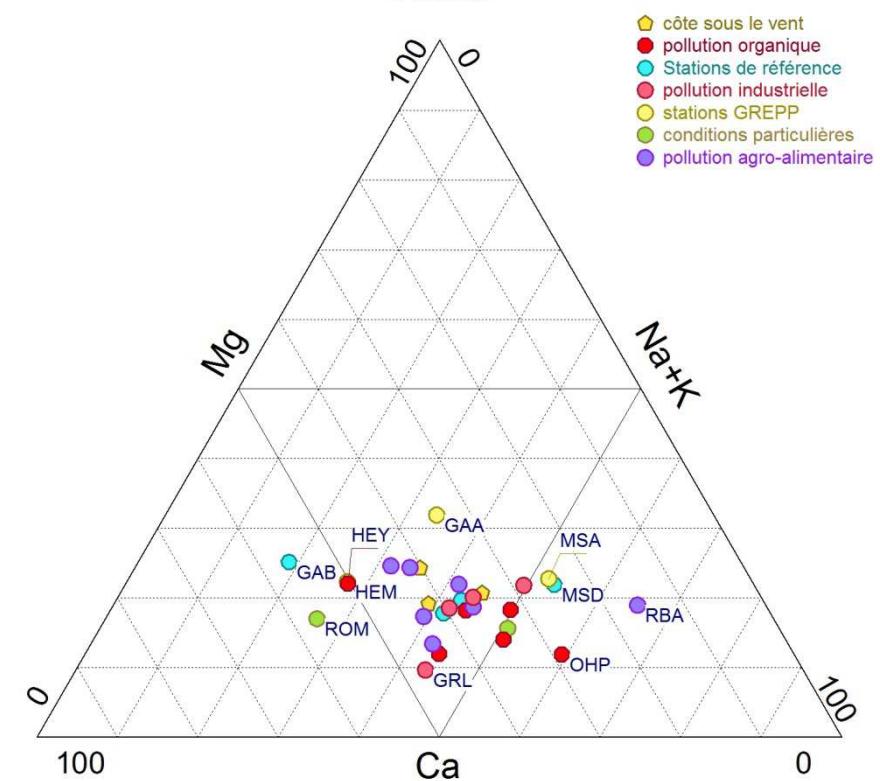
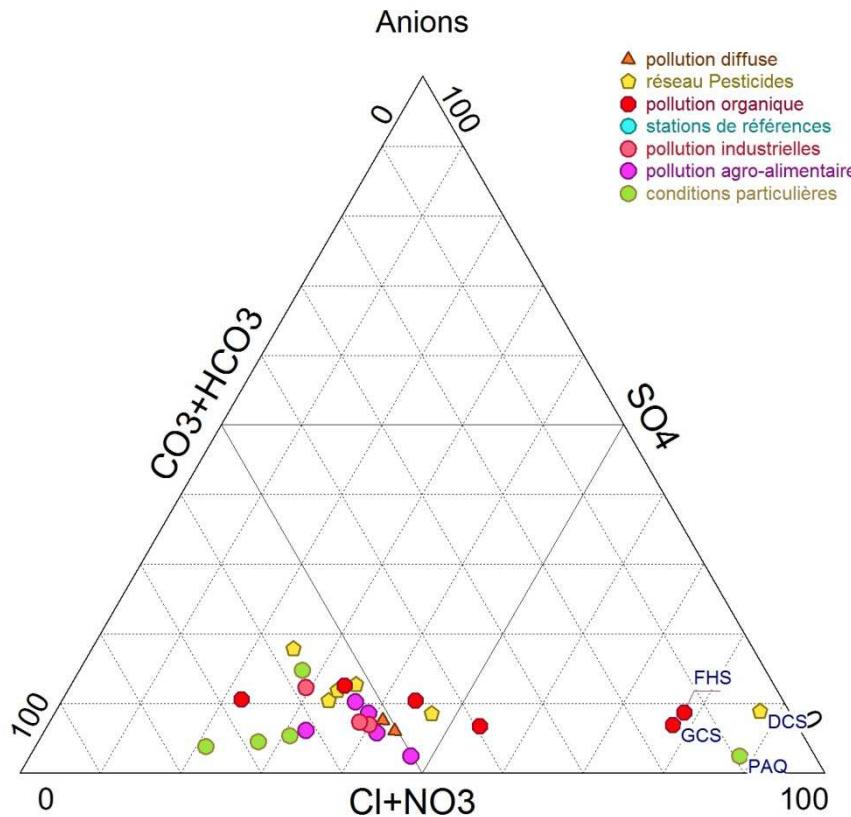
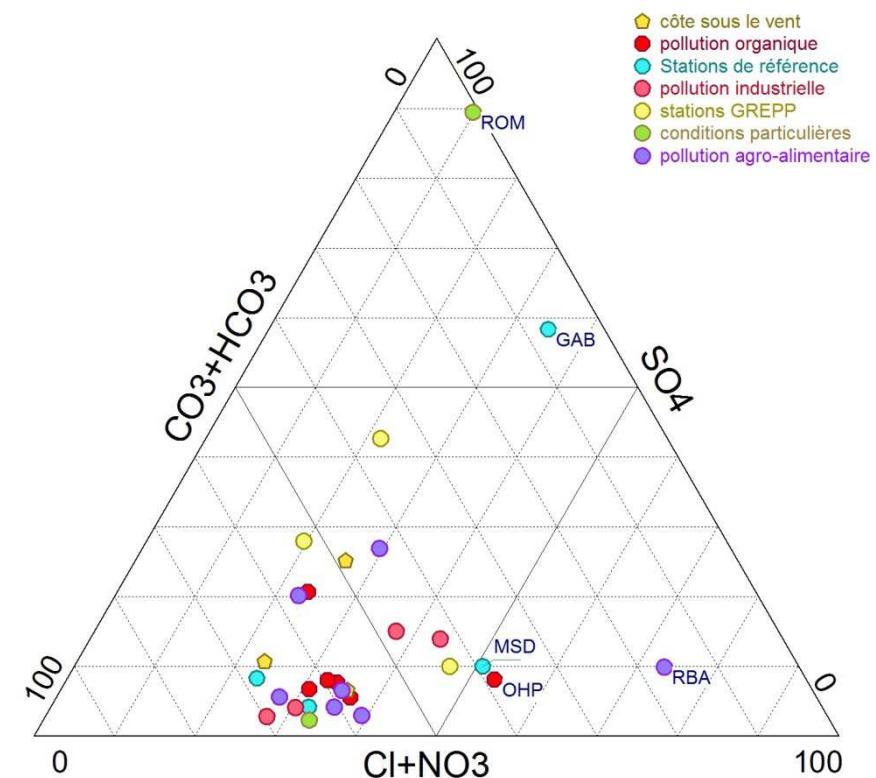
**MARTINIQUE****Cations****GUADELOUPE****Cations**

Figure 34 : Faciès cationique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe

Dans la plupart des échantillons de Guadeloupe, on ne remarque pas de dominance particulière d'un cation, à l'exception de la Rivière du Galion (Bassin bleu), de la Rivière Rouge (Matouba) et de la Rivière aux Herbes (Les Yuccas) caractérisées par l'abondance du calcium. De même, les eaux de la Ravine de Onze Heure (Petit-Bourg), de la Ravine bleue (aval élevage de Ouassous) et, dans une moindre mesure, de la Rivière Moustique Sainte-Rose aval (Débauchée et amont embouchure) sont plus riches en sodium et potassium que les autres cours d'eau.

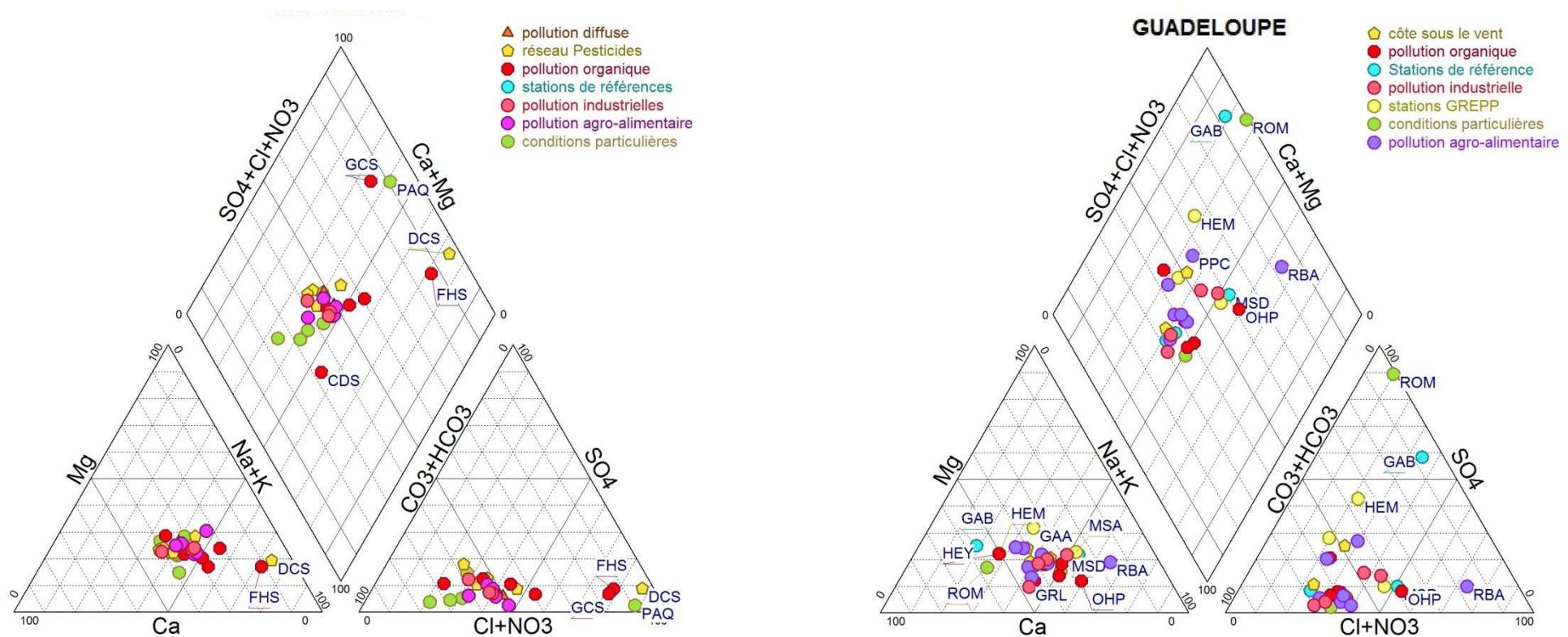
En Martinique, la Rivière Deux Courants (réseaux pesticides et influence haline) et la Ravine Fond Henri (aval STEP) sont nettement plus riches en sodium et potassium.

**MARTINIQUE****GUADELOUPE****Anions**

**Figure 35 : Faciès anionique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe**

Le faciès anionique des stations étudiées en Guadeloupe révèle un profil plutôt carbonaté à l'exception encore de la Rivière du Galion (Bassin bleu) et de la Rivière Rouge (Matouba), respectivement sulfatées à très sulfatées (figure ci-dessus). La Ravine bleue (aval élevage de ouassous) se distingue par son profil nettement chloruré. C'est également le cas mais plus modestement de la Ravine de Onze Heure (Petit-Bourg) et de la Rivière Moustique Sainte-Rose aval (Débauchée).

Comme en Guadeloupe, beaucoup de stations du réseau complémentaire de Martinique sont carbonatées et bicarbonatée. Les rivières Grand Case (aval STEP), Deux Courants (réseau pesticides), Paquemar (géochimie particulière) et la Ravine Fond Henri (aval STEP) sont nettement chlorurées. Cependant, seule la Rivière Deux Courants est sous influence des marées.



**Figure 36 : Faciès minéral synthétique des stations des réseaux complémentaires en Martinique et en Guadeloupe**

En Guadeloupe, les eaux de la Rivière du Galion (Bassin bleu) et de la Rivière Rouge (Matouba) sont sulfatées calciques. Celles de la Ravine bleue (aval élevage de ouassous) ainsi que celles de la Ravine de Onze Heure (Petit-Bourg) et de la Rivière Moustique Sainte-Rose aval (Débauchée) sont chlorurées sodiques et potassiques, alors que les autres stations se caractérisent par des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Le diagramme de Piper ci-dessus synthétise ces résultats.

En Martinique, le Canal de Ducos (aval STEP) est de type carbonaté sodique et potassique, les rivières Grand Case (aval STEP) et Paquemar (géochimie particulière) sont de type chlorurée calcique et magnésienne, et la Rivière Deux Courants (réseau pesticides et influence marine) ainsi que la Ravine Fond Henri (STEP) sont chlorurées sodiques et potassiques. Tous les autres cours d'eau du réseau complémentaire ont des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

**Partie II :**  
**Elaboration de l'indice diatomique**  
**des Antilles françaises**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

### III. L'ANALYSE DE DONNÉES : LA DÉMARCHE GLOBALE D'ANALYSE

La démarche globale d'analyse conduite sur ce jeu de données a été organisée de façon à produire la connaissance nécessaire à l'élaboration d'un nouvel indice diatomique adapté au contexte biogéographique et écologique des Antilles. Le contexte géo-climatique et l'objectif du programme présentant d'assez fortes similitudes avec un programme achevé début 2012 à la Réunion pour la mise au point d'un indice spécifique à ce DOM (l'Indice Diatomique Réunion ou IDR), le cadre conceptuel et l'articulation méthodologique des phases principales de l'analyse des données de Martinique et de Guadeloupe ont été relativement comparables à celles qui ont servi récemment dans le cadre de la conception de l'IDR. Toutefois, il a fallu adapter la pratique aux spécificités du jeu de données et la conduite concrète de la démarche aux Antilles a de ce fait présenté certaines particularités.

Sur le plan de la démarche générale d'analyse, il a tout d'abord été nécessaire d'étudier **les principaux gradients présents dans le jeu de données abiotique**, correspondant aux forçages environnementaux et anthropiques s'appliquant sur les cours d'eau locaux.

Il a ensuite été nécessaire d'essayer de comprendre la **structuration des communautés de diatomées** en réponse à ces forçages environnementaux globaux rencontrés en Martinique et Guadeloupe. Ce point est important pour mieux caractériser les flores typiques (naturelles, altérées), mais aussi pour pouvoir déterminer, dans le cadre d'application de la DCE, à quels sites de référence adéquats il sera possible de comparer un site de réseau dont on cherche à évaluer l'état écologique.

Après cette prise de connaissance des jeux de données et de leur structuration, il était important de **mettre en relation la réponse des espèces avec les gradients d'anthropisation**, afin de déterminer leur **profil de qualité**. Ces profils de qualité ont été ensuite mobilisés et exploités avec certaines règles spécifiques afin de donner à chaque espèce contributive de l'indice un message écologique permettant au nouvel outil de bio-indication, **l'Indice Diatomique des Antilles ou IDA**, de rendre compte du **gradient d'anthropisation à la station et à la date** en fonction de la **composition floristique spécifique du relevé collecté**.

La **Figure 37** en page suivante résume les caractéristiques de la démarche réalisée, qui s'est organisée selon 5 natures ou groupes de tâches. Les Tâches de 1 à 3, qui consistent en une analyse exploratoire des données avec l'utilisation de techniques descriptives multivariées, avaient pour objectif l'investigation de la structure des données abiotiques d'une part (ACP complète), des données sur les assemblages biologiques d'autre part (biotypologie basée sur une SOM), et enfin l'étude des co-variations entre matrice des descripteurs abiotiques de l'environnement et des réponses biologiques (CCA complète).

- **Tâche 1 :** Basée sur une ACP des données abiotiques complètes, elle visait à bien prendre connaissance de la **structure des données abiotiques**, de la contribution de chaque variable, des gradients représentés dans le jeu de données, de l'auto-corrélation des variables, et à commencer de repérer comment il était possible d'**isoler gradients naturels et gradients anthropiques**.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

- **Tâche 2 :** Basée sur l'utilisation d'un réseau neuronal non supervisé, la Self-Organizing Map ou SOM, une analyse spécifique s'appuyant sur la matrice biologique des 471 relevés d'assemblages diatomiques visait à repérer les **communautés de diatomées-types des Antilles** et à repérer **les grands traits spécifiques de leurs préférences écologiques**. Le jeu de données incluant des sites de très bonne qualité et des sites altérés, un premier objectif de cette biotypologie était de dégager des assemblages diatomiques de référence d'une part, et des assemblages-types représentatifs de natures et d'intensités d'altérations d'autre part. Un second objectif de cette analyse était de repérer si la distribution des biotypes diatomiques était plutôt commune aux deux îles, ou au contraire spécifique à l'une d'entre elles. Dans le 1<sup>er</sup> cas, il serait plus performant de produire, à partir du jeu de données regroupé, un même indice pouvant s'appliquer indifféremment sur la Martinique et la Guadeloupe. En cas de différences très sensibles de biotypologie sur les 2 îles, il serait au contraire préférable de construire un indice spécifique par île.

- **Tâche 3 :** Basée sur une analyse capable de mettre en relation **gradients abiotiques et réponses biologiques** (CCA complète), elle visait à bien prendre connaissance de l'effet des **gradients naturels** (quels descripteurs, quel poids sur les flores des Antilles) de manière à mieux en isoler ensuite les effets par rapport à celui des **gradients anthropiques** (optique genèse de l'indice biologique).

Cette partie d'analyse exploratoire de la structure des données abiotiques et biologiques complètes des Antilles fait l'objet du **Chapitre IV** « Analyse exploratoire des données abiotiques et biologiques » du présent rapport.

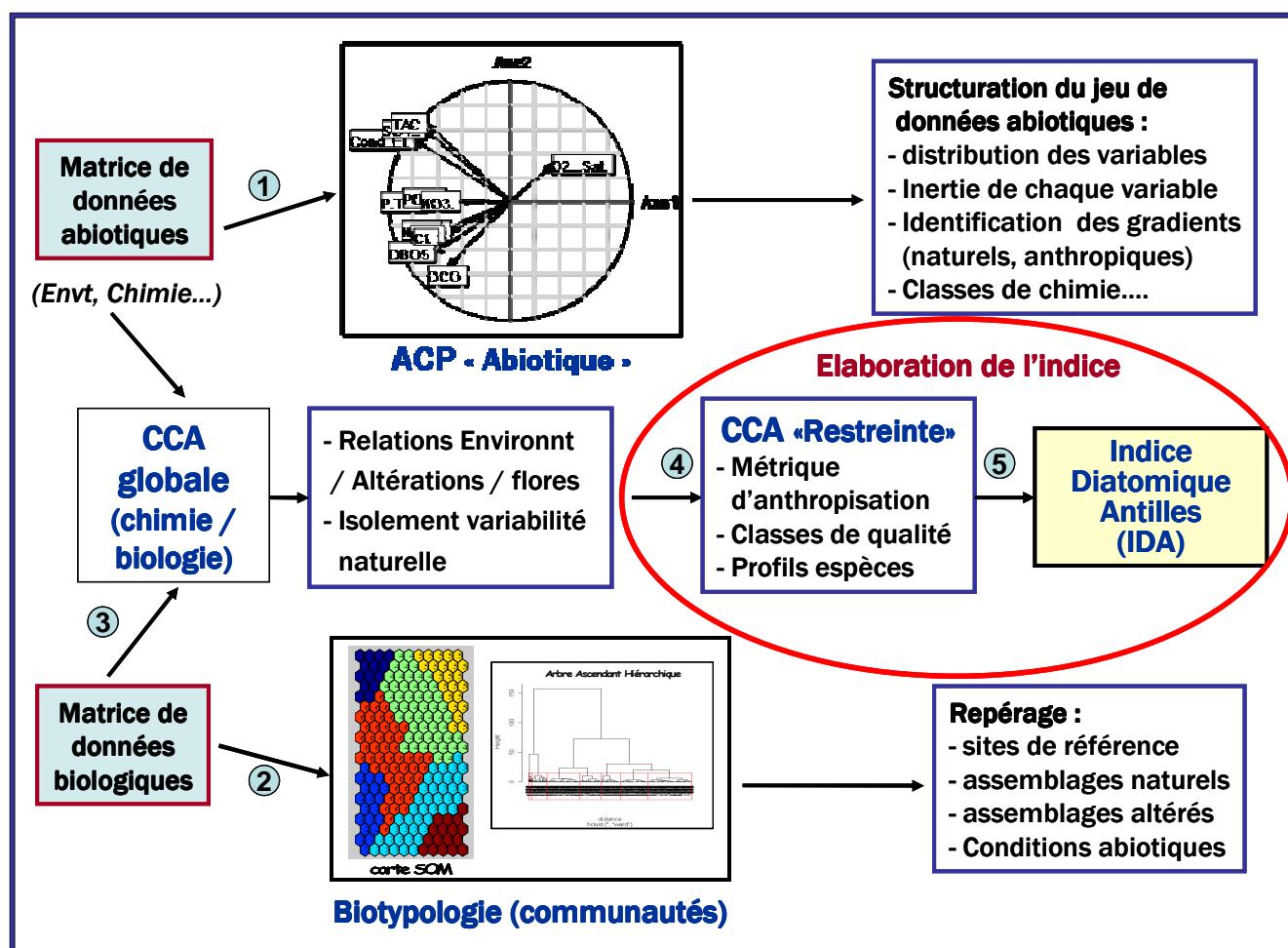


Figure 37 : Organigramme de la démarche d'analyse de données réalisée

Les 2 tâches suivantes, basées sur une analyse restreinte centrée sur 10 descripteurs abiotiques les plus susceptibles de rendre compte d'impacts anthropiques, avaient pour objectif la mise au point proprement-dite de l'indice (zone cerclée de rouge dans la Figure 37) :

- **Tâche 4** : Basée sur une CCA restreinte, elle avait pour but d'isoler et de quantifier **l'effet des variables synonymes d'altération anthropique sur les flores**, de façon à représenter le gradient d'anthropisation présent aux Antilles et d'affecter aux espèces à prendre en compte dans l'indice, un profil adéquat de qualité.
- **Tâche 5** : Elle a porté sur l'**élaboration proprement dite de l'indice** (méthode de prise en compte du profil des espèces constitutives, formule de calcul...), puis sur son utilisation pour calculer les notes indicielles des sites aux dates d'étude à partir de la composition spécifique des relevés.

Cette partie de la démarche spécifiquement dédiée à la conception du nouvel indice diatomique sera traitée spécifiquement au **Chapitre V** relatif à la conception de l'indice.

En fin de rapport, les résultats de l'indice ont fait l'objet d'un travail exploratoire de détermination d'Etat Ecologique selon deux stratégies : la plus simple, basée directement sur les notes du nouvel indice et une autre, plus « DCE-compatible », faisant intervenir des calculs d'EQRs sur la base de la trame géographique abiotique des HERs.

Les résultats ont fait l'objet d'une première évaluation dont les résultats, même si encore perfectibles sur des cas particuliers, étaient déjà globalement satisfaisants dans la réponse pression-impact. Un nouveau scénario post-Copil basé sur l'application de 2 variantes d'IDA sur 2 regroupements d'HERs pertinents sur le plan des conditions naturelles a amélioré l'évaluation globale d'état, mais laisse encore quelques questions ouvertes et options à trancher courant 2013, zen fonction notamment du statut écologique donné à l'espèce NINC.

## IV. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNÉES ABIOTIQUES ET BIOLOGIQUES

### A. Analyse des données abiotiques, étude des gradients environnementaux

#### 1. Matrice de chimie et ses descripteurs

La matrice de chimie utilisable pour l'analyse des données contient 468 sets de descripteurs de physico-chimie ou de chimie pouvant être mis en correspondance avec des relevés biologiques (site x date) correspondants. Cette base est renseignée, plus ou moins complètement selon le cas, pour 25 paramètres physico-chimiques et hydrochimiques. Ceux-ci peuvent être regroupés en 3 grandes catégories :

##### **1-1) Les données de physico-chimie de terrain**

Elles ont le plus souvent été réalisées de façon couplée avec l'échantillonnage des biofilms de terrain, pour bien représenter les conditions *in situ* au moment du prélèvement. Il a existé quelques rares exceptions à ce principe (cas de sonde ayant subi un problème), les mesures ayant dans ce cas été refaites *in situ* sous 2 à 3 jours maximum.

Les données mesurées sur le terrain étaient les suivantes :

Paramètre	T°eau	pH	Cond. El.	Teneur en O <sub>2</sub>	Saturation O <sub>2</sub>
Unité	°C	Unités pH (0-14)	µS/cm	mg/l	% saturation

En pratique, la teneur de l'eau en O<sub>2</sub> à saturation étant régie de façon importante par la pression atmosphérique et la température de l'eau, ces 2 variables étant elles-mêmes fortement influencées par un assez fort gradient d'altitude présent aux Antilles (concentration en O<sub>2</sub> dissous beaucoup plus importante à saturation pour des eaux froides ou fraîches que tempérées), la variable la plus significative d'une aptitude à la vie biologique et d'une demande en oxygène en train de s'exercer est le % de saturation. Les teneurs en O<sub>2</sub>, peu comparables d'un site à l'autre et d'une saison à l'autre ont pu être utilisées dans les analyses de données globales, mais c'est surtout les données de saturation qui ont fait l'objet d'une interprétation.

## 1-2) Les données de chimie de laboratoire

Dans le contexte d'acquisition très récente de la connaissance de base sur la taxonomie et l'écologie des espèces de diatomées présentes aux Antilles, l'objectif réaliste assigné à ce premier indice diatomique est de réaliser un diagnostic fiable **de l'altération trophique et organique, voire chimique au sens altération chimique générale par des acides, des bases, des sels** (portée comparable à celle de l'IBD en métropole, de l>IDR à la Réunion).

Par contre, il est encore illusoire à ce stade de penser diagnostiquer finement une altération toxique liée à des micropolluants comme les pesticides, les métaux, ce qui pourrait faire l'objet d'un programme ultérieur une fois la connaissance écologique de base portée par les diatomées considérée comme bien connue.

Les descripteurs retenus pour entrer dans la matrice de données abiotiques du projet ont donc été les suivants :

### 1-2-a) Descripteurs représentatifs de la géochimie-hydrochimie naturelle :

Outre le pH et la conductivité électrique, paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* et eux aussi très inféodés à la géologie / géochimie / hydrochimie naturelle, les descripteurs analysés au laboratoire et retenus dans la matrice de données comme influencés de façon nettement dominante par les environnements naturels sont les suivants :

- **Calcium**, exprimé en mg de Ca++/L (le Mg++, complètement auto-corrélé et redondant avec le calcium, n'a pas été pris en compte)
- **Magnésium**, exprimé en mg de Mg++/L
- **Hydrogénocarbonates**, exprimés en mg (HCO<sub>3</sub>)-/L. Cette variable représentera les sites aux eaux carbonatées riches en hydrogénocarbonates (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)<sup>-</sup> et (HCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>
- **Chlorures**, exprimés en mg Cl-/L. Ils constituent le meilleur descripteur des influences halines naturelles trouvées à proximité du littoral. Dans cette mise au point d'indice, on cherchera à s'affranchir de la prise en compte de la sélection qu'ils exercent sur les flores naturelles dans le diagnostic d'altération (outre l'influence littorale qui n'est pas synonyme d'une altération anthropique, il peut en arriver de façon naturelle dans des secteurs amont de cours d'eau sous influence volcanique et thermale). Ils peuvent aussi être localement présents dans des rejets d'origine anthropique (rejets d'IAA, d'industries chimiques...)
- **Sodium**, exprimé en mg Na+/L. C'est essentiellement un descripteur d'influence haline littorale. Cependant, des eaux thermales issues du volcanisme peuvent aussi en contenir, sous forme de chlorures et aussi sous forme de carbonates, et sélectionner des flores naturelles un peu spécifiques. Enfin, il peut en être contenu dans des rejets anthropiques.
- **Sulfates**, exprimés en mg (SO<sub>4</sub>)--/L. Ils peuvent être présents de façon naturelle dans les eaux de la Réunion (influence géologique du volcanisme) et exercer une sélection de flore d'origine naturelle. On peut aussi en trouver des concentrations importantes dans des rejets anthropiques, notamment d'origine chimique et domestique, et ils signent dans ce cas une altération.

- **Titre alcalimétrique complet** (TAC). C'est un bon indicateur de conditions chimiques naturelles représentant bien le gradient entre des eaux acides peu minéralisées et des eaux géochimiquement très minéralisées, de type sources thermales plus ou moins carbonatées et basiques. Mais 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...).

### **1-2-b) Descripteurs typiquement représentatifs du degré d'altération anthropique**

Les descripteurs suivants renseignent la situation du site sur un gradient s'échelonnant des conditions naturelles de référence aux conditions d'altérations anthropiques les plus extrêmes :

- **Teneur en MES** (exprimée en mg/L). Bien sûr dépendante en partie des conditions géologiques / pédologiques et des pentes, la teneur en MES, surtout hors épisodes de crues pendant lesquels l'échantillonnage diatomique est déconseillé, peut être représentative des usages agricoles et rendre compte, sur des valeurs moyennes au site, d'une altération anthropique liée à l'érosion.
- **P. Total** (exprimé en mg de P/L). Du fait de la forte teneur des argiles du sol en P, il est de façon dominante influencé par l'érosion, dont une partie est sous influence humaine. Incluant aussi les lixiviations de phosphore épandu sur les zones agricoles et les orthophosphates, une partie de son signal est aussi due aux pratiques agricoles de fertilisation, aux effluents (d'élevage, de STEP) et aux formulations lessivielle.
- **Orthophosphates** (exprimés en mg de (PO<sub>4</sub>)--/L). Il s'agit d'un descripteur tout-à-fait essentiel d'anthropisation. C'est la fraction la plus rapidement biodisponible du phosphore présent dans les hydrosystèmes. Originaire des engrains agricoles, des formulations lessivielle, des effluents d'élevage et d'IAA, des effluents domestiques et de STEP, c'est un responsable dominant des manifestations d'eutrophisation qui provoque d'importantes croissances micro-algales.

Une fois une biomasse importante mise en place, aux moments où la respiration (fins de nuits) ou les phénomènes de sénescence de la biomasse produite (processus fermentaires de recyclage) dominent sur l'activité photosynthétique, des phénomènes plus ou moins longs d'anoxie peuvent se manifester. Les diatomées sont des indicateurs performants de cette altération.

- **DCO** (exprimée en mg d'O<sub>2</sub>/L). Elle est représentative d'une charge organique dont une partie modérée peut être due à des conditions naturelles (eaux de tourbières et eaux de lixiviation de zones fortement organiques). Dans les fortes valeurs, elle signe un enrichissement organique anthropique qui peut aller de matières très oxydables (donc fortement dommageables au fonctionnement écologique d'un hydrosystème) à plus réfractaires (matières organiques non minéralisées au cours d'un traitement de STEP ou de rejet d'IAA). L'interprétation de sa nuisance passe par l'examen concomitant de la DBO5.
- **DBO5** (exprimée en mg d'O<sub>2</sub>/L). C'est l'un des descripteurs primordiaux pour marquer les altérations anthropiques, et notamment les rejets de matière organique fortement biodisponible et minéralisable. La déplétion de la saturation en O<sub>2</sub> provoquée par de fortes teneurs en DBO5 est fortement dommageable à la plupart des maillons biologiques des hydrosystèmes.
- **COD, COT** (exprimé en mg de C/L). Ces variables, représentatives de la teneur en carbone dissous ou total par litre d'eau, donnent une information composite.

Une partie du carbone organique peut être dû à une origine naturelle (par exemple eaux de tourbières, eaux de drainage de zones comportant des accumulations organiques naturelles). Du carbone organique peut aussi résulter du rejet dans le milieu de matières organiques fermentescibles (rejets de STEP, rejets d'élevage, rejets domestiques diffus, rejets d'IAA) et est dans ce cas synonyme d'altération anthropique pénalisante pour le milieu aquatique. Lorsque les teneurs sont faibles à moyennes, l'origine peut être naturelle ou anthropique. S'il y a forte teneur, c'est très certainement dû à une altération anthropique. Pour une interprétation plus écologique des valeurs rencontrées, il faut dans le même temps se référer à la DBO5 et au NKJ, qui peuvent donner une bonne idée de la nature fermentescible ou réfractaire du carbone analysé et de l'aspect plus ou moins pénalisant pour les milieux aquatiques.

Pouvant participer à la fois à une typologie naturelle de sites bien particuliers (tourbières...) et à une typologie d'altérations anthropique, avec une redondance seulement partielle avec d'autres descripteurs, il aurait été intéressant de prendre en compte ces 2 paramètres dans la base de données. Cependant, selon le type de réseau et le laboratoire en charge d'un marché donné, l'une ou l'autre de ces analyses ont été réalisées et il a été très difficile a posteriori, avec la même unité, de savoir précisément et à tout coup si l'analyse avait été réalisée sur eau brute (COT) ou eau filtrée (COD). Comme de plus il n'existe pas de loi simple permettant de reconstituer la **valeur du COD à partir du COT et vice versa**, il a été jugé **préférable de ne pas tenir compte de ces deux descripteurs dans l'analyse de données** (une information de substitution à ce niveau pouvant être apportée par DCO, DBO5, NKJ).

- **Ammonium** (exprimé en mg/l de  $(\text{NH}_4)^+$ /L. Pouvant être produit en teneurs relativement élevées lors de phénomènes d'ammonification de la matière organique (aval d'élevages, aval de STEPS) et pouvant aussi arriver aux hydrossystèmes suite à des lixiviations d'engrais azotés ammoniaqués, il s'agit d'une espèce毒ique pour les poissons (les salmonidés y sont particulièrement sensibles) et certaines espèces de macro-invertérés benthiques et de diatomées (notamment les plus oligotrophes). Les teneurs en ammonium sont donc représentatives d'un gradient anthropique et doivent être prises en compte pour représenter le gradient d'altérations anthropiques.
- **Nitrite** (exprimés en mg  $(\text{NO}_2)^-$ /L. Forme assez transitoire et fugace de l'azote minéral dans les écosystèmes aquatiques, elle rend compte, comme les ions ammonium, d'une activité de minéralisation de matières organiques fermentescibles en cours et de conditions un peu réduites du milieu aquatique. Elle peut être très toxique sur tous les compartiments biologiques mais n'atteint que rarement des valeurs élevées, constituant une forme chimique très transitoire entre l'ammonium et les nitrates. Du fait de son impact biologique, ce descripteur a été pris en compte dans la base de données et dans les analyses.
- **Nitrate** (exprimé en mg  $(\text{NO}_3)^-$ /L. Les nitrates constituent un indicateur indéniable d'altération anthropique. Forme la plus oxydée de l'azote minéral, ils marquent la forme terminale de l'azote issu de la minéralisation des matières organiques fermentescibles (type effluents organiques, rejets de STEP...). C'est pourquoi on en trouve des quantités non négligeables à l'aval des bassins versants. Des apports directs par l'activité agricole (apports, pour la fertilisation des parcelles, de nitrates, d'ammonnitrate, d'apports organiques type fumier et lisier) contribuent aussi de façon importante aux quantités trouvées dans les eaux. Lorsqu'ils sont absolument seuls, les nitrates exercent un impact hydrobiologique assez modeste sur la plupart des maillons, qui se renforce cependant dès que d'autres stresseurs (ammonium, ou orthophosphates, ou demande en oxygène) viennent agir de façon cumulative. De plus, du fait du cadre normatif en place pour la potabilisation de l'eau, les nitrates constituent un critère de déclassement pour cet usage. Ce descripteur a donc été intégré à la base de données.

- **L'azote Kjeldahl** (exprimé en mg N/L) : Variable intégrative associant l'ammonium dissous dans l'eau et la minéralisation en ammonium de la matière organique contenue dans l'eau, ce descripteur très sensiblement induit par l'altération anthropique est représentatif de la disponibilité de matières actives azotées fermentescibles. Les valeurs moyennes à élevées en NKJ sont synonymes d'altération anthropique et la minéralisation de cette matière organique excédentaire va provoquer un risque de déplétion en oxygène dans les hydrossystèmes. Entre autres maillons biologiques, les diatomées répondent nettement à cette altération. Ce descripteur a été pris en compte dans la matrice de données.

Certaines valeurs manquantes ont pu être comblées par des valeurs récupérées de campagnes supplémentaires trouvées par ASCONIT. Les valeurs d'un site/campagne qui étaient toujours manquantes après ce rajout ont été calculées en moyennant les valeurs disponibles pour le paramètre sur le site.

## 2. Pré-traitement de la matrice de chimie

En raison de trop grandes variabilités et de distributions non normales des paramètres, nous avons effectué une transformation sur les données chimiques hors pH et Température. Les autres paramètres ont été transformés par méthode BoxCox (Box and Cox 1964) qui permet de déterminer les meilleures transformations à effectuer sur les variables. Les paramètres « DCO », « HCO<sub>3</sub> » et « MES » ont subi une distribution log(x) tandis que les autres variables ont été transformées par  $x^{[(\lambda-1)]}/\lambda$ , où  $\lambda$  est un coefficient déterminant la transformation à effectuer.

## 3. Analyse de l'auto-corrélation des variables abiotiques

Les 25 variables environnementales devant être analysées dans l'ACP complète ont fait l'objet d'une étude d'autocorrélation. Si cette technique est souvent utilisée comme une aide à la simplification ultérieure des analyses par une sélection des variables à la fois pertinentes et les moins redondantes, elle n'a rien d'un processus pouvant s'appliquer de manière automatique en utilisant des seuillages prédéfinis et doit au contraire faire appel à de l'expertise basée sur la bonne connaissance des relations cause(s)-effet(s). En effet, l'auto-corrélation peut signifier que 2 variables sont liées de façon organique par des processus, l'une dépendante de l'autre et les deux étant porteuses d'une information plus ou moins redondante (exemples de la DBO<sub>5</sub> et de la saturation en oxygène), mais il peut aussi y avoir des corrélations de fait liées à une co-évolution fortuite de variables dans les conditions spécifiques du jeu de données et de la distribution des sites des réseaux d'étude.

La matrice d'autocorrélation de Pearson concernant ces descripteurs abiotiques est présentée en **Tableau 10** page suivante.

## Rapport final

paramètres	Ca	Cl	Cond. El.	DB05	DCO	HCO3	K	MES	Mg	Na	NH4	NKU	N02	N03	O2_dissous	pH	P04	Ptot	Sat. 02	SiO2	S04	TAC	T°C	TH	Turbidité
Ca	1																								
Cl	0,76	1																							
Cond. El.	0,8	0,8	1																						
DB05	0,18	0,26	0,2	1																					
DCO	0,28	0,3	0,3	0,33	1																				
HCO3	0,71	0,77	0,69	0,27	0,31	1																			
K	0,81	0,82	0,77	0,24	0,34	0,75	1																		
MES	0,5	0,48	0,54	0,01	0,12	0,48	0,59	1																	
Mg	0,9	0,86	0,82	0,18	0,28	0,74	0,84	0,51	1																
Na	0,78	0,89	0,8	0,21	0,26	0,76	0,82	0,51	0,87	1															
NH4	0,33	0,38	0,4	0,28	0,18	0,38	0,42	0,37	0,29	0,4	1														
NKU	0,26	0,3	0,29	0,22	0,18	0,33	0,36	0,23	0,23	0,28	0,54	1													
N02	0,29	0,37	0,34	0,38	0,31	0,34	0,36	0,09	0,29	0,35	0,53	0,26	1												
N03	0,33	0,34	0,31	0,13	0,13	0,33	0,47	0,42	0,39	0,33	0,17	0,12	0,27	1											
O2_dissous	-0,38	-0,44	-0,43	-0,23	-0,23	-0,44	-0,43	-0,33	-0,36	-0,43	-0,5	-0,38	-0,32	-0,07	1										
pH	0,16	0,18	0,1	0,07	0,02	0,38	0,17	0,01	0,22	0,18	-0,13	-0,1	-0,01	0,23	0,15	1									
P04	0,43	0,49	0,46	0,31	0,22	0,54	0,6	0,36	0,43	0,48	0,57	0,4	0,43	0,37	-0,33	0,14	1								
Ptot	0,24	0,32	0,28	0,48	0,28	0,33	0,33	-0,01	0,21	0,28	0,38	0,32	0,41	0,14	-0,3	0,03	0,65	1							
Sat. 02	-0,28	-0,36	-0,36	-0,12	-0,12	-0,34	-0,32	-0,35	-0,25	-0,35	-0,43	-0,32	-0,24	-0,1	0,68	0,22	-0,23	-0,16	1						
SiO2	0,32	0,2	0,2	0,05	-0,02	0,32	0,31	-0,12	0,34	0,23	-0,13	-0,01	0,01	0,16	0,11	0,44	0,22	0,14	0,18	1					
S04	0,78	0,61	0,67	0,05	0,16	0,41	0,67	0,45	0,75	0,64	0,28	0,16	0,22	0,32	-0,26	0,05	0,37	0,2	-0,19	0,19	1				
TAC	0,77	0,74	0,71	0,28	0,32	0,95	0,78	0,49	0,78	0,78	0,4	0,34	0,35	0,36	-0,46	0,33	0,55	0,34	-0,34	0,34	0,45	1			
T°C	0,42	0,56	0,52	0,28	0,33	0,54	0,5	0,3	0,49	0,56	0,28	0,3	0,33	0,32	-0,35	0,24	0,34	0,28	-0,19	0,11	0,29	0,54	1		
TH	0,89	0,79	0,8	0,23	0,31	0,72	0,77	0,44	0,88	0,77	0,31	0,27	0,33	0,35	-0,37	0,17	0,47	0,36	-0,26	0,32	0,72	0,76	0,44	1	
Turbidité	0,49	0,62	0,58	0,17	0,23	0,6	0,61	0,74	0,54	0,61	0,35	0,27	0,21	0,43	-0,4	0,13	0,39	0,17	-0,38	-0,06	0,33	0,61	0,47	0,5	1

Code couleurs

Noir :  $x < 0,20$ Bleu :  $0,20 < x < 0,40$ Orange :  $0,40 < x < 0,70$ Rouge :  $0,70 < x < 1$ 

Tableau 10 : Matrice d'auto-corrélation de Pearson entre les descripteurs abiotiques analysés dans l'ACP complète

Les coefficients d'autocorrélation ont été figurés en codes de couleurs en fonction de leurs gammes de valeurs, et les cases présentent des couleurs tendant d'autant plus vers le rouge que les descripteurs présentent une forte auto-corrélation entre eux.

Dans le cadre de ce jeu de données abiotiques Antilles, une tendance marquante qui est aussi un fait assez classique est que les descripteurs les plus auto-corrélés sont ceux qui reflètent la minéralisation de l'eau sous influence essentiellement naturelle (influence de la géochimie des substrats et de l'hydrochimie qui en découle). L'anthropisation peut aussi contribuer à une augmentation des solutés, mais dans une nettement moindre mesure que les gradients hydrochimiques naturels, sauf dans le cas particulier de fortes pollutions de type industries chimiques (déversement d'acides, de bases, de sels dans les milieux aquatiques).

On peut ainsi noter des inter-relations d'assez fortes à très fortes entre des descripteurs qui, avec un caractère plus ou moins englobant, contribuent fortement à la minéralisation et à la charge ionique de l'eau sous influence géochimique dominante (substrats géologiques et particularités locales de type sources thermales).

Ainsi, les descripteurs d'assez fortement (couleur orange) à fortement inter-correlés sont les suivants : Ca++, Mg++, K+, Na+, SO<sub>4</sub>--, Cl-, HCO<sub>3</sub>-et bien sûr, selon une logique de plus en plus englobante, le TAC (Titre Alcalimétrique Complet), le TH (titre Hydrométrique) et la conductivité électrique, qui englobent le message de ces cations et anions fortement impliqués dans la minéralisation chimique naturelle, la force ionique et le pouvoir-tampon de l'eau.

Toutefois, même si les R<sup>2</sup> sont élevés, il n'y a pas redondance complète de ces descripteurs. Si le TAC, le TH et la conductivité électrique sont des indicateurs globalisants qui augmentent avec l'augmentation de certains (TH, TAC) ou de tous ces cations et anions (Cond. El.), il n'est pas possible, réciproquement, de connaître précisément la composition ionique de l'eau ni même les grandes influences géochimiques dont elle a pris l'empreinte uniquement avec la mesure de ces descripteurs englobants.

Par exemple, une forte conductivité peut être déclenchée par des influences halines littorales, par l'influence de sources thermales, par des roches sédimentaires ou métamorphiques très carbonatées qui, sous un même référentiel de valeurs de conductivité, peuvent recouvrir des compositions hydrochimiques de l'eau très différentes.

Le haut niveau d'auto-corrélation de ces variables traduit aussi l'existence dans ce jeu de données de gradients forts allant d'eaux très peu minéralisées (eaux volcaniques sur laves récentes peu altérées) à des eaux très fortement minéralisées du type eaux thermales, eaux carbonatées, eaux littorales sous influence haline. Tous ces solutés hydrochimiques sont à des valeurs faibles dans les eaux très peu minéralisées et se renforcent de façon relativement congruente sur les stations plus fortement minéralisées, conduisant à ce haut niveau d'auto-corrélation qui ne signifie pas pour autant redondance complète d'information.

Concernant les variables susceptibles d'être plus fortement sous influence anthropique, dont la relation avec l'anthropisation est précisée pages **73 à 75**, les niveaux d'auto-corrélation sont en général d'un niveau moins élevé que pour les précédentes (entre 0,2 et 0,5), traduisant une réponse assez différenciée des différents descripteurs selon le type d'altération anthropique en cause.

La teneur en MES est la plus fortement auto-corrélée avec la turbidité. Elle représente en partie une position du site dans le continuum amont-aval, comme en témoigne le niveau de corrélation intermédiaire avec différents paramètres indicateurs de la minéralisation croissante des eaux dans le continuum amont-aval ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , TAC etc...), mais aussi avec les nitrates qui sont le descripteur d'enrichissement trophique le plus corrélé au gradient amont-aval et au gradient général de pollution diffuse sur le territoire. En situation d'hydrologie modérée à moyenne (hors violents épisodes de crues), elle représente aussi l'érosion agricole liée au travail du sol et autres pratiques culturelles synonymes d'usages agricoles relativement intensifiés.

La DBO5 et la DCO sont 2 descripteurs moyennement reliés entre eux (0,33) et synonymes habituels de rejets plutôt ponctuels apportant des matières organiques plus ou moins fermentescibles au cours d'eau. La DCO rend compte de toute la matière organique y compris réfractaire, la DBO5 de la M.O. facilement labile. Ces 2 variables sont le plus souvent associées à des rejets de STEP, d'industries agro-alimentaires, de rejets d'élevage et, si la pression sur le territoire est suffisante, d'une présence marquée de pollution domestique diffuse. Ces 2 descripteurs et de façon un peu plus marquée la DBO5, sont donc en partie auto-corrélés avec d'autres descripteurs typiques de tels rejets, à savoir  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{--}$  et P Total,  $\text{K}^+$ , le TAC et la température de l'eau (de telles infrastructures collectives fortement contributives au gradient de pollution organique et trophique se situent de façon plus habituelle sur l'aval des cours d'eau).

La DBO5 et la DCO sont aussi auto-corrélées négativement à la teneur en  $\text{O}_2$  de l'eau, ce qui est une relation logique, mais la relation n'est pas très forte (-0,23) du fait que la demande en oxygène s'exprimera plus ou moins fortement par un déficit réel en oxygène dans la rivière en fonction des conditions de débit et d'agitation hydrodynamique de l'eau au site.

Le  $\text{PO}_4$ , principal responsable de l'eutrophisation des eaux, a une origine composite. Il peut émaner à la fois des fertilisations agricoles et des effluents diffus d'origine domestique ou d'élevages, mais encore plus fortement d'eaux usées domestiques et de formulations lessiviellles arrivant au cours d'eau via de gros rejets de STEPs et d'IAA. Les grosses infrastructures collectives ayant une probabilité plus forte d'être implantées vers l'aval des bassins versants, les orthophosphates sont donc sensiblement corrélés avec les autres descripteurs classiques de rejets anthropiques composites (NKJ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , P. Total, DCO, DBO5) mais aussi avec divers autres descripteurs représentatifs de l'enrichissement général de l'eau en solutés minéraux géochimiques et hydrochimiques dans le gradient amont-aval ( $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , TAC...) et des pollutions agricoles diffuses aval ( $\text{NO}_3^-$ ).

## 4. Analyse en Composantes Principales complète (ACP)

Elle a été réalisée pour étudier le poids relatif et les gradients qu'exercent les forçages abiotiques dans les hydrosystèmes des Antilles. Cette analyse permet de représenter successivement dans différents plans la physionomie et le poids d'intervention des diverses variables abiotiques sur les axes successifs de l'analyse multivariée.

Les premiers axes portent le plus d'information sur la structuration du jeu de données et sur la physionomie des composantes principales, les axes suivants sont porteurs d'une information décroissante.

Compte-tenu d'une hétérogénéité de pratiques de laboratoires doublé d'une difficulté de traçabilité pour certaines analyses, il n'a pas été possible d'exploiter de façon fiable les 2 paramètres COD et COT. L'ACP complète a donc permis l'analyse d'influence relative de 25 paramètres abiotiques différents, au lieu des 27 initialement collectés.

Un des objectifs de l'analyse de données préalable à la mise au point d'un nouvel indice diatomique est de repérer et si possible d'isoler ce qui ressort de la **variation naturelle des conditions environnementales** et d'autre part, de **l'effet des altérations anthropiques**. En effet, dans l'indice, c'est cette dernière information qui va primer pour produire un outil biocénotique capable de diagnostiquer l'altération de l'état écologique.

Les intérêts d'une telle analyse sont d'une part d'observer l'action structurante relative des différents paramètres, de repérer les possibilités d'isolation des influences naturelles et des influences anthropiques (à l'idéal, des variations naturelles pourraient être portées par un des 2 axes principaux et les variations anthropiques par l'autre) et de prendre bonne connaissance de l'auto-corrélation des variables.

Si l'étude des auto-corrélations a souvent été utilisée comme une aide à la simplification ultérieure des analyses par une sélection des variables à la fois pertinentes et les moins redondantes, elle n'a rien d'un processus automatique seuillé et doit faire appel à de l'expertise basée sur la bonne connaissance des relations cause(s)-effet(s). En effet, l'auto-corrélation peut avoir deux origines complètement différentes. Deux variables peuvent être liées de façon organique par des processus, l'une dépendante de l'autre et les deux étant porteuses d'une information plus ou moins redondante (exemples de la DBO5 et de la saturation en oxygène). Mais il peut aussi y avoir des corrélations de fait liées à une co-évolution fortuite de variables dans les conditions spécifiques du jeu de données et de la distribution des sites des réseaux d'étude, et dans ce cas, ces variables n'apportent pas d'information redondante mais sont simplement le signe de cette co-évolution non « organique ».

Le package qui a été utilisé pour effectuer cette ACP est « ade4 » sous R (Dray 2007, Référence 15)

Les variables ont été transformées comme indiqué ci-dessus (Box-Cox). Les variables ont été centrées-réduites dans l'analyse, cette modification permet de rendre plus comparables des variables avec des unités et des amplitudes de variation différentes.

## 5. Résultats de l'ACP complète

Les principales informations émanant de cette ACP complète sont reportés en **Figure 38** page suivante. L'information structurante très dominante est portée par l'axe 1 avec plus de 44 % de l'inertie totale de l'analyse. L'inertie portée par les axes suivants décroît très vite avec 10,1 % pour l'axe 2, 7,8% pour l'axe 3, et devient très faible (à peine 5%) pour l'axe 4.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

En fonction des caractéristiques spécifiques de ce jeu de données, il n'a pas été facile d'isoler de façon nette l'influence de certaines catégories de variables sur un axe ou l'autre. Sur le croisement axe 1 X axe 2 (partie gauche de la figure), la plupart des gradients de variables à la fois naturelles et augmentées par l'anthropisation sont portées de façon composite par l'axe 1 (vers la gauche) et l'axe 2 (vers le haut).

Logiquement, la teneur et la saturation en O<sub>2</sub> dissous (vers le bas à droite) sont à l'opposé des gradients, dans un ordre décroissant, de NH<sub>4</sub>, NKJ, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>, DBO<sub>5</sub>, toutes ces variables traduisant des pollutions anthropiques diverses (rejet de STEP, d'industries agro-alimentaires, d'élevage, pollution domestique) qui conduisent à une augmentation du niveau trophique et à une demande en oxygène.

Les composantes principales horizontales, les plus purement portées par l'axe 1, renseignent sur l'hydrochimie conditionnée par la géologie des substrats, avec la conductivité, le Titre Hydrométrique, le TAC, le Ca, le Mg, le SO<sub>4</sub> (variables liées à la minéralisation de l'eau sous influence essentiellement géochimique naturelle) et la teneur en nitrates, indicateurs de pollutions diffuses non directement liés à la proximité de rejets ponctuels dans le milieu.

Le pH et la teneur en SiO<sub>2</sub>, caractéristiques de la minéralisation de l'eau, ont des composantes principales orthogonales à l'opposition Saturation en O<sub>2</sub> / descripteurs de pollutions composites de type STEPs ou IAA, donc ces variables n'ont pas de liaison marquante et organisée avec les descripteurs de pollutions anthropiques.

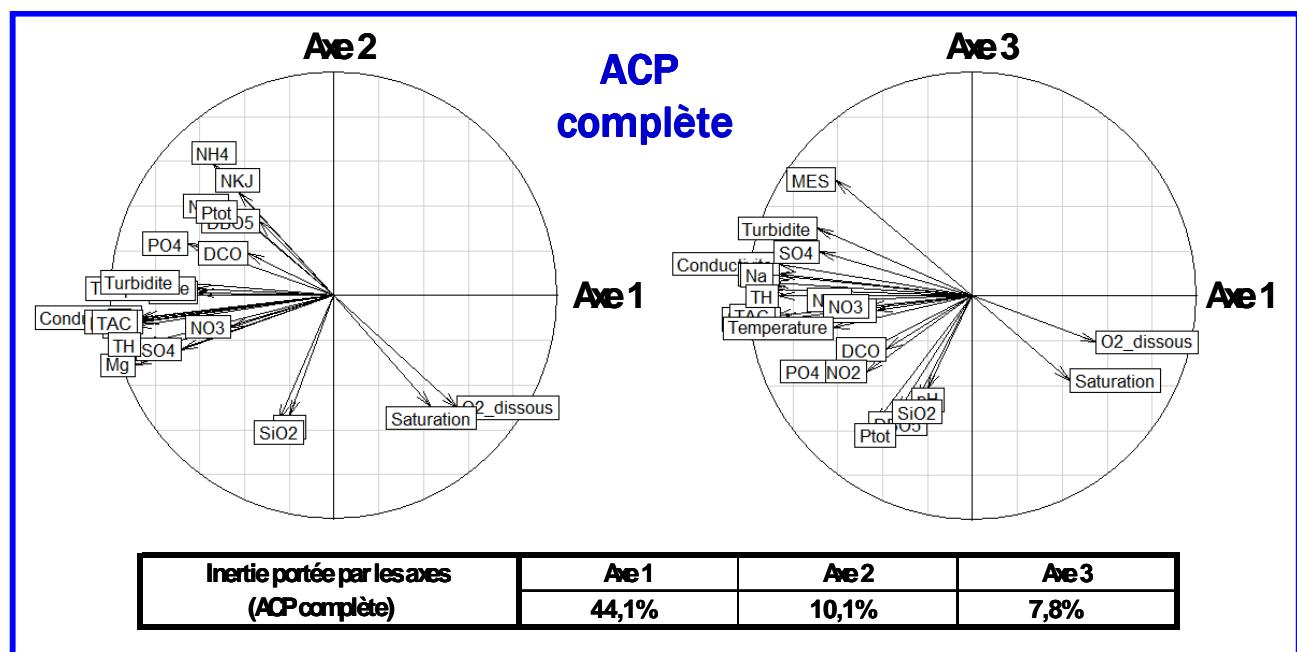


Figure 38 : Physionomie des composantes principales de l'ACP complète

En partie droite de la **Figure 38**, le croisement (axe 1 X axe 3), porteur de peu d'information nouvelle (axe 3 porteur de seulement 7,8 % d'information non prise en charge par le croisement précédent), oppose cette fois la saturation en oxygène aux teneurs en MES, à la turbidité, au SO<sub>4</sub>, au Na et à la conductivité, variables assez fortement associées au continuum amont-aval et dont les valeurs s'accroissent vers l'aval. La saturation en O<sub>2</sub>, au contraire, a tendance statistiquement à décroître vers l'aval pour différentes raisons, en particulier l'augmentation des pollutions anthropiques, l'augmentation des phénomènes de recyclage de nutriments et de processus fermentaires et l'apparition de faciès plus lentiels sur le cours aval de certaines rivières.

La **Figure 39** page suivante permet de mieux situer le positionnement des relevés (site X date) étudiés au cours du programme en fonction du positionnement de leurs variables abiotiques dans l'ACP. Il est ainsi possible de repérer la structuration des principaux forçages abiotiques qui s'exercent dans l'espace des données, et en particulier les grandes caractéristiques liées aux forçages naturels, ainsi que les forçages anthropiques influant objectivement sur certaines variables abiotiques au (site x date).

La partie a) de la figure (en haut) projette les (sites x dates) selon leurs variables abiotiques dans le plan porteur du maximum d'inertie de l'ACP (croisement axe 1 X axe 2 = plus de 54 % de l'information structurante de l'analyse) et rappelle le positionnement et l'intensité des vecteurs de composantes principales des différentes variables abiotiques intervenant dans l'ACP complète. La partie b) de la figure (en bas) permet de projeter en variable externe la nature des réseaux thématiques dans lesquels ont été acquises les données (sites x dates).

La **Figure 39 a)** rappelle qu'il n'a pas été possible, comme dans des analyses antérieures portant sur d'autres contextes biogéographiques, d'isoler de façon efficace les variations plutôt d'origine naturelle de gradients plutôt d'origine anthropique. En effet, la plupart des gradients à la fois naturels et provoqués par l'anthropisation sont portées de façon composite par l'axe 1 (vers la gauche) et l'axe 2 (vers le haut).

En partie b) de la figure, la projection des sites de référence (ellipse figurée en bleu dans le secteur sud-sud-est du nuage de points) illustre la diversité et la variabilité des conditions naturelles qui s'y appliquent. On peut se référer aux vecteurs de composantes principales de la partie A de la figure pour les expliciter.

La partie de ce nuage complètement à droite, la plus opposée au vecteur "conductivité électrique", représente les eaux naturelles les moins minéralisées du jeu de données, avec une hydrochimie caractéristique de sites situés sur massifs volcaniques avec des contextes fortement dilutifs sur substrats de lave peu altérée (exemples : sites GALm sur la rivière Galion amont en Martinique, site CAPg sur la rivière de Capesterre amont en Guadeloupe). La partie de ce nuage de référence passant à gauche de l'axe 2 se trouve au contraire sur eaux naturelles fortement minéralisées et carbonatées (cf composantes principales Ca++, Mg ++, SO4--, TAC, Cod. El, TH, température de l'eau et, avec une plus faible contribution, NO3, qui tirent l'analyse dans ce secteur) que l'on rencontre sur la zone des mornes de Martinique (Grande Rivière Pilote à Beauregard PILm, Vauclin VAUm) et sans équivalent géologique et hydrochimique naturel en Guadeloupe.

Afin de comprendre toute l'étendue possible des conditions naturelles et à quelles variables de forçage elles répondent, il est aussi intéressant d'identifier l'information portée par l'ellipse rouge "conditions particulières" de la partie b) de la figure, située complètement à droite du nuage et au-dessus de l'axe 1, qui concerne principalement la Rivière Rouge à Matouba en Guadeloupe (ROMg). Nous sommes ici en face d'une rivière sous influence d'eaux thermales profondes à composition très spécifique, comme il est possible de le voir dans les diagrammes de Piper en **pages 64 à 66**, partie droite des figures concernant la Guadeloupe. Côté composition cationique, cette rivière est très riche en Ca++, pauvre en Mg ++ (disjonction peu habituelle entre ces 2 cations) et par contre riche en K+ et Na+. Côté anionique, c'est une eau très riche en sulfates, très peu carbonatée et riche en chlorures.

L'information portée par l'axe 1 sera essentiellement un gradient de conductivité et de charge ionique de l'eau en liaison essentielle avec des gradients géochimiques naturels et de manière plus modérée par des altérations anthropiques chimiques dans le cadre du gradient amont-aval.

Sur la partie située la plus à gauche de cet axe 1, on trouve quelques sites situés uniquement en Martinique et pouvant subir des influences halines, se traduisant naturellement par les valeurs de conductivité électrique, de chlorures et de sodium les plus élevées : Grande Rivière Pilote aval Bourg Rivière-Pilote (PIBm), Deux-Courants au Pont Séraphin (DCSm) et, de manière plus marginale ou plus occasionnelle (conjonction débits-coefficients de marées), Rivière des Coulisses à Petit-Bourg (COPm).

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

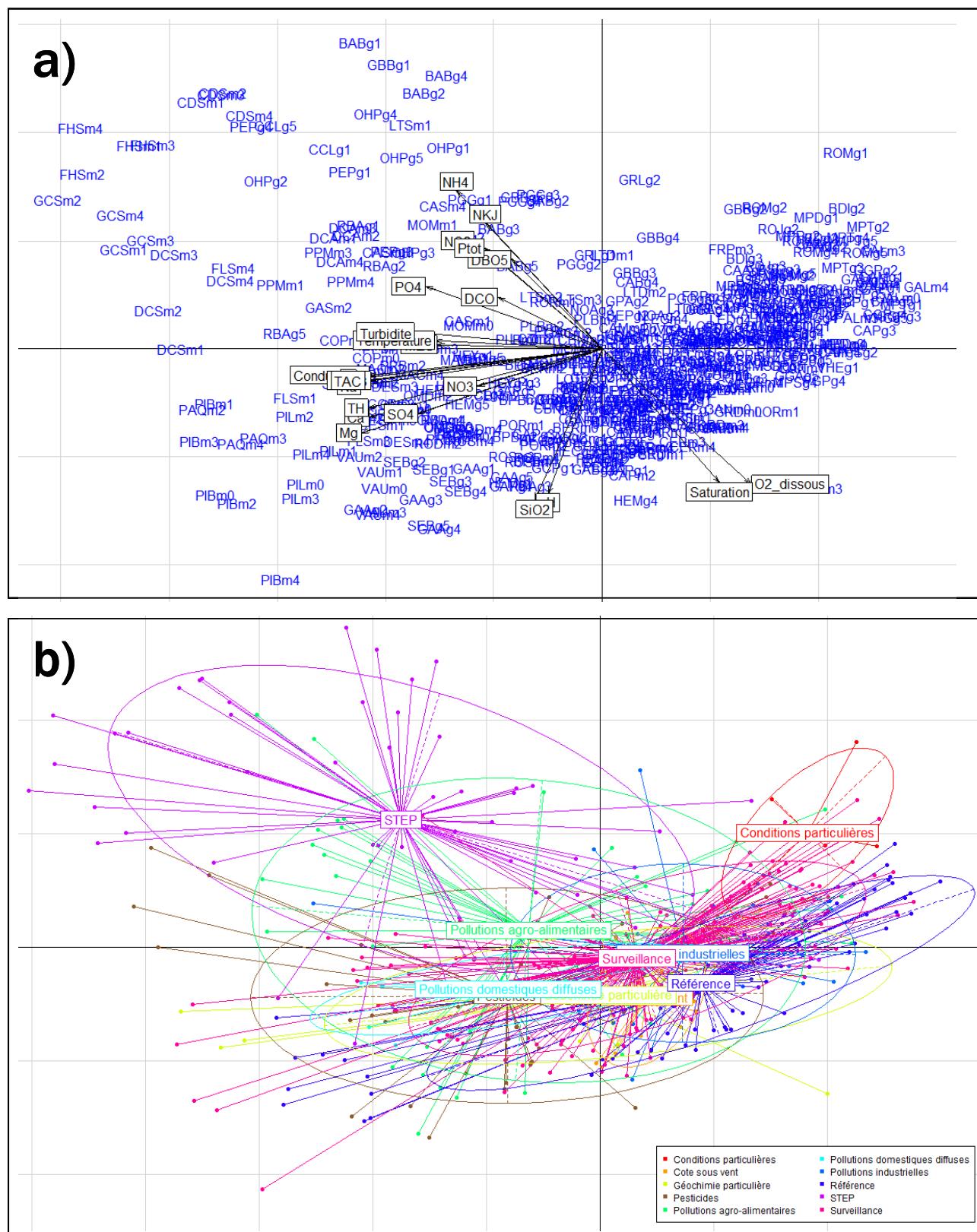


Figure 39 : Projection dans l'ACP complète : a) des relevés du programme ;  
b) de la vocation des sites d'étude

Tiré dans le sens opposé aux composantes principales représentant la saturation et la teneur de l'oxygène dans l'eau et orienté dans la direction Ouest à Nord-Ouest, on trouve un gradient plutôt déterminé par les pollutions organiques, domestiques et de STEP. Le début du gradient est modéré et plutôt organique (cf positionnement des ellipses de réseaux concernant les thématiques "pollutions particulières" en vert-olive clair, "pollutions domestiques diffuses" en bleu clair, "surveillance" en bistre et "pollutions agro-alimentaires" en vert soutenu). La fin de ce gradient en haut à gauche représente les pollutions organiques et eutrophisantes intenses situées à l'aval de STEPs (ellipse de couleur violette). Les STEPs dont les relevés sont situés le plus en haut à gauche, à l'extrémité du gradient, sont celles où se cumulent les pollutions les plus intenses (composantes principales, dans l'ordre décroissant d'influence: NH4, NKJ, NO2, P Total, DBO5, DCO et PO4) : Ravine de Onze Heures à Petit-Bourg (OHPg), Rivière Baret à Bellevue (BABg), Rivière du Pérou Aval (CEPg) et la Tracée (LTSm) à certaines dates, et semble doublée d'une influence haline littorale légère à modérée pour celles qui reviennent plus s'aligner vers la partie gauche de l'axe 1 : STEP Vauclin 2 (GCSm), STEP Ste Luce (FHSm), STEP Canal de Ducos (CDSm).

Cette typologie des forçages abiotiques principaux de Martinique et Guadeloupe s'est nécessairement appuyée sur les sites qui sortent un peu du centre de gravité du nuage dense de relevés, illustrant de ce fait des situations particulières typiques (à la fois conditions naturelles abiotiques dans toute leur diversité, des conditions les plus déminéralisées aux conditions très carbonatées ou sous influence d'hydrochimie thermale très spécifique, voire influence haline littorale), et situations de pollutions anthropiques marquées de types divers.

Pour les sites situés au centre du nuage et caractéristiques de conditions plus modérées et plus habituelles dans le jeu de données, il est plus difficile de repérer les vignettes (sites x dates) et ces sites seront classifiés de façon plus précise en fonction de leurs flores caractéristiques (démarche de biotypologie) et les conditions abiotiques associées à ces peuplements caractéristiques.

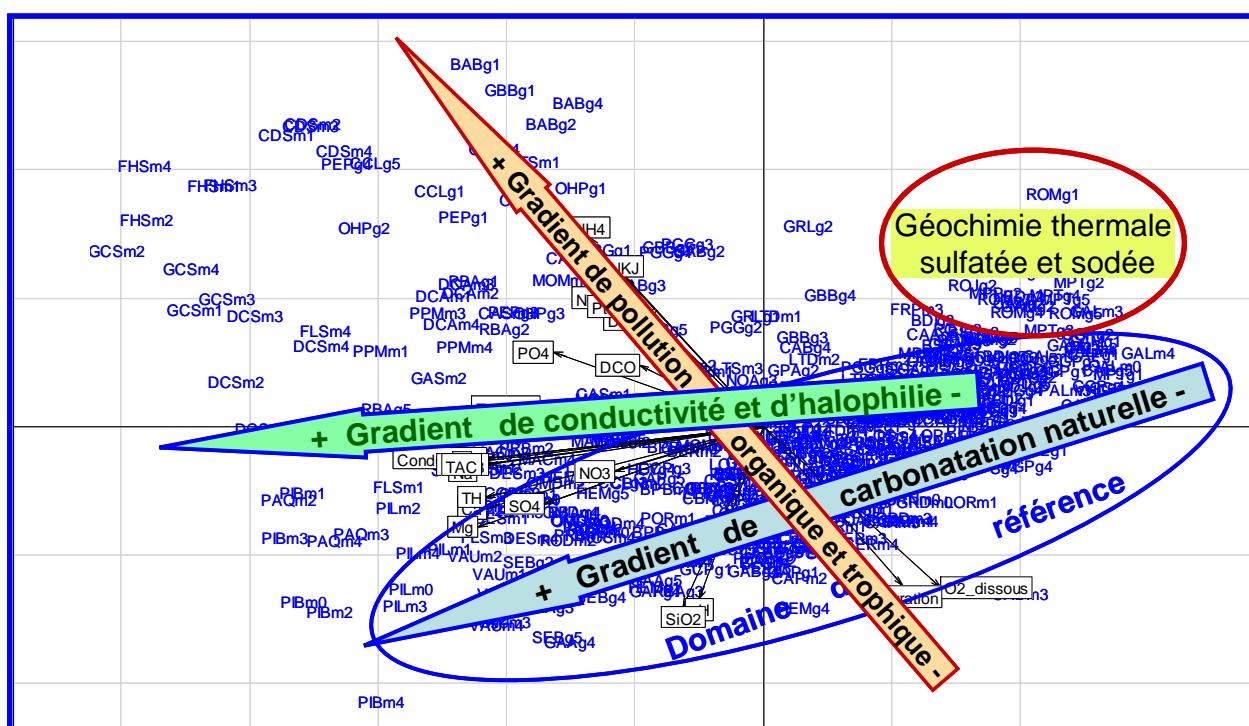


Figure 40 : Figuration résumée de la structuration des principaux gradients abiotiques dans l'ACP complète

Par souci de lisibilité, l'information structurante sur les grands forçages abiotiques qui s'exercent en Martinique et Guadeloupe et qui sont résumés dans cette ACP abiotique complète, telle qu'on vient de la décrire, est récapitulée dans la **Figure 40** page précédente.

Il a ensuite été observé si la structuration du jeu de données était sensiblement influencée par le DOM Antillais d'origine (voir **Figure 41** ci-dessous).

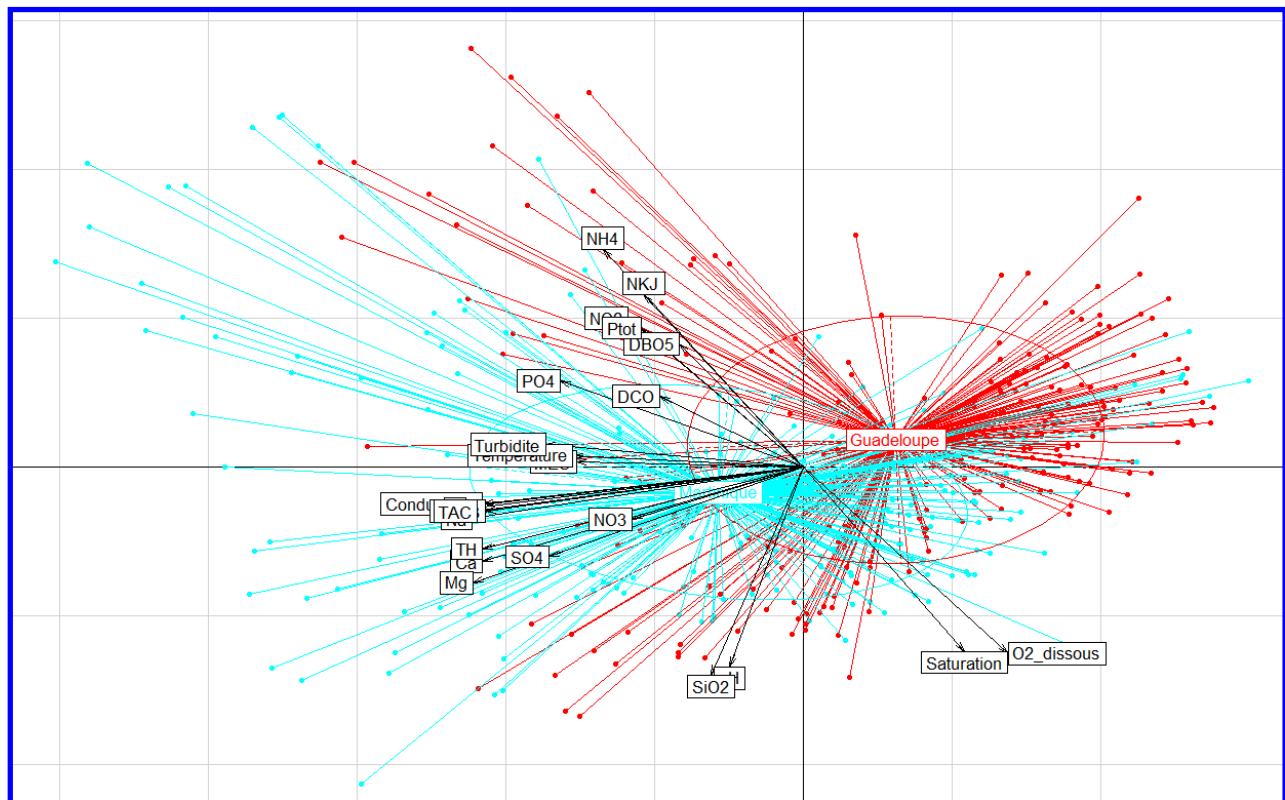


Figure 41 : Positionnement relatif des relevés sites x dates de Guadeloupe et de Martinique dans l'ACP complète

On peut constater qu'il existe une différence assez sensible de positionnement des relevés des 2 îles dans le gradient des variables environnementales abiotiques. En effet, le barycentre du nuage constitué par les relevés (sites x dates) de Guadeloupe, figuré en rouge, est sensiblement décalé vers la droite de l'axe 1, ce qui traduit à la fois une moindre conductivité et minéralisation des eaux en général et, à l'exception d'une quinzaine de sites X dates correspondant à des relevés de STEPs assez sévères rencontrés sur 4 stations seulement, une intensité de pollution globalement moindre en Guadeloupe qu'en Martinique (figuration du nuage et du barycentre en bleu clair).

Concernant la moindre minéralisation des eaux naturelles, la principale différence typologique entre Martinique et Guadeloupe réside dans la présence, dans le Sud et la partie centrale de la Martinique et sur une surface relativement conséquente, de bassins versants fortement minéralisés et carbonatés (zone des Mornes, Plaine du Lamentin), ce contexte géochimique n'existant pas en Basse-Terre de Guadeloupe qui est la seule partie de l'île présentant des cours d'eau à écoulements permanents.

L'autre facteur naturel ayant pu jouer sur cette physionomie moyenne est qu'en Guadeloupe, pratiquement aucune des stations incluses à l'étude ne comporte de domaine de transition sensible et ne semble sous influence haline littorale, alors que plusieurs stations proches du littoral, en Martinique, peuvent subir des influences au moins temporaires.

Enfin, la Martinique est moins préservée et ses hydro-systèmes sont soumis à différentes catégories d'altérations (pression agricole, pression liée à la densité de population et d'usages anthropiques divers répartis sur le territoire, à l'urbanisation) souvent plus sévères qu'en Guadeloupe, ce qui contribue aussi à tirer le centre de gravité Martiniquais vers la gauche de l'axe 1.

En

**Figure 42** page suivante sont positionnés les relevés (site x date) des Antilles (regroupement Guadeloupe + Martinique) en fonction : a) de la saison, et b), du type de réseau.

On peut constater que globalement, les 2 saisons se projettent en gros sur la même aire, ce qui signifie que les saisons n'ont pas joué un rôle déterminant sur les valeurs des variables qui auraient pu être influencées par l'influence saisonnière. Une des raisons à cela est que la typologie saisonnière habituelle n'a pas vraiment été respectée pendant la durée de l'étude, le carême ayant pu être très arrosé et chaud une année donnée et la saison d'hivernage ayant au contraire pu être notablement plus sèche qu'à l'accoutumée sur 2 ans.

Donc, sur la durée de l'étude, les 2 saisons ne sont pas vraiment marquées par un différentiel sensible concernant les variables abiotiques ayant servi à faire cette ACP complète et notamment par une dilution ou une concentration généralisée des solutés, de façon reproductible, une saison donnée.

Concernant cette fois la représentation des aires couvertes sur ce croisement d'axes principaux dans l'espace des données abiotiques en fonction de la nature des réseaux, un constat peut être fait qui a correspondu à une logique de construction de l'étude :

- Le domaine de référence occupe toute la partie basse du nuage de points. Comme cela a été résumé graphiquement en **Figure 40**, ellipse bleue, son extension dans la largeur de la droite vers la gauche correspond à un gradient depuis des eaux très peu minéralisées sur laves volcaniques peu altérées vers des substrats plus conductifs et surtout plus carbonatés (zone des Mornes de Martinique vers la gauche) ;
- Le réseau de surveillance, censé donner une image représentative de l'état des masses d'eau des 2 Antilles pour le rapportage européen, se situe en position intermédiaire dans le gradient d'altération (qui progresse du bas à droite en haut à gauche, à l'opposé des variables d'oxygénéation de l'eau comme on a pu le voir précédemment en **Figure 41**) ;
- Le réseau complémentaire, qui a été principalement constitué pour incorporer des sites fortement pollués dans l'étude, se positionne en partie dans des situations spéciales un peu partout dans le référentiel abiotique, mais de façon dominante vers le haut et la gauche du nuage de points qui correspond dans ce secteur de l'ACP aux points de plus forte pollution, situés le plus souvent à l'aval de STEPs. Cela montre l'utilité de ce réseau complémentaire pour illustrer des situations de forte pollution indispensables à la mise au point de l'indice. Par contre, cela pose en retour la question de l'aspect éventuellement un peu optimiste du réseau de surveillance, vu que les points qui tirent le plus le réseau complémentaire sont des rejets de STEPs, équipements collectifs qui situent, à l'échelle de ce programme, une cinquantaine de relevés (site x date) dans des zones plus altérées que le point le plus altéré du réseau complémentaire.

Ces STEPs qui produisent des altérations très sensibles sont parfois des infrastructures relativement importantes. Elles peuvent être localisées en zone proche du littoral, altérant un linéaire très limité d'eau douce mais polluant ensuite le milieu littoral et côtier.

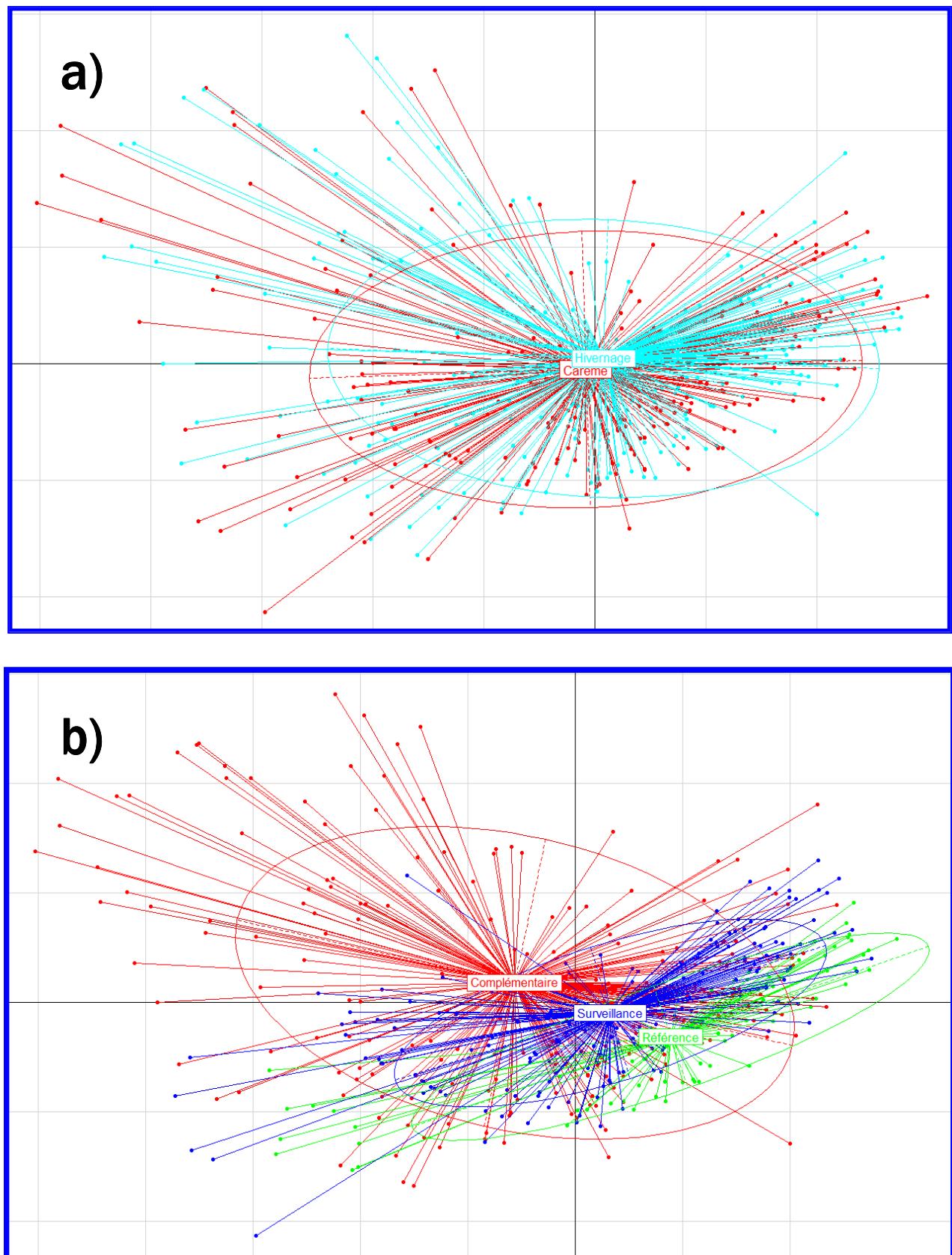


Figure 42 : Distribution des relevés (sites x dates) des Antilles dans l'ACP complète en fonction : a) de la saison ; b) de la vocation du réseau

D'autres fois, elles sont relativement limitées sur le plan des équivalents-habitants mais dysfonctionnent ou même n'assurent plus aucun service collectif sans parade actuelle réelle dans le cadre structurel des Antilles (exemple : petites unités de STEPs construites par obligation dans le cadre d'autorisations de construction de lotissements, mais avec responsabilité de servitude d'entretien peu claire et entretien non assuré suite à "dégât de cyclone", cf STEP des Yuccas, site HEYm, dont le cas est loin d'être isolé).

Cette figure montre bien, au bilan, le caractère très utile de ce réseau complémentaire (il a illustré des situations spéciales en périphérie du domaine couvert par les 2 autres réseaux) mais pose en retour l'étendue modeste des altérations suivies dans le cadre institutionnel, alors que d'autres cas pas forcément très lourds au niveau des équivalents-habitants ont pu être rencontrés mais peuvent provoquer de forts niveaux de pollutions locales, et que ces situations anormales perdureront probablement assez longtemps en l'absence de surveillance (qui serait peut-être à mettre en place dans le cadre d'un équivalent-RCO, pour ne pas pénaliser outre mesure le rapportage européen sur des cas souvent ponctuels) et éventuellement de cadre juridique ou d'effort volontariste pour les faire résorber.

## B. Analyse des assemblages diatomiques, biotypologie

### 1. Utilisation de la SOM : aspects méthodologiques généraux

La réalisation d'une biotypologie consiste à différencier et à repérer les principaux assemblages-types diatomiques présents dans les jeux de données des Antilles en fonction des différents contextes naturels et de forçage anthropique.

Compte tenu de l'expérience capitalisée par l'équipe CARMA d'Irstea, il a été décidé de faire appel à une technique neuronale non supervisée, la SOM (Kohonen, 1982, reprise dans Référence 25), déjà utilisée avec succès par le passé dans des cas relativement analogues (Tison et al, 2005, Référence 45), afin d'intégrer au mieux l'information apportée par chaque taxon, de la respecter en tant que tel et de la résumer d'une façon visuelle et intelligible, ce qui pose un gros problème à la plupart des autres techniques à base multivariée (pour mémoire, les assemblages diatomiques peuvent intégrer plusieurs centaines de taxons, ici 478 avant seuillage). Un avantage de cet outil est de conserver et de traiter séparément l'information apportée en propre par chaque espèce sur un vecteur dédié, qui participe à l'apprentissage des unités virtuelles (cellules sur la carte). L'apprentissage vise à positionner au mieux les unités d'échantillonnage réelles dans un maillage d'unités virtuelles (la carte avec son nombre d'hexagones) qui subissent un grand nombre de cycles d'apprentissage. La structure topologique de la carte évolue au fur et à mesure des cycles en respectant un principe de voisinage (les cellules situées au voisinage immédiat d'une unité virtuelle doivent être les plus similaires à celle-ci et plus les cellules sont éloignées sur la carte, plus elles sont différentes) et de Best Matching Unit (chaque unité réelle d'échantillonnage ira se positionner dans l'unité virtuelle qui lui correspond le mieux, autrement dit la plus similaire à ce stade de l'apprentissage).

En fin d'apprentissage, l'information sur la structure multi-dimensionnelle des communautés de diatomées est résumée en 2 dimensions sur le plan de la carte auto-organisante, ce qui permet une visualisation facile des résultats.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

En outre, les assemblages de chaque site d'étude sont positionnés dans le maillage d'unités virtuelles de la carte (les hexagones), mais on peut aussi bénéficier de certaines facilités permettant de visualiser et de mieux comprendre l'écologie des assemblages et même des espèces individuelles en fonction du repérage de l'influence de variables abiotiques externes à l'apprentissage biologique réalisé. Ainsi, il est possible de plaquer sur les cellules individuelles de la carte ou sur les ensembles biotypologiques repérés (clusters) les variables abiotiques de l'environnement correspondant aux sites. Cela peut être fait directement sur la carte ou sous la forme de boxplots de variables environnementales correspondant aux unités biotypologiques isolées (les différents clusters d'assemblages diatomiques typiques). De même, le positionnement détaillé de chaque espèce dans chaque relevé et chaque assemblage virtuel peut être matérialisé sur la carte par une fonction de densité, etc... De telles facilités aident à comprendre la structure de la carte et des facteurs de forçage qui s'exercent dans les milieux sur les communautés et les espèces.

La démarche de mobilisation de la SOM et la déclinaison des différentes étapes méthodologiques qui ont été mises en œuvre pour établir une biotypologie des assemblages diatomiques des Antilles sont résumées en **Figure 43** ci-dessous.

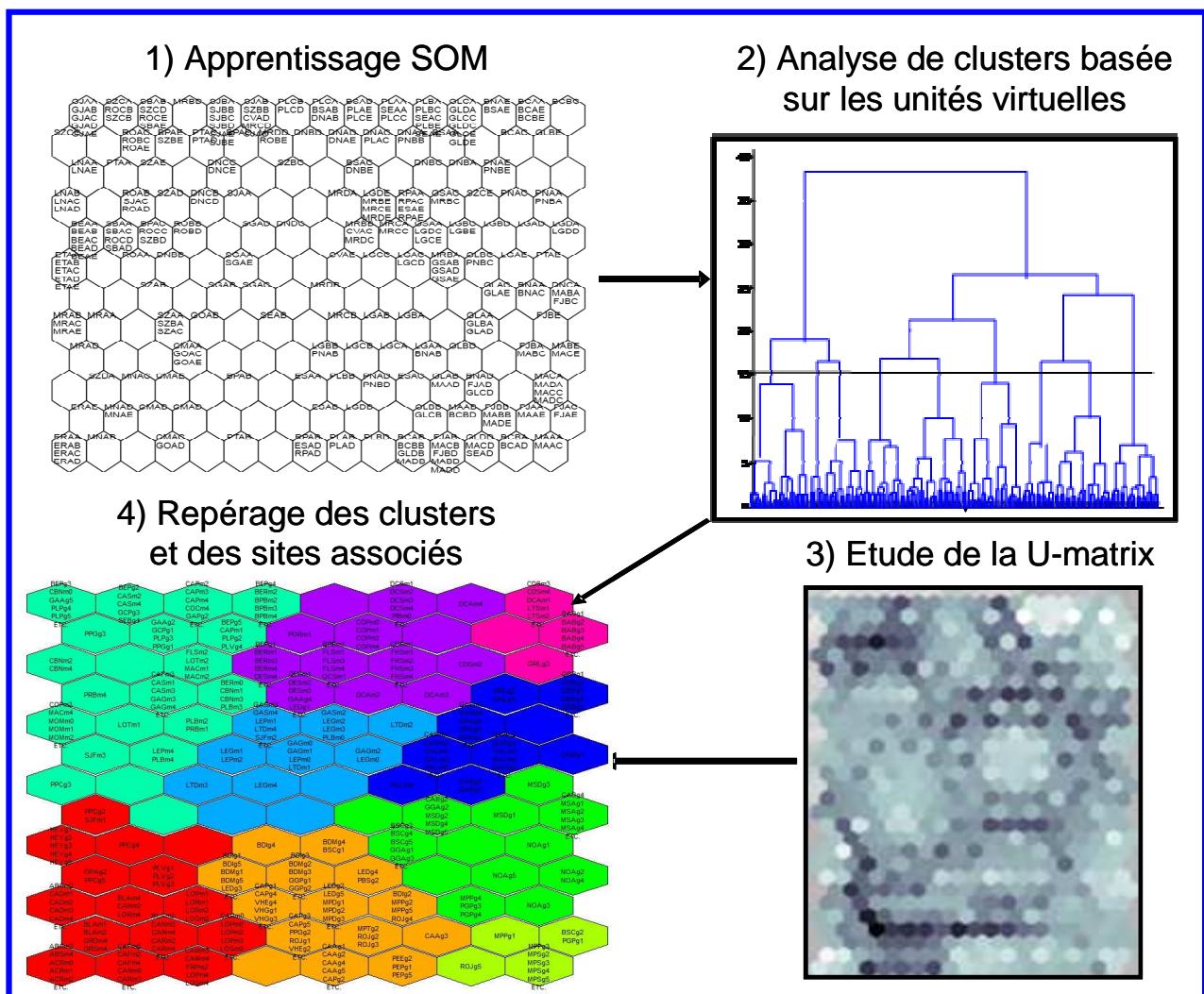


Figure 43 : Procédure générale d'utilisation de la SOM pour le repérage biotypes diatomiques des Antilles sur sites naturels et altérés

La mise en œuvre de la SOM a été effectuée sous le logiciel R, avec le package "SOM" récemment développé par Marius BOTTIN à l'Irstea Bordeaux.

La démarche générale suivie pour la réalisation de chacune de ces différentes étapes et les spécificités qui ont été prises en compte en fonction des caractéristiques de ces jeux de données Antillais sont exposées au **Chapitre 2** page suivante, les résultats de la biotypologie et de son interprétation écologique sont présentés respectivement au **Chapitre 3** et au **Chapitre 4**.

## 2. Mobilisation de la SOM pour l'élaboration de la biotypologie :

### 2-1) Opérations préalables sur les données

L'apprentissage non supervisé réalisé par la SOM utilise la matrice biologique constituée par les résultats de comptages sur les différents relevés (site x date) collectés pendant l'étude.

Il est tout d'abord utile de réaliser certaines opérations sur la matrice brute de données.

Dans le contexte nouveau des Antilles, la stratégie de déploiement de terrain (assise-sites, prise en compte de la saisonnalité climatique locale) et de réalisation des inventaires visait à repérer le maximum d'espèces pouvant se retrouver à un moment ou un autre dans des inventaires diatomiques de ce programme, afin de les recenser et de faciliter le travail ultérieur de reconnaissance de futurs opérateurs de réseaux. Dans le cadre de cette étude, un nombre important d'espèces différentes a ainsi été repéré (en tout, **478 espèces différentes reconnues en tant que tel et ayant été incluses dans les comptages**) suite à l'examen biologique des **483 assemblages biologiques** prélevés et ayant fait l'objet de dénombremens d'abondance relative pour le compte de la Martinique et de la Guadeloupe.

Cependant, il n'est pas possible d'affecter à toutes ces espèces à la fois une signification dans des communautés-types et un profil écologique consistant. En effet, plus de la moitié d'entre elles n'ont été vues qu'un très faible nombre de fois, en termes d'occurrence et/ou d'abondance relative moyenne. Porteuses de trop peu d'information environnementale, au demeurant trop aléatoire pour pouvoir être considérée comme fiable, il a été nécessaire de seuiller les taxons participant à l'apprentissage. Un seuillage relativement modéré a été appliqué selon les critères suivants : 1) taxon répertorié dans **au moins 3 relevés différents**, et 2) avec une abondance relative d'**au moins 2,5 % dans le relevé où il est le plus abondant**.

Au final, cette procédure de seuillage a permis d'utiliser dans un premier temps **189 taxons** suffisamment représentés pour réaliser l'apprentissage de la SOM. Ce filtrage permet une réponse plus robuste de l'analyse. Le seuillage s'est trouvé ré-actualisé de fait à **177 taxons** Post-Copil du 14-12-2012, suite à quelques regroupements de taxons. Cependant, il n'a pas été procédé à un réapprentissage et à la ré-interprétation complète de la carte compte-tenu du volume de travail représenté pour une plus-value probablement marginale sur le plan bio-typologique.

Suivant une pratique qui a déjà montré son intérêt antérieurement, il a ensuite été réalisé une transformation  $\log(x+1)$  sur la matrice de données ( $x_i$  = abondance relative de l'espèce  $i$ ) afin d'amplifier le message des espèces en faibles abondances relatives par rapport aux dominantes. Cette pratique a souvent été utilisée avec succès en biotypologie.

Concernant les flores diatomiques, son utilisation est sous-tendue par une connaissance écologique qui la légitime. A côté de toutes petites espèces pionnières compétitives dans les environnements instables et perturbés, qui se multiplient très vite et atteignent des effectifs élevés dans les inventaires, il existe des espèces de grande taille, typiques de sites de très bonne qualité et/ou appréciant les environnements relativement stables, mais au temps de doublement d'effectifs beaucoup plus long. Elles apportent une information écologique intéressante, notamment sur les sites de référence, que la transformation log permet d'amplifier un peu.

## 2-2) Biotypologie globale : phase d'apprentissage

Afin de tenter de repérer les regroupements de communautés diatomiques des Antilles, après plusieurs essais empiriques de dimensionnement (le nombre de cellules devant être optimisé pour permettre une bonne ségrégation des sites et la gestion correcte des voisinages) et contrôle de la qualité d'apprentissage (examen de critères d'erreur topographique et d'erreur quantitative), une carte auto-organisatrice de 104 unités virtuelles (13 X 8) a été réalisée avec l'ensemble des relevés biologiques collectés pendant l'étude.

Cette carte a donc mobilisé 478 relevés biologiques collectés au cours de 4 campagnes saisonnières de prélèvements et d'une campagne additionnelle par île (Campagne 0 pour Martinique, Campagne 5 pour la Guadeloupe).

Cet apprentissage mêle des sites sous influence naturelle dominante, et d'autres sous différentes natures et intensités d'impact anthropique.

La distance mathématique utilisée pour le processus d'apprentissage et pour gérer les voisinages dans la SOM en fonction des similitudes ou des différences d'assemblages a été la distance de Manhattan.

L'apprentissage de la carte a nécessité un processus de 12 cycles d'apprentissage grossier suivis de 21 666 cycles de tunage fin.

Le pourcentage de cellules vides de la carte finale, présentée en **Figure 44**, est d'environ 14%. Le processus a été relancé tant que le pourcentage de cellules vides n'était pas inférieur à 15% et que les cellules vides se trouvaient trop proche du bord. Il a fallu de plus choisir un compromis sur les erreurs topologiques et quantitatives. En effet, ces erreurs ont une dynamique inverse, la diminution de l'une implique l'augmentation de l'autre.

En fin de processus, la validité de la carte auto-organisatrice obtenue a été vérifiée et jugée parfaitement valide à partir des 2 indicateurs de qualité de l'apprentissage pré-évoqués (un critère relatif à l'erreur topologique, un autre représentatif de l'erreur de quantification).

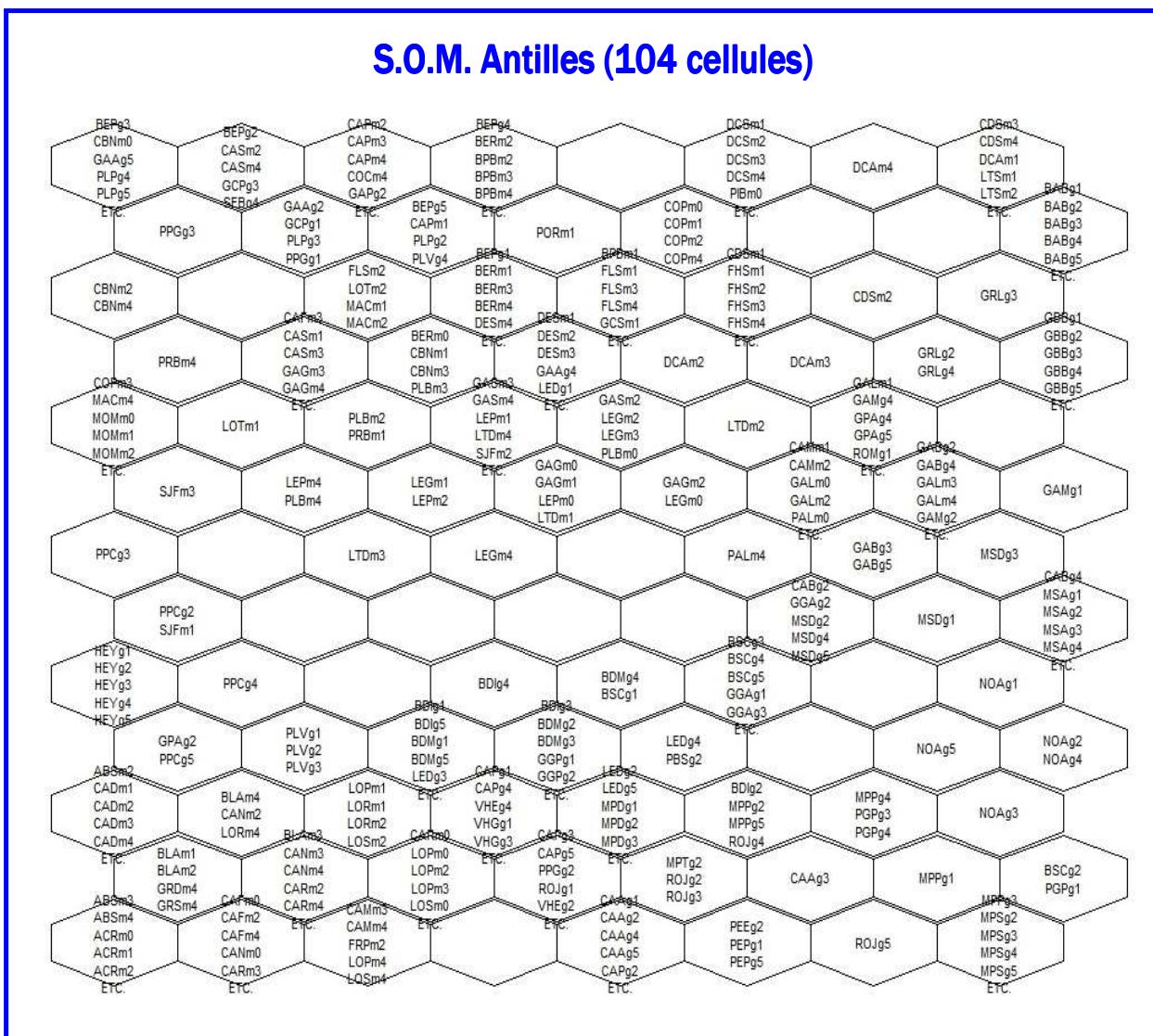
## 2-3) Méthodologie de repérage des biotypes diatomiques

Suite à l'apprentissage par le réseau neuronal, la phase suivante vise à générer un arbre ascendant hiérarchique basé sur la similarité des assemblages, dans le but de repérer les "clusters" représentatifs des flores diatomiques typiques des Antilles. Le but principal poursuivi ici est de repérer les biotypes naturels (flores de référence) et de pouvoir en dériver leur zone biogéographique d'extension. Mais, à titre plus indicatif, une telle analyse peut aussi renseigner sur les conséquences biotypologiques de l'effet de grandes altérations-types (exemples : aval de rejet de STEP, de distillerie...) et de leur intensité sur la composition des communautés sélectionnées à leur aval.

Comme résumé dans la **Figure 43** décrivant la procédure générale d'utilisation de la SOM, sur la base de la composition taxonomique des unités virtuelles de la carte auto-organisatrice (SOM) présentée en **Figure 44**, il a été procédé à l'établissement d'un arbre ascendant hiérarchique visant à identifier les clusters d'assemblages, regroupés selon leur similarité.

La distance mathématique utilisée pour mesurer la similarité ou la différence d'assemblages est la distance de Manhattan, la méthode de regroupement qui a été utilisée pour la constitution de l'arbre ascendant hiérarchique à partir du contenu des Unités Virtuelles de la SOM est la méthode de Ward.

Une fois l'arbre produit, il est possible d'envisager plusieurs niveaux de coupe. Afin d'avoir des clusters représentatifs de conditions abiotiques et biotiques homogènes, il convient de descendre suffisamment dans l'arbre.



**Figure 44 : Apprentissage de la biotypologie des flores diatomiques Antillaises réalisé sur la base d'une SOM de 104 unités virtuelles**

La physionomie topologique de la carte auto-organisatrice (la présence de cellules ne contenant pas de relevés réels entre deux ensembles de relevés constitue un élément objectif de discontinuité permettant d'aider à la délimitation des bordures de clusters) et la densité des résidus entre cellules (les zones de fortes distorsions par rapport au plan de la carte traduisent aussi une discontinuité forte entre cellules voisines sur cette même carte) aident à adopter le niveau de coupe le plus pertinent. En effet, ces 2 types de caractéristiques permettent de matérialiser à quels endroits se situent les zones principales de discontinuité entre clusters.

En examinant successivement les niveaux de coupe croissants de l'arbre produit et en s'appuyant sur la physionomie de la carte et de ses résidus, l'arbre peut être divisé de façon de plus en plus détaillée, ce processus poussé à l'extrême pouvant aller jusqu'à représenter chaque unité virtuelle regroupant un nombre variable de sites réels (de zéro à plus d'une trentaine selon les cellules) et constituant la feuille la plus élémentaire de l'arbre.

Cependant, l'expertise hydrobiologique se confronte très vite à la difficulté de compréhension de la réalité écologique sous-tendant des découpages de clusters trop raffinés. Ce qui détermine donc un "bon" niveau de coupe est un compromis entre recherche d'entités biotypologiques homogènes et faculté de compréhension et d'interprétation de ce que représentent vraiment les entités biologiques définies. Notamment, il faut qu'au niveau de coupe atteint, il soit encore possible de repérer de façon intelligible pourquoi -forçages abiotiques - et en quoi -composition, sens écologique- ces entités biotypologiques diffèrent.

### 3. Analyse des résultats de la SOM, niveaux de coupes et analyse.

La carte auto-organisatrice obtenue pour repérer les biotypes diatomiques de Guadeloupe et Martinique est présentée en **Figure 44** page précédente. Ses cellules contiennent les codes des relevés réels (site x date) rattachés à chaque unité virtuelle. Certaines cellules contiennent un nombre important de relevés réels (assemblages typiques similaires), d'autres sont vides (pas de site réel en correspondance avec le contenu numérique des unités virtuelles suite à l'apprentissage).

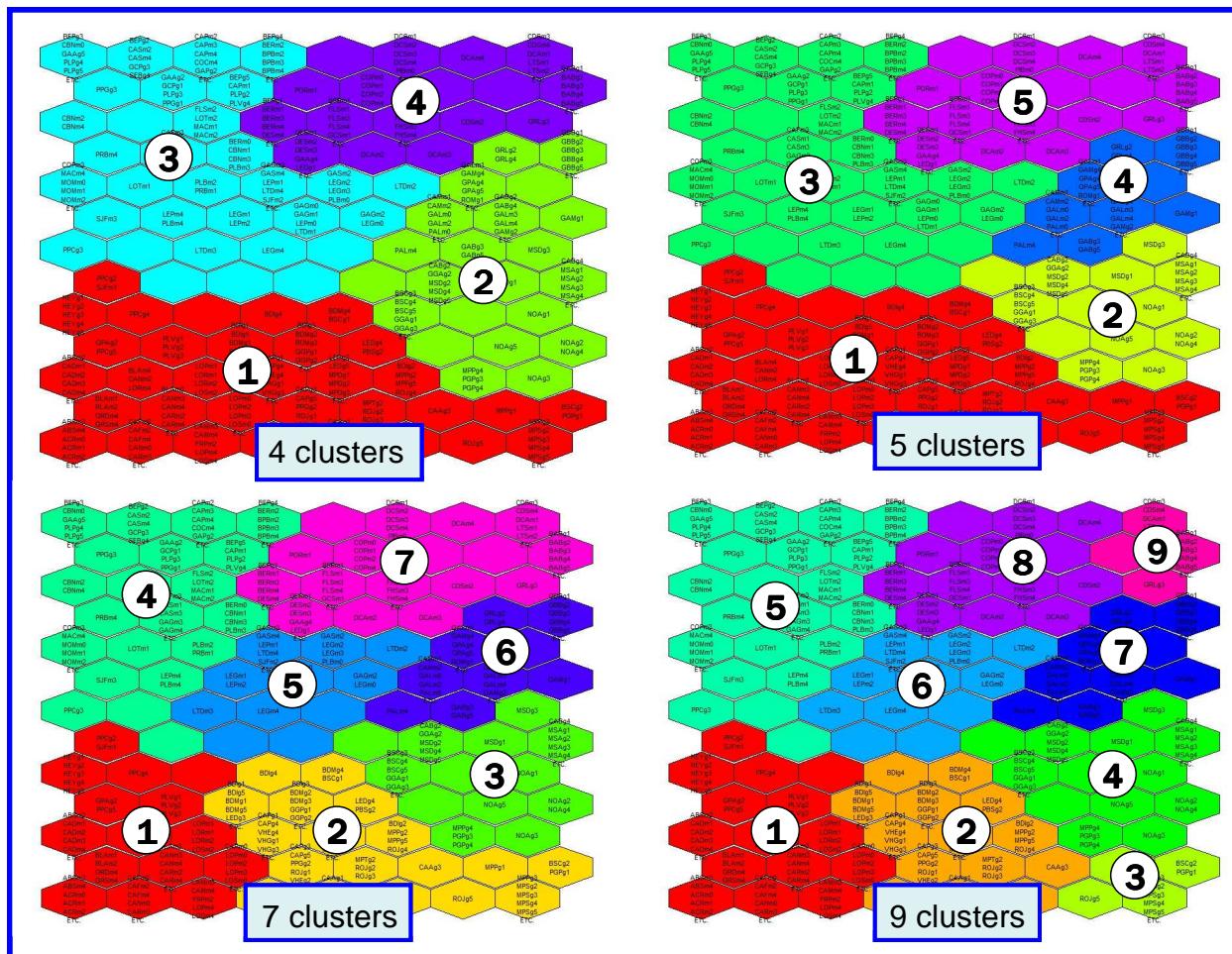
Faisant suite à l'apprentissage biotypologique basé sur les relevés diatomiques des Antilles, l'étape suivante a consisté en l'élaboration d'un arbre ascendant hiérarchique basé sur la méthode de Ward (Ward 1963) à partir des assemblages virtuels de la carte auto-organisatrice.

Il a ensuite été examiné la pertinence et la signification écologique des assemblages diatomiques typiques sur la carte auto-organisatrice (SOM), en fonction de niveaux de coupe successifs sur l'arbre ascendant hiérarchique produit comme schématisé dans la **Figure 43** décrivant la procédure méthodologique d'utilisation de la SOM.

Sur le principe, on peut découper l'arbre jusqu'à ce que chaque cluster contienne une seule unité virtuelle, gage de la plus grande homogénéité intra-cluster. Mais l'intérêt pratique est de regrouper les sites suffisamment comparables à l'échelle globale des Antilles pour définir des communautés typiques de catégories homogènes de conditions environnementales. Afin de comprendre la logique successive d'apparition de nouveaux clusters par subdivision en 2 parties d'entités prédefinies à un niveau de coupe inférieur, il a donc été procédé de manière verticale à l'examen successif des découpages de la carte auto-organisatrice depuis la première division du jeu de données en 2 clusters jusqu'à atteindre une quinzaine de clusters.

Seuls les résultats obtenus en faisant progresser le niveau de coupe entre 4 et 9 clusters sont présentés dans le rapport. Les conséquences des niveaux de coupe successifs et la figuration de la topologie des clusters obtenus à certains niveaux de coupe intermédiaires sur la carte auto-organisatrice sont représentés en **Figure 45** page suivante. Les résultats et leur interprétation écologique ont été examinés à chaque fois en s'appuyant sur les moyens pré-décris.

Sans rentrer dans le détail, chaque niveau de coupe successif provoquait une amélioration intelligible de l'homogénéité des derniers groupes subdivisés.



**Figure 45 : Examen successif des niveaux de coupe de la SOM pour 4, 5, 7 et 9 clusters**

Le dernier niveau de coupe ayant apporté une plus-value intelligible a été, en passant de 8 à 9 clusters, la division de l'ancien Cluster 2, typiquement inféodé aux substrats volcaniques peu minéralisés de la Guadeloupe, en deux nouveaux clusters exclusifs de la Guadeloupe, le Cluster 2 plutôt d'altitude (sauf cours d'eau pentus de la périphérie du massif de la Soufrière) très faiblement pollué, et un nouveau Cluster 3 d'altitudes plus faibles, à eaux plus minéralisées et en contextes plus agricoles et anthropisés.

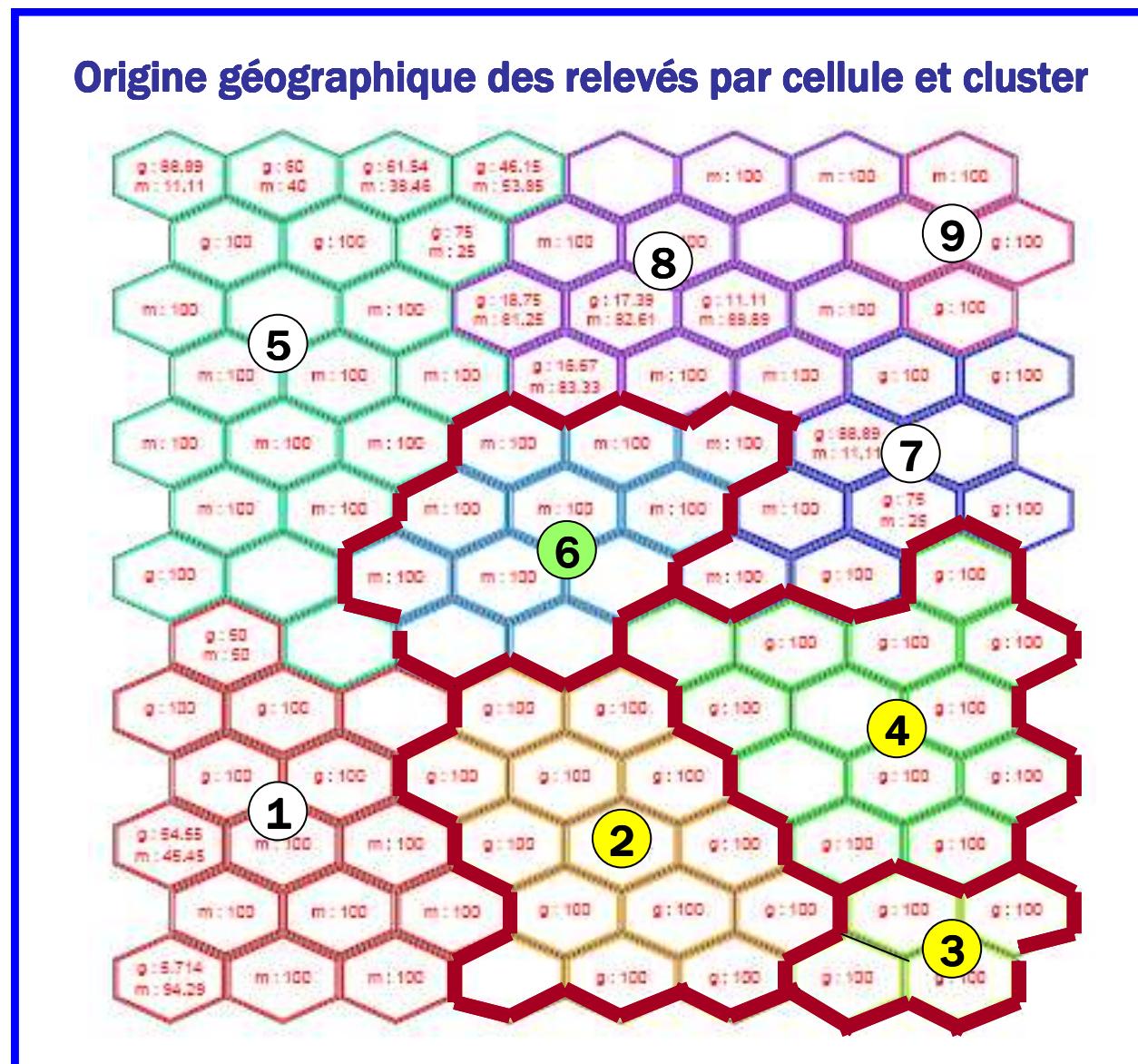
Juste avant (passage de 7 à 8 clusters), le Cluster 7 situé en haut à droite de la carte, caractéristique d'eaux très minéralisées, à forte conductivité et polluées s'est subdivisé en un cluster plutôt représentatif de sites très minéralisés avec influence aval littorale voire haline plus ou moins fréquente et intense (Cluster 8 définitif, de couleur violette, en haut au centre droit de la carte), et un cluster tout en haut à droite de la carte (Cluster 9 définitif) de couleur rose et représentatif d'eaux très minéralisées sous influence de pollutions de STEP conséquentes.

Concernant cette fois la spécificité des biotypes isolés pour être présents plutôt sur une Antille que sur une autre, même si des conditions hydrochimiques très sensiblement différentes peuvent être rencontrées sur une île par rapport à l'autre (cf cours d'eau très peu minéralisés sur massifs volcaniques peu altérés rencontrés en Guadeloupe, cf zones fortement minéralisées et carbonatées qu'il est possible de rencontrer en Martinique dans la zone des Mornes, sans équivalent en Guadeloupe), la biotypologie des 2 îles reste relativement comparable sur le plan des flores suffisamment présentes pour fonder la typicité des assemblages qu'on rencontre sur chacune d'entre elles.

Le premier cluster typique d'une des deux Antilles (la Guadeloupe) apparaît seulement à partir du niveau de coupe de 5 clusters (4 clusters communs pour un seul cluster spécifique correspondant à une situation hydrochimique très faiblement minéralisée n'existant pas en Martinique), donc cette particularité de la typologie apparaît justifiée sur le plan environnemental.

Ensuite, avec les niveaux de coupe croissants, des clusters se subdivisent parfois en un nouveau cluster spécifique d'une Antille (cas de l'ancien cluster 1 qui se divise en une partie Martinique à gauche et une partie Guadeloupe à droite).

Au niveau de coupe de 9 clusters, niveau finalement retenu pour décrire la biotypologie des assemblages diatomiques de cours d'eau à l'échelle de la Martinique et de la Guadeloupe (**Figure 46** ci-dessous), l'analyse révèle que 4 clusters sur 9 sont typiques d'une des 2 Antilles.



**Figure 46 : Assise géographique des clusters au niveau de coupe 9 clusters**

Les clusters 2, 3 et 4 (vignette à fond jaune) sont typiques de Guadeloupe, le cluster 6 (vignette à fond vert) est typique de Martinique, les 5 autres (vignette incolore) sont mixtes.

Deux d'entre eux résultent d'une nouvelle subdivision amont -aval du cluster initial typique des conditions volcaniques peu minéralisées des 2 Antilles (cluster 1 initial en rouge), ce cluster se raffinant progressivement en un cluster restant mixte aux 2 îles (cluster 1 du niveau de coupe 9) et en deux clusters typiques de Guadeloupe (Clusters 2 et 3 de la carte SOM coupée à 9 clusters) séparant des flores d'eaux très peu minéralisées et peu anthroposées plutôt d'altitude et des flores d'eaux de conductivité un peu plus élevée des zones aval des mêmes bassins versants, sous pollutions diffuses agricoles.

Un troisième s'est spécialisé au niveau de coupe 5. Auparavant cluster mixe aux 2 îles il s'est séparé en un cluster 4 (vert franc) typiquement guadeloupéen et un cluster 7 (bleu foncé) contenant toujours des assemblages des 2 îles (numéros définitifs de clusters du niveau de coupe 9).

Le quatrième, typique de Martinique et Cluster 6 de la carte SOM coupée à 9 clusters, correspond à des flores de la zone centrale de faible altitude de la Martinique, dans des cours d'eau de minéralisation et de carbonatation moyenne s'écoulant plutôt vers la côte est et assez nettement thermophiles. Ce contexte à la fois géologique, de gamme d'altitude modérée et sur pentes modestes n'est pratiquement pas rencontré en Basse-Terre de Guadeloupe, justifiant cette spécificité d'assemblage.

Au final, si des différences biogéographiques sont visibles entre Martinique et Guadeloupe, la plupart d'entre elles concernent des espèces apparues à faible occurrence et/ou à très faible abondance relative dans le jeu de données total. Une proportion modérée de ces espèces ressort dans la liste des 189 taxons ayant contribué à l'élaboration de la SOM, qui n'a pas été ré-apprise et ré-interprétée suite aux quelques ajustements taxonomiques post-Copil. En effet, cela aurait représenté un travail conséquent avec toutes les figures et interprétations détaillées à refaire pour une plus-value marginale, vu que la carte s'auto-structure un peu différemment et avec toutes les inversions-miroirs possibles, mais qu'en termes de résultats biotypologiques, elle conduit au final, à très peu de chose près, aux mêmes périmètres de clusters. Le périmètre s'entend, non en termes de topologie exactement identique de l'affectation des relevés réels aux cellules (et de leurs assemblages virtuels internes) sur la carte (c'est une carte auto-organisatrice), mais de regroupements quasi-identiques de listes de relevés (sites x dates) dans chacun des clusters, forcés par les mêmes conditions naturelles, à partir du moment où les valeurs des 2 critères de qualité d'apprentissage valident la qualité de la carte qui en découle.

D'autre part, les 4 entités typologiques ressortant spécifiques respectivement de Guadeloupe (Clusters 2, 3 et 4) et de Martinique (Cluster 6) correspondent aussi le plus souvent à des ensembles naturels particuliers présents dans une île sans équivalent réel dans l'autre. Les assemblages typiques n'étant pas individualisés dès le départ, des clusters exclusifs d'une île parviennent à s'individualiser en avançant dans le niveau de coupe. Cependant, la plupart du temps, en progressant dans le niveau de coupe, un cluster nouvellement créé se spécialise sur une île mais l'autre cluster résultant de la division reste mixte, ce qui ne clarifie pas la typologie de cet ensemble restant et montre bien qu'il reste plus de similitudes inter-îles que de différences typologiques. Sur 5 entités biotypologiques sur 9, il se confirme bien que l'on a affaire à des assemblages d'espèces communs aux deux îles et, sur les autres, les différences biotypologiques se trouvent assez nettement confortées par des différences de conditions naturelles entre les deux Antilles (hydrochimie à faible minéralisation sur laves volcaniques peu altérées en Guadeloupe, conditions très minéralisées et carbonatées, ainsi que conditions plus chaudes du fait des altitudes faibles à modérées en Martinique pour le Cluster 6).

Du fait de ce constat et du faible impact des espèces exclusives à une île sur l'assise taxonomique réelle de l'indice (notion de taxons "utiles", suffisamment représentés pour qu'il puisse leur être affecté un profil), il a donc été décidé de **mobiliser le jeu de données inter-îles** pour **construire les profils de qualité des espèces constitutives de l'IDA** (d'abord **189**, diminués à **177** en fonction de quelques évolutions et regroupements Post-Copil).

Cela revient à établir un indice commun "Antilles", puisque toutes les données disponibles des 2 îles sur chaque taxon constitutif ont servi à établir son écologie et son profil de qualité. C'est un gage de meilleure assise des profils (ils reposent sur le maximum de relevés diatomiques disponibles). Cependant, comme exposé en Partie 3 Post-Copil, deux variantes de l'indice sont à ce stade proposées, en fonction de l'ensemble naturel (regroupement d'HERs) concerné, une avec NINC en taxon d'alerte, l'autre sans.

Il n'y a pas de réel inconvénient à avoir inclus dans l'indice certaines espèces d'une île dont le profil ne sera à ce stade pas mobilisé sur l'autre, du fait qu'elle n'y a jusqu'à présent pas été trouvée (d'autant qu'il est possible qu'entretemps, progressivement, on les y trouve à l'occasion d'années à hydrologie ou climatologie atypique, ou simplement avec l'allongement des séries de relevés et de différences saisonnières ou inter-annuelles d'effet-filtre local dans la gamme des possibles à un site). Si certaines espèces sont vraiment spécifiques d'une île, on peut imaginer qu'un taxon absent sur une île dans des conditions environnementales qu'on retrouve sur les deux îles aura un ou plusieurs homologues écologiques sur l'autre île, inclus dans l'indice, qui auront des préférences écologiques et un profil de qualité pratiquement analogues. Les unes apporteront une information plus ou moins équivalente à celle non apportée par le taxon absent.

Par contre, cela aurait présenté beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages de construire des profils spécifiques sur la base des occurrences et des abondances relatives spécifiquement trouvées pour un taxon sur chacune des deux îles, ce qui aurait considérablement affaibli l'assise écologique de la plupart des **189** profils de taxons (version initiale du rapport du 09-12-2012), puis **177** profils de taxons inclus dans l'indice (présente V2 post-Copil). La solution de construction d'une base d'indice unique assise sur toute l'information écologique mobilisable à l'échelle des 2 îles était la solution la plus optimisée, c'est celle qui a été retenue au final dans le principe général. Cependant, comme évoqué ci-dessus, il existe à ce stade une nuance d'application pratique de l'indice au terrain, à savoir la prise en compte de 2 variantes d'IDA, chacune dédiée à un regroupement d'HERs, dont la seule différence est la façon de prendre en compte le profil spécifique d'un seul taxon (NINC).

Ceci dit, il peut encore se présenter des cas spécifiques à traiter en raison de caractéristiques biogéographiques locales, qui pourraient encore entraîner une évolution des particularités de mise en application, si elles se révèlent nécessaires. Cette éventualité est abordée vers la fin de la Partie 2, dans la partie de rapport traitant de la mise en œuvre et du test de la première version de l'indice proposée (version de rapport du 09-12-2012), et certaines anomalies résiduelles encore détectées suite au scénario Post-Copil (Partie III du présent rapport) nécessiteront des compléments d'information écologique en 2013 pour stabiliser la pratique finale.

#### 4. Analyse des résultats de la SOM : structure et écologie des assemblages-types

La carte auto-organisatrice avec le découpage biotypologique en 9 clusters, niveau de coupe finalement retenu pour interpréter la biotypologie, est présentée dans la partie haute de la **Figure 47**, page suivante. La projection des clusters dans l'espace des données abiotiques de l'ACP complète est présentée en parallèle en partie basse de **Figure 47** pour plus de commodité d'interprétation écologique. A noter que cette interprétation se référera aussi au schéma interprétatif de l'ACP complète tel que résumé en **Figure 40**.

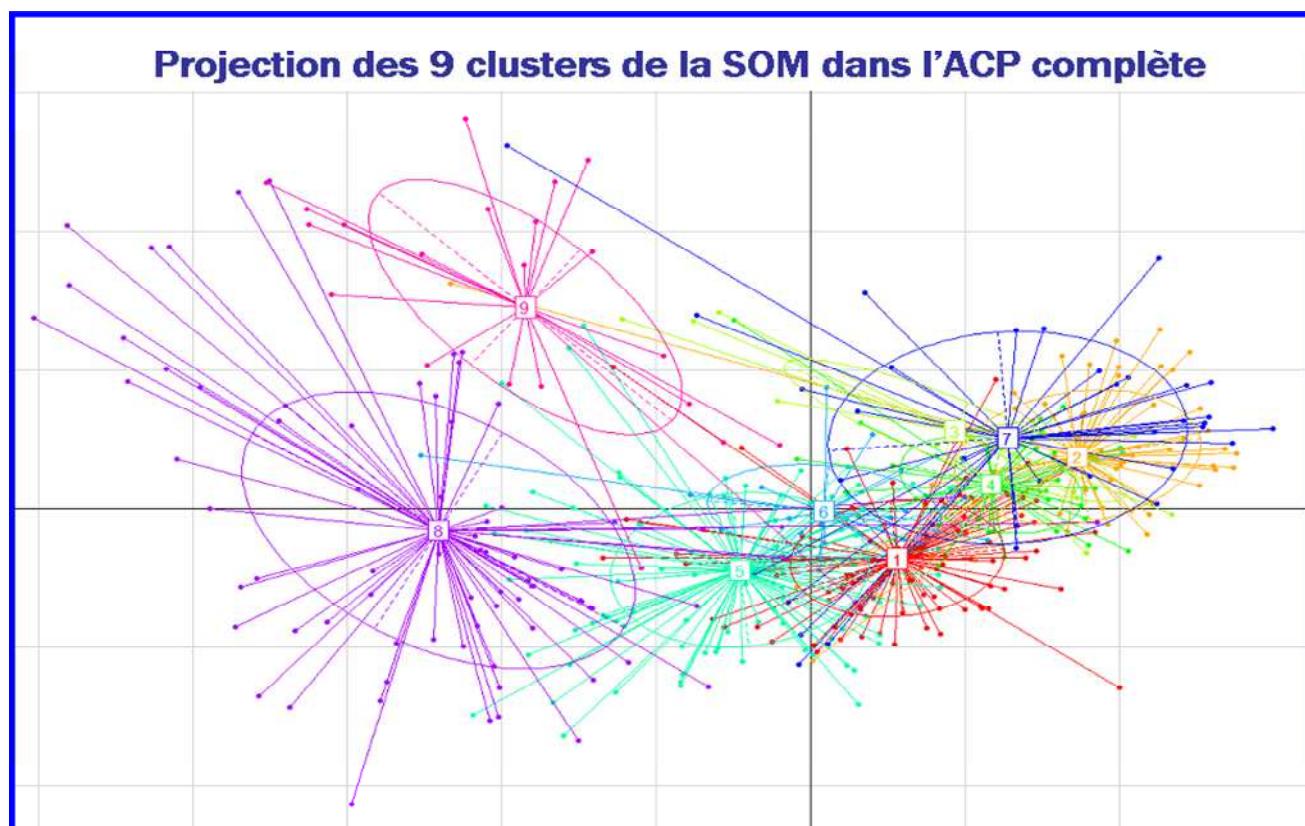
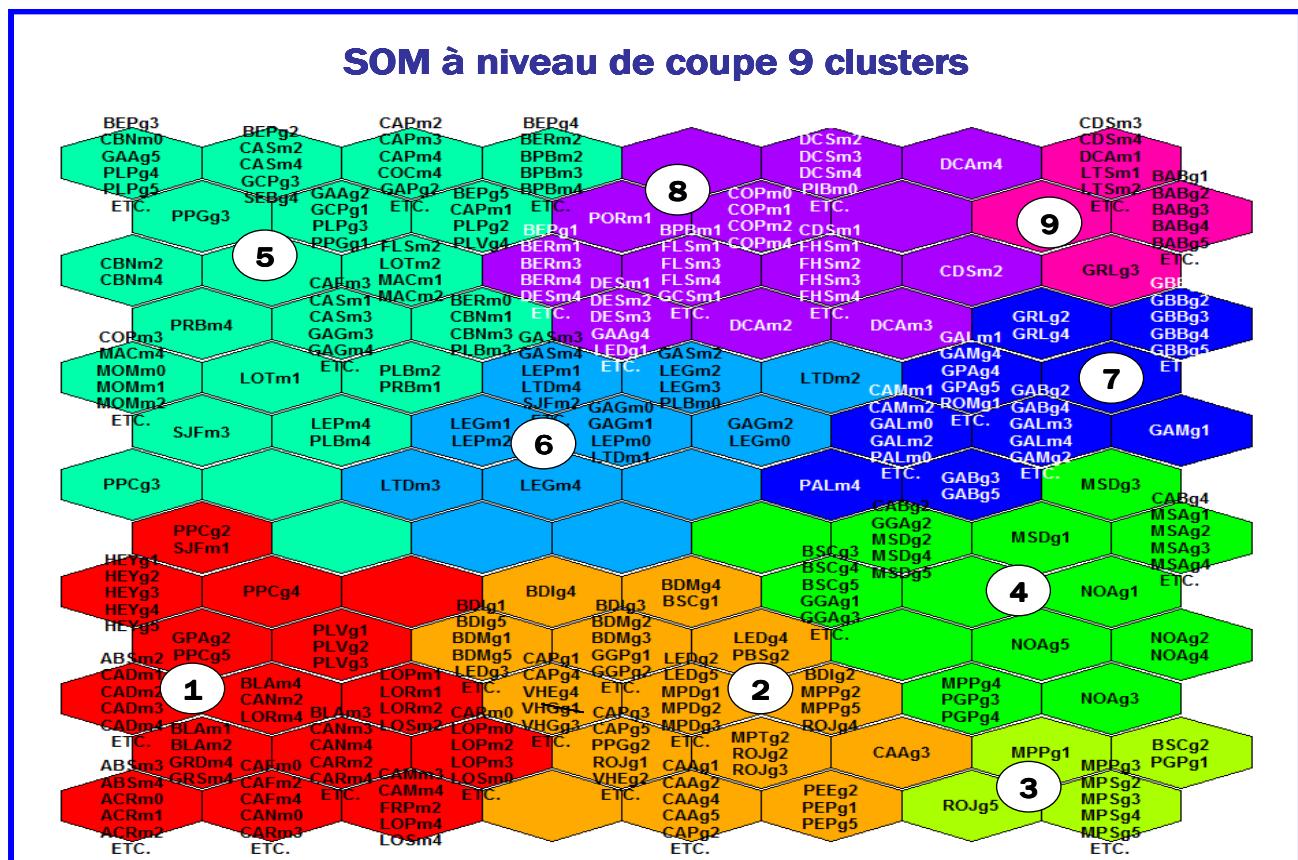


Figure 47 : Découpage biotypologique de la SOM et projection des clusters dans l'espace des données abiotiques de l'ACP complète

Selon ce cadre interprétatif de l'ACP abiotique donné en **Figure 40**, où la zone de référence du jeu de données se situait dans toute la partie basse du nuage de relevés, il est aisément de noter qu'un bon nombre de biotypes contiennent un assortiment de (sites x dates) dans la zone de référence, de la droite vers la gauche du nuage selon que leur hydrochimie naturelle est peu minéralisée (partie en bas à droite) ou au contraire de plus en plus carbonatée (vers la gauche). Un autre aspect qui se remarque facilement est que, depuis ces sites de référence, la plupart des clusters biotypologiques peuvent recouvrir en leur sein un gradient amont-aval et un gradient d'altération assez conséquent, les ellipses correspondant à chaque cluster couvrant un domaine s'étendant, plus ou moins selon les entités, depuis les sites de référence en direction du haut et de la gauche du nuage de points de l'ACP (gradient naturel ou anthropique de minéralisation de l'eau par rapport aux références en s'étirant vers la gauche, gradient de pollution en s'étirant vers le haut et la gauche).

Un fait marquant assez visuel est donc que les flores naturelles de chaque biotype peuvent résister à ces gradients et persister assez longtemps dans leur entité typologique avant de basculer vers un nouveau biotype, cette fois franchement pollué (exemple du basculement du Biotype 2 vers le Biotype 3 en Basse-Terre de Guadeloupe en fonction de la perte d'altitude et de l'augmentation de la pression anthropique notamment agricole, exemple du passage des Biotypes 4 et 7 vers le Biotype 9, adapté à des conditions de pollution intense sur des eaux fortement minéralisées en liaison avec la pression anthropique (de type « aval de STEPs présentant des caractéristiques insuffisantes de traitement »)).

Le biotype 8 contient en son sein toute une gamme de conditions fortement minéralisées allant de sites de référence jusqu'à des conditions littorales soumises de façon plus ou moins forte et fréquente à des influences halines.

Ce contexte de résilience des populations naturelles jusqu'à des situations déjà assez polluées, qui se traduit en pratique par l'englobement dans certains clusters d'un gradient allant de sites de référence à des sites déjà assez fortement anthropisés, est assez proche de ce qui a pu être vu dans un autre contexte tropical à la Réunion. Ce qui soutient cette résilience tient à la fois à des conditions de débits fournis sur des cours d'eau à forte hydrodynamique, à un contexte dilutif et souvent turbulent atténuant les effets des pollutions et enfin, au réensemencement permanent de diatomées typiques des amonts de ce même réseau hydrographique, espèces souvent synonymes de bonne qualité, qui atténuent jusqu'à un certain point les messages produits par les altérations.

A la Réunion, de telles caractéristiques biotypologiques ont conduit à construire un indice plutôt focalisé sur **l'apparition de taxons négatifs**, synonymes de forte altération ponctuelle ou plus généralisée à l'amont, plutôt que sur une prise en compte équilibrée de la composition d'une communauté dans son ensemble comme ce qui est pratiqué dans les indices métropolitains IPS et IBD 2007. Un indice bâti sur ce principe déjà usité, qui a servi de base à la mise au point de beaucoup d'indices diatomiques utilisés en Europe continentale, aurait donné des résultats insuffisamment discriminants sur des cours d'eau de longueur trop modeste et dans de tels contextes dilutifs. La physionomie des conditions abiotiques correspondant aux biotypes repérés aux Antilles à ce stade laisse déjà augurer qu'il faut aussi privilégier l'apparition de taxons négatifs (répondant ici au vocable « Taxons d'alerte ») plutôt que la composition typologique de tout l'assemblage pour pouvoir diagnostiquer de façon sensible l'apparition d'une dégradation anthropique.

Ce cadre interprétatif général étant précisé, il est déjà possible de situer certaines caractéristiques et préférences écologiques des clusters (= biotypes diatomiques) identifiés. Pour mémoire, les projections cartographiques des biotypes rencontrés aux (sites x dates) pendant les campagnes de prélèvement de Guadeloupe et de Martinique sont intégralement présentées dans **l'Annexe 8**.

Dans l'état actuel des connaissances biogéographiques acquises avec le jeu de données du programme, le **Cluster 2**, le **Cluster 3** et le **Cluster 4** sont typiques de la Guadeloupe, le **Cluster 6** est typique de la Martinique.

- le **Cluster 2**, du moins sur les sites de référence qui le caractérisent, est représentatif des flores des eaux les moins minéralisées qu'il est possible de trouver aux Antilles, plutôt en altitude ou sur fortes pentes sur les laves peu altérables du Massif de la Soufrière et sur des cours d'eau ne subissant aucune influence de sources thermales.
- Le **Cluster 4** se trouve à toutes saisons sur la partie Nord et Nord-Est de la Basse-Terre de Guadeloupe, sur des bassins versants à eaux légèrement plus minéralisées correspondant majoritairement à l'HER Guadeloupe "Plaines humides". On peut le retrouver de zones amont de référence jusqu'à des secteurs recouverts de plantations de bananeraies.
- Le **Cluster 3**, lui aussi typique de Guadeloupe, s'est séparé du Biotype 2 au dernier de coupe de la typologie (passage du niveau de coupe 8 au niveau de coupe 9). Ce biotype qui ne démarre pas de la zone de référence est une subdivision aval des hydro-systèmes faiblement minéralisés sur laves peu altérables du Massif de la Soufrière (Cluster 2). Les eaux y sont un peu plus minéralisées et sous pression anthropique (présence sensible d'activités agricoles et de pollutions diffuses) et plus représentatives d'un contexte aval à faible altitude.
- Le **Cluster 1**, concernant de façon mixte Guadeloupe et Martinique, est typique de bassins versants sur massif volcanique avec des conditions moyennement sous l'influence de roches métamorphiques carbonatées et/ de sources thermales avec présence de calcium, de magnésium et de carbonates, dont l'influence est diluée par le réseau hydrographique. Ce cluster 1 est largement implanté dans le domaine de référence et ses flores sont le plus souvent représentatives de bonne qualité, sauf un faible nombre de relevés qui s'éloignent vers le haut et la gauche.
- Le **Cluster 5**, concernant de façon mixte Guadeloupe et Martinique et dont quelques sites font partie du domaine de référence, est un biotype correspondant à des eaux assez fortement conductives et carbonatées. Il se situe en périphérie des massifs volcaniques de Martinique et de Guadeloupe, en général plus à l'aval des mêmes bassins versants que le biotype 1 (eaux plus conductives, plus chaudes, plus d'apports anthropiques diffus et élévation modérée du niveau trophique).
- Le **Cluster 6**, typique de Martinique, correspond à des flores de la zone centrale de faible altitude de la Martinique, dans des cours d'eau de minéralisation moyenne s'écoulant plutôt vers la côte est et assez nettement thermophiles.
- Le **Cluster 7** concerne plutôt des cours d'eau faiblement minéralisés et plutôt peu pollués, plutôt d'altitude, à pH inférieur à 7, de températures plutôt fraîches. Toutefois, il recouvre un gradient assez large de conditions environnementales, allant de situations de référence à quelques (sites x dates) dérivant nettement dans la zone concernée par des altérations anthropiques.
- Le **Cluster 8** concerne des sites très fortement minéralisés, à hautes teneurs en carbonates et en sulfates. Ces conditions particulières se rencontrent de façon naturelle dans la zone des Mornes en Martinique et ailleurs, dans certaines rivières des massifs volcaniques des 2 îles sous influence thermale chargée en carbonates et en sulfates. C'est aussi dans ce biotype que l'on rencontre la plupart des sites sous influence haline littorale, exclusivement situés en Martinique. Quelques sites des Mornes sont des références à géochimie très minéralisée et très particulière. On peut aussi trouver dans ce cluster des sites fortement anthropisés (ceux qui se situent dans la partie en haut de l'axe 1), sous influence notamment de stations d'épuration.

- Le **Cluster 9** regroupe des sites assez fortement minéralisés, quoique à un degré moindre que ceux du biotype 8. Par contre, il regroupe les sites subissant les altérations trophiques et organiques les plus fortes du jeu de données, souvent positionnés à l'aval de rejets de STEPs à fonctionnement nettement perfectible. Ce cluster 9 est clairement isolé dans le coin en haut à droite de la SOM, ce positionnement confirmant l'aspect très typique de ce biotype.

Le positionnement dans l'ACP a permis de souligner certaines caractéristiques marquantes des biotypes diatomiques repérés par la SOM. Il est aussi possible, afin de compléter ou affiner les informations sur leur écologie, de faire appel à l'information apportée par quelques autres descripteurs abiotiques à partir de la distribution de variables environnementales figurées sous forme de box-plots par cluster. Les informations sur les forages naturels généraux sont données en **Figure 48** page suivante, les informations sur l'effet des variables hydrochimiques minérales sont données en **Figure 49**, les informations sur les variables d'enrichissement anthropique en **Figure 50**. Les informations environnementales-cibles détaillées par paramètre et par cluster sont fournies exhaustivement en **Annexe 7**.

Ces trois figures représentent les box-plots d'une sélection de variables environnementales choisies pour caractériser l'écologie des 9 biotypes diatomiques identifiés avec la SOM. Comme certaines variables peuvent présenter des valeurs outliers très éloignées de la norme du groupe (situations naturelles spéciales, du type influence halophile, situations très altérées juste à l'aval de rejets de STEPs alors que l'assemblage dérivant de l'amont maintient encore la communauté dans le même cluster biotypologique), il a en général été choisi de borner l'échelle de la représentation sur le percentile 75 du cluster présentant les valeurs les plus élevées dans chaque paramètre, sauf quand l'échelle permettait une représentation correcte et non écrasée des valeurs naturelles habituelles.

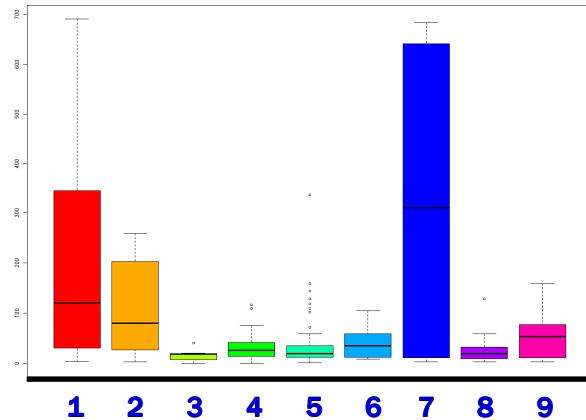
Lorsque l'échelle choisie exclut de la représentation des outliers trop éloignés, le nombre d'outliers exclus par cluster est indiqué en haut du boxplot spécifique à chacun d'entre eux pour lesquels il y a eu des exclusions. La barre en gras en partie centrale du cluster représente sa valeur médiane, soit le mode de distribution en effectifs (autant d'effectifs de (sites x dates) dans ce cluster au-dessus de cette valeur qu'au-dessous).

Le contenu de ces figures conforte et précise le classement typologique tiré de la SOM et de l'ACP. Les clusters sont présentés dans un ordre de minéralisation de l'eau croissante et de "naturalité" décroissante par rapport aux sites de référence :

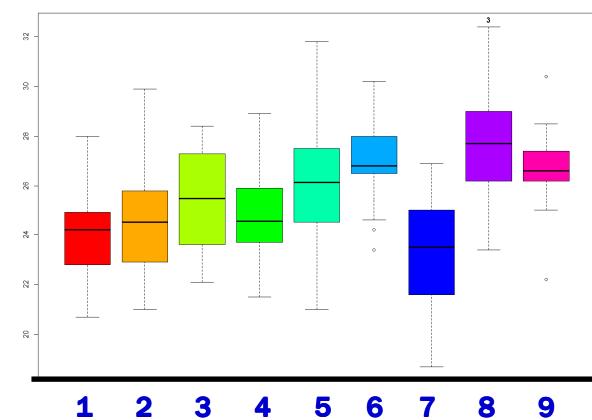
- Le **Cluster 2**, exclusif du massif volcanique de Guadeloupe sur laves peu altérées, est typique d'eaux les plus faiblement minéralisées du jeu de données Antilles. Plutôt en altitude (3<sup>ème</sup> cluster d'altitude sur sa valeur de médiane, derrière le Cluster 7 et le Cluster 1, classement conforté aussi par la température de l'eau, ce cluster présente une faible charge minérale et la plus faible conductivité électrique (mais une saturation en O<sub>2</sub> élevée et un pH non acide, ce qui laisse à penser que ses flores aiment les eaux peu minéralisées mais ne sont ni acidobiontes, ni spécialisées dans les milieux réducteurs (flores oxyphiles). Cluster peu altéré en général, mais il présente des valeurs non négligeables de P total et de DCO, ce que peut être la conséquence à la fois de cours d'eau à forte hydrodynamique sur zones à forte pente (phénomènes érosifs) et d'eaux enrichies en matières organiques probablement d'origine naturelle et faiblement biodisponibles.
- **le Cluster 4** également typique de la Guadeloupe, correspondant à des eaux faiblement minéralisées (un tout petit peu plus que le 2), à des altitudes cependant plus faibles que lui, non carbonatées et à faibles teneurs en calcium et magnésium, avec des eaux encore fraîches et une influence anthropique de nulle à modeste.

## Forçages naturels généraux

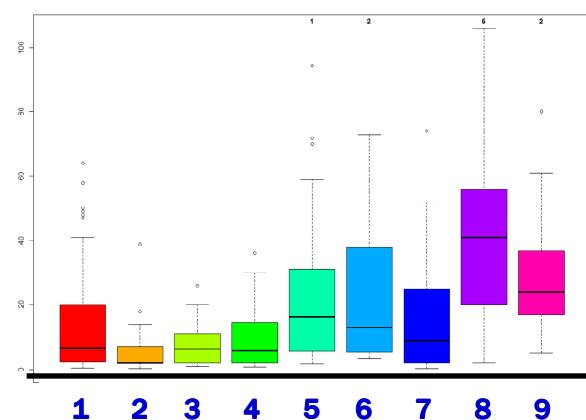
Altitude (m)



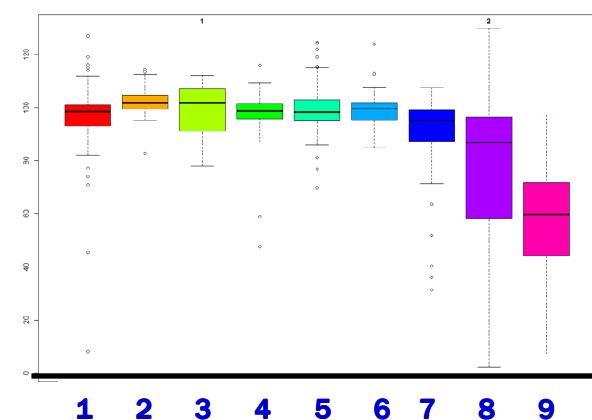
Température ( $^{\circ}$ C)



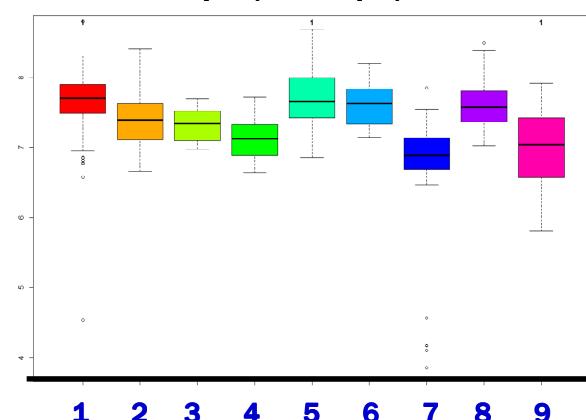
MES (mg/l)



Saturation O<sub>2</sub> (%)



pH (unités pH)



Cond. El. ( $\mu$ s/cm)

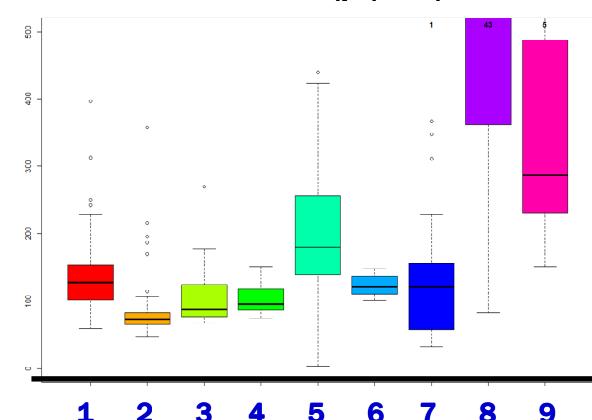
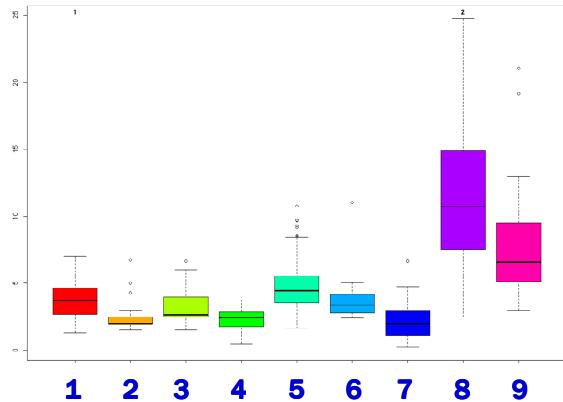


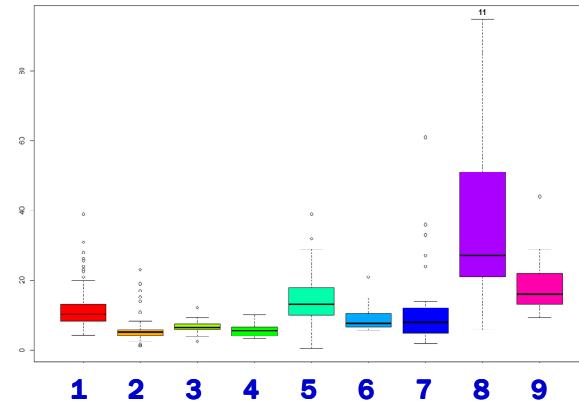
Figure 48 : Variables générales de forçages naturels

## Forçages naturels généraux

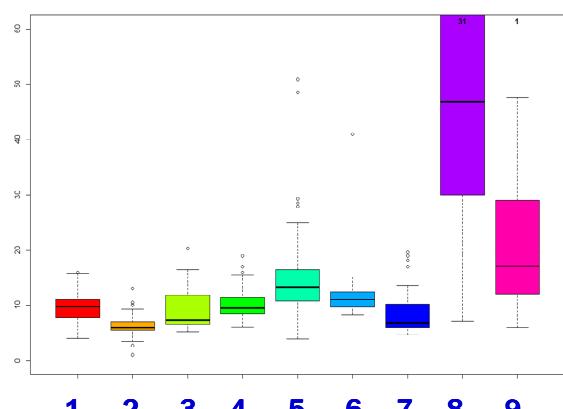
TAC (<sup>°</sup> Français)



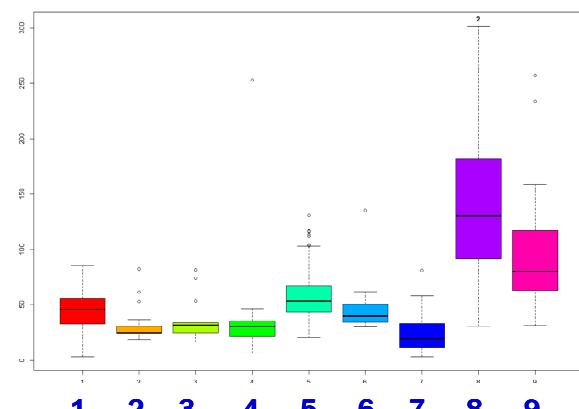
Ca <sup>++</sup> (mg/l)



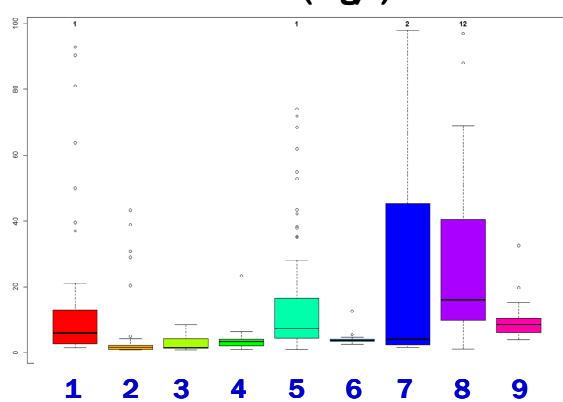
Na <sup>+</sup> (mg/l)



HCO<sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)



SO<sub>4</sub> <sup>--</sup> (mg/l)



Cl <sup>-</sup> (mg/l)

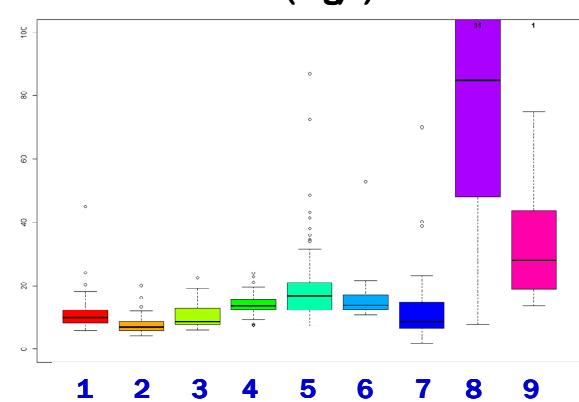
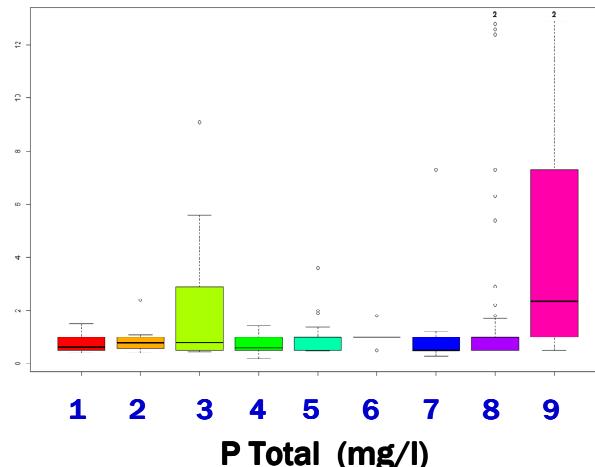


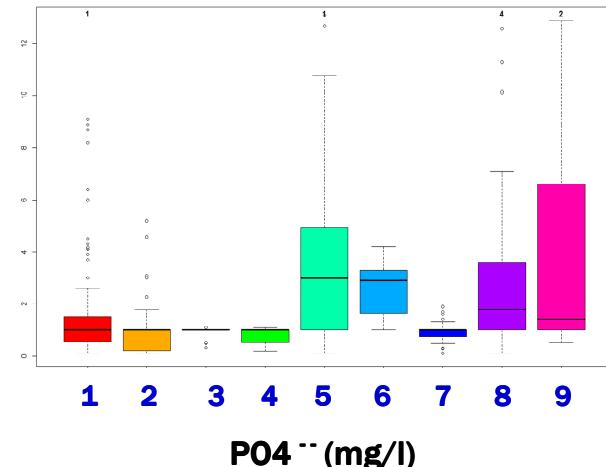
Figure 49 : Variables de forçage naturel géochimique

## Variables d'enrichissement anthropique

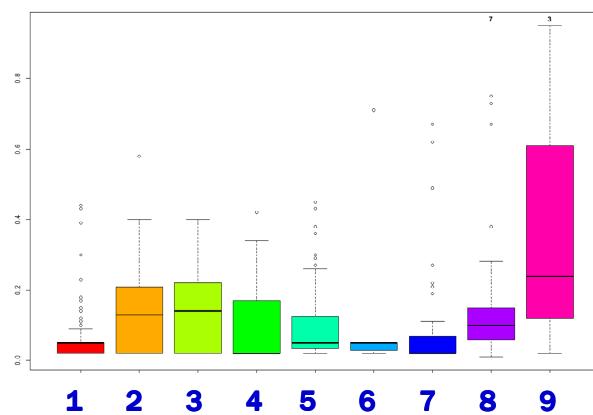
NKJ (mg/l)



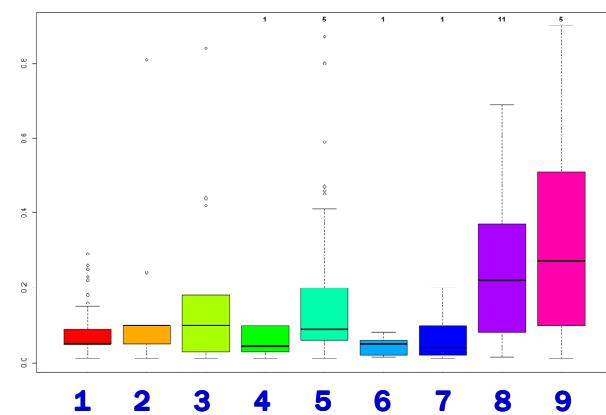
NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)



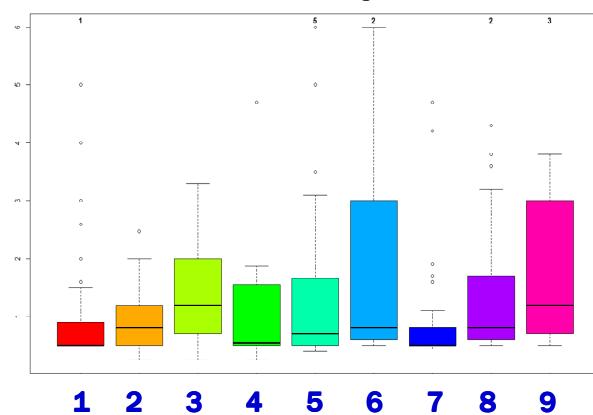
P Total (mg/l)



PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (mg/l)



DB05 (mg/l)



DCO (mg/l)

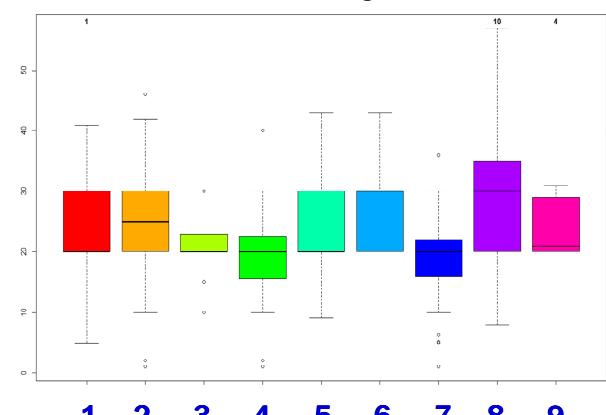


Figure 50 : Variables caractéristiques d'enrichissement anthropique

- **Le Cluster 3**, également typique de la Guadeloupe, s'est différencié du Cluster 2 tardivement (passage du niveau de coupe 8 à 9). Influencé par une hydrochimie comparable (sols de laves peu altérables, faiblement carbonatées), il correspond à une typologie plus thermophile, de bas de bassin versant, d'eaux un peu plus minéralisées sous l'influence du gradient amont-aval et est généralement marqué par un enrichissement sous l'effet d'activités anthropiques (notamment pollutions diffuses agricoles)
- **Le Cluster 7**, commun à la Martinique et à la Guadeloupe, correspond à une typologie de flores d'altitude en eaux fraîches, le plus souvent sous faible altération anthropique. Il est peu minéralisé et ses eaux sont de franchement acides à légèrement acides. Cette typologie traduit l'influence de thermalisme non carbonaté sur les 2 Iles, comme en témoignent ses faibles valeurs de TAC et la teneur de ses eaux la plus importante en sulfates. Le thermalisme étant plus ou moins influent et dilué selon les stations, le référentiel hydrochimique de ce cluster est assez variable et les flores caractéristiques sont influencées par la faible minéralisation, la teneur en sulfates. On peut y repérer des espèces d'acidobiontes à acidophiles.
- **Le Cluster 1** est associé au relief volcanique de Martinique et de Guadeloupe. Il occupe une large gamme d'altitudes mais sa médiane est la 2ème la plus élevée. Il est caractéristique de rivières à haute énergie et aux eaux fraîches, naturellement carbonatées et bien dotées de calcium et magnésium, ce qui peut traduire la présence de roches métamorphiques carbonatées et l'influence de thermalisme carbonaté. C'est un cluster avec des flores de référence ou synonymes de faible altération anthropique.
- **Le Cluster 6** est spécifique à la Martinique et caractéristique de sa partie médiane, d'altitudes modérées à faibles sur tufs et tufs altérés (bassins versants de la rivière Galion et de la Lézarde). Les cours d'eau sont modérément minéralisés (conductivités de 120 à 150), modérément carbonatés, sur sols érodables. Les cortèges sont thermophiles, ce cluster est marqué par des impacts anthropiques liés à de la pollution diffuse (l'un des clusters aux plus fortes valeurs en NO<sub>3</sub>) et à des rejets organiques (certains sites à DBO5 assez forte).
- **Le Cluster 5** est commun à la Martinique et à la Guadeloupe et typique de sols fortement minéralisés (valeurs élevées de pH et conductivité, TAC, teneurs en calcium, en Magnésium, en sodium, en chlorures, en sulfates élevées) situés à faibles altitudes en périphérie des gros massifs volcaniques. Ces bassins versants à sols assez épais et altérés sont favorables aux cultures (notamment bananeraies, cultures de cannes...) et à diverses autres activités anthropiques. Le cluster et ses flores sont donc marqués par des conditions thermophiles et conductives, certains sites étant de plus assez fortement concernés par des pollutions diffuses (NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>) et ponctuelles domestiques ou agroalimentaires (PO<sub>4</sub>, DBO5).
- **Le Cluster 8** est caractéristique des conditions naturelles les plus minéralisées de Martinique (c'est là qu'on retrouve notamment les flores de référence et de bassins versants altérés de la zone des Mornes, zone dotée d'une géochimie très particulière et d'eaux à fortes conductivités). C'est aussi dans ce cluster que se regroupent des flores de sites proches du littoral et sous influence haline littorale plus ou moins épisodique. On peut aussi y retrouver des situations de pollutions fortes (par exemple, STEPs amenant notamment une élévation des teneurs en ions minéraux et sélectionnant des flores tolérantes aux eaux de fortes conductivités).

Les flores qu'on y trouve sont tolérantes à des eaux fortement conductives (beaucoup d'espèces motiles appartenant aux nitzschiacées et naviculacées, dont *Nitzchia inconspicua* dont le cas a du être spécifiquement abordé en fin de rapport pour la construction de l'indice.)

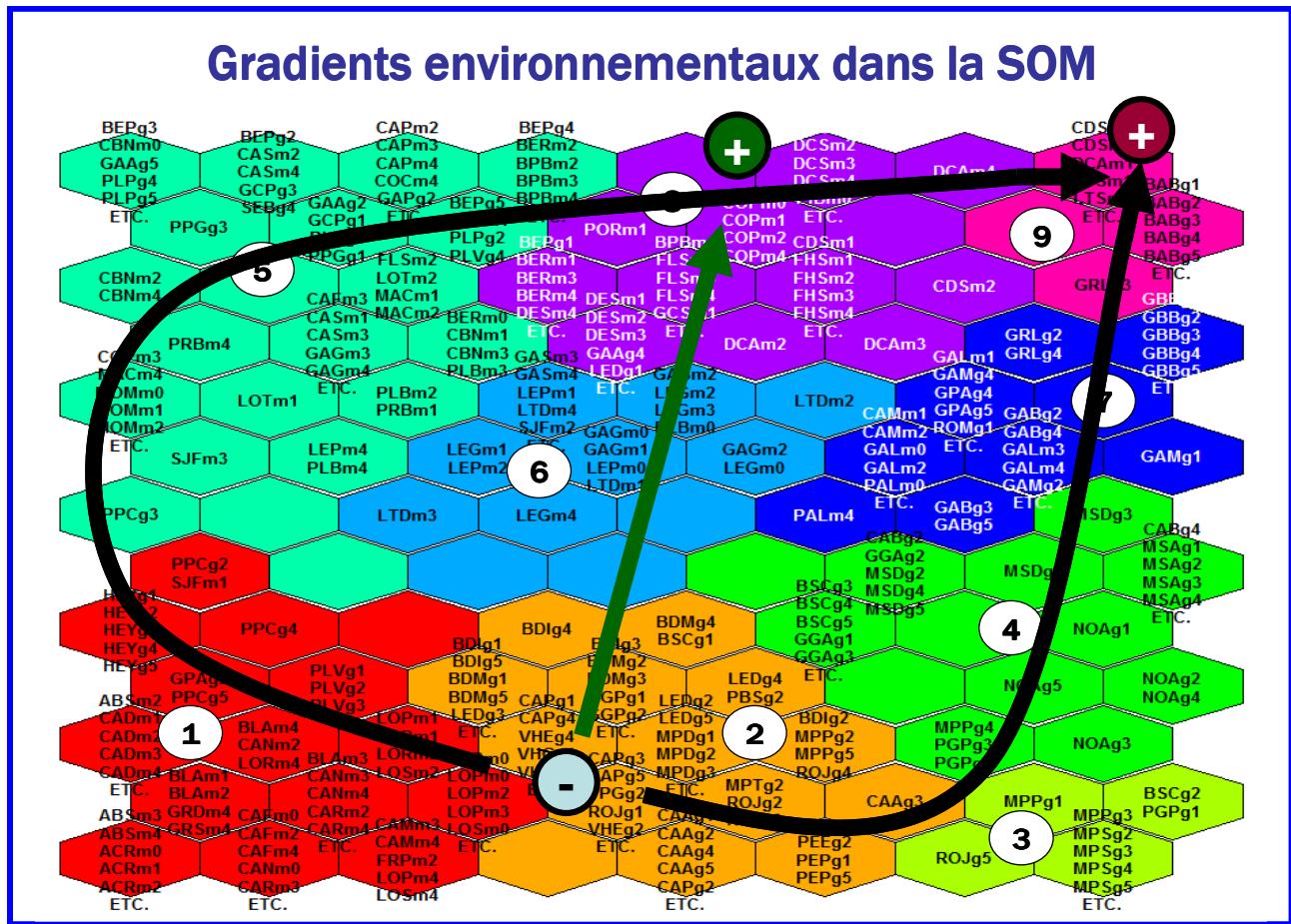
- Enfin, **le Cluster 9** est caractéristique de sites souvent situés à faible altitude et d'eaux d'assez fortes conductivités. Bien que de minéralisation naturelle moins élevée que celle du Cluster 8, le plus souvent pour raison de fonds géochimique, ce cluster se caractérise par un fort niveau de pollution diffuse et surtout ponctuelle (c'est là qu'on trouve les rejets de STEPs et certains rejets d'IAA les plus défectueux). En effet, les teneurs en différents polluants minéraux chimiques amènent ce cluster au 2<sup>ème</sup> rang des valeurs de TAC derrière le Cluster 8 sans qu'une géochimie naturelle particulière ne soit spécifiquement en cause, et ce cluster se caractérise aussi par de fortes valeurs de tous les paramètres signant un enrichissement des milieux aquatiques d'origine anthropique (certains étant reportés en **Figure 50**), et en particulier de toutes les formes de l'azote et du phosphore. L'impact de ces altérations ressort particulièrement nettement sur la projection des clusters dans l'ACP en **Figure 47** p 98, le Cluster 9 s'étendant très largement dans le domaine en haut à gauche de l'axe 1.

En résumé, les gradients structurants principaux permettant d'expliquer le positionnement et l'organisation des clusters diatomiques dans la carte SOM sont schématisés dans la **Figure 51** page suivante.

La structuration des clusters a répondu à un double gradient de minéralisation croissante des eaux et d'altérations anthropiques. Les sites les moins minéralisés de tout le jeu de données appartiennent au cluster 2, exclusif de Guadeloupe. Trois biotypes sont exclusifs de la Guadeloupe (le 2, le 3 et le 4), qui occupent la partie basse et droite de la carte. Comme cette la carte a été apprise avec les similarités et les relations de voisinage des assemblages de flores, le gradient à la fois de minéralisation et d'altération anthropique progresse du bas vers le haut de la carte de façon doublement curvilinéaire venant converger vers le cluster 8, le plus minéralisé et avec des sites sous influence haline, et le cluster 9, le plus pollué. Le gradient présent dans le milieu de la carte est essentiellement un gradient répondant aux conditions géochimiques plutôt naturelles.

Il avait déjà été vu dans l'ACP qu'il n'était pas facile de séparer les gradients hydrochimiques naturels et les gradients d'altérations anthropiques, l'ordination dans la SOM le confirme. Le gradient amont-aval n'est pas réellement bien restitué au final par une évolution des flores cohérente à l'échelle de la carte puisque des situations aval plutôt polluées peuvent être trouvées dans le cluster 3 en bas à droite de la carte (différenciation à un niveau de coupe tardif), qui représente l'aval plus minéralisé et plus pollué des bassins versants du cluster 2, typique de conditions faiblement minéralisées sur laves peu altérées. Les 2 autres clusters aval sont le 8 et le 9 et sont situés en partie haute et plutôt droite de la SOM.

Un autre fait déjà vu à l'occasion de la projection des clusters dans l'espace des données abiotiques de l'ACP et qui se confirme ici est que, au-delà du gradient organisé de minéralisation et de pollution à l'échelle de la carte, en gros de la partie basse et centrale (cluster 2, le moins minéralisé) jusqu'au coin supérieur droit (cluster 9, typique de pollutions fortes), la plupart des clusters typiques de conditions de minéralisation naturelle différente contiennent en eux à la fois des sites de référence et un gradient parfois assez sensible d'altérations qui n'arrive pas, sur des cours d'eau si courts et souvent à débits assez soutenus, à déclencher un changement de biotypologie. Le seul cluster qui soit complètement altéré sans contenir de sites de référence est le cluster 9. Le cluster 3 est un peu dans le même cas mais avec des impacts moins intenses résultant de pollution diffuse agricole sur la partie basse des bassins versants.



#### Légende :

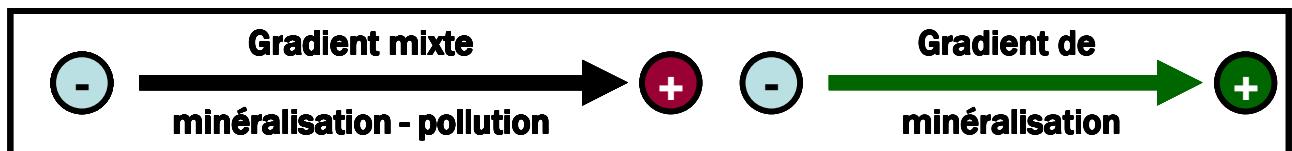


Figure 51 : Résumé des gradients environnementaux structurant les relevés biologiques en biotypes diatomiques dans la SOM

Ainsi, comme cela est bien visible dans la partie basse de la **Figure 47** page 98, les clusters 2, 1, 4, 5, 6, 7 et 8 peuvent chacun contenir certains sites de référence typiques des conditions géochimiques - hydrochimiques naturelles qui lui sont propres et présenter en son sein un gradient plus ou moins important d'altération (souvent plus important pour les clusters situés en partie haute de la carte).

Ce contexte original n'est pas usuel en métropole, où la longueur plus importante des bassins versants doublée d'un contexte rarement aussi dilutif (hors contexte de montagne) contribue à faire apparaître assez vite des différences biotypologiques nettes à l'aval d'une altération, en fonction de conditions environnementales plus tranchées dans le continuum amont-aval. Par contre, ce phénomène de forte résilience des assemblages naturels amont a déjà été remarqué aussi à la Réunion.

La conséquence pratique pour l'élaboration du nouvel indice diatomique Réunionnais a été de faire porter l'effort de diagnostic, non sur l'assemblage diatomique dans son équilibre et dans sa composition globale, mais en focalisant le message de bio-indication sur les changements d'espèces, par l'identification de taxons à valeur bio-indicatrice négative servant de taxons d'alerte dont l'apparition est synonyme d'altération anthropique nette à l'amont. C'est l'apparition puis l'augmentation de ces taxons qui, par leur cumul, viennent dégrader la note d'indice sans que les taxons de bonne qualité n'interviennent pour ré-accroître la note. Ce type de construction d'indice, basée sur une philosophie bien différente par rapport au mode de fonctionnement des indices Français IPS et IBD, est aussi celle qui a semblé la plus convenable dans ce contexte Antillais ou, jusqu'à un certain point, la composition typique des assemblages est plus marquée par la résilience des flores de bonne qualité ré-arrivant de l'amont que par des changements nets et rapides de biotypologie.

## 5. Utilisation de l'IndVal pour le repérage des espèces les plus typiques par cluster

Sur la base des listes taxonomiques présentes dans les relevés rattachés à chaque groupe biotypologique, une analyse spécifique visant à repérer et lister les espèces caractéristiques de chaque groupe a été réalisée grâce au calcul de l'IndVal, indice mis au point par (Dufrêne et Legendre, 1997, [Référence 16](#)).

Cet indice IndVal tient compte de l'abondance et de la probabilité d'occurrence de chaque espèce dans chacun des groupes, et attribue ainsi à chaque espèce une valeur indicatrice dont la valeur la plus forte correspond au groupe qu'elle caractérise le mieux. Un test de permutation (test de Monte-Carlo) est ensuite appliqué à ces données d'IndVal afin de s'assurer de la significativité statistique du rattachement d'une espèce à un groupe donné (ce qui revient à tester et confirmer que l'affectation par l'IndVal d'une espèce dans un groupe n'est pas due au hasard).

Pour les 9 groupes, l'Indval et les tests de significativité au risque  $\alpha$  de 0,05 ont fait apparaître une liste plus ou moins fournie des espèces caractéristiques (entre 2 espèces caractéristiques pour le cluster 5 et 22 pour les clusters 7 et 9). De ces listes complètes ont été sélectionnés les taxons jouxtant ou dépassant le score Indval de 0,10 et dont le repérage dans le cluster est significatif, qui sont présentés dans le Tableau 11 page suivante.

**Nota :** Parmi ces espèces structurantes figure un nombre encore substantiel d'espèces dont la détermination taxinomique reste encore à conforter, bien qu'elles soient clairement reconnues en tant que tel sous leur numéro de code.

Quelques commentaires assez généraux peuvent être faits par rapport à ces listes d'espèces-types, qui semblent consistantes par rapport aux conditions abiotiques correspondant à chaque groupe diatomique examinées précédemment..

Il n'y a pas de liaison directe entre nombre d'espèces des relevés appartenant à un cluster et nombre d'espèces typiques de conditions particulières correspondant à ce cluster. En effet, la SOM et ensuite l'IndVal sélectionnent plus facilement des taxons caractérisant des conditions très spécifiques dans le jeu de données, plutôt présentes dans un cluster particulier, que des taxons un peu banaux adaptées à des conditions médianes du jeu de données, plutôt au centre du nuage, dotés d'une certaine ubiquité ou d'une euryécie leur permettant d'émerger à plusieurs clusters.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Groupe 1			Groupe 4			Groupe 7			Groupe 9																																																																																																																																																																																																														
Taxons	IndVal	p value	Taxons	IndVal	p value	Taxons	IndVal	p value	Taxons	IndVal	p value																																																																																																																																																																																																												
GE01	0.607	0.001	G071	0.8	0.001	AD06	0.507	0.001	NARV	0.692	0.001																																																																																																																																																																																																												
DEN1	0.429	0.001	ADCT	0.476	0.001	AD19	0.361	0.001	ND01	0.455	0.001																																																																																																																																																																																																												
ADSH	0.422	0.001	G053	0.413	0.001	G072	0.274	0.001	ESBM	0.443	0.001																																																																																																																																																																																																												
ND02	0.373	0.001	AD14	0.391	0.001	PRBU	0.256	0.006	NP01	0.423	0.001																																																																																																																																																																																																												
EORU	0.36	0.001	C002	0.35	0.001	BR01	0.255	0.001	G066	0.393	0.001																																																																																																																																																																																																												
NUP1	0.318	0.002	C001	0.325	0.001	BNE2	0.21	0.001	G074	0.391	0.001																																																																																																																																																																																																												
ARPU	0.289	0.001	NESC	0.307	0.001	G082	0.203	0.001	NA54	0.367	0.001																																																																																																																																																																																																												
NURU	0.284	0.001	GBOB	0.281	0.001	FCRS	0.202	0.002	E005	0.308	0.001																																																																																																																																																																																																												
PLFR	0.233	0.001	GBPA	0.281	0.001	EEX1	0.189	0.001	PI38	0.273	0.001																																																																																																																																																																																																												
NSLC	0.19	0.001	CTRO	0.226	0.002	BNE1	0.177	0.001	ND03	0.266	0.002																																																																																																																																																																																																												
NI41	0.137	0.043	GPP1	0.182	0.004	AD13	0.164	0.004	MAPE	0.195	0.006																																																																																																																																																																																																												
CBAC	0.119	0.01	GYRE	0.182	0.001	G085	0.158	0.003	G059	0.192	0.001																																																																																																																																																																																																												
Groupe 2			NI76	0.164	0.001	AD05	0.155	0.01	NCLA	0.191	0.024																																																																																																																																																																																																												
Taxons	IndVal	p value	NAM1	0.139	0.003	EU20	0.139	0.005	AMMO	0.173	0.007																																																																																																																																																																																																												
GDEC	0.507	0.001	AD16	0.136	0.002	EUNO	0.113	0.007	ESUB	0.155	0.003																																																																																																																																																																																																												
CEUG	0.415	0.001	AD11	0.118	0.03	EEX2	0.108	0.005	NJAC	0.155	0.002																																																																																																																																																																																																												
AMUS	0.399	0.001	ESLE	0.118	0.016	EEXI	0.106	0.007	G058	0.137	0.006																																																																																																																																																																																																												
UBIC	0.354	0.001	G055	0.102	0.029	EU22	0.0998	0.004	G070	0.136	0.001																																																																																																																																																																																																												
FGOU	0.288	0.001	NFIL	0.099	0.012	Groupe 5			PI31	0.125	0.003																																																																																																																																																																																																												
E006	0.284	0.001	taxons IndVal p value			DCFD	0.122	0.003	NI78	0.121	0.013																																																																																																																																																																																																												
NACD	0.221	0.001	NNGO	0.194	0.01	Groupe 6																																																																																																																																																																																																																	
RH01	0.206	0.001	FTNR	0.128	0.038	EADN	0.135	0.003	Taxons	IndVal	p value	Groupe 3			AD07	0.488	0.001	AD07	0.488	0.001	Groupe 8			Taxons	IndVal	p value	G051	0.456	0.001	ASTG	0.303	0.001	taxons	IndVal	p value	NQDJ	0.426	0.001	NSYM	0.397	0.001	SMN1	0.253	0.001	NINC	0.547	0.001	NI64	0.393	0.001	AD08	0.38	0.001	GOAH	0.233	0.002	AD07	0.488	0.001	E001	0.32	0.001	AD10	0.355	0.001	NI44	0.211	0.001	ASTG	0.303	0.001	NAMP	0.32	0.001	G050	0.301	0.001	NERI	0.191	0.007	SMN1	0.253	0.001	G065	0.319	0.001	NP02	0.235	0.001	NI45	0.138	0.021	GOAH	0.233	0.002	E002	0.303	0.001	NFIC	0.169	0.005	LMUT	0.127	0.014	NI44	0.211	0.001	NINK	0.293	0.001	CYMI	0.139	0.007	NAUR	0.117	0.013	NERI	0.191	0.007	E004	0.287	0.002	NNOT	0.105	0.039	FTN1	0.112	0.005	NI45	0.138	0.021	NROS	0.256	0.001	Groupe 7			NOBT	0.103	0.013	LMUT	0.127	0.014	E003	0.214	0.001	taxons IndVal p value			Groupe 8			NAUR	0.117	0.013	NP05	0.191	0.001	Taxons IndVal p value			FTN1	0.112	0.005	FTN1	0.112	0.005	CMLF	0.181	0.005	Taxons IndVal p value			NOBT	0.103	0.013	NOBT	0.103	0.013	FSAP	0.162	0.02	Taxons IndVal p value			Groupe 9			taxons IndVal p value			DCRS	0.114	0.021	Taxons IndVal p value			taxons IndVal p value			taxons IndVal p value			NCTE	0.113	0.029	Taxons IndVal p value			Taxons IndVal p value			Taxons IndVal p value		
EADN	0.135	0.003	Taxons	IndVal	p value																																																																																																																																																																																																																		
Groupe 3			AD07	0.488	0.001	AD07	0.488	0.001	Groupe 8																																																																																																																																																																																																														
Taxons	IndVal	p value	G051	0.456	0.001	ASTG	0.303	0.001	taxons	IndVal	p value																																																																																																																																																																																																												
NQDJ	0.426	0.001	NSYM	0.397	0.001	SMN1	0.253	0.001	NINC	0.547	0.001																																																																																																																																																																																																												
NI64	0.393	0.001	AD08	0.38	0.001	GOAH	0.233	0.002	AD07	0.488	0.001																																																																																																																																																																																																												
E001	0.32	0.001	AD10	0.355	0.001	NI44	0.211	0.001	ASTG	0.303	0.001																																																																																																																																																																																																												
NAMP	0.32	0.001	G050	0.301	0.001	NERI	0.191	0.007	SMN1	0.253	0.001																																																																																																																																																																																																												
G065	0.319	0.001	NP02	0.235	0.001	NI45	0.138	0.021	GOAH	0.233	0.002																																																																																																																																																																																																												
E002	0.303	0.001	NFIC	0.169	0.005	LMUT	0.127	0.014	NI44	0.211	0.001																																																																																																																																																																																																												
NINK	0.293	0.001	CYMI	0.139	0.007	NAUR	0.117	0.013	NERI	0.191	0.007																																																																																																																																																																																																												
E004	0.287	0.002	NNOT	0.105	0.039	FTN1	0.112	0.005	NI45	0.138	0.021																																																																																																																																																																																																												
NROS	0.256	0.001	Groupe 7			NOBT	0.103	0.013	LMUT	0.127	0.014																																																																																																																																																																																																												
E003	0.214	0.001	taxons IndVal p value			Groupe 8			NAUR	0.117	0.013																																																																																																																																																																																																												
NP05	0.191	0.001	Taxons IndVal p value			FTN1	0.112	0.005	FTN1	0.112	0.005																																																																																																																																																																																																												
CMLF	0.181	0.005	Taxons IndVal p value			NOBT	0.103	0.013	NOBT	0.103	0.013																																																																																																																																																																																																												
FSAP	0.162	0.02	Taxons IndVal p value			Groupe 9			taxons IndVal p value																																																																																																																																																																																																														
DCRS	0.114	0.021	Taxons IndVal p value			taxons IndVal p value			taxons IndVal p value																																																																																																																																																																																																														
NCTE	0.113	0.029	Taxons IndVal p value			Taxons IndVal p value			Taxons IndVal p value																																																																																																																																																																																																														

**Tableau 11: Liste des espèces caractéristiques pour chacun des 9 groupes diatomiques identifiés sur la SOM de 104 cellules**

Dans ce sens, le Cluster 9, qui est le cluster correspondant aux situations les plus altérées du jeu de données (rejets de STEPs engendrant de fortes pollutions) est celui qui a la liste la plus longue d'espèces typiques, à savoir des espèces spécialisées qui apparaissent dans des conditions très polluées et désoxygénées et qu'on ne retrouve pas ailleurs. On y trouve notamment des diatomées motiles nitzschiacées, des naviculacées, *Mayamaea permitis*, divers Gomphonema...

Deux autres clusters font apparaître aussi un nombre élevé d'espèces typiques :

- le Cluster 7, sous influence thermale non carbonatée (dominance des sulfates), qui présente des flores spécialisées d'eaux faiblement minéralisées et à pH acide (flores acidophiles à acidobiontes), notamment des genres *Eunotia* et *Achnanthidium* ;
- le Cluster 4, typique de la partie Nord et Nord-Est de la Basse-Terre de Guadeloupe, sur des bassins versants à eaux légèrement à modérément minéralisées correspondant majoritairement à l'HER Guadeloupe "plaines humides". On peut le retrouver de zones amont de référence jusqu'à des secteurs recouverts de plantations de bananeraies avec un enrichissement des eaux dû aux pollutions diffuses agricoles.

A l'inverse, Le Cluster 5, malgré la diversité spécifique de ses assemblages, n'a que 2 espèces lui étant reconnues comme caractéristiques. Comme il présente des conditions moyennes de minéralisation et de carbonatation et qu'il est exposé à des pollutions diffuses d'intensité de modeste à moyenne, il partage des flores avec tous ses clusters voisins qui sont aussi carbonatés (le 1, le 6, le 8) et représente des conditions moyennes pour le jeu de données qui conviennent bien à beaucoup d'espèces euryèces. Il est donc difficile de lui dégager une flore réellement typique.

Les autres clusters se situent en position typologique intermédiaire, n'ayant pas une très large liste d'espèces caractéristiques (de 8 à 12 selon les cas), mais celles-ci permettant de bien cerner l'écologie typique de ces communautés. Ainsi, le Cluster 2 trouvé seulement en Guadeloupe possède un cortège d'espèces d'eaux peu minéralisées mais pas acides, de conditions fraîches et oxygénées non ou peu polluées. Le Cluster 3 est typique de conditions un peu plus minéralisées de bas de bassin versant, de températures plus élevées et de pollutions diffuses agricoles. Le cluster 8 est typique des eaux les plus carbonatées des Antilles, qu'il s'agisse de conditions géochimiques particulières (zone des Mornes de Martinique sur tufs plus ou moins altérés), de conditions minéralisées de bas de bassin versant voire même d'influences halines littorales.

Même s'il n'est pas possible dans ce rapport de rendre compte de façon détaillée de toute la connaissance écologique capitalisée au cours de ce programme, la démarche de biotypologie réalisée avec la SOM, l'étude de la typicité des flores de chaque cluster à l'aide de l'Indval et la mise en relation des communautés avec les conditions abiotiques rencontrées sur les stations apportent un lot important de renseignements sur l'écologie des peuplements et des espèces. En particulier, il est possible sur la SOM de repérer la distribution de chaque espèce, de juger de la portée spécialisée ou large de ses préférences écologiques et de son aspect structurant ou non pour tel ou tel cluster par mise en perspective de la distribution du cluster dans la SOM et de la distribution de l'espèce. Ainsi, la **Figure 52** : Projection de profils dans la SOM : taxons sténoèces et euryèces et la **Figure 53** pages suivantes permettent d'illustrer des distributions-types de taxons sténoèces versus euryèces et, pour la seconde, la distribution d'espèces sur la SOM en fonction de la structure de clusters biotypologiques mis en évidence. La densité de l'espèce par cellule est figurée en tramé allant du blanc (absence de l'espèce) au noir (forte présence de l'espèce). La couleur des clusters tels que définis sur la SOM au niveau de coupe 9 est rappelée en trame de fond périphérique des cellules en fonction de leur appartenance à un cluster donné.

La première notion qui est illustrée par la **Figure 52** : Projection de profils dans la SOM : taxons sténoèces et euryèces est la notion d'amplitude des préférences écologiques des espèces. Certaines ont des conditions-cibles précises et étroites (c'est le cas des espèces dites sténoèces, présentées en partie gauche de la Figure sous un cerclage vert), ou à préférences moins précises et plus larges, ces espèces étant qualifiées d'euryèces et présentées en partie droite de la figure sous un cerclage brun).

Naturellement, les espèces sténoèces ont une valeur bio-indicatrice plus précise et ont d'ailleurs plus de chances d'être sélectionnées par l'Indval comme typiques d'un cluster.

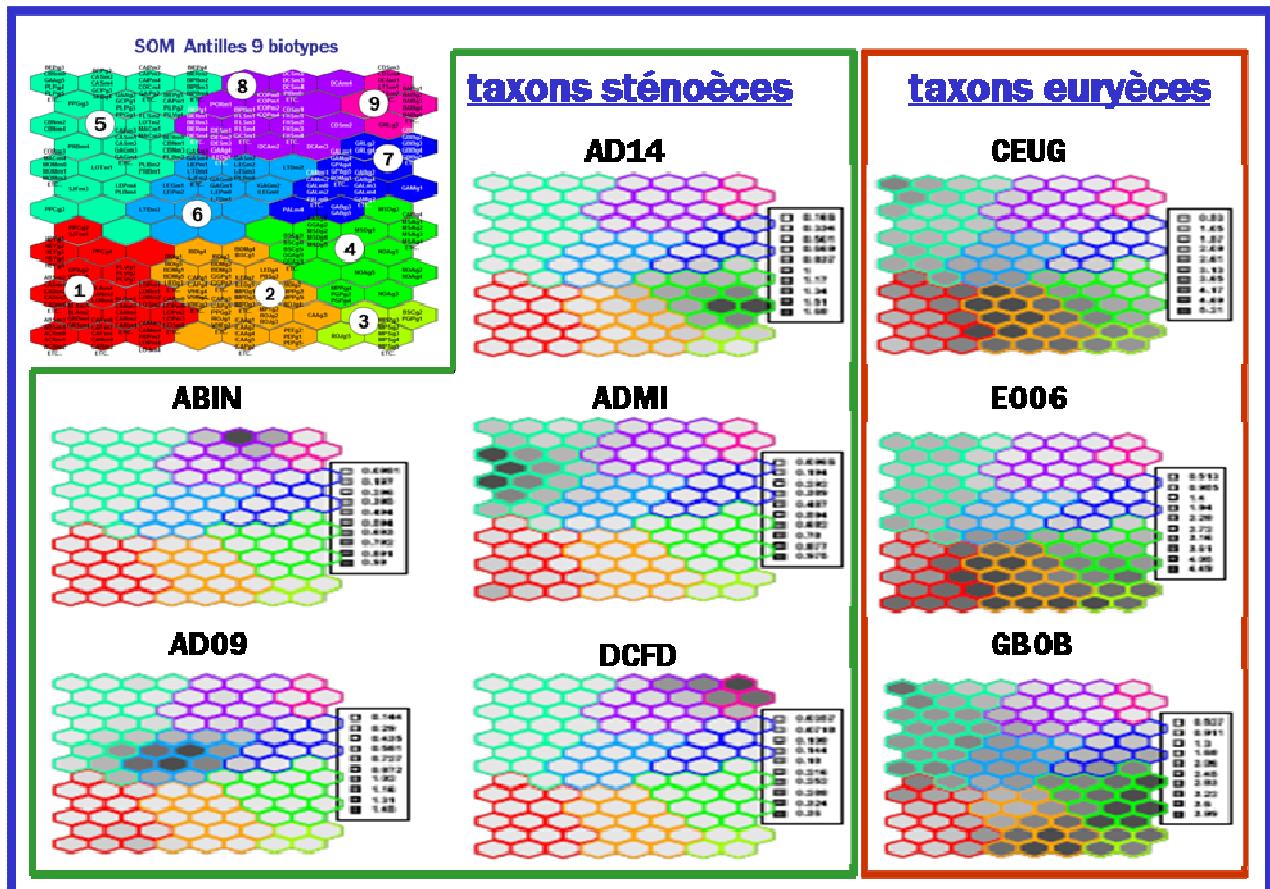


Figure 52 : Projection de profils dans la SOM : taxons sténoèces et euryèces

Les espèces euryèces sont plus plastiques et plus adaptables à des gradients de large échelle. Il arrive aussi qu'on rencontre des espèces ubiquistes, qui peuvent s'accommoder de conditions très variées et changeantes dans le temps, et malgré tout rester compétitives par rapport à des espèces plus spécialisées. L'information qu'elles apportent est souvent d'un intérêt limité pour la bio-indication, et en particulier la bio-indication de l'altération anthropique.

CEUG (*Cocconeis Euglypta*) aime les eaux bien courantes et peut s'accommoder d'eaux de peu minéralisées (cluster 2) à moyennement minéralisées (cluster 5) et de très bonnes qualités des eaux jusqu'à des eaux concernées par des pollutions diffuses. C'est un cas typique d'espèce euryèce, c'était d'ailleurs l'espèce la plus fortement présente dans le jeu de données de la Réunion, et parfaitement adaptée aux conditions naturelles siégeant sur substrat volcanique, sans ou avec influences thermales modérées. EO06 (un *Eolimna* encore à déterminer) et GBOB sont aussi des taxons typiques euryèces avec des préférences écologiques un peu différentes.

La **Figure 53** en page suivante illustre l'information relative à l'écologie des espèces qu'il est possible de résumer à l'aide de la SOM.

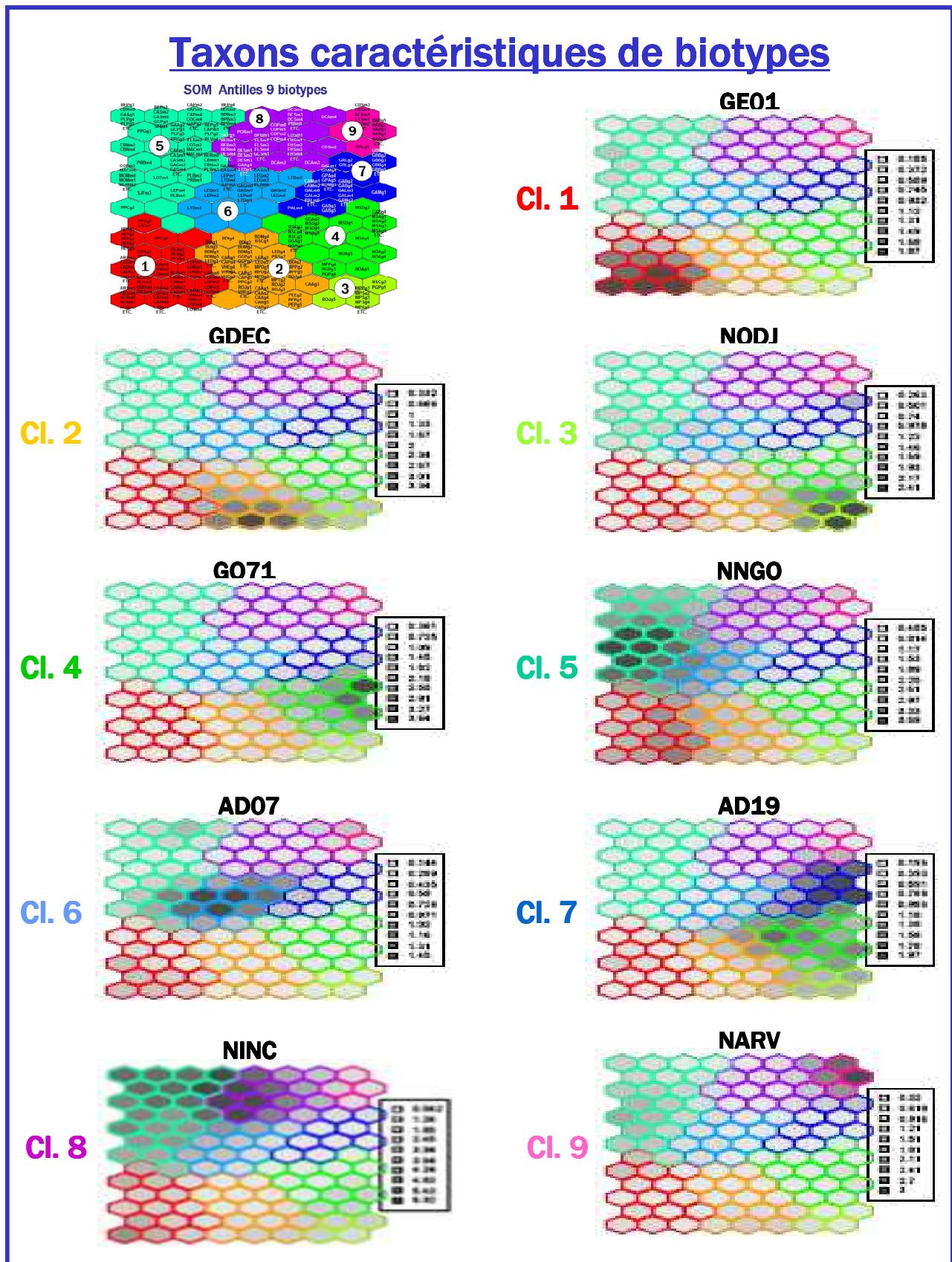


Figure 53 : Projection dans la SOM de profils de taxons typiques de biotypes

A titre d'exemple, la distribution d'un des taxons ressortis parmi les plus structurants pour chaque cluster sur la base du calcul de l'IndVal est illustré (clusters 1 à 9).

Les profils de distribution dans la SOM des 189 taxons (Pré-Copil) qui ont servi à son apprentissage et qui rentrent dans l'élaboration de l'indice, liste réduite et réactualisée Post-Copil à **177 taxons**, sont donnés exhaustivement en **Annexe 9**.

## 6. Bilan de cette biotypologie, conséquences opérationnelles

La biotypologie présentée dans les pages précédentes est consistante et intelligible sur le plan écologique. Elle nous a permis de mieux comprendre la distribution et la signification des flores typiques en fonction des conditions de milieu, ce qui était le but recherché.

Le **Tableau 12** en page suivante résume l'information permettant de comprendre l'écologie des 9 groupes diatomiques typiques repérés aux Antilles. Il est organisé verticalement selon une logique de forçage géochimique et de minéralisation de l'eau croissants (en se basant principalement sur l'accroissement de la conductivité électrique) et, lorsque possible, de gradient d'anthropisation croissant dans un même type géochimique. Il résume les préférences abiotiques naturelles des groupes diatomiques considérés et donne les principales espèces-repères indicatrices de l'écologie dominante de chaque groupe (pour plus de détails, voir listes plus complètes des espèces typiques de groupes en **Tableau 8** page 110.).

La biotypologie réalisée avec la SOM **a permis de différencier spécifiquement 2 clusters sur des critères d'altération des milieux** et de dégradation au long du continuum mont-aval (le **Cluster 3** sur l'aval de bassins versants sur substrats de lave à eaux peu minéralisées et faiblement carbonatées en Guadeloupe, concerné par des pollutions diffuses principalement d'origine agricole, et le **Cluster 9** commun aux 2 îles, en conditions plus minéralisées, qui regroupe essentiellement des avals de STEPs). Cependant, il est aussi ressorti de cette biotypologie que **les clusters principalement structurés par les flores de conditions naturelles contiennent le plus souvent en leur sein un gradient environnemental assez important allant de sites de référence à des situations parfois sensiblement altérées par l'homme, sans que cette altération n'ait le temps de provoquer un basculement de typologie**. Dans ce contexte îlien tropical, les raisons en tiennent à divers facteurs :

- Flores de très bonne qualité sur la plupart des amonts et régime soutenu donnant des conditions écologiques plutôt favorables pour les diatomées et une migration-recolonisation permanente vers l'aval de ces flores de bonne qualité,
- Rivières à hydrodynamique souvent forte, tempérant les effets de l'altération (dilution, ré-oxygénéation),
- Continuums assez courts et le plus souvent sans grosse discontinuité de profil de pentes permettant de définir un parcours de plaine suffisamment long pour que l'altération provoque un basculement biotypologique.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Groupe diatomique	Préférences abiotiques	Espèces-repères
<b>2</b>	Typique au massif volcanique de la Soufrière (Guadeloupe) sur laves peu altérées. Groupe aux eaux les plus faiblement minéralisées (en-dessous de 100 µS/cm, médiane vers 75 µS/cm), d'altitude moyenne (100 à 300 m), faible pression anthropique.)	GDEC, CEUG, AMUS, UBIC, FGOU, E006, MACD, RH01 ...
<b>3</b>	Cluster exclusif de Guadeloupe, même hydrochimie non carbonatée de base que le précédent (conductivités de 70 à 180 µS/cm, médiane vers 90 µS/cm) mais conditions aval de bassins versants, altitudes faibles, cortèges thermophiles tolérants aux pollutions diffuses agricoles	NQDJ, NI64, E001, NAMP, GO65, E002, NINK, E004, NR05, E003, ...
<b>4</b>	Cluster exclusif de Guadeloupe, typique de l'HER "plaines humides" au Nord-Est de la basse-Terre, altitudes faibles à modérées, conductivités faibles, de 80 à 150 µS/cm, (médiane vers 100 µS/cm), hydrochimie peu minéralisée et non carbonatée, charge modérée en Mg, Na, SO4. Pression d'anthropisation de nulle à modérée (érosion et pollutions diffuses).	G071, ADCT, G053, AD14, C002, C001, NESI, GB0B, GBPA, CTRO, ...
<b>1</b>	Cluster commun aux deux Antilles. Stations le plus souvent d'altitude ou sur pentes des massifs du volcan, modérément minéralisées et carbonatées, conductivités entre 80 et 220 (médiane 125 µS/cm) mais pH élevé (médiane : 7,8), charge dominante en Ca et Mg. Pression d'anthropisation négligeable.	GE01, DEN1, ADSH, NDO2, EORU, NUP1, ARPU, NURU, PLFR, NSLC, ...
<b>6</b>	Cluster typique de Martinique, en zone médiane de modeste altitude sur tufs plus ou moins altérés (Zone Galion-Lézarde). Eaux à pH élevé (médiane : 7,8), moyennement conductives (de 100 à 150 µS/cm), charge minérale surtout constituée par Mg, Ca et Na. Cortèges thermophiles tolérants à des altérations par l'érosion (MES) et les fertilisants agricoles (surtout NO3).	AD07, G051, NSYM, AD08, AD10, G050, NP02, NFIC, ...
<b>5</b>	Cluster commun aux deux Antilles, situé en périphérie des 2 massifs volcaniques à altitudes modérées à faibles sur sols altérés profonds. Eaux à pH élevé, fortement minéralisées (conductivités de 150 à plus de 300 µS/cm), carbonatées et à charge importante en Ca, Mg, Na, K, SiO2. Pression sensible de pollutions diffuses agricoles et domestiques (MES, PO4 et NO3) en liaison avec les cultures de banane, de canne et l'habitat	Cluster médian, bcp d'espèces euryèques d'eaux carbonatées, peu de taxons exclusifs : NNGO, FTNR
<b>7</b>	plutôt d'altitude et de températures fraîches, typique d'eaux thermales à pH acide, modérément minéralisées (conductivité médiane de 120 µS/cm) mais non carbonatées, charge minérale principale en Ca, Na et SO4, flores d'acidobiontes à acidophiles, eaux de non à peu altérées.	GAD06, AD19, GO72, PRBU, BRO1, BNE2, GO82, FCRS, EEX1, BNE1 ...
<b>8</b>	Cluster le plus minéralisé et carbonaté, à pH élevé, commun aux deux Antilles. Il regroupe des géochimies particulières (HER Mornes de Martinique, quelques sites avec thermalisme carbonaté des 2 volcans, quelques sites sous influence haline littorale de Martinique. Il couvre depuis des sites de référence des Mornes jusqu'à de fortes altérations anthropiques ponctuelles	ANINC, ASTG, SMN1, GOAH, NI44, NERI, ...
<b>9</b>	Cluster aval un peu moins minéralisé par sa géochimie naturelle que le cluster 8, mais qui s'est différencié principalement sur les gradients anthropiques (fortes pollutions ponctuelles de type STEPS...) et les flores les plus altérées (tolérance aux fortes conductivités, à l'enrichissement organique et trophique...)	NARV, ND01, ESBM, NP01, GO66, G074, NA54, E005, PL38, ND03 ...

**Tableau 12 : Signalétique résumée des 9 biotypes diatomiques des Antilles et de leur écologie**

Ce contexte plutôt dilutif sur des bassins versants relativement courts et la forte résilience des flores naturelles typiques ont 2 conséquences opérationnelles assez importantes :

- En fonction des résultats de typologie, sauf cas particulier toujours possible, il sera facile d'appliquer sur des bassins complets bien définis, de l'amont à l'aval, une comparaison avec des références propres au biotype. S'il a pu être observé l'importance de facteurs thermiques pour la définition de certains biotypes aimant les eaux fraîches ou au contraire thermophiles, il semble que, contrairement à la Réunion, le régime thermique saisonnier n'indue pas de basculements d'un biotype à un autre très différent dans les mêmes cours d'eau. Dans ces conditions, le **concept de référence adéquate sera plutôt géographique que temporel**, ce qui rend plus facile son identification et sa mise en pratique opérationnelle ;
- Le contexte très dilutif, l'hydrodynamique favorable à la minimisation des effets d'altérations et la résilience affirmée des flores naturelles conduisent à **baser le nouvel indice sur l'information portée sur des taxons d'alerte synonymes de dégradation anthropique** plutôt que sur un calcul d'indice prenant en compte toute la composition floristique de l'assemblage dans son équilibre au site.

La trame des HERs1 des Antilles amène une information assez consistante sur la structuration à la fois abiotique des milieux et des assemblages biologiques qui y vivent. Cependant, il faut sérié l'analyse :

- Certaines d'entre elles sous-tendent bien la structuration observée des flores diatomiques, c'est le cas pour pour l'HER "Plaine humide" au Nord-Est de la Basse-Terre de Guadeloupe et c'est aussi le cas pour les HERs "Mornes du sud" et "Plaine du Lamentin" pour la Martinique.
- Par contre, cette trame est à étudier avec plus d'attention dans les vastes et diverses HERs "Pitons du Nord" pour la Martinique et "Volcan Humide" pour la Guadeloupe car il n'est pas évident a priori qu'elle soit suffisante. En effet, le cloisonnement physique assez fort des bassins versants et les particularités géochimiques et hydrochimiques locales (présence ou non d'affleurements de roches métamorphiques carbonatées parmi le socle de lave, présence ou pas de sources thermales, de typologie de minéralisation éventuellement différente) peuvent conduire à des biotypologies différentes selon les bassins et stables sur un bassin donné en fonction de ses particularités géochimiques bien spécifiques et des forçages naturels de plus large échelle. Mais cela n'aura pas forcément de répercussions sur l'évaluation si les niveaux de référence des notes d'IDA sont similaires ou proches. Il sera tenu compte de ce dernier aspect pour la stratégie et la grille finale d'évaluation.

L'analyse biotypologique a donc permis de repérer la structuration des grands ensembles de flores et de savoir à quel assortiment de sites de référence il est possible de comparer des sites à évaluer dans un ensemble naturel et floristique homogène (biotypes). Ceci dit, pour appliquer des équivalents de qualité écologique (les EQRs) comme recommandé dans la DCE, le raccrochage typologique est important mais le niveau des notes de référence calculées avec le nouvel indice est l'information qui doit primer. En fonction de ces notes, il pourra être envisagé de simplifier le découpage, notamment si deux ou plusieurs ensembles biotypologiques ont le même cadre de notation, qu'il s'agisse du niveau de référence ou des notes indicielles les plus basses qu'il est envisageable d'atteindre dans ces ensembles.

Ce problème de l'affectation de la bonne référence sera donc à ré-examiner en fin de travail, au regard du référentiel de valeurs indicielles produites par le nouvel outil.

## C. Relations assemblages biologiques – environnement : Analyse Canonique des Correspondances complète

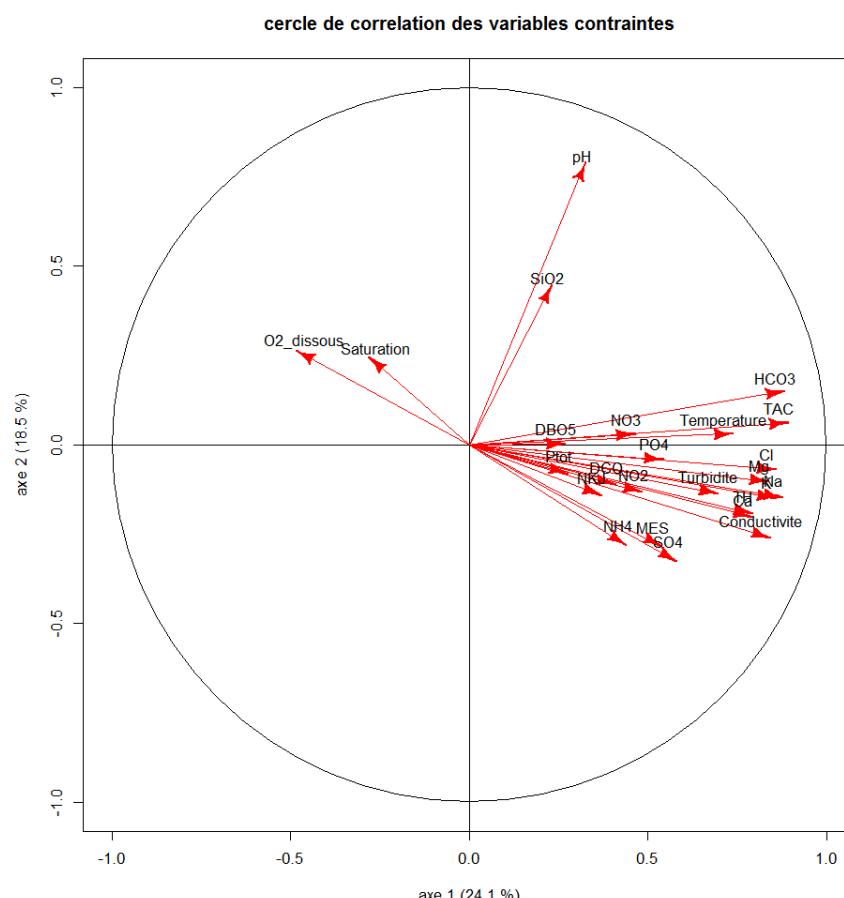
### 1. Aspects méthodologiques

L'analyse canonique des correspondances (CCA) permet d'étudier les relations (linéaires) qui existent entre deux tableaux. En écologie, beaucoup des CCA mettent en relations une matrice abiotique et une matrice biologique (ter Braak 1987, **Référence 8**). Le package utilisé pour réaliser cette analyse est le package « vegan » (Jari Oksanen 2012, **Référence 19**).

La matrice de variables abiotiques utilisée dans cette analyse, qui est la même que celle utilisé pour l'ACP complète mise en œuvre telle que développé en **page 79**, comporte un assortiment de 25 variables abiotiques. La matrice biotique utilisée contient 183 espèces et 468 relevés (sites/campagne). L'objectif de cette analyse exploratoire globale est de repérer l'importance des variables environnementales qui exercent leurs forçages naturels et anthropiques sur les flores diatomiques et inversement, de repérer les réponses des communautés de diatomées imputables à telle ou telle variable abiotique. Elle apporte une connaissance intéressante sur l'écologie qui s'exerce aux sites en fonction des dates, et permet de repérer les réponses des cortèges et des espèces aux forçages abiotiques les plus structurants.

La matrice a été transformée par une transformation log ( $x+1$ ). Cette transformation permet de diminuer l'importance des trop grandes valeurs d'abondances relatives et d'augmenter le signal porté par les abondances faibles sans altérer les importances relatives entre les différentes espèces. En pratique et notamment en conditions environnementales instables, les abondances relatives des relevés peuvent être dominées par de petites espèces pionnières se multipliant très vite alors que d'autres espèces, et notamment celles de taille beaucoup plus importante, ont un temps de doublement d'effectifs beaucoup plus long. Les abondances relatives ne sont donc pas forcément un reflet représentatif des biovolumes ou biomasses par espèces d'un assemblage, d'autre part les espèces de tailles importantes, mais aussi certaines espèces peu abondantes aux préférences écologiques précises, pas forcément très compétitives et souvent sensibles aux dégradations de l'habitat, portent souvent des messages écologiques très informatifs sur les conditions écologiques précises au site et en particulier pour les sites de très bonne qualité. La transformation log, souvent intéressante dans le cadre de démarches d'analyse biotypologique d'assemblages multispécifiques, a donc pour double objectif de mieux représenter la biomasse par rapport à l'effectif et d'autre part, de faire ressortir un peu plus nettement les messages écologiques intéressants souvent apportés par les espèces de grande taille et/ou dotées d'une sensibilité particulière et d'une faible compétitivité face à des espèces plus ubiquistes.

## 2. Résultats



**Figure 54 : Cercles des corrélations sur le premier plan factoriel (axe 1 et 2) de l'analyse canonique des correspondances (CCA) sur tous les paramètres à disposition**

Dans la **Figure 54**, il faut tout d'abord noter un effet d'inversion-miroir du cercle des composantes principales par rapport à l'ACP complète présentée en **Figure 38**. C'est un fait classique dans le cadre de l'utilisation de la CCA avec ce package sous R. Le poids et l'orientation des variables étant déterminés de façon relative, cela ne pose pas de problème particulier dans l'analyse ni dans son interprétation.

On observe que la plupart des variables autres que le pH et le SiO<sub>2</sub>, sont portées de façon très dominante par l'axe principal (axe 1). L'O<sub>2</sub> dissous et le pourcentage de saturation sont corrélés négativement aux autres variables, c'est-à-dire que leur dynamique est inverse aux autres variables abiotiques, et en particulier à celles dont les valeurs s'accroissent avec les rejets domestiques, de STEP, d'élevages ou d'IAA, qui peuvent générer une demande en oxygène in situ.

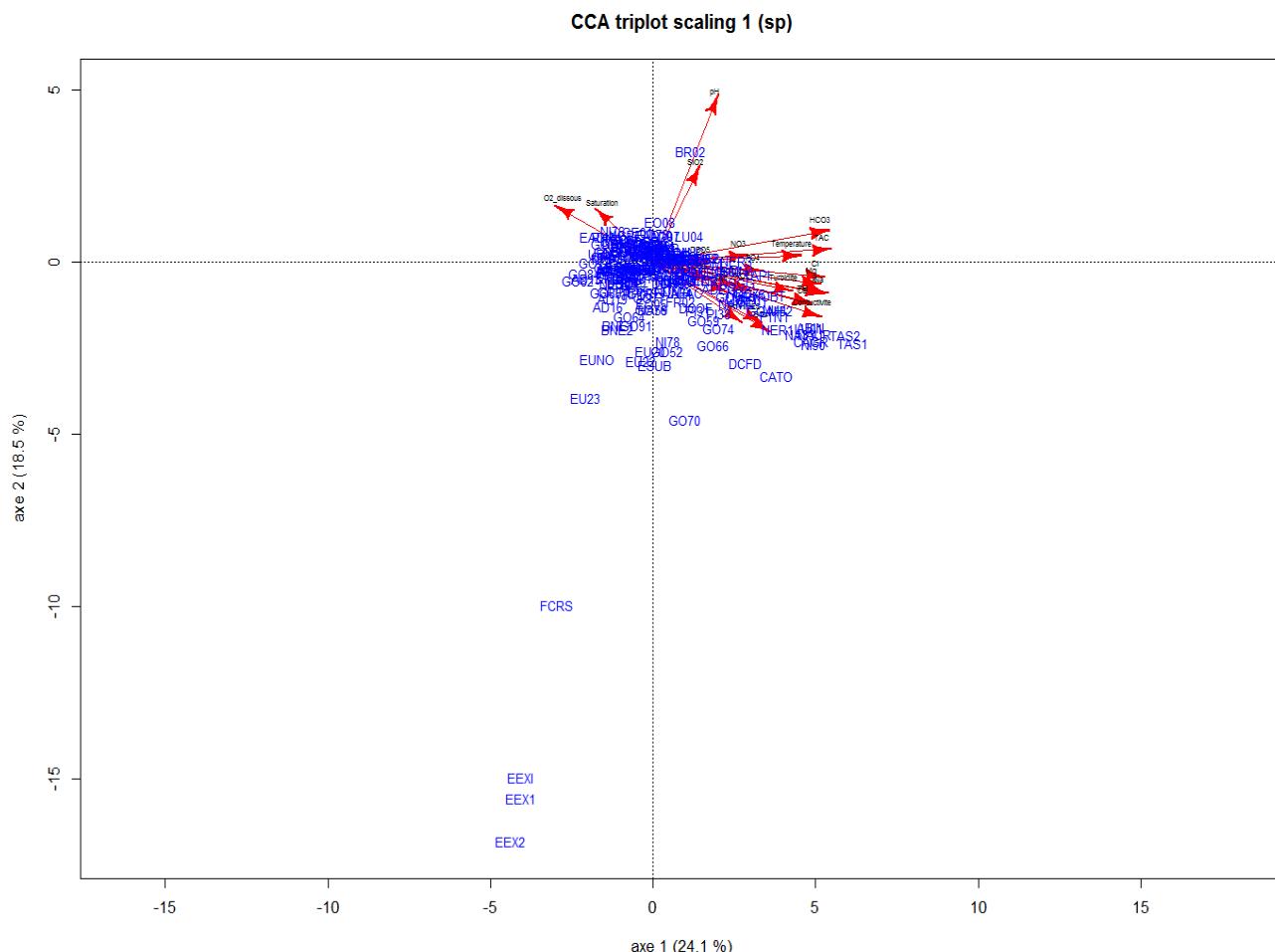
Le pH et le SiO<sub>2</sub> sont principalement portés par l'axe 2 et leurs composantes principales orthogonales aux autres variables influentes suggèrent leur indépendance par rapport à presque toutes les autres variables. Autrement dit, ces deux paramètres ne subissent pas de co-variation particulière dictée par une relation avec les autres variables figurées dans ce plan.

Le fait que des variables plutôt hydrochimiques naturelles et que les variables plutôt à mettre en correspondance avec des altérations anthropiques soient quasiment toutes portées par l'axe 1 ne permet pas de dégager une partition claire des informations portées par les différents axes et ne favorise pas l'isolement dans cette analyse complète de la composante "altérations anthropiques", ce qui aurait pu être utilisé pour matérialiser le gradient anthropique pour la fondation du nouvel indice. C'est le même problème que pour l'ACP complète présentée en **Figure 38**.

Axe 1	Axe 2	Axe 3
24.1%	18.5 %	10.7%

**Tableau 13 : Pourcentage d'inertie totale des axes contraints pour les axes 1, 2 et 3.**

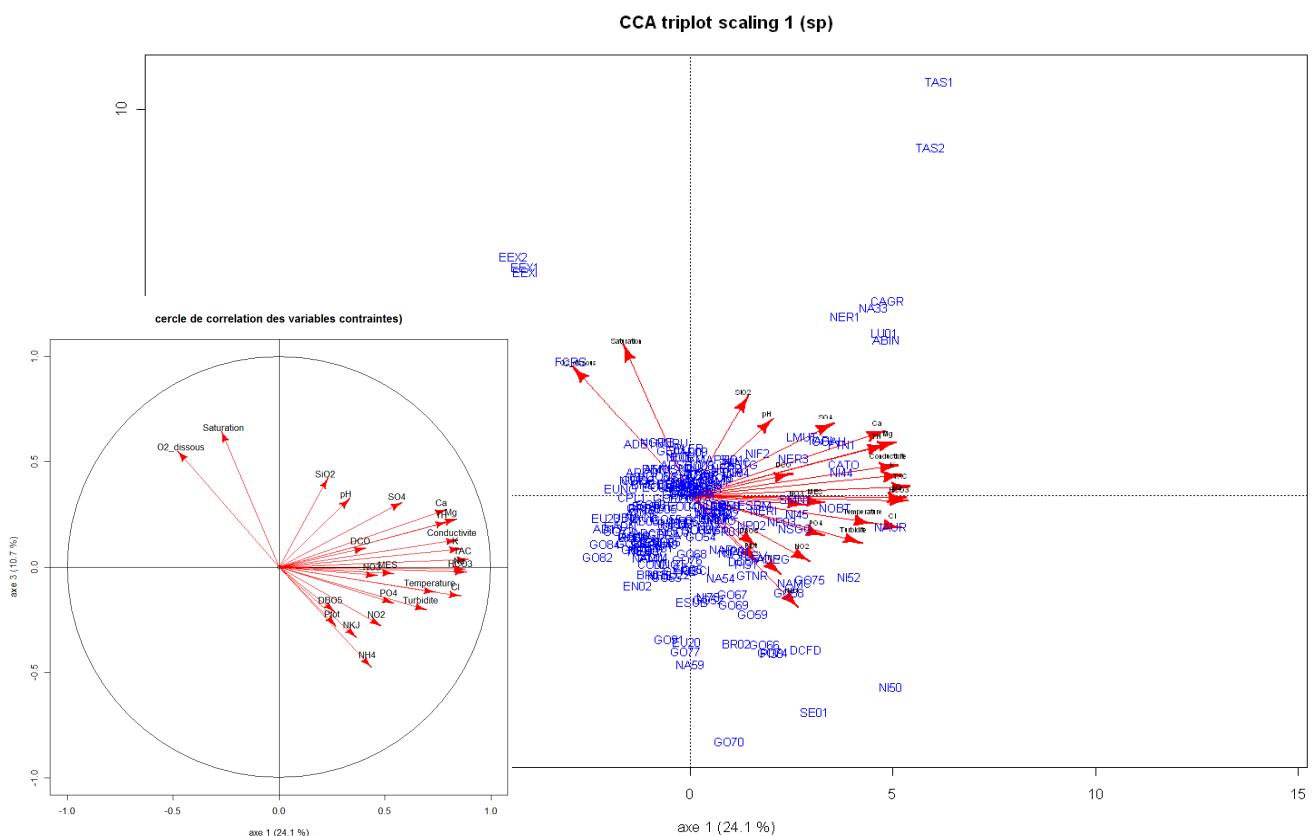
L'information dominante (42,5%) est portée par le croisement des 2 premiers axes. L'axe 3 porte encore 10,7 % de l'inertie totale, ce qui justifie de regarder aussi quelle information s'y rapporte et comment elle se structure. Le poids des axes suivants devient négligeable.



**Figure 55 : Projection des espèces dans l'analyse canonique des correspondances.**  
L'espace de projection est défini par les axes 1 et 2 (premier plan factoriel).

Le positionnement des espèces dans le plan principal des données abiotiques (**Figure 55**) permet d'avoir un aperçu des variables physico-chimiques pour lesquelles les espèces ont le plus d'affinités.

On peut par exemple voir que différentes espèces acidobiontes du genre *Eunotia* (les espèces rapportées à *Eunotia exigua* formes 0, 1, 2 - EEX0, 1, 2 – et EU23) ou *Frustulia crassinervia* (FCRS) sont typiques de conditions acides (secteur en bas à gauche du croisement [axe 1 x axe 2], vers les basses valeurs de la composante principale pH). Au contraire, une *Eolimna* et une *Brachysira* encore sous numéros (EO08, BR02) ressortent comme préférant les pH alcalins. Des espèces comme *Gomphonema* sp.66 (GO66) ou *Diademis confervaceoides* (DFCD), comme CAT0, qui ressortent du nuage à l'opposé des composantes principales d'oxygénation, peuvent être imputés à des sites à forte minéralisation et à haut niveau de pollution organique, ce qui se traduit par une forte déplétion en Oxygène. Deux espèces du genre *Thalassiosira* (TAS1 et TAS2) sortent du nuage d'espèces du côté des très fortes conductivités, en bonne cohérence avec leur statut d'espèces halines.



**Figure 56 : Cercles des corrélations sur le deuxième plan factoriel (axe 1 et 3) de l'Analyse Canonique des Correspondances sur tous les paramètres à disposition**

L'observation sur le deuxième croisement d'axes (axes 1 et 3) permet d'avoir une autre vue sur les liens qui existent entre les variables et entre les données. La **Figure 56**, en conformité avec le **Tableau 13**, nous montre que les variables sont moins portées par ce deuxième plan factoriel que par le premier, mais contient une information structurante complémentaire. Ce plan représente moins bien certaines variables comme le pH mais représente mieux d'autres variables, comme le PO4 (plus les composantes principales des variables se rapprochent du bord du cercle, plus celles-ci sont structurantes dans l'espace des données abiotiques).

La projection des espèces dans ce plan permet de voir quelles autres variables impactent les espèces. On voit par exemple que les espèces rapportées à *Eunotia exigua* sont tirées par l'O2 dissous et la saturation, ce qui laisse penser que ce sont des espèces de milieux riches en oxygène (rivières courantes et peu altérées) et avec un pH acide, en cohérence avec la classification de Van Dam (Van Dam, Mertens et al. 1994).

Certaines espèces comme ABIN, LU01, CAGR, NER1, NA33 se détachent du nuage de points du fait de leur préférence vers un pH alcalin doublé de minéralisations de l'eau modérées et vers des fortes valeurs de SiO2. Ces variables n'exerçant qu'une inertie moyenne dans ce plan, les conclusions sur leurs liens avec ces espèces sont moins affirmées que pour leurs influences étudiées sur le croisement (axe 1 x axe 2), cependant ces informations apparaissent cohérentes et se recoupent en bonne partie avec les informations tirées du plan précédent.

Les espèces CATO, NI44, NAUR, NER3, LMUT, NOBT, dont la présence vers la droite de l'axe 1 concorde bien avec les fortes valeurs des variables géochimiques TAC, Ca, Mg, HCO3, SO4, témoignent de l'affinité de ces espèces avec les plus fortes minéralisations de l'eau sous influence de substrats carbonatés qui, essentiellement en Martinique, accompagnent d'assez larges formations géologiques sédimentaires (tufs) ou, dans ces deux Antilles, peuvent être associées des inclusions métamorphiques et/ou du thermalisme carbonaté dans les massifs volcaniques et créer des conditions géochimiques particulières à certains bassins versants de cours d'eau.

Des espèces comme NI40, DCFD, SEO1, NI52, NAMC semblent plutôt converger avec diverses variables d'altérations anthropiques amenant déplétion en oxygène, fortes valeurs de NH4 et NKJ, MES et probablement de carbone organique (descripteurs non associés à l'analyse pour un problème de jeu de données incomplet et de traçabilité de la matrice pas toujours assurée). Ces altérations sont le plus souvent associées à l'influence de rejets ponctuels de STEPs et d'IAA...

## V. CRÉATION DE L'INDICE DIATOMIQUE ANTILLES

### A. Crédation du gradient d'anthropisation

Pour créer le gradient composite d'anthropisation, nous avons choisi de ne considérer que des paramètres nettement sous influence de l'anthropisation afin de minimiser le poids des influences naturelles dans l'espace des données de l'analyse. Il a donc été procédé à la réalisation d'une combinaison ACP-CCA restreinte basée sur 8 descripteurs directs de pression anthropique + une variable transformée basée sur la saturation en oxygène. Les influences autres qu'anthropiques conservent une part d'influence puisque des influences à la fois naturelles et anthropiques peuvent jouer de façon conjointe sur les mêmes paramètres, ce qui rend la distinction difficile. C'est par exemple le cas pour la saturation en oxygène, qui est sous influence de gradients anthropiques mais aussi pour partie des conditions environnementales (conditions lotiques turbulentes et aérées /vs parties aval de cours d'eau présentant une rupture de pente). Concernant cette variable, nous avons choisi de considérer la saturation en oxygène comme symbole d'une dégradation, nous avons pour cela créé le paramètre « déficit en oxygène » qui est l'opposé de la saturation.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Pour les autres variables prises en compte dans cette analyse restreinte (cf **Tableau 14** ci-dessous), même si des gradients naturels relativement conséquents peuvent exister, l'altération anthropique exerce un poids dominant sur le référentiel de valeurs et en particulier sur toute la gamme des valeurs élevées, qu'il n'est pas possible de rencontrer en conditions non anthropisées.

*Nota :* Nous n'avons pas pris en compte la conductivité électrique qui, bien qu'influencée systématiquement à la hausse par l'altération anthropique, ne l'est que modérément par rapport à l'influence de certaines conditions naturelles (par exemple, substrats fortement carbonatés, sources thermales, influences halines littorales). Il en est de même pour le pH qui, de plus, n'est pas facilement interprétable de façon systématique comme indicateur d'altération dans le cadre d'un indice biologique d'évaluation, l'altération anthropique pouvant provoquer des effets inverses sur cette variable selon sa nature précise et le moment où on en mesure les effets.

Bien que nous ayons été attentifs à ce que les différents paramètres ne soient pas auto-corrélatifs de manière trop importante (**Tableau 14**), on peut noter que le degré de corrélation entre les orthophosphates (PO4) et le phosphore total (Ptot) est assez élevé. Cette corrélation provient principalement du fait que ces variables sont emboîtées, à savoir que le PO4 est « inclus » dans le calcul du Ptot. et peut contribuer fortement à la valeur de ce dernier dans certaines conditions, notamment quand le phosphore dissous domine. Cependant, nous avons choisi de garder les deux paramètres car ils ne sont pas synonymes ni indicateurs des mêmes types de dégradations (PO4 plutôt provoqué par les pollutions domestiques et lessivielle, certaines industries agro-alimentaires, les rejets d'élevage, la fertilisation des parcelles agricoles, Ptot fortement influencé aussi par l'érosion agricole et la migration de particules fines associée).

paramètres	DBO5	Déficit O2	MES	NH4	NKJ	NO2	NO3	PO4	Ptot
<b>DBO5</b>	1	0,12	0,01	0,28	0,22	0,38	0,13	0,31	0,48
<b>Déficit O2</b>		1	0,35	0,43	0,32	0,24	0,1	0,23	0,16
<b>MES</b>			1	0,37	0,23	0,09	0,42	0,36	-0,01
<b>NH4</b>				1	0,54	0,53	0,17	0,57	0,38
<b>NKJ</b>					1	0,26	0,12	0,4	0,32
<b>NO2</b>						1	0,27	0,43	0,41
<b>NO3</b>							1	0,37	0,14
<b>PO4</b>								1	0,65
<b>Ptot</b>									1

**Tableau 14 : Tableau des corrélations de Pearson pour les 8 paramètres "d'anthropisation"**

Afin de créer ce **Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation (GCMA)**, nous avons procédé à deux analyses complémentaires permettant de l'asseoir de façon plus robuste. Le GCMA combine un gradient basé sur une Analyse en Composante Principale (ACP) « Gradient ACP », ainsi qu'un second basé sur une Analyse Canonique des Correspondances (ACC) « Gradient ACC » (**Équation 1**).

Le but de cette combinaison est de corriger mutuellement les analyses. En effet le « gradient ACP » ne prend en compte que les paramètres abiotiques émanant des analyses physico-chimiques et chimiques des eaux, qui résultent de mesures instantanées ou d'analyses d'échantillons ponctuels prélevés dans la rivière. Leur représentativité temporelle peut être prise en défaut pour représenter les conditions intégrées qui ont présidé à la sélection des biofilms dans la rivière, compte-tenu du pouvoir intégratif de ces derniers (de un à trois mois). Ce risque est particulièrement encouru pour les sites ayant subi des conditions instables pendant l'épisode de croissance, pour des sites marqués par des rejets à la rythmicité et à l'intensité variables (type rejets de STEPs ou d'IAA, pollutions agricoles liées à la saisonnalité des pratiques, pollutions accidentelles). Malgré tout, la projection des sites dans l'ACP permet une ordination des sites selon le gradient de pollution basé sur les **données abiotiques objectives mesurées ou dosées**. Quant à l'analyse ACC, elle permet de prendre en compte à la fois le forçage de la matrice abiotique et la réponse de la matrice biotique. Les placements des sites dans l'ACC lors de la construction du gradient ACC vont être en quelque sorte « corrigés » par l'appel de la matrice biotique. La chimie des sites étant sujette au défaut de représentativité temporelle pré-exposé, l'intégration temporelle présentée par les référentiels biologiques permet de fiabiliser l'ordination des sites.

Ce Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation s'écrit comme la somme des gradients « Gradient ACP » et « Gradient ACC ».

$$GCMA = \text{Gradient ACP} + \text{Gradient CCA}, \quad \text{où}$$

$$\text{Gradient ACP}_j = \sum_{i=1}^3 \text{inertieAxe}_i * \text{projection Site}_j \text{Axe}_i \quad \text{où } j \text{ site et } i \text{ axe}$$

$$\text{Gradient ACC}_j = \sum_{i=1}^3 \text{inertieAxe}_i * \text{projection Site}_j \text{Axe}_i \quad \text{où } j \text{ site et } i \text{ axe}$$

#### Équation 1 : Formule du Gradient Composite d'Anthropisation

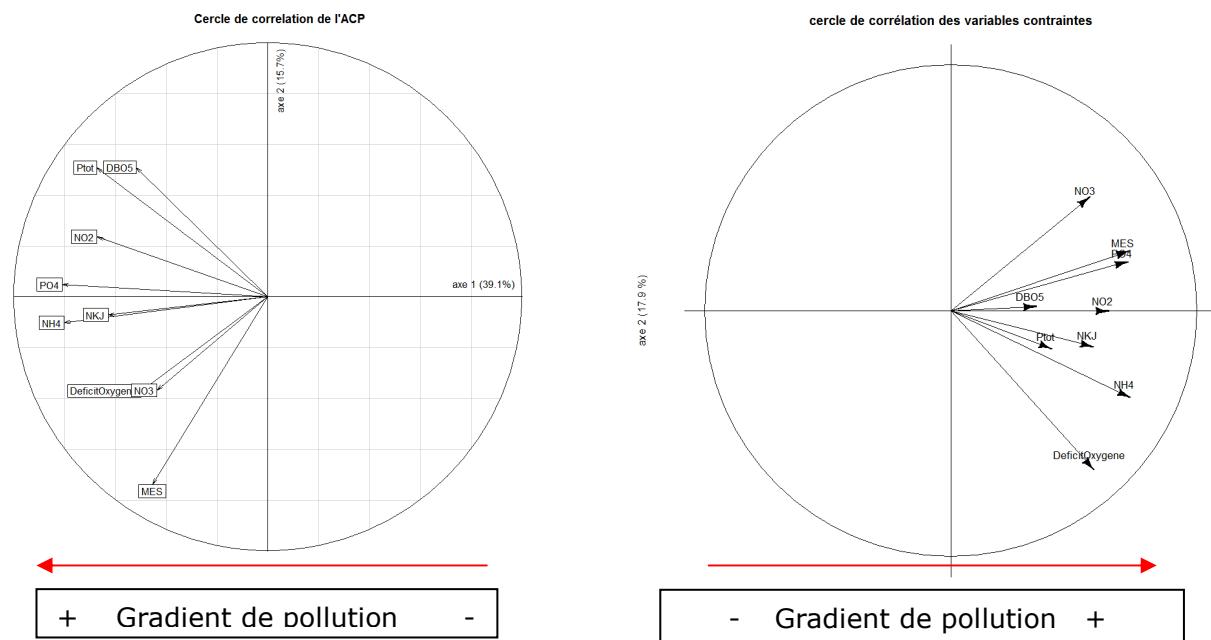


Figure 57 : **Cercles de corrélations des axes 1 et 2 des analyses ACP restreinte (gauche) et CCA (droite) pour les paramètres anthropiques**

Le "gradient ACP" a été créé par rapport à une ACP sur la matrice de chimie transformée par boxcox (cf. précédemment). Le "gradient ACC" a de son côté été créé par une ACC sur la même matrice de chimie et la matrice spécifique transformée en  $\log(x+1)$ . Les deux analyses ne prennent en compte que les paramètres synonymes d'anthropisation.

Les cercles de corrélations des analyses ACP et CCA (**Figure 57**) nous permettent entre autres de repérer le sens du gradient de pollution. Le **Tableau 15** ci-dessous détaille la contribution relative des premiers axes pour les 2 analyses multi-variées réalisées (environ 55% de l'information expliquée par le croisement des 2 premiers axes pour chacune d'entre elles).

Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 1	Axe 2	Axe 3
39.10%	15.67	11.85	39.4	17.8	12.3

**Tableau 15 : Tableaux des valeurs propres des axes pour l'ACP (gauche) et l'ACC (droite) pour les axes contraints**

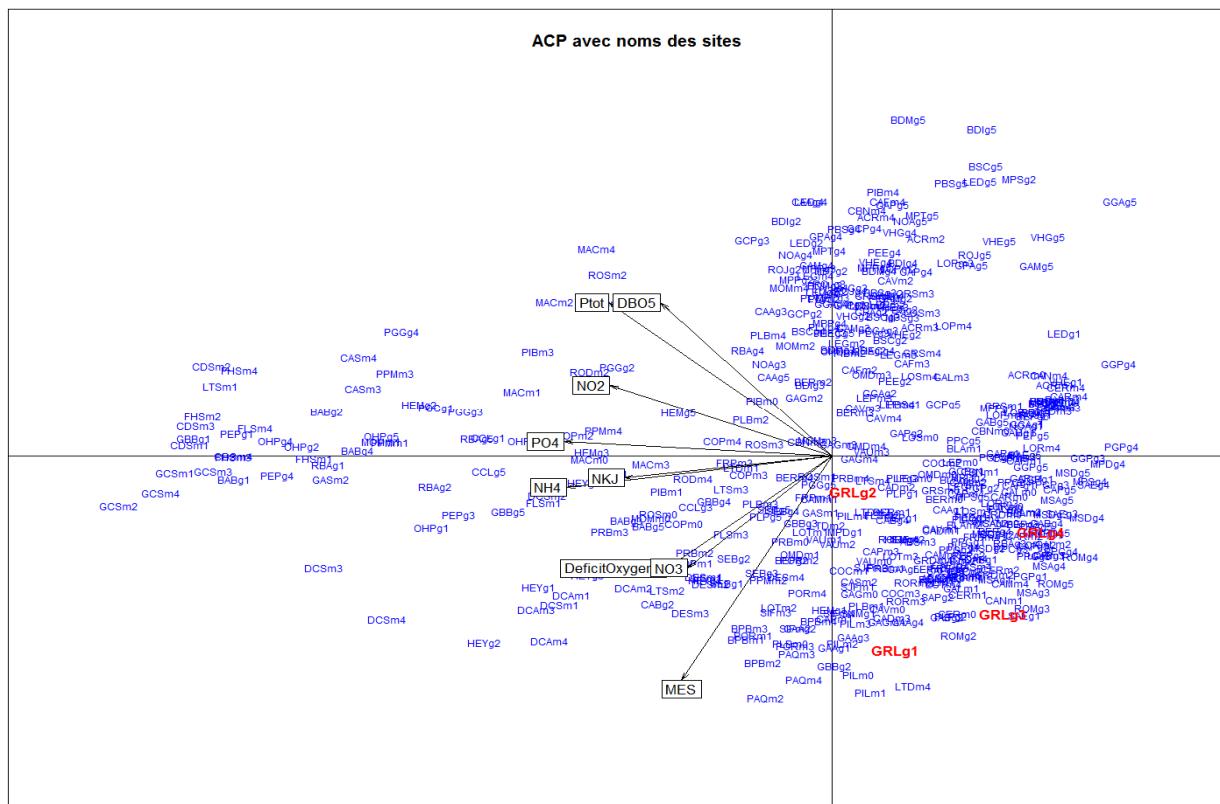
paramètres	Contribution axe1 (%)	Contribution axe2 (%)	Contribution axe3 (%)
<b>DBO5</b>	7.64	18.46	1.16
<b>DeficitOxygene</b>	7.11	9.7	22.32
<b>MES</b>	5.88	38.6	2.11
<b>NH4</b>	18.29	0.73	7.29
<b>NKJ</b>	11.23	0.36	15.05
<b>NO2</b>	12.87	3.99	0.62
<b>NO3</b>	5.43	9.58	46.56
<b>PO4</b>	18.64	0.17	4.11
<b>Ptot</b>	12.92	18.42	0.78

Tableau 16: Tableau des contributions des sites sur les axes 1,2 et 3 pour l'ACP

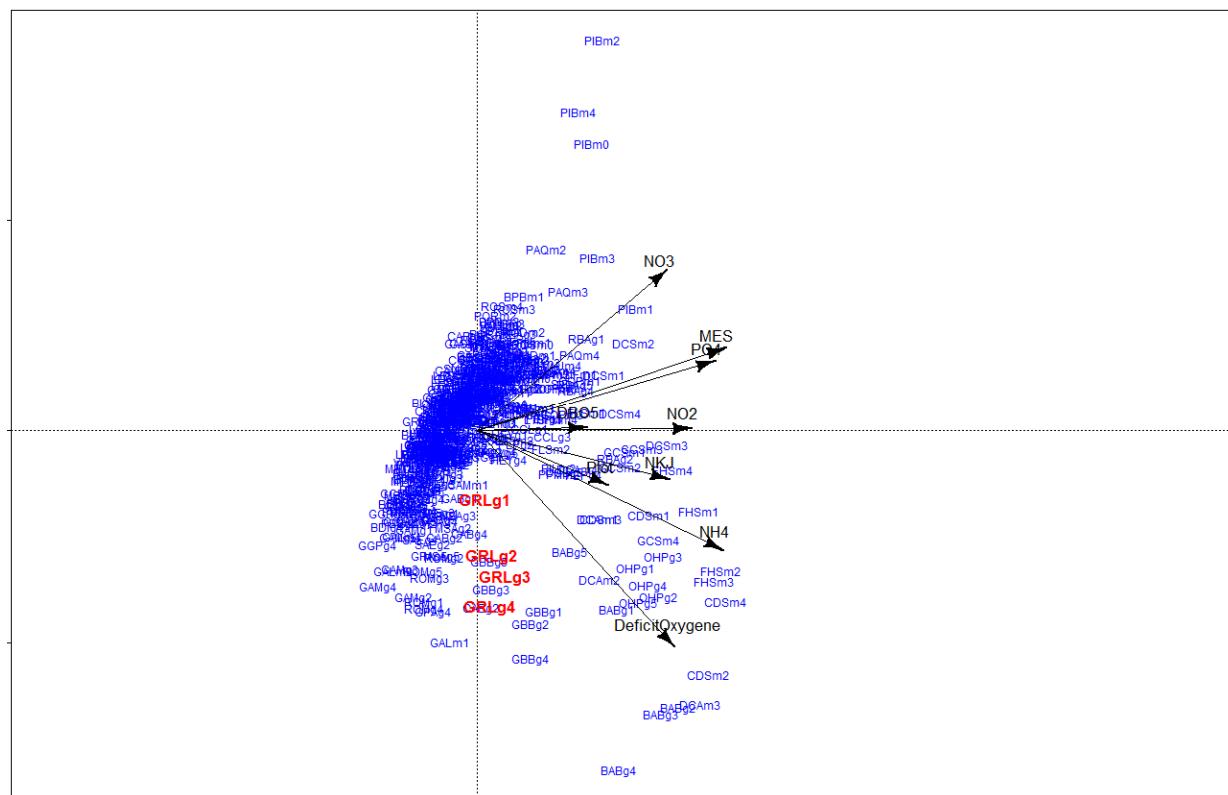
Le Tableau 16 ci-dessus détaille la contribution des sites par variable sur les 3 premiers axes de l'ACP. On peut y remarquer que, si le croisement (Axe 1 X Axe 2) porte l'information dominante sur la plupart des variables, l'Axe 3 est porteur d'une forte information structurante pour le déficit en O<sub>2</sub> et le NKJ, et d'une information dominante pour la teneur en NO<sub>3</sub>, ces 3 variables étant étroitement associées avec le positionnement des sites dans le continuum amont-aval et statistiquement en fort accroissement vers l'aval. Pour le déficit en O<sub>2</sub> et le NKJ, la liaison est assez immédiate avec la localisation aval bassin versant de plusieurs sites de STEPs suivis dans le cadre du programme. Pour le NO<sub>3</sub>, il s'agit plutôt d'une variable très intégrative des divers types de pollutions dans le continuum amont-aval, qu'elles soient diffuses (fertilisation agricole, minéralisation des pollutions domestiques et d'élevages...) ou ponctuelles (les rejets d'IAA, les STEPS peuvent émettre aussi de fortes quantités).

Si l'on regarde le positionnement relatif des sites dans les différentes analyses (**Figure 58** et **Figure 59** en page suivante), on peut noter qu'il y a bien un certain intérêt à considérer la création d'un gradient multi-métrique.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**



**Figure 58 : Projection des sites dans l'ACP (couleur rouge pour le site GRL)**



**Figure 59 : Projection des sites dans l'ACC avec une couleur rouge pour le site GRL**

Si l'on se concentre par exemple sur le site « GRL » (ZA Lamentin) en Guadeloupe, un site plutôt pointé dans des qualités passablement dégradées au vu du terrain, on voit que la chimie des relevés (analyse ACP) a tendance à lui donner, selon les campagnes, une chimie relativement peu impactée (**Figure 58**). L'ACC par contre, qui s'appuie aussi sur les réponses biologiques, associe mieux ces sites avec des composantes principales liées à l'altération (*cf* **Figure 59**), en particulier au déficit en oxygène et aussi de façon moins forte aux pollutions à NH<sub>4</sub>, ce qui correspond mieux aux éléments de connaissance préalable sur ce site. Outre cet exemple flagrant, d'autres différentiels de classification de ce type peuvent aussi être remarqués selon les sites et les dates, ce qui peut trouver une partie de son origine dans les différences de capacité d'intégration temporelle entre la matrice abiotique et la matrice des réponses biologiques.

Les deux gradients ont été normalisés entre 0 et 1, où 0 est une valeur de site de très mauvaise qualité tandis que 1 signifie une très bonne qualité. Le gradient multimétrique obtenu par sommation de ces deux grandeurs est compris entre 0 et 2.

Si l'on s'intéresse maintenant aux valeurs des gradients associés au site « GRL » (**Tableau 17**, **Tableau 18**), on voit clairement ce réajustement de qualités du site entre les gradients ACP et CCA. L'assise du **Gradient Composite Multimétrique d'Altération** gagne en robustesse et en fiabilité par le cumul de ces deux métriques, l'une ou l'autre d'entre elles étant susceptible d'être prise en défaut soit pour le problème déjà souligné d'assise temporelle dans des conditions changeantes (gradient ACP), soit pour un problème local particulier susceptible d'entacher la représentativité biologique dans le gradient ACC (cas *a priori* plus rare, mais que l'on pourrait redouter par exemple en cas de perturbation forte au niveau des contraintes d'habitat pendant l'épisode de croissance).

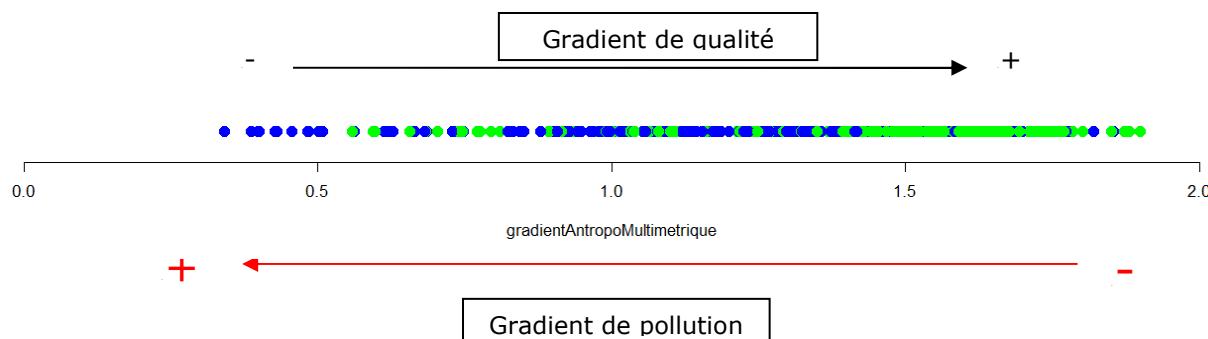
GRLg1	GRLg2	GRLg3	GRLg4
0.6958574	0.7216298	0.7798819	0.8463678

**Tableau 17 : Valeurs du gradient ACP pour le site GRL selon les campagnes**

GRLg1	GRLg2	GRLg3	GRLg4
0.5239804	0.5451477	0.5055919	0.5982180

**Tableau 18 : Valeurs du gradient CCA pour le site GRL selon les campagnes**

Le gradient multi-métrique (GCMA) peut être représenté sur un axe horizontal (**Figure 60**) où, par construction, le gradient de qualité des sites s'interprète de la gauche (conditions les plus polluées) vers la droite (sites les moins pollués). Les couleurs verte et bleue représentent respectivement la Guadeloupe et la Martinique.



**Figure 60 : Schéma du Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation (ACP+ACC)**

On remarque, en bonne correspondance avec la connaissance préalables et avec les référentiels de chimie collectés dans le cadre de l'étude, que les sites de Martinique semblent en moyenne plus impactés que ceux de Guadeloupe. Il y a cependant un bon mélange des sites des deux îles le long du gradient, ce qui est intéressant pour la genèse d'un indice applicable indifféremment dans une île et dans l'autre.

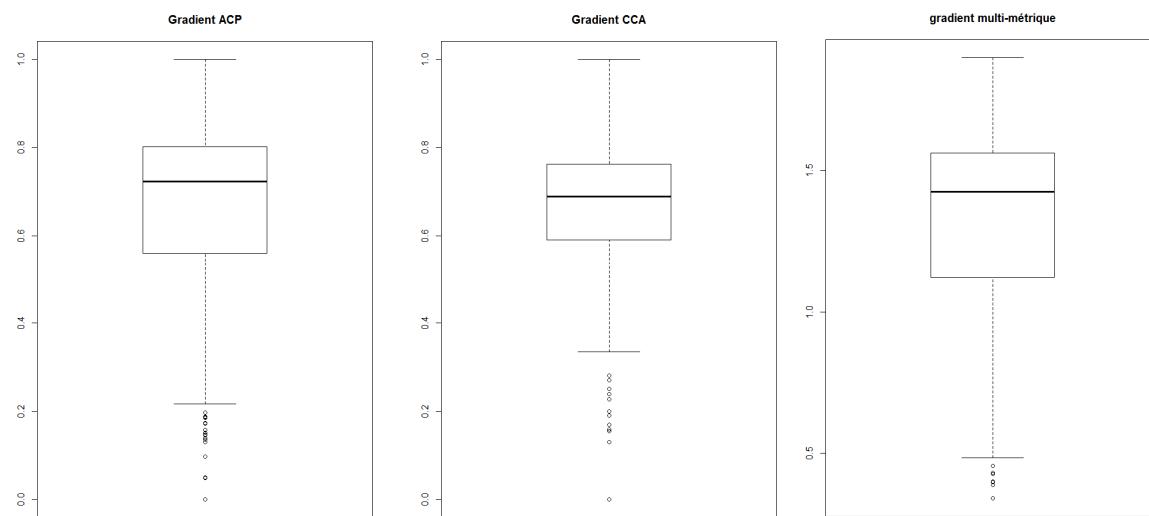


Figure 61 : Boxplots des gradients ACP (gauche), gradient ACC (centre) et gradient GCMA (droite).

Les boxplots des gradients permettent de voir les dispersions de leur valeur. On remarque dans la **Figure 61** que le « gradient ACP » donne plus de sites de bonnes qualités que le « gradient CCA ». En effet la médiane du « gradient ACP » est d'environ 0.7 contre 0.55 pour le « gradient CCA ». Ces configurations nous suggèrent que l'information apportée par l'ACC, qui intègre la composante "réponse biologique", est particulièrement intéressante car elle peut aider à rendre compte des effets sur le biote de pics transitoires ou autres épisodes de pollution non captés par la stratégie d'échantillonnage ponctuel de l'eau. L'assise de l'indice sur ces deux gradients nous semble donc être un gage de meilleure stabilité et de meilleure robustesse du nouvel indice produit.

## B. Crédation des classes de qualité

Après la création du gradient, il est nécessaire de le discréteriser. En effet les données ne sont pas suffisantes pour l'instant, pour passer à des modèles continus. Au vu de la structuration des données, il a été décidé de créer 5 classes [« très mauvaise qualité » (TMQ), « mauvaise qualité » (MQ), « moyenne qualité » (mQ), « bonne qualité » (BQ), « très bonne qualité » (TBQ)]. En considérant le gradient chimique comme un gradient de pollution, les différentes classes peuvent être définies comme des classes de qualités chimiques des sites. Un site avec une valeur faible de GCMA est un site de bonne qualité. Et inversement pour une forte pollution.

Pour discréteriser le gradient nous avons procédé en 2 étapes successives (Figure 62) :

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

- Tout d'abord, repérer les notes des sites appartenant au réseau dit de « référence » et prendre comme limite de la Bonne Qualité/Très Bonne Qualité le 1<sup>er</sup> quartile de ces notes. C'est-à-dire que par construction, 75% des relevés de référence sont dans la classe de « Très bonne qualité ». Tous les relevés de sites de référence ou tous les relevés de sites à évaluer **avec des notes supérieures à cette limite** seront donc pris dans cette classe TBQ. Inversement, 25 % des relevés de référence aux notes inférieures à cette limite seront dans une classe inférieure à la classe de « Très bonne qualité », et il en sera de même pour les relevés (site à évaluer X date) dont la note est inférieure à cette limite.
- Pour le domaine des notes en dessous de cette limite, nous avons découpé le reste du gradient en 4 classes avec un nombre de sites équivalents par classe (découpage équinumérique). Ce découpage sur une base empirique a cependant l'avantage d'affecter un nombre plus équilibré de sites dans les classes de qualités 1 et 2, permettant ainsi d'avoir des profils plus consistants en termes de données sur les basses classes de qualité.

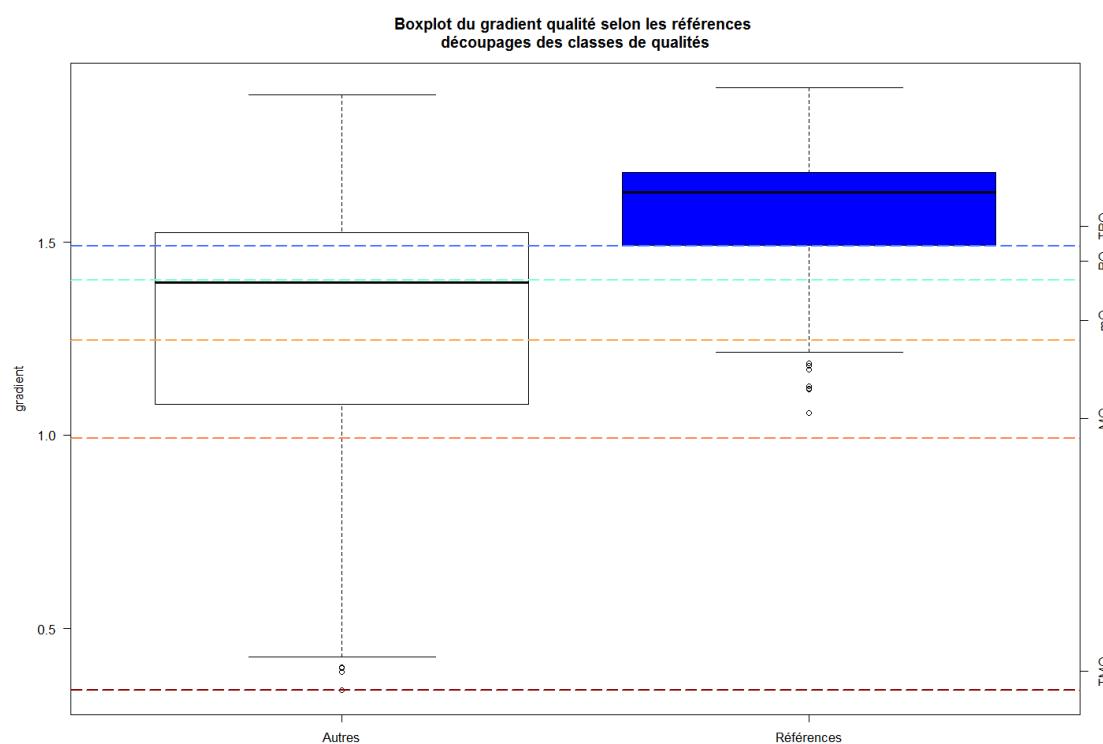


Figure 62 : Méthodologie pour la discréétisation du gradient composite.

Premier quartile du boxplot des sites de référence = limite de la « très bonne qualité ».  
 Reste du gradient : découpé de manière équi-numérique.

Suite au découpage du gradient de la façon pré-indiquée, la **Figure 63** en page suivante permet de visualiser la répartition globale des relevés par classes de qualité. On peut y voir que la moyenne des qualités des sites se situe dans la classe de « bonne qualité ». Ce n'est pas surprenant, du fait que le réseau de sites comportait une part assez importante de sites de référence ou assez peu altérés afin de pouvoir bien repérer, dans le cadre de ce programme, toute la diversité des assemblages naturels ou pseudo-naturels.

181 relevés, pour partie de référence, pour partie en provenance d'autres sites à évaluer, sont donc dans la classe de « Très Bonne Qualité ».

Les autres relevés (site x date) sont répartis par construction de telle manière que chaque classe autre que la classe du TBE (calée pour sa part sur les sites de référence) soit la plus proche possible de l'iso-effectif (71 à 72 relevés selon la classe), comme montré en partie droite de la Figure 63.

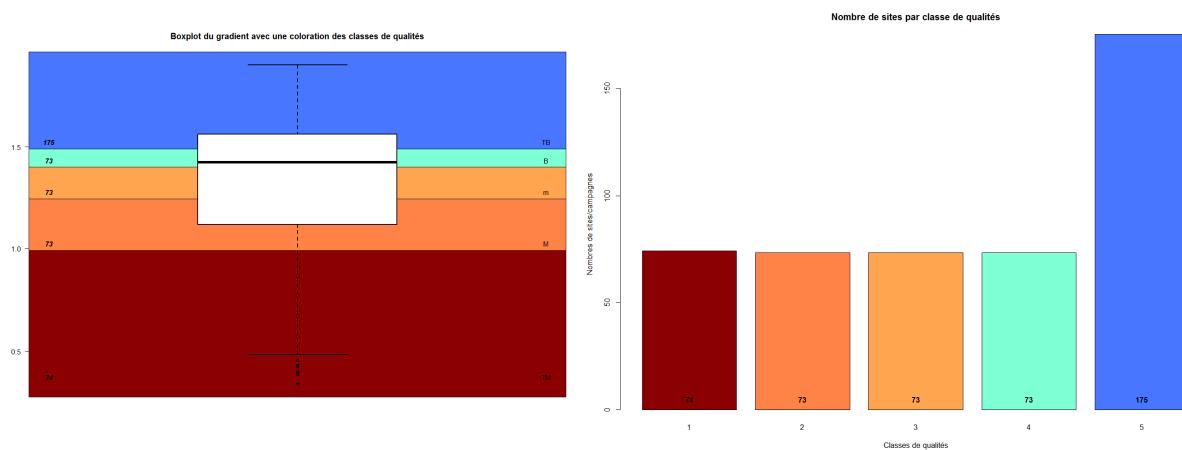


Figure 63 : Boxplot du GCMA (Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation) selon les différentes classes de qualités. Les chiffres sur la gauche représentent le nombre de sites par classe. Les lettres sont les noms des classes.

Comme on l'a vu, le Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation a été construit sur l'agrégation en 2 métriques de l'information apportée par les 8 descripteurs d'altération anthropique retenus (cf **Tableau 14**). Bien que l'information ne puisse pas avoir exactement la même portée au niveau agrégé ou descripteur séparé par descripteur séparé, on peut ensuite vérifier si l'information contenue dans les deux gradients composites se retrouve au niveau des valeurs de certaines variables d'anthropisation considérées séparément.

Dans cet objectif, si l'on regarde maintenant les boxplots de certains paramètres chimiques choisis à titre d'exemples dans les différentes classes de qualités (**Figure 64** représentant le gradient de NO<sub>3</sub>, **Figure 65** représentant le Ptot) on repère nettement un gradient d'altération, même si son ordination classe par classe sur le descripteur abiotique considéré ne correspond pas exactement à la ventilation par classe du gradient composite.

Si l'on examine plus spécifiquement la **Figure 64** concernant les nitrates, il peut y avoir des références depuis de très basses valeurs (sites ultra-oligotrophes, notamment sur reliefs et substrats de laves peu altérables en altitude) jusqu'à des valeurs plus élevées sur substrats et cours d'eau plus minéralisés et plus biogènes à altitudes moindres (sites de référence oligotrophes à mésotrophes, comme dans la zone des Mornes de Martinique), ce qui contribue à élargir l'échelle des possibles dans le domaine de référence (181 relevés pris en compte) sans correspondance obligatoire en effectifs et en valeurs dans la classe située juste en-dessous (72 relevés seulement dans la classe BE). Il y a donc distorsion d'effectifs et il peut de ce fait y avoir distorsion de gamme de distribution statistique de valeurs.

D'autre part, assis sur 8 variables différentes et sur 2 analyses mêlant forçages abiotiques et effet sur la matrice biologique des assemblages, le gradient composite d'altération procure une vision englobante et robuste des forçages anthropiques et établit une comparabilité du référentiel à l'échelle de tout le jeu de données de l'étude. On ne peut pas s'attendre à ce qu'il donne exactement la même image qu'une valeur basée sur un ou deux prélèvements ponctuels d'eau sur un seul descripteur d'anthropisation, qui devient beaucoup plus dépendante de la typologie précise d'altération.

Ces deux facteurs peuvent largement contribuer à expliquer la dispersion des valeurs de nitrates et les recouvrements de classes parfois constatés.

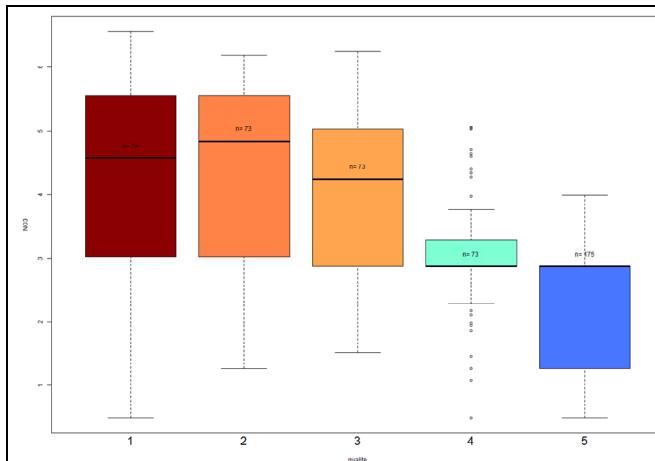
Un commentaire spécifique est également nécessaire concernant l'extrémité du gradient concernant les plus basses classes de qualité et l'apparente distorsion qui semble apparaître entre les deux métriques comparées. Si l'on se focalise sur la Classe 1 (couleur marron), la classe la plus basse représentée par le gradient Composite contient plutôt des sites les plus fortement impactés à l'aval de rejets de STEPs qui peuvent être nettement enrichis en différents composés anthropiques pris en compte dans le gradient composite (NH4, NKJ, COD, PO4, DCO, DBO5, oxygène...), mais qui ne sont pas forcément les plus riches en nitrates du jeu de données, notamment si la STEP n'est pas spécifiquement équipée ou performante pour prendre en charge de façon efficace le processus de nitrification (libération dominante de NKJ, de NH4 et libération significative de NO2). La comparaison des 2 classifications est donc tout-à-fait consistante et il est normal que la Classe 1 du gradient Composite apparaisse en moyenne moins enrichie en nitrates vu la typologie des sites et des altérations qui la concernent le plus.

Concernant le phosphore total (**Figure 65**), il suffit d'avoir eu un épisode légèrement turbide et légèrement chargé en MES de granulométrie fine, en liaison avec un petit épisode hydrologique (reflet d'une érosion et apport d'argiles granulométriques, particulièrement riches en phosphore total, au moment d'un échantillonnage), pour impacter largement le domaine des basses valeurs et notamment le domaine de référence. Les épisodes de crue sont des épisodes transitoires qui couvrent peu de temps par rapport à un hydrogramme annuel complet, on a donc statistiquement assez peu de probabilité de les échantillonner et encore moins lorsque l'on s'attache à respecter la norme d'échantillonnage de diatomées, qui recommande d'éviter les prélèvements lorsqu'un épisode de crue significatif a perturbé le milieu dans un passé récent. Ceci dit, il arrive que les eaux soient légèrement teintées sans remaniement important des substrats du milieu ni des biofilms (cas d'épisodes presque quotidiens de petites pluies en altitude à la saison des pluies), on reste donc dans le cadre de la norme mais les descripteurs MES et P total peuvent s'en trouver sensiblement affectés par rapport à une situation d'étiage stabilisé.

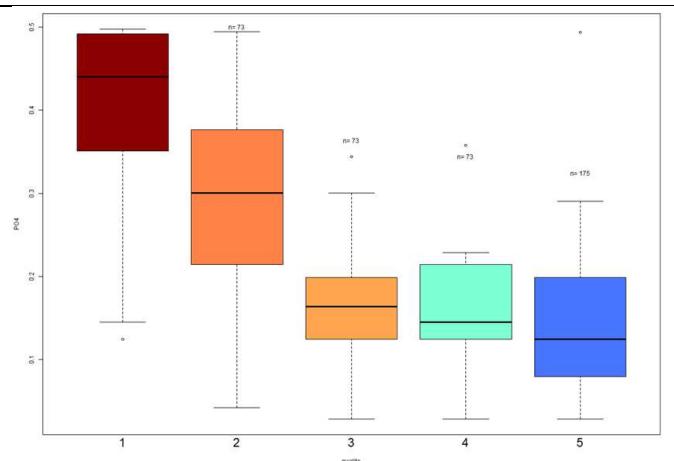
Avec 181 relevés dans la classe de TBE, on a eu mécaniquement près de 3 fois plus de chances d'échantillonner des situations influencées par un épisode hydrodynamique récent avec des eaux un peu teintées que pour les autres classes à 72 effectifs de relevés, même si cet échantillonnage d'eau était peu représentatif de l'épisode intégré de croissance du biofilm correspondant. Ce fait, ainsi que le fait qu'on ait plus souvent affaire, dans cette classe, à des sites amont sur des rivières à plus fort travail hydrodynamique (substrats grossiers et faciès de torrents) suffit pour étendre le référentiel de distribution de la classe de TBE vers des valeurs un peu plus élevées que celui des classes juste en-dessous. Cependant, le gradient est respecté au niveau des médianes, ce qui conforte la cohérence de cette mise en relation et la pertinence du gradient composite.

Il est logique que la distribution examinée classe par classe et descripteur abiotique d'anthropisation par descripteur abiotique d'anthropisation, en correspondance avec des spécificités de types de pollution, ne puisse pas présenter une cohérence totale de profil avec la photographie donnée par une métrique intégrant des informations de 8 descripteurs en même temps.

Mais, même s'il n'y a visiblement pas une linéarité complète entre les gradients des 2 métriques mises en perspective et celui du GCMA sur chaque figure, si l'on porte maintenant un **jugement plus intégré** sur ces mises en perspective de métriques, on voit que les médianes par classe pour le NO<sub>3</sub> comme pour les orthophosphates diminuent de façon cohérente avec l'augmentation de la qualité de l'eau et sont malgré tout globalement en phase avec le GCMA.



**Figure 64 : Boxplot du paramètre NO<sub>3</sub> (mg/L) selon les classes de qualités (attention, les valeurs sont transformées).**

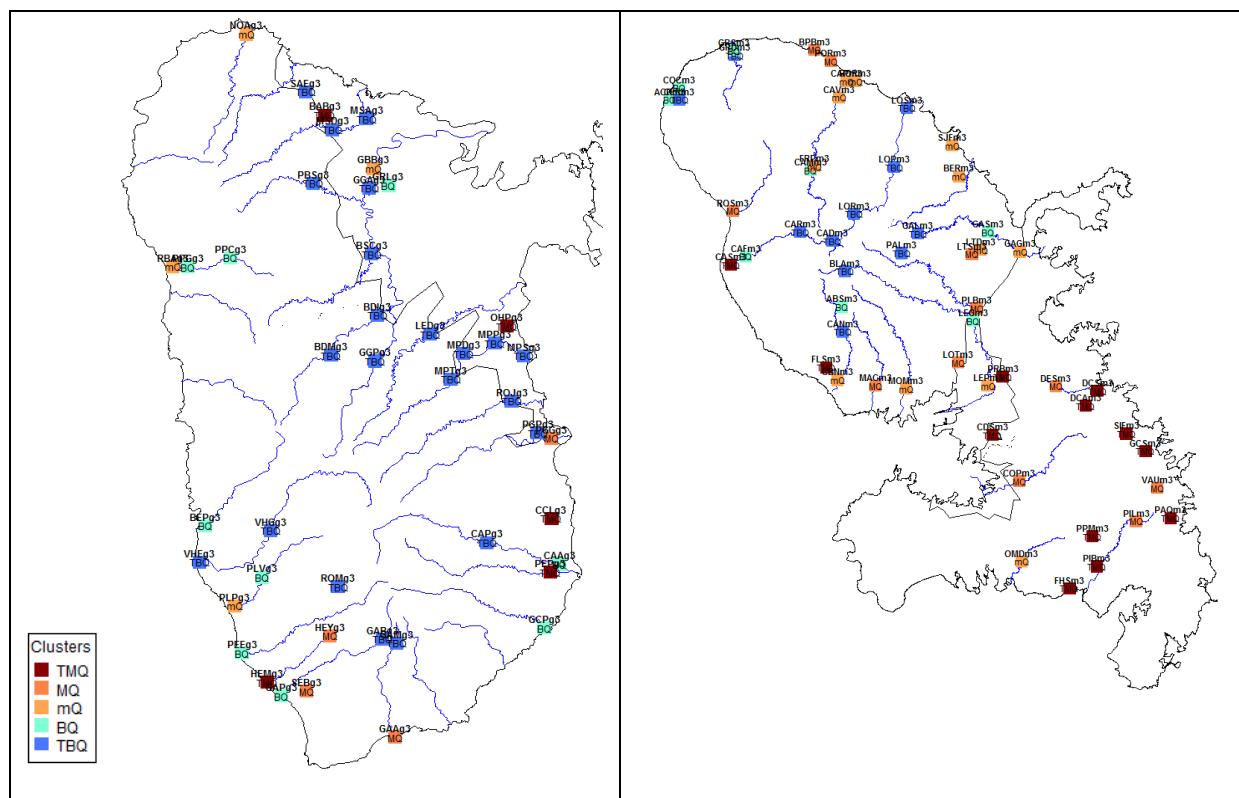


**Figure 65 : Boxplot du paramètre P04 (mg/L) selon les classes de qualités (attention, les valeurs sont transformées).**

Il faut aussi à ce stade préciser que le jeu de données constitué, malgré l'effort de collecte et la qualité des données constitutives, présente encore des limites au niveau de son assise. C'est vrai pour les référentiels abiotiques, avec le problème de faible représentativité temporelle des données actuelles de prélèvements ponctuels, et c'est encore plus vrai pour le faible recul qu'il autorise pour les préférences environnementales de nombreuses espèces qui n'ont été rencontrées, ni avec une forte occurrence, ni avec une abondance relative suffisante pour bien asseoir leurs profils écologiques. D'une part, l'assise de ces box-plots pourra être améliorée dans le temps avec l'augmentation du nombre de données d'analyses couvrant mieux l'étendue des possibles pour chaque variable environnementale à chaque site, d'autre part l'augmentation de l'information collectée sur chaque espèce laissera une marge significative de progression sur la précision et la robustesse des profils de qualité des espèces et, au final, du nouvel indice mis au point.

Il n'est pas possible dans ce rapport de commenter dans le détail l'interprétation de tous les gradients de variables d'anthropisation par rapport au gradient intégré procuré par le GCMA. L'approche précédente a permis de vérifier que ce gradient composite servant de base au calcul des profils de qualité des espèces donne des réponses cohérentes et tout-à-fait interprétables vis-à-vis de gradients plus spécifiques présentés par des descripteurs abiotiques individuels d'anthropisation.

On peut maintenant s'intéresser et porter des éléments d'appréciation sur la structuration spatiale des qualités écologiques des sites de Martinique et de Guadeloupe en fonction des pressions anthropiques (**Figure 66** en page suivante), sur la base de la grille d'interprétation des valeurs de GCMA proposée en **Figure 63**.



**Figure 66 : Cartes de qualité des sites pour la Guadeloupe (gauche) et la Martinique (droite) à partir du GCMA pour la campagne 3 (Hivernage 2010).**

**Légende :** Marron : « Très Mauvaise Qualité », Marron clair : « Mauvaise Qualité », Orange : « Moyenne Qualité », Bleu clair : « Bonne Qualité ». Bleu : « Très bonne Qualité ».

On peut remarquer que les sites les plus pollués sont situés sur les littoraux, ce qui n'est pas surprenant vu le cumul de pressions anthropiques qui s'y exercent et l'installation d'infrastructures gravitaires collectives de type STEPS, souvent en périphérie aval d'agglomérations et souvent à proximité du littoral. On en trouve aussi sur certaines rivières sous influence de villes ou d'infrastructures collectives ou privées sensiblement impactantes (distilleries...).

Les sites associés aux massifs volcaniques, situés en altitude ou dans des zones pentues peu favorables à l'implantation d'agglomérations ou d'activités anthropiques intensifiées, sont pour la plupart classées en bonne, voire en très bonne qualité. A l'inverse, la plupart des zones peu pentues sur sols plus profonds qui, outre l'implantation de villes ou de villages, font l'objet d'agriculture intensive se révèlent dégradées par les pollutions agricoles diffuses et l'érosion (périphérie éloignée et aval des massifs volcaniques de Guadeloupe et Martinique, zone des Mornes et zone médiane de Martinique).

Les résultats de ces projections cartographiques d'état par campagne montrent une bonne cohérence par rapport à ce qui est connu du terrain. Cependant, un petit nombre de sites se retrouvent dans des classes de qualités ne leur correspondant pas. C'est par exemple le cas des sites « La Broue » sur la rivière du Vauclin (VAU) et du site Beauregard sur la Rivière Pilote (PIL) en Martinique, qui sont des sites de référence mais qui se trouvent classés dans les classes de qualités 1 à 3. Ces cas particuliers, pour lesquels la géochimie naturelle très particulière n'est pas étrangère au déclassement abiotique (il se passe la même chose, d'ailleurs, sur compartiment diatomique, avec des flores adaptées à des eaux à conductivité et minéralisations élevées) font l'objet d'un diagnostic spécifique et d'un travail d'adaptation pour leur résolution dans la suite du rapport.

## C. Création des profils écologiques

La création des profils est réalisée à partir des classes de qualités chimiques. Ils expriment la probabilité de trouver une espèce donnée dans les différentes classes de qualité. La formule du profil est la même que celle réalisée récemment pour l'IDR (indice Diatomique Réunion).

$$P(sp_{classe}) = \frac{\left( OccTaxon_{classe} * \sum_{classe} abond Rel_{sp} \right)}{NbSites_{classe} * \sum A}$$

ou  $A = \frac{\left( OccTaxon * \sum_{classe} abond RelTaxon \right)}{NbSites_{classe}}$

$$P(sp_{classe}) \in [0,1]$$

### **Équation 2 : Formule du profil pour un taxon sp pour une classe de qualité donnée.**

Bien qu'une expertise écologique soit assez délicate sur des taxons nouveaux ou pour des taxons connus ou rapportés à des taxons connus, mais dont l'écologie peut différer entre Métropole et Antilles, les profils ont été validés par avis d'experts (Irstea et Asconit).

A contrario, cette difficulté illustre bien le caractère indispensable d'un indice spécialisé aux Antilles, et cette expertise a malgré tout pu s'appuyer assez largement sur les référentiels de chimie collectés et sur l'assise de la classification faite, pour laquelle une des métriques prise en compte s'est appuyée aussi sur les réponses biologiques aux gradients abiotiques (via l'ACC restreinte).

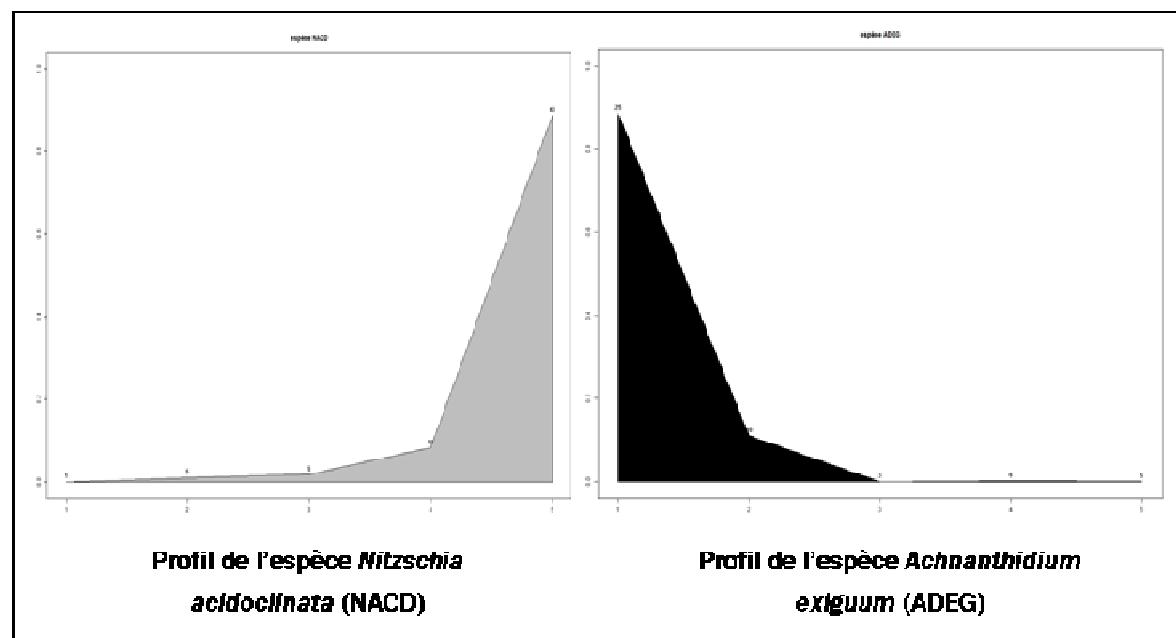


Figure 67 : Profils de qualité d'espèces typiques : NACD à gauche, très bon état ; AEGE à droite, très mauvais état.

A l'examen de la **Figure 67** page précédente, l'espèce *Nitzschia acidoclinata* (NACD) par exemple présente un profil typique de flores de référence puisque présente exclusivement dans la classe de qualité 5 (très bonne qualité)

Au contraire, l'espèce *Achnanthidium exiguum* (ADEG) est une espèce manifestement affiliée aux sites pollués (forte probabilité d'abondance relative dans la classe 1) et donc considérée comme une espèce-cible hautement intéressante pour diagnostiquer l'altération anthropique.

Du fait de leurs caractéristiques ambiguës en termes de signal de la pollution, certaines espèces particulières ne peuvent entrer en compte dans l'indice, comme par exemple les espèces halines. Certaines d'entre elles apparaissent dans des sites littoraux, mais pour des raisons qui n'ont rien à voir avec une altération anthropique (entrées naturelles d'eaux d'origine marine). Neuf espèces ont ainsi pu être cataloguées, sur la base de l'analyse de données et par avis d'expert, comme des espèces halines ou saumâtres et, même s'il a pu leur être calculé un profil de qualité en fonction des variables abiotiques des sites où on les a trouvées, leur présence est uniquement la conséquence d'entrées marines. Elles n'entreront donc pas en compte dans le calcul de l'indice. C'est par exemple le cas des espèces *Luticola mutica* et *Nitzschia amplexens* (en violet dans la **Figure 68**).

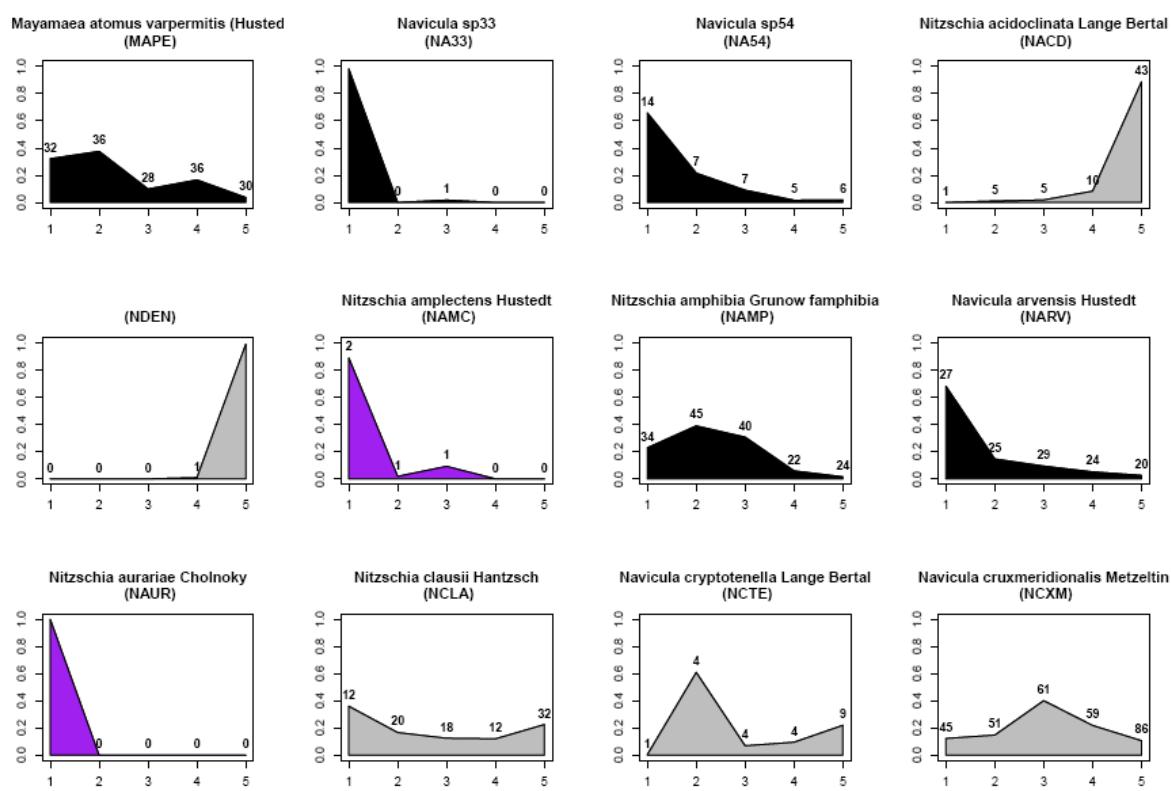


Figure 68 : Exemples de profils. Noir : Espèces-cibles synonymes d'altération anthropique. Violet : Profils espèces halines. Gris : Toutes autres espèces.

Les profils calculés pour les 177 espèces finalement retenues sont intégralement présentés en **Annexe 11**, les planches de profils sont présentées en **Annexe 12**.

## D. Création de l'indice

### 1. Sélection des taxa

Les espèces entrant en compte dans l'indice ont été choisies par rapport à leurs profils. Seules les espèces avec des fortes probabilités dans les classes de qualité 1 et 2 ont été retenues comme espèces « cibles » représentant l'altération anthropique. Deux seuils ont été définis en cascade pour sélectionner les taxons d'alerte :

- Si la probabilité de l'espèce dans la classe 1 est supérieure ou égale à 0.1 ET la somme des probabilités de l'espèce dans la classe 1 et la classe 2 est supérieure ou égale à 0.6.
- Si la somme des probabilités de l'espèce dans la classe 1 et 2 est supérieure ou égale à 0.65.

Les différents taxons d'alerte sélectionnés pour indiquer l'altération pourront être retrouvés dans **l'Annexe 10**. Les valeurs calculées d'abondance relative par classe servant de base à leurs profils sont donnés en **Annexe 11**.

Plusieurs espèces pré-sélectionnés comme espèces cibles avec les seuils ci-dessus et présentant des profils jugés comme erronés par avis d'experts et ont été retirés. C'est le cas pour certaines *eunotia*, *Eunotia subarcuatoidea* (ESUB) ou *Eunotia sp22* (EU22). Au final, 49 **espèces cibles** ont été sélectionnées, on trouve **37 espèces cibles en Guadeloupe** (27% des espèces présentes en Guadeloupe) et **43 espèces cibles en Martinique** (29%).

L'espèce *Nitzschia inconspicua* (NINC) semble avoir un statut un peu particulier car elle semble assez ambiguë en termes d'interprétation de son positionnement vis-à-vis de la pollution, avec semble t'il un « signal » différent selon l'île. Elle est une composante très importante de flores de référence de la zone des Mornes en Martinique, elle est souvent liée à des augmentations de conductivité et de minéralisation de l'eau et associée à des pollutions de zone aval en Basse-Terre de Guadeloupe.

L'inclure en taxon d'alerte synonyme d'altération n'a pas de consistance globale inter-île et ferait chuter les 2 sites de référence de la Zone des Mornes de Martinique à des notes indicielles très basses (elle peut présenter des abondances relatives très dominantes sur ces sites). Pour la suite de la Partie II, nous avons donc choisi d'exposer les résultats obtenus lorsque l'espèce *Nitzschia inconspicua* n'était pas considérée comme espèce cible.

Ce point spécifique reste cependant à débattre et à régler de façon satisfaisante. Il nécessite encore du travail afin de trouver une solution satisfaisante pour le régler. Pour information plus complète, il est possible de se référer à **l'Annexe 14** dans laquelle sont figurées les cartes d'états lorsque l'espèce NINC est prise en compte.

## 2. Formulation de l'indice

$$IDA^{+'}_{site} = \left[ \left( \sum_{sp \in \{site, sp^{+'}\}} abund \text{Rel}_{sp_{site}} \right) * \left( richesseSp^{+'}_{site} / richesseSp_{site} \right) \right], IDA^{+'}_{site} \in [0,1]$$

$$IDA^{-'}_{site} = \left[ \left( \sum_{sp \in \{site, sp^{-'}\}} abund \text{Rel}_{sp_{site}} \right) * \left( richesseSp^{-'}_{site} / richesseSp_{site} \right) \right], IDA^{-'}_{site} \in [0,1]$$

$$IDA_{site} = \frac{(IDA^{+'}_{site} - IDA^{-'}_{site})}{\sum_{sp \in site} abund \text{Rel}_{sp_{site}}} * 100, IDA_{site} \in [-100,100]$$

**Équation 3: Formule de l'Indice Diatomique Antilles**

La valeur d'indice pour un site (Équation 3), prend en compte l'abondance relative des espèces se trouvant dans le site ( $abond \text{Rel}_{sp_{site}}$ ). La richesse spécifique totale du site i.e le nombre total d'espèces que contient le site ( $richesseSp_{site}$ ), la richesse spécifique du site en espèces « - » (taxons d'alerte synonymes d'altération) et les autres (respectivement  $richesseSp^{-'}_{site}$  et  $richesseSp^{+'}_{site}$ ). Plus le nombre de taxons d'alerte et leur abondance est important dans le site, plus la valeur de l'indice est faible.

## 3. Création des classes d'état biologique

L'indice prend des valeurs entre [-100,100]. Pour ramener cette échelle couvrant 200 unités à une note sur 20, il a été procédé à une translation horizontale :

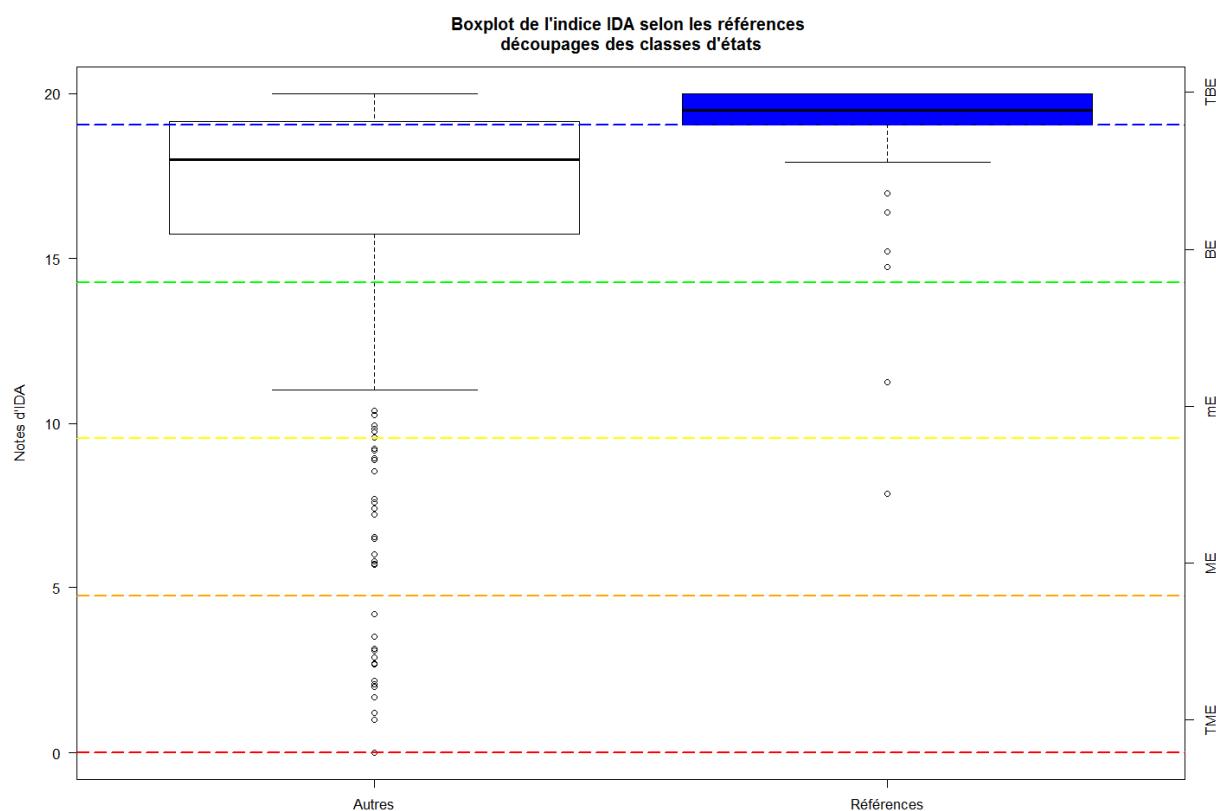
$$[-100, 100] \rightarrow [1, 20]$$

, où 1 est la valeur des sites les plus pollués et 20 les sites de très bon état.

De même que pour le gradient, le vecteur de l'indice a été discrétisé.

Pour ce faire nous avons appliqué une méthode similaire à la discrétisation du gradient chimique. Nous avons sélectionné les notes associées aux notes des sites de référence et récupéré la valeur de 1<sup>er</sup> quartile comme limite « très bon état/bon état ». Le reste du vecteur a été discrétisé en 4 classes équidistantes (i.e les écarts entre les limites de classes sont les mêmes) (**Figure 69**).

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**



**Figure 69 :** Illustration de la discréétisation du vecteur des notes d'état

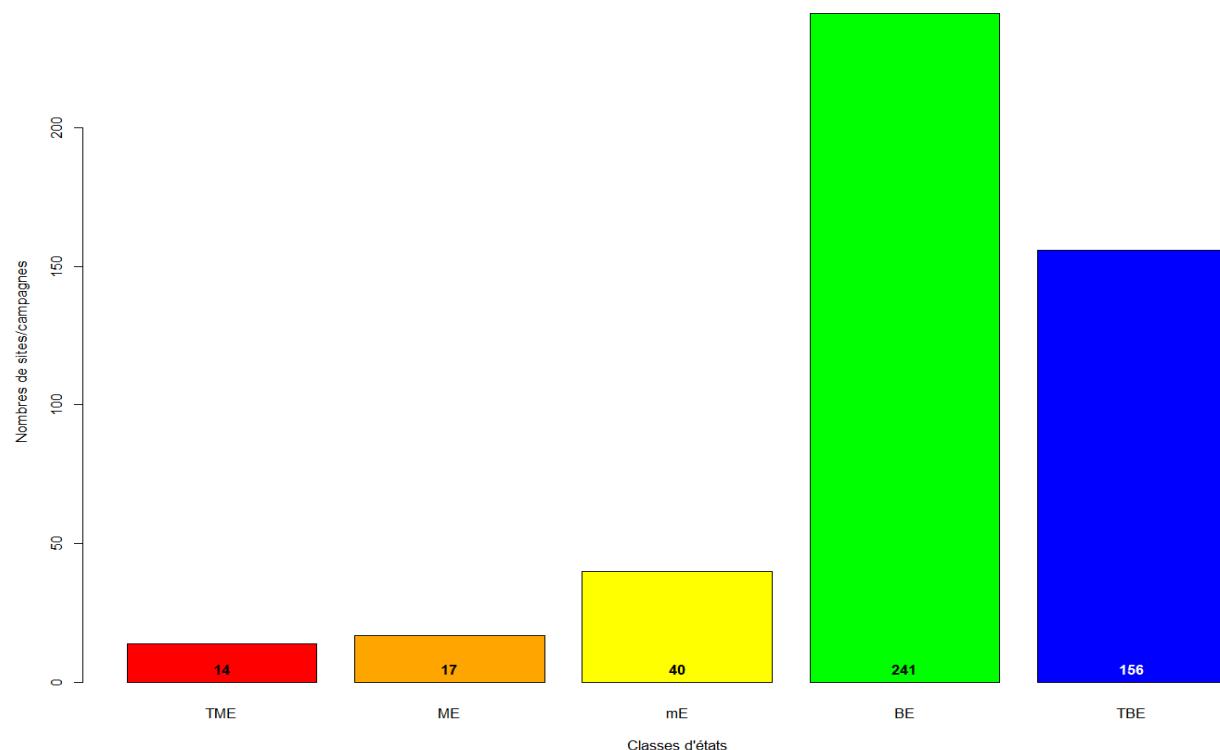
TME	ME	EM	BE	TBE
[0-4.7]	]4.7-9.5]	]9.5-14.2]	]14.2-19.04]	]19.04-20]

**Tableau 19 : Limites des classes d'états.**

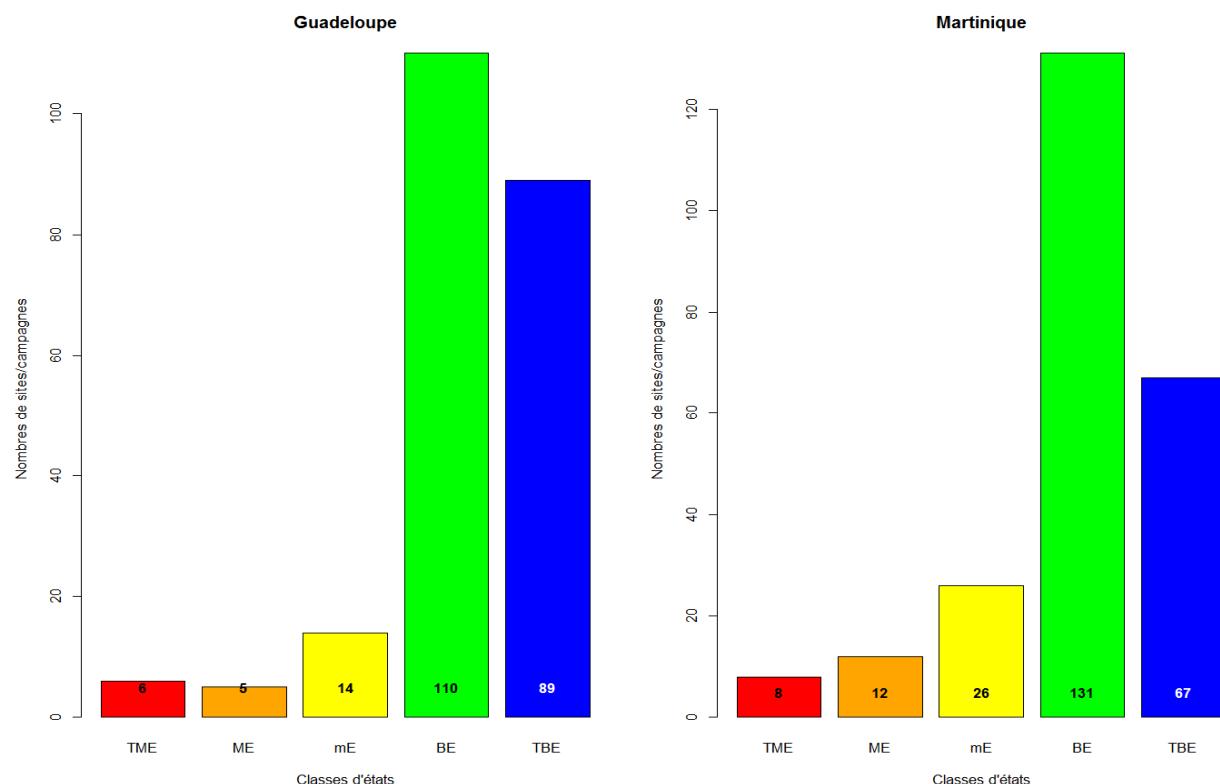
La **Figure 70** en page suivante présente le nombre de sites (station/campagne) par classe d'états. La classe la plus importante en termes d'effectifs est la classe de bon état avec 228 sites, ce qui est logique puisque la médiane du gradient est située dans cette classe (**Figure 72**). La classe de « très mauvais état » contient quant à elle 15 relevés (site x date).

Si l'on s'intéresse cette fois à la répartition par île des sites (**Figure 71**), on remarque le même patron général de répartition entre les classes pour les deux îles, à savoir la représentation la plus importante de la classe de sites de « bon état ». La Martinique contient plus de sites que la Guadeloupe dans chacune des classes sauf pour la classe de « très bon état », 68 sites contre 93 pour la Guadeloupe. Cela matérialise à nouveau le fait que la Martinique est globalement sous pression d'anthropisation plus importante que la Basse-Terre de Guadeloupe (la Grande-Terre étant dépourvue de rivières à écoulements permanents).

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**



**Figure 70 : Histogramme du nombre de sites dans les différentes classes d'états. Les couleurs de chaque barre correspondent à la couleur associée des classes d'états. Rouge : « Très Mauvais État », Orange : « Mauvais État », Jaune : « État Moyen », Vert : « Bon État », Bleu : « Très Bon État ».**



**Figure 71 : Histogrammes des nombres de sites par classes d'états selon les îles : Guadeloupe (gauche), Martinique (droite)**

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final

En complément, pour avoir un meilleur aperçu de la dispersion des notes des sites, on peut se référer au boxplot associé (Figure 72).

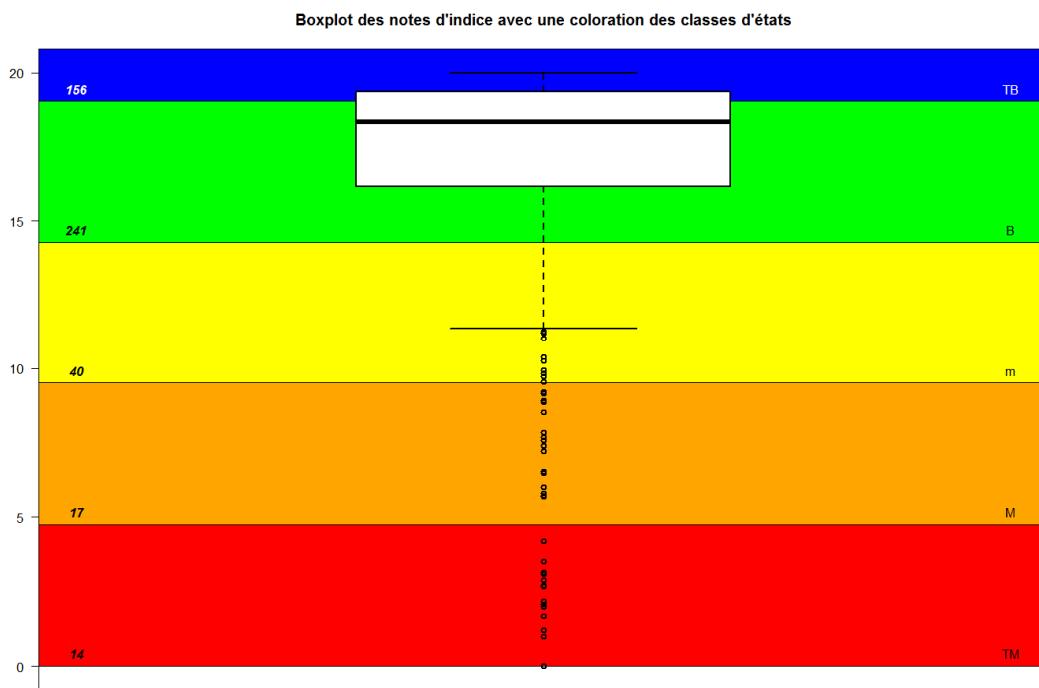
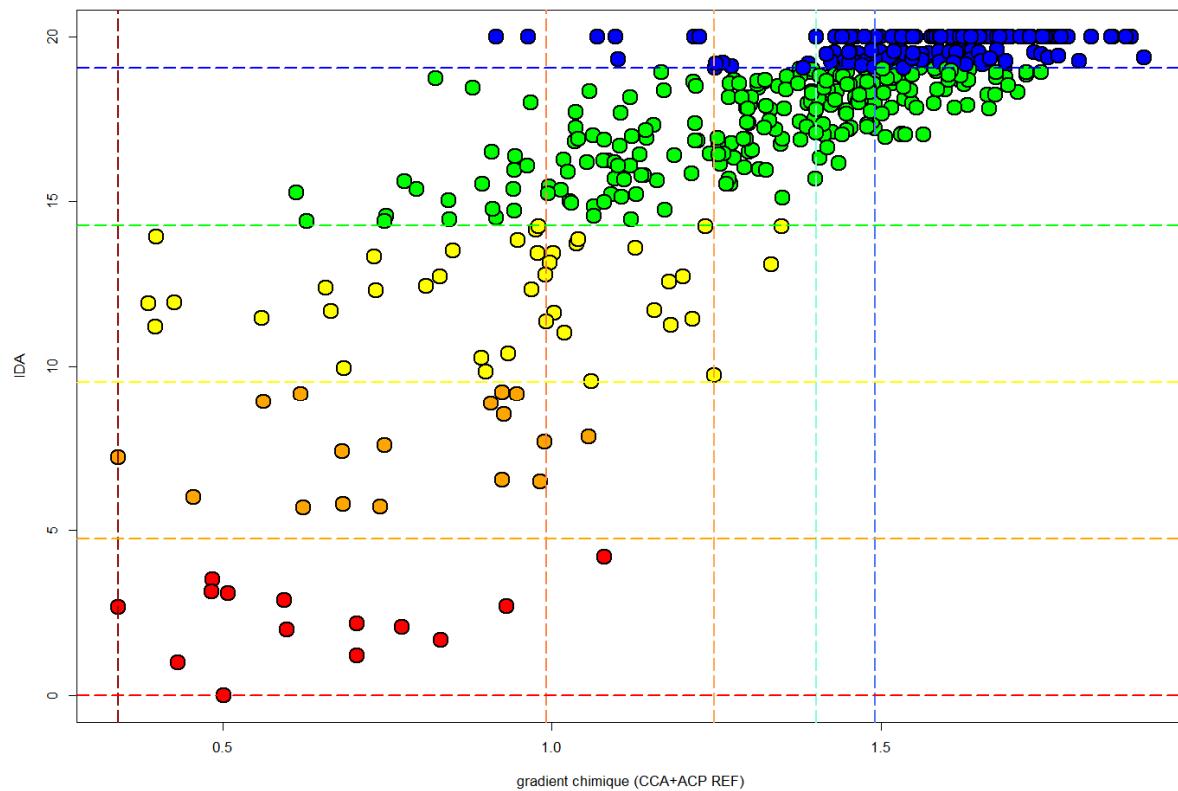


Figure 72 : Boxplot des notes d'états avec les différentes classes d'états. Les nombres sur la gauche représentent le nombre de sites par classe. Les lettres sur la droite représentent les classes d'états.

On peut ensuite observer (**Figure 73** page suivante) une relation consistante entre les notes du nouvel indice et le gradient composite d'anthropisation (GCMA), ce qui était le but recherché avec le principe de construction de l'indice. On peut cependant remarquer que la relation n'est pas linéaire.

Si la physionomie générale de cette relation est plutôt bonne et montre la réponse satisfaisante de l'IDA à l'altération, il reste à creuser un peu plus le cas de certains points qui se positionnent de façon particulière et d'en comprendre les raisons. Il est probable que, selon les endroits et les dates, les relevés chimiques ponctuels n'aient pas pu intégrer et rendre compte de toutes les détériorations, surtout en cas d'événements de pollution à rythme non régulier ou portés par un événement hydrologique, que l'on a peu de chances de capter avec une telle stratégie. Il peut donc être normal que la note biologique procurée par certains relevés apparaisse plus sévère que ne le laisseraient penser les valeurs de chimie observées ayant servi à l'assise du calcul de la valeur du CGMA (quelques points décalés en bas à droite du nuage).

Par contre, on peut aussi noter quelques points à positionnement particulier dans la partie en haut à gauche du nuage de points, c'est-à-dire des réponses biologiques qui ne rendent pas bien compte des valeurs observées des variables d'anthropisation. Si on peut imaginer que ça puisse arriver de manière occasionnelle (exemple d'un échantillonnage ponctuel tombant juste sur un pic de pollution, ou lors d'un épisode turbide augmentant fortement la charge de la colonne d'eau en MES et en P Total, phénomènes transitoires n'ayant influencé qu'une petite partie de l'épisode de croissance des biofilms), il y a objectivement assez peu de chance pour que ça se renouvelle souvent. Les points avec des notes anormalement hautes d'indice malgré la valeur déjà notable du CGMA sont donc à diagnostiquer plus finement au cas par cas pour repérer s'il s'agit d'un problème de règles de calcul des profils de qualité des taxons (pas assez sévères et laissant certains taxons synonymes d'altération ne pas pénaliser l'indice), ou s'il s'agit d'une typologie de cas bien spécifique.



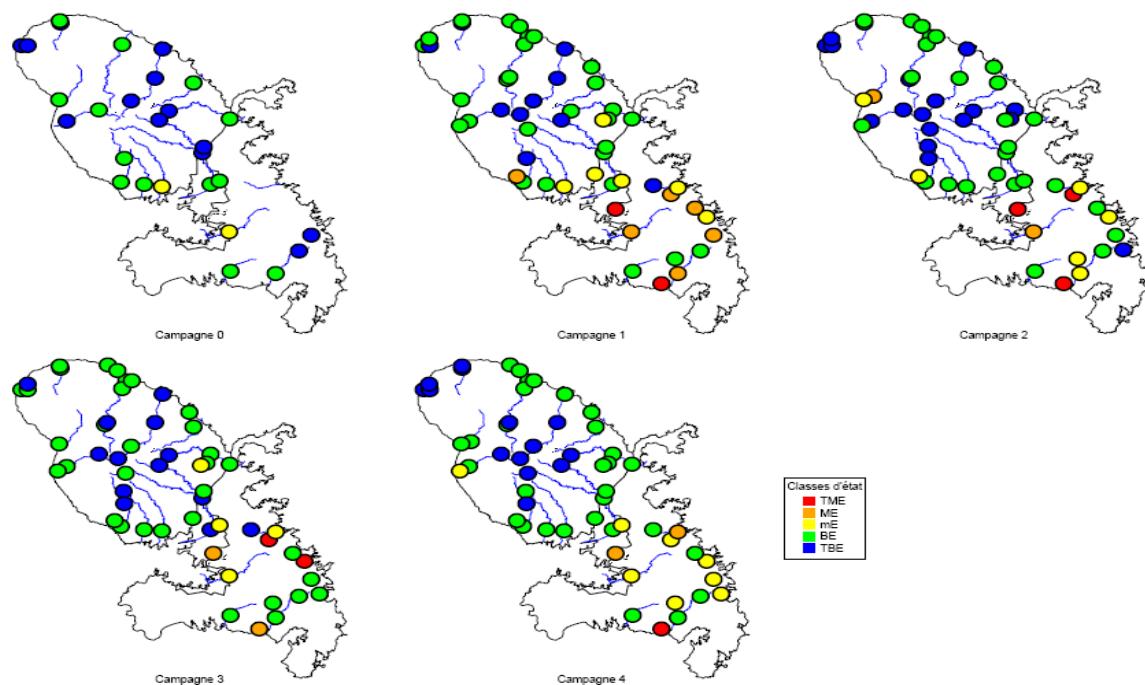
**Figure 73 : Notes de l'indice (IDA) en fonction du Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation (GCMA).**

Les différentes lignes représentées sont les limites entre les différentes classes : classes de qualités (verticales), classes d'états (horizontales). Les couleurs des points sont les couleurs des classes d'état biologique selon notes d'indices.

Il est maintenant utile d'examiner géographiquement et de diagnostiquer les qualités biologiques affectées aux sites sur la base du nouvel IDA. Dans le cas de la Martinique (**Figure 74** en page suivante), le Sud et la partie médiane de la Martinique semblent plus impactés que le Nord. Deux stations sortent presque à chaque campagne comme des sites en très mauvais état. Il s'agit de deux stations d'épuration, Sainte-Luce-Bourg (FHS) et Canal de Ducos (CDS). Les stations à proximité de la Montagne Pelée sont toutes de bon ou très bon état, les plantations bananières en périphérie de la partie Nord entraînant un petit déclassement de TBE vers le BE probablement en raison des pollutions diffuses agricoles et d'effets de l'érosion. Cependant, certains sites considérés comme en bon état par rapport au terrain ne ressortent pas toujours comme tel et inversement.

La zone des Mornes et la zone médiane, du fait d'une géochimie particulière, d'activités agricoles entraînant des pollutions diffuses et certaines fois, de la présence de bourgs ou d'infrastructures collectives assez lourdes, présentent des signes patents d'altération anthropique.

Ce constat cartographique, avec ses variabilités par campagne, donne une représentation assez réaliste et fidèle des niveaux d'altération rencontrés en Martinique. Il restera cependant à mieux examiner et à caler au mieux le problème du niveau de référence sur les deux sites de référence de la zone des Mornes.



**Figure 74 : Cartes d'état des sites selon les campagnes pour la Martinique**

Examinons maintenant le cas de la Guadeloupe (**Figure 75** en page suivante).

Sur cette île, deux sites nettement impactés sont la station Bellevue (BAB) et la station Petit-Bourg qui sont toutes deux des stations d'épuration. Bien que la Guadeloupe paraisse en moyenne moins impactée que la Martinique, on observe quand même le même patron général, à savoir que les sites les plus impactés sont à basse altitude et proches du littoral. Ce constat coïncide avec les densités d'anthropisation des deux îles et la présence connue de certaines infrastructures polluantes (STEPs...). Une carte d'état avec d'autres stations supplémentaires pour la Guadeloupe pourra être retrouvée en Annexe 5 : Carte d'état biologique des sites supplémentaires de Guadeloupe.

Les décalages éventuels entre ces résultats cartographiques sur les deux îles et la réalité de pression et d'impact anthropique, s'il y en a, pourraient être imputables à plusieurs facteurs comme l'assise temporelle des valeurs de chimie, les méthodes mises en œuvre pour la création de l'indice, les profils assignés aux espèces sur une base souvent réduite d'occurrences et d'abondances relatives etc... Les cas précis d'écart entre l'avis expert de terrain et certaines évaluations sur la base de l'IDA, lorsqu'ils seront bien diagnostiqués, pourront être réglés par des démarches spécifiques. Au-delà de la correction si nécessaire de petits défauts de fabrique qui pourraient être relevés, les problèmes engendrés par une assise-données trop limitée actuellement vont peu à peu pouvoir se résoudre par l'augmentation et la précision des jeux de données.

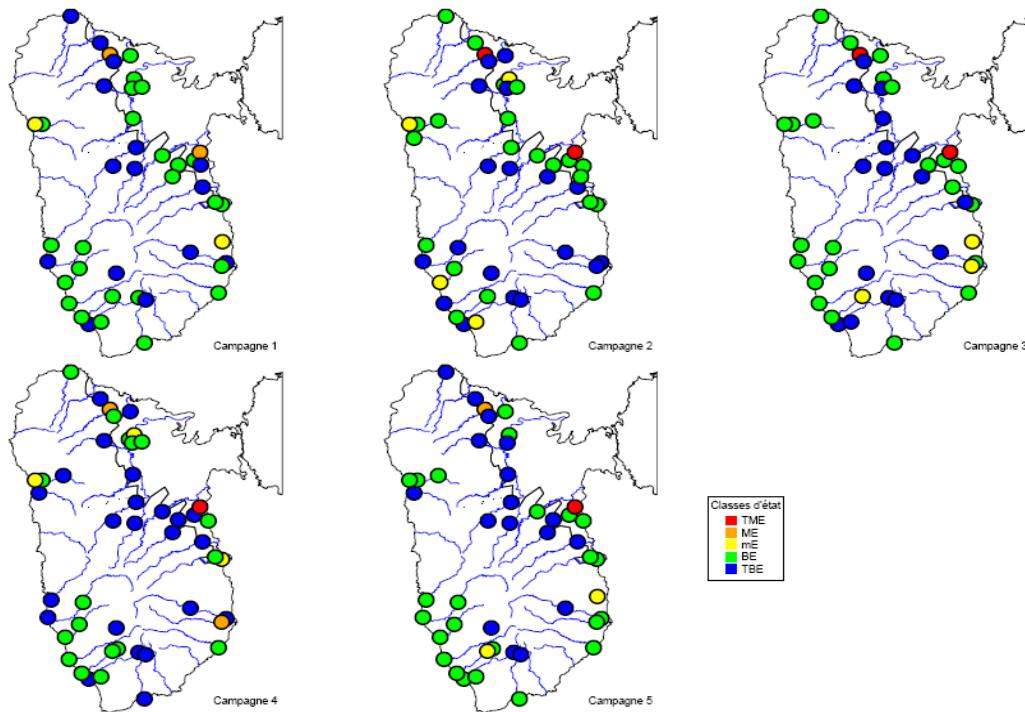


Figure 75 : Cartes d'état des sites selon les campagnes pour la Guadeloupe

## 4. Transformation des notes en EQR

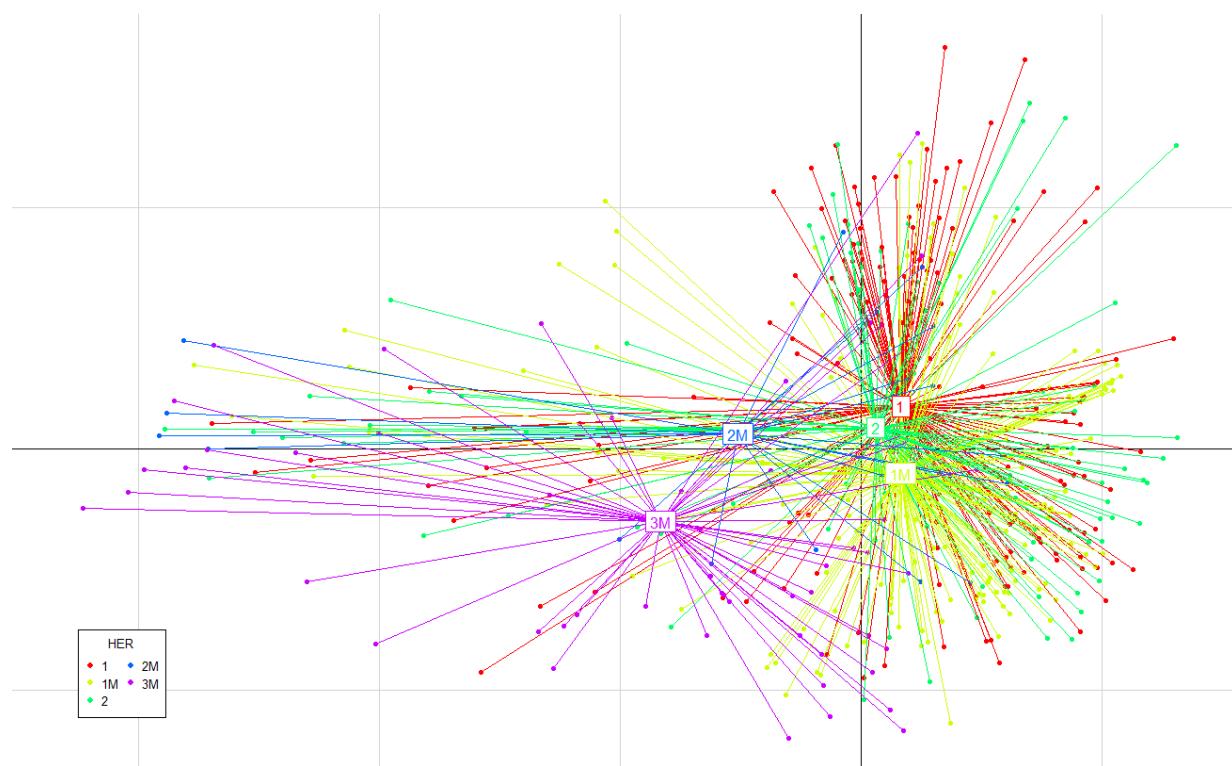
Comme rappelé en début de rapport, selon le travail de J.G. Wasson et al, 2004 (**Référence 52**), trois HER (Hydro-EcoRégions) de niveau 2 peuvent se distinguer en Guadeloupe :

- La Grande Terre (non représentée dans notre travail du fait de l'absence de cours d'eau permanents)
- La Basse Terre qui peut se découper en 2 sous-HERs, les volcans humides (1G) et les plaines humides (2G)

Selon le même auteur, la Martinique présente elle aussi 3 HERs de niveau 2 :

- L'HER Pitons du Nord (1M)
- L'HER Mornes du Sud qui peut se diviser en 2 sous HER : Plaine du Lamentin (2M) et Mornes du Sud (3M).

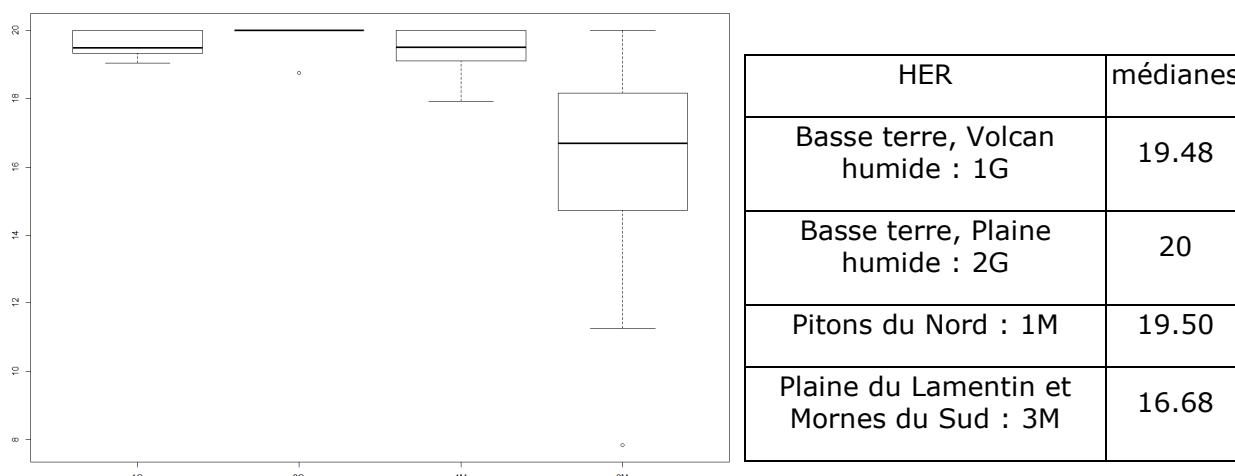
En se basant sur l'ACP sur les descripteurs d'anthropisation (**Figure 76** en page suivante), on voit clairement que le positionnement du barycentre de l'HER 3 (Mornes de Martinique) est plus tiré vers la gauche de l'Axe 1 que le reste des HERs. Cependant, ce positionnement de barycentre recouvre une grande diversité de situations, entre des relevés (site x date) arrivant dans le secteur proche de l'Axe 2, la plupart de ces points étant attachés aux relevés des sites de référence de la Rivière du Vauclin à la Broue (site VAU) et de la Rivière Pilote amont à Beauregard (site PIL), et des relevés fortement pollués tirés vers la gauche de l'axe.



**Figure 76 : Analyse en Composantes Principales restreinte (descripteurs d'anthropisation), avec projection des HERs en couleurs.**

**Légende :** rouge: HER1 Guadeloupe, vert: HER2 Guadeloupe, jaune: HER1M Martinique, bleu: HER 2M Martinique, violet: HER 3M Martinique.

La différence de positionnement global de cette HER se voit clairement aussi en regardant la médiane des notes des sites de référence des différentes HERs (**Tableau 20** ci-dessous).



**Tableau 20 : Boxplot et tableau des médianes des notes d'états de référence selon les différentes HERs**

On peut de même noter que le positionnement de barycentre des autres HER couvre également des disparités internes importantes entre sites et relevés. Ainsi en est-il pour le positionnement de certains relevés (site x date) de toutes les HERs qui sont fortement tirés vers la gauche de l'axe 1.

Cette physionomie rappelle :

1) qu'en dépit de leurs conditions naturelles et même si certaines HERs sont plus préservées que d'autres (notamment zones d'altitude sur massifs volcaniques), aucune d'entre elles n'est indemne de points spécifiques présentant un fort niveau de pollution.

2) que l'HER 2M (Plaine du Lamentin) est celle dont, du fait de la géologie sur tufs altérés entraînant une minéralisation naturelle du même type mais un peu moins forte que celle de l'HER 3M, les caractéristiques de forçages naturels (niveau de minéralisation de l'eau, altitudes et reliefs modérés et aussi niveau thermique élevé) sont les plus proches de celles de cette HER 3M.

De gros équipements industriels (distillerie, conserverie etc...) ou collectifs (STEPs), la présence d'agglomérations significatives à l'aval de bassins versants et/ou plus rarement le cumul de pollutions diffuses d'origines diverses peuvent selon le cas être en cause et tirer le relevé vers le haut (augmentation des valeurs de PTot et de DBO5) et la gauche (autres descripteurs liés aux pollutions diffuses et aux STEPss) du plan de l'ACP restreinte.

Dans le jeu de données, il est à déplorer le manque complet de stations de référence dans l'HER 2 de Martinique (Plaine du Lamentin) qui subit de façon quasi-généralisée une forte fréquentation et de fortes pressions anthropiques, sans aucun hydrosystème préservé. Au niveau des HER1 et sur le plan de la typologie abiotique, cet ensemble était rattaché avec la zone des Mornes du Sud de Martinique. La **Figure 76** montre bien que ces 2 entités ont les barycentres proches et une distribution des relevés couvrant les mêmes domaines, ce qui témoigne à la fois de forçages naturels comparables (eaux fortement minéralisées et carbonatées sur formations de tufs plus ou moins altérés) et d'effets comparables des forçages anthropiques.

Sur le plan des conditions abiotiques et de l'affectation d'un niveau de référence pour la construction d'EQRss, nous avons joint l'HER 2M avec l'HER3M.

La re-normalisation de la mesure d'écart à la référence par le biais de la mise en place d'EQRs (= Ecological Quality Ratios) selon les HERs va permettre de rendre comparable les notes entre elles et, comme recommandé par la DCE, de mesurer l'écart d'Etat Ecologique par rapport à la "référence adéquate".

#### Calcul de l'EQR pour un site i :

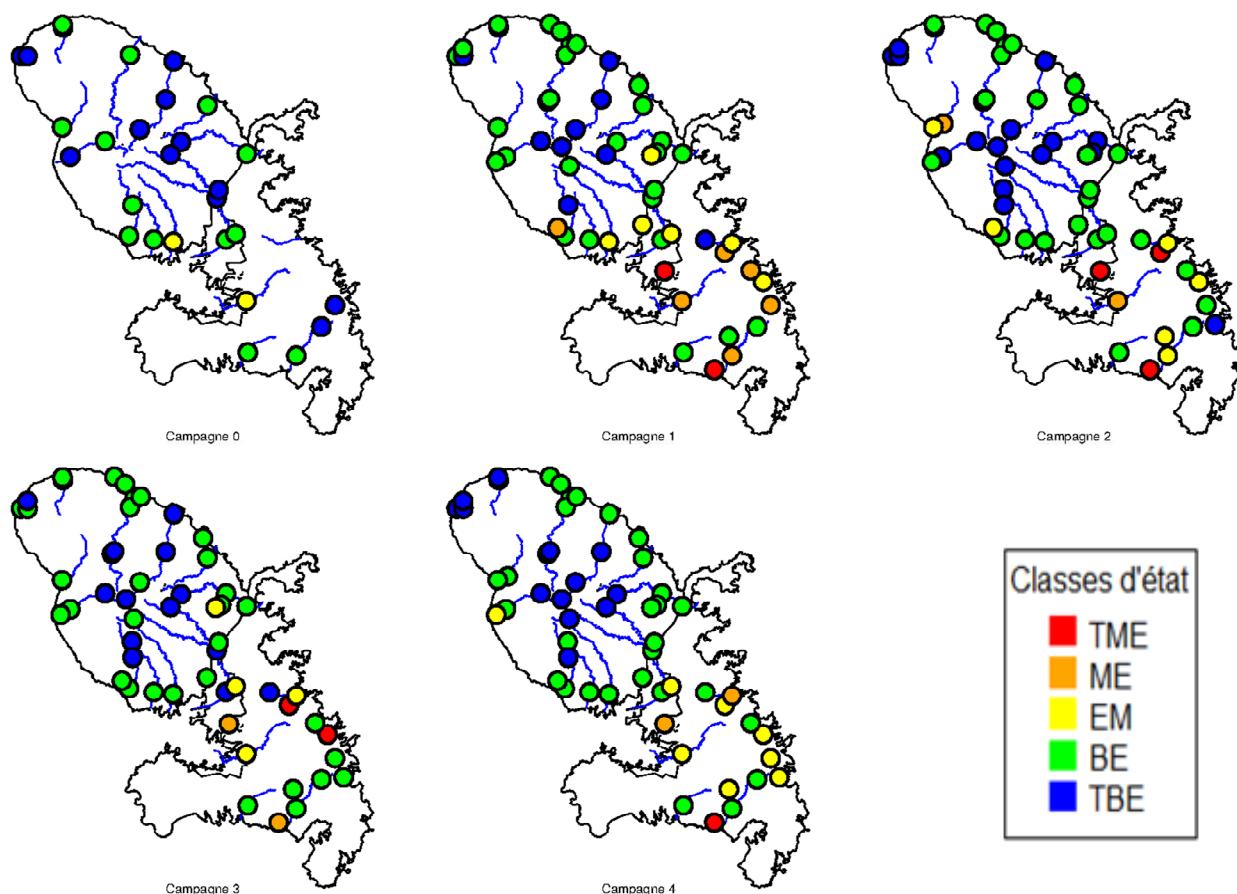
$$NoteEQR_i = note_i / med(siteRef_{HERi}), \text{ où } HERi \text{ est l'HER auquel appartient le site } i.$$

La médiane des notes de référence pour l'HER considérée aura par définition la valeur de 1 et servira de niveau de référence, la note indicielle minimale qu'il est possible d'atteindre dans l'HER considérée correspondra par construction à un EQR de 0.

Examinons maintenant l'effet entraîné par cette renormalisation EQR au niveau d'ensembles naturels abiotiques cohérents (les HERs définies par Wasson et al) sur l'évaluation de l'Etat Ecologique :

#### - Pour la Martinique :

La correction des notes d'indices de la Martinique par les HERs (**Figure 77** page suivante) permet de mieux faire ressortir l'altération de certains sites du Nord, notamment les stations sur le Fond Lahaye à la STEP Schoelcher 2 (FLS), sur la rivière Carbet à la STEP du Carbet à certaines dates, sur la Roxelane à la distillerie Depaz (ROD).



**Figure 77 : Carte des notes d'états pour les sites de Martinique corrigés par les EQRs selon les HERs**

Dans l'ensemble "Mornes du Sud" regroupé, cette correction donnant un EQR de référence de 1 correspondant à des notes médianes d'IDA de 16,7 (cf **Tableau 20**) permet l'évaluation d'un niveau plus proche du statut de référence pour les sites de référence Rivière-Pilote amont (PIL) et Vauclin (VAU), même si des classements plus bas surviennent à certaines dates pour des raisons qu'il faudra continuer à diagnostiquer.

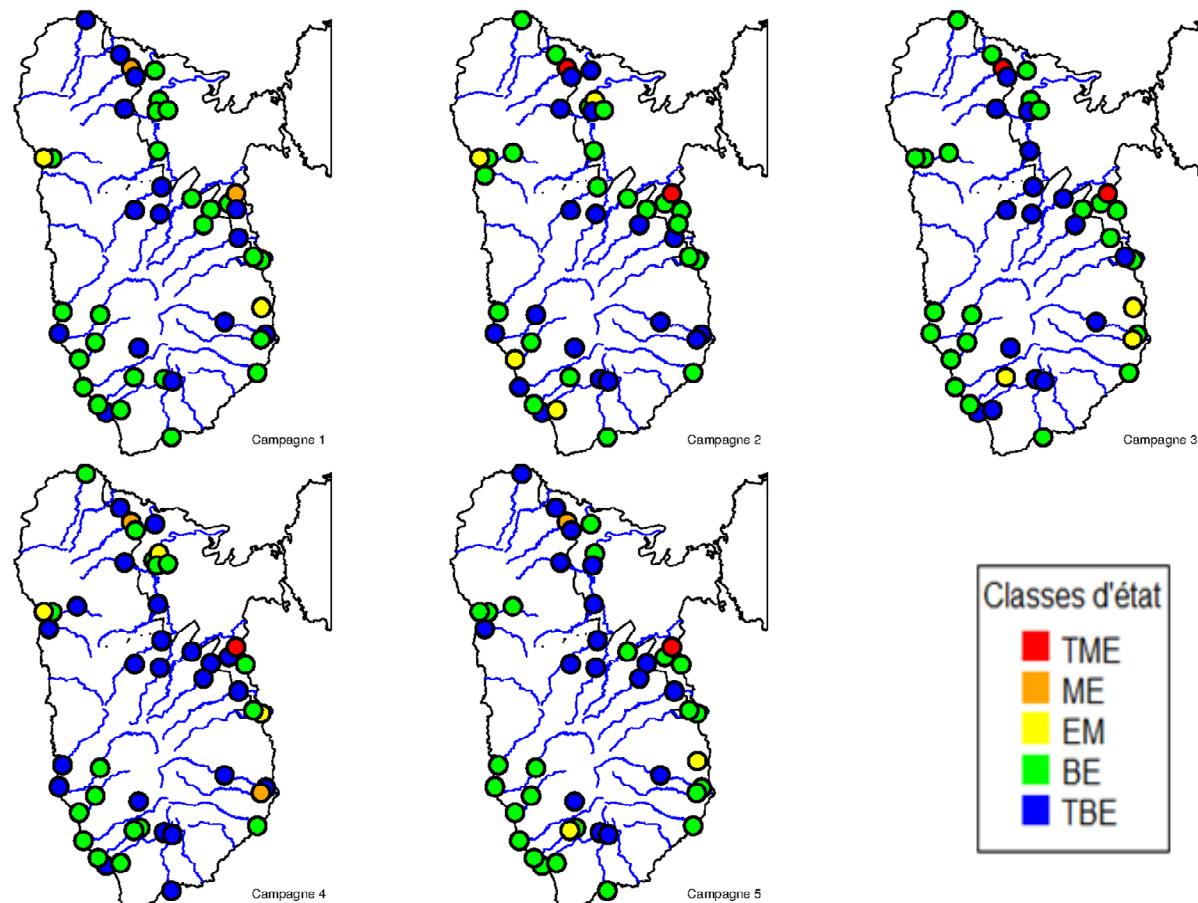
Il y a quelques problèmes naturels particuliers dans cette zone à savoir :

- 1) des problèmes d'hydrologie très peu soutenue en saison sèche, donnant des minéralisations naturelles de fortes à très fortes (Cond. El. pouvant atteindre les 1500 µs/cm) ;
- 2) des effets de forte élévation thermique *in situ* ;
- 3) de façon saisonnière, le problème de fortes chutes de matériel végétal directement dans ces cours d'eau à débits peu soutenus et notamment des fruits de type mangues, avec des effets saprobiques etc...

Malgré cet ajustement à la baisse des niveaux de référence, le référentiel d'évaluation basé sur les EQRs continue de bien marquer l'altération des sites pollués, notamment STEP Ste Luce (FHS), Rivière-Pilote aval bourg Rivière-Pilote (PIB) à certaines dates, STEP Ducos 1 (CDS), Station Total à Longuevilliers (LOT) en Plaine du Lamentin etc...

Même si les choses sont probablement encore perfectibles, les résultats obtenus avec cette correction semblent mieux correspondre avec la réalité des niveaux de référence et des impacts anthropiques.

**Pour la Guadeloupe :**



**Figure 78 : Carte des notes d'états pour les sites de Guadeloupe corrigés par les EQRs selon les HERs**

**Rappel :** La simulation représentée en **Figure 78** est faite sans intervention de NINC comme taxon d'alerte.

Dans le cas de la Guadeloupe, sur la base de la grille d'EQR « Basse-Terre, Volcan humide), 53 % de sites passent du très bon état au bon état. Ces points souvent situés en périphérie éloignée des massifs volcaniques et proches du littoral, sur sols altérés plus profonds et avec une pression humaine non nulle (présence de grandes zones de cultures type bananeraies ou canne à sucre, présence de bourgades) subissent notamment une influence d'enrichissement trophique qui peut suffire à expliquer cette sortie du TBE.

Sur la base des EQRs, l'évaluation de certains sites devient plus sévère que sur la base des notes indicielles directes, comme pour les stations Lonqueteau (CCL) ou Aval élevage Ouassous (RBA) ce qui, par rapport à la connaissance du terrain, est plus en accord avec la réalité de ces sites.

Au global en Guadeloupe, l'évaluation actuelle s'est améliorée sur la base des EQRs et devient assez réaliste. Le tout est de savoir si elle est correcte sur son calage de niveau ou un peu trop laxiste pour les sites de modérément à moyennement altérés, ce qui semble être l'opinion des parties prenantes de Guadeloupe sur ce scénario excluant la prise en compte de NINC dans la liste des taxons d'alerte.

	<b>TME</b>	<b>ME</b>	<b>EM</b>	<b>BE</b>	<b>TBE</b>
<b>1G</b>	[0.29,0.47]	]0.47,0.64]	]0.64,0.82]	]0.82,0.99]	]0.99,1.02]
<b>2G</b>	[0.06,0.29]	]0.29,0.52]	]0.52,0.75]	]0.75,1]	
<b>1M</b>	[0.38,0.54]	]0.54,0.69]	]0.69,84]	]0.84,0.97]	]0.97,1.02]
<b>3M</b>	[0,0.24]	]0.24,0.49]	]0.49,0.73]	]0.73,0.89]	]0.89,1.19]

**Tableau 21 : Limite des classes d'états selon les différentes HER.**

Bien que l'évaluation d'état obtenue des sites (Martinique ou Guadeloupe) ne soit pas toujours jugée correcte par les intervenants et experts locaux et puisse encore être améliorée dans certains cas, la prise en compte des HERs et des EQRs correspondants dans la correction des états, plutôt que l'utilisation des notes brutes d'IDA, a permis de gagner sensiblement en adéquation avec la réalité de terrain.

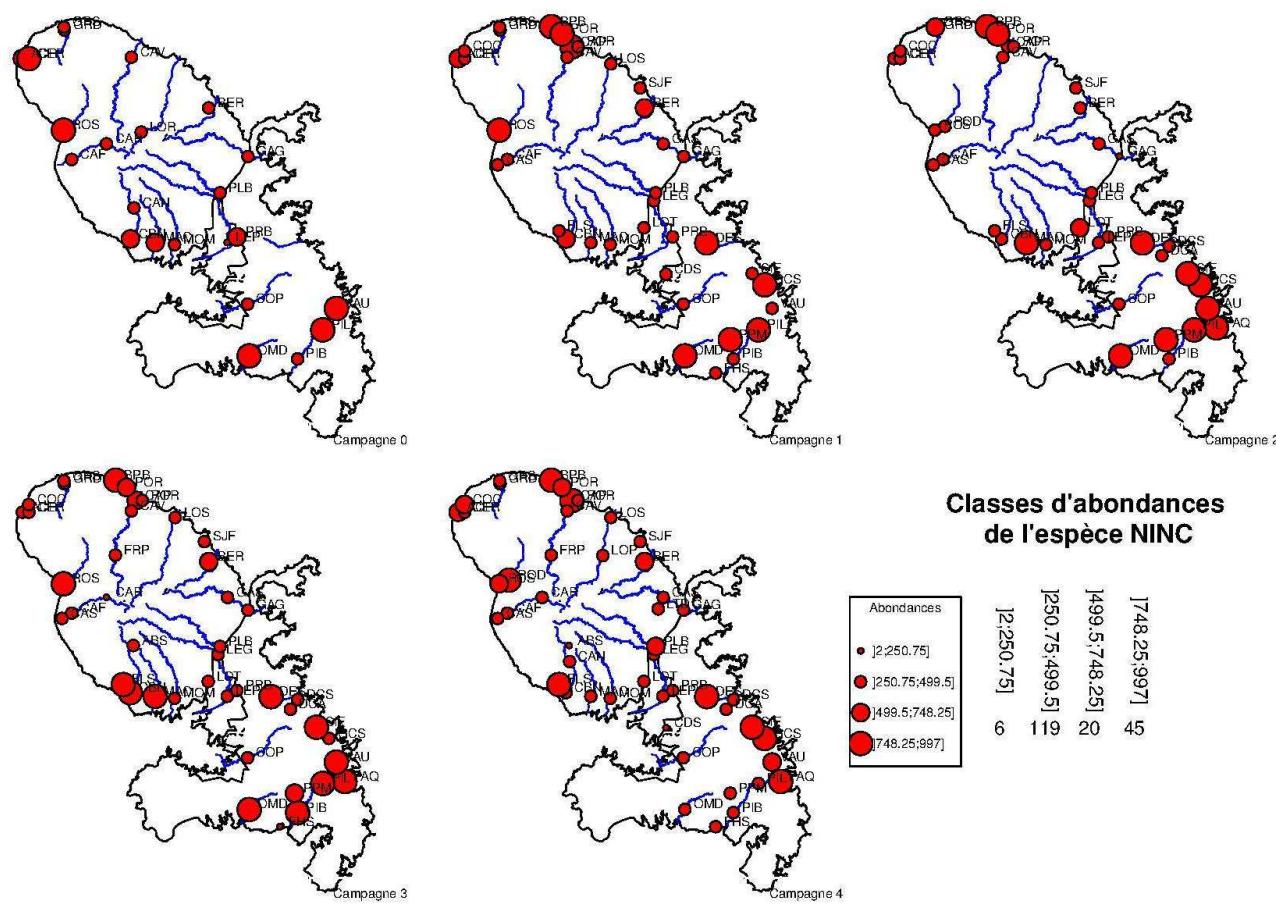
A ce stade, **l'espèce NINC semble poser un problème particulier pour la précision et la sensibilité de l'indice entre les deux îles**, qui mérite quelques développements spécifiques et en particulier d'examiner attentivement sa répartition et le détail de ses préférences écologiques.

**En Martinique** (**Figure 79** page suivante), où la géologie provoque des conditions fortement minéralisées et carbonatées sur toutes les formations de tufs, et en particulier sur la zone des Mornes du Sud et la Plaine du Lamentin, sans oublier quelques placages de tufs altérés situés sur toute la périphérie éloignée du massif volcanique de la Montagne Pelée, cette espèce se retrouve dans de nombreux relevés (190) avec une abondance moyenne de 220 pour mille. C'est une des espèces dominantes dans ce contexte.

Les sites dans lesquels l'espèce est la plus fortement présente sont situés dans la zone des Mornes du Sud, dont ils forment une partie importante des assemblages naturels.

Même si, globalement, cette zone est exposée à pas mal d'impacts anthropiques de différentes natures, il est à noter que l'espèce est particulièrement abondante sur les deux sites de référence de cette HER des Mornes du Sud (VAU et PIL) sans que des altérations anthropiques significatives ne puissent y être suspectées.

Cette zone à l'hydrochimie naturelle fortement marquée par les substrats de tufs est caractérisée par la présence d'eaux fortement minéralisées avec une gamme large de cations et d'anions, dont Ca++, Mg++, Na+, HCO3-, SO4--, et des valeurs de conductivité électrique et de TAC de niveau élevé pour des référentiels naturels, ce qui traduit la typologie très particulière de cette zone. Les espèces qui y vivent sont adaptées à des conditions de forte minéralisation de l'eau.



**Figure 79 : Cartes des abondances relatives de l'espèce NINC en 4 classes en Martinique lors des 5 campagnes**

**En Guadeloupe** (voir **Figure 80**), cette espèce se trouve plus particulièrement distribuée dans des sites aval de cours d'eaux aux conditions carbonatées (sous l'influence, selon le cas, d'eaux thermales fortement minéralisées et carbonatées, ou d'inclusions de roches métamorphiques carbonatées dans le massif volcanique). On peut donc remarquer ici qu'il y a une certaine convergence écologique entre les deux Antilles concernant le positionnement de l'espèce en fonction des forçages naturels relatifs à la minéralisation de l'eau, à des pH plutôt basiques, au forçage thermique.

Le problème vient du fait que la Basse-Terre de Guadeloupe est en général moins minéralisée que la Martinique et que les sites périphériques du volcan carbonatés et à basse altitude (secteur sud et un ou deux sites en côte Ouest) sont à la fois les sites les plus minéralisés et carbonatés de la Basse-Terre de Guadeloupe et des endroits où s'applique une pression anthropique non négligeable (agriculture, élevage de ouassous, bourgades et pollutions domestiques, etc...) qui elle-même peut exercer une action sur l'accroissement de la charge minérale et du titre alcalimétrique de l'eau.

L'espèce y est donc associée de fait à des sites pollués dans le cadre de la structure actuelle du réseau alors que les forçages principaux qui expliquent sa présence ne sont pas forcément anthropiques ou du moins, pas uniquement anthropiques. Ceci pose donc un problème puisque considérer cette espèce comme un taxon d'alerte synonyme d'altération va déclasser des sites de bonnes qualités et même des références à géochimie particulière de Martinique et Guadeloupe (notamment bassins sous influence thermale ou d'inclusions carbonatées) ou et si on l'enlève au contraire, le risque pour la Guadeloupe serait de ne pas assez déclasser des sites avec d'éventuelles pollutions.

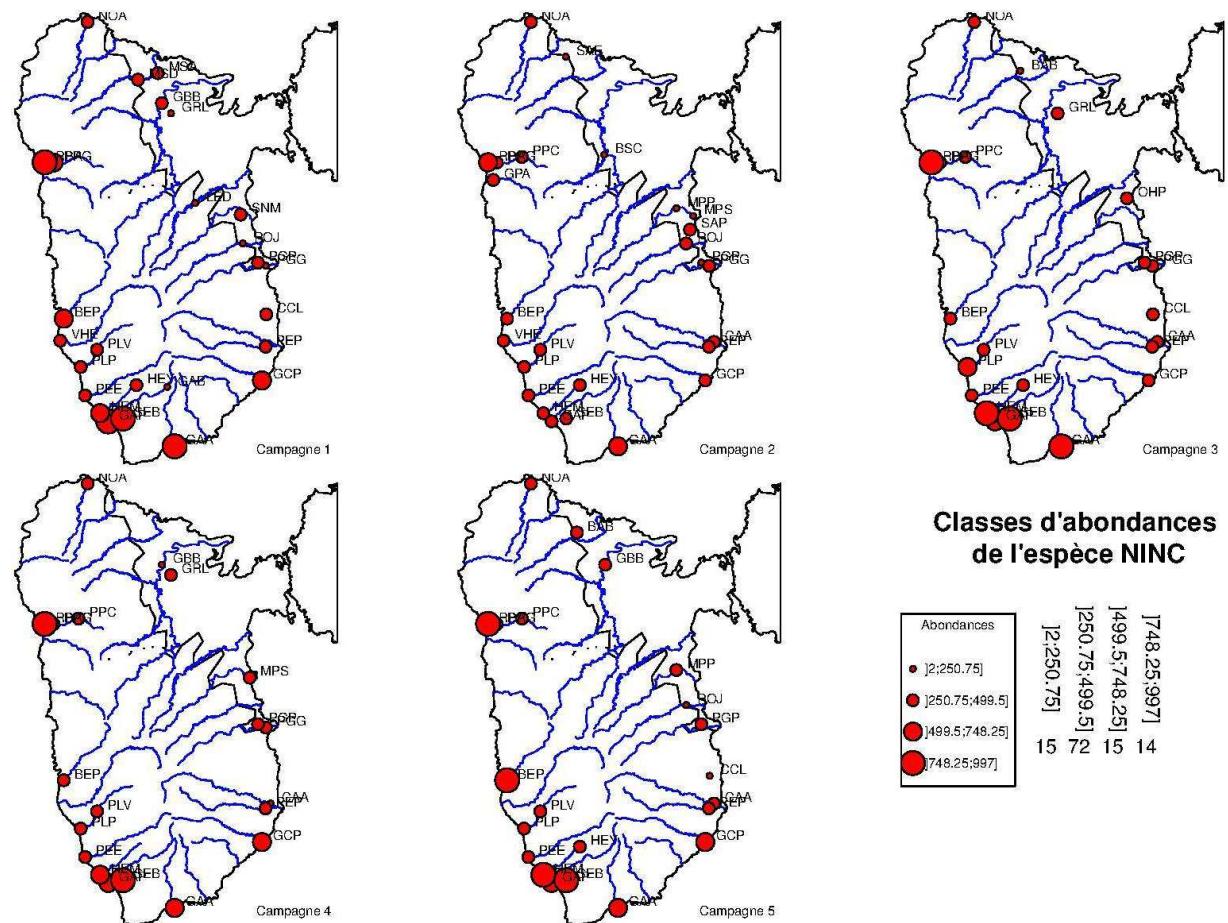


Figure 80 : Cartes des abundances relatives de l'espèce NINC en 4 classes en Guadeloupe lors des 5 campagnes

Les profils écologiques calculés avec les seuils actuellement testés placeraient a priori NINC en « espèce-cible » révélatrice d'altérations anthropiques notables. Or, s'il est clair que cette espèce résiste à de fortes conductivités et minéralisations de l'eau, qu'en est-il réellement de l'altération anthropique ? C'est ce que nous allons essayer d'approfondir.

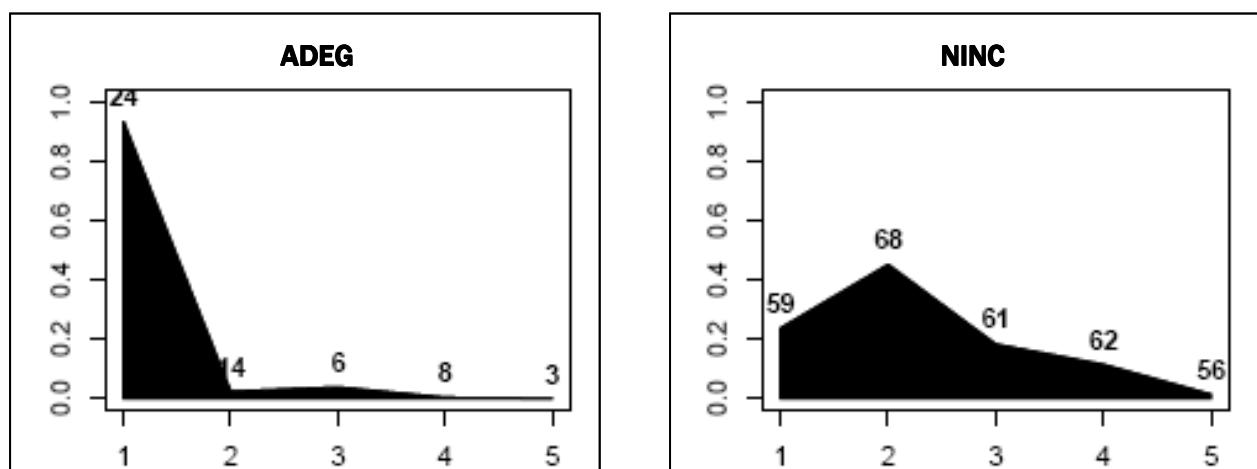


Figure 81 : profils de qualité comparés de *Nitzschia inconspicua* (NINC) et *Achnanthidium exiguum* (ADEG)

La **Figure 81** page précédente met en comparaison le profil de qualité actuel de NINC (espèce au statut vis-à-vis de l'altération à préciser) et de ADEG (une des espèces assez typiques de conditions fortement polluées).

Comme on l'a vu, le statut de NINC pose spécialement question vu qu'elle est fortement présente dans toute l'HER des Mornes de Martinique (globalement très minéralisée) et y est fortement représentée dans les 2 seuls sites de référence de cette région naturelle alors qu'en Guadeloupe, elle semble plutôt liée à des sites altérés.

Cependant, à cette distance géographique et dans des conditions écologiques proches (contexte biogéographique très voisin), il est peu plausible qu'il ait pu s'exercer de grosses différences de sélection et de modification de génome conduisant à des préférences écologiques très différencierées d'une Antille à l'autre.

On peut donc remarquer sur cette figure que si, au premier regard, les profils semblent tous deux marquer assez à très nettement l'altération anthropique avec les règles actuelles de seuillage, il y a tout de même une nette différence entre elles sur la répartition de l'espèce par classes de qualité. En effet, ADEG est clairement distribuée à 90 % dans la classe 1 correspondant aux conditions les plus dégradées, alors que NINC a un profil de distribution large avec un mode dans l'actuelle classe 2 (à un peu plus de 40 %), mais s'étendant aussi avec des abondances relatives aux environs de 15-20 % sur 3 autres classes de qualité.

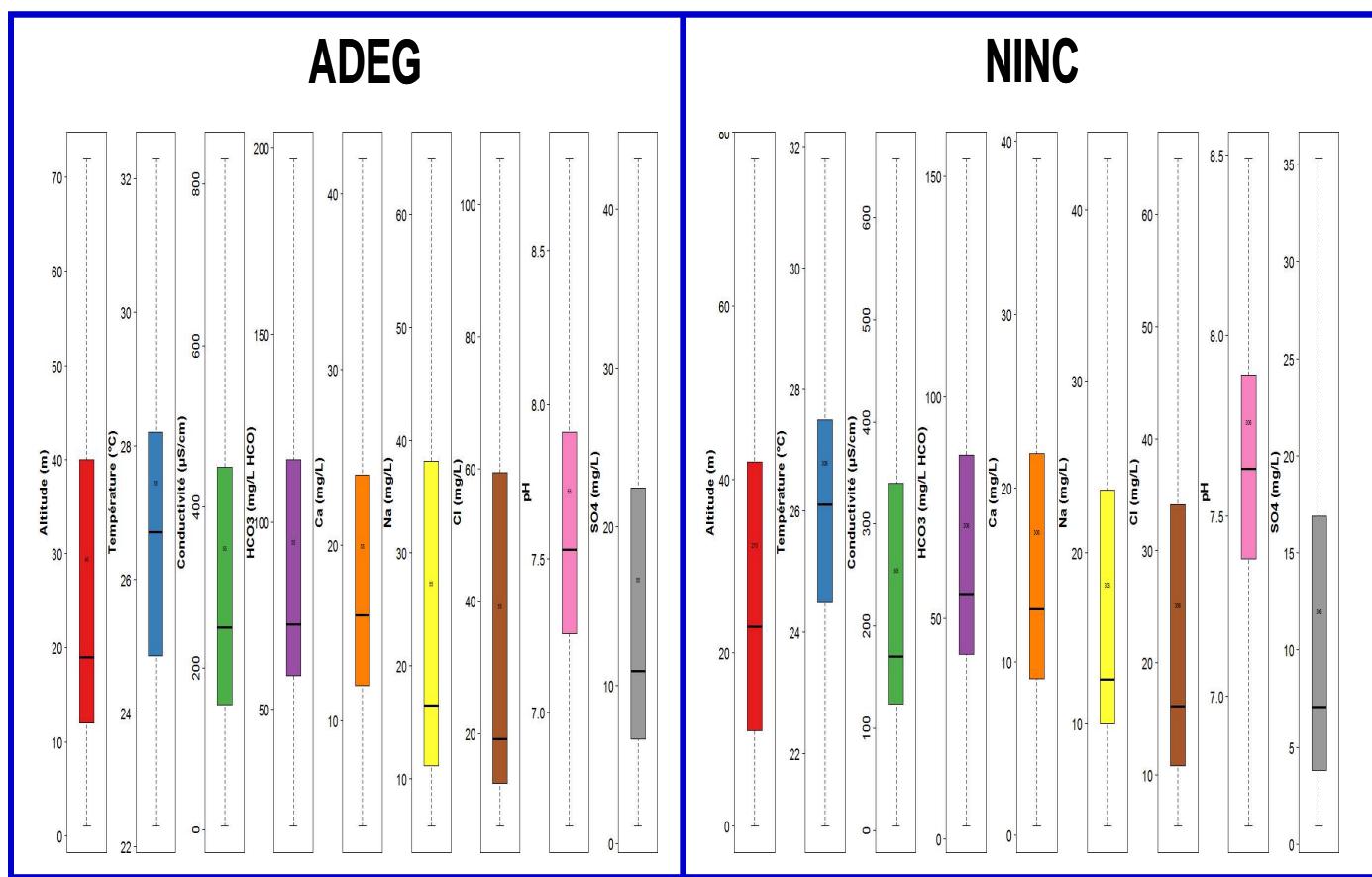
De plus, il faut rappeler qu'elle est fortement présente aussi dans les 2 seuls sites de référence des Mornes de Martinique, catégorie de qualité de fait très sous-représentée dans le jeu de données, dans son profil et probablement aussi sous-représentée ou non-représentée dans le domaine de référence du CGMA (vu que 25 % des relevés de référence ont été exclus par construction du domaine GCMA de référence et que les notes indicielles de référence données par l'IDA sont sensiblement plus basses dans cette HER que dans les HERs volcaniques).

Donc l'impression laissée par ce profil, pourtant robuste si l'on en croit le nombre élevé des occurrences par classe, est que si ce taxon est moins abondant sur les classes de référence que sur les autres, il n'en est pas exclu. Il domine même les assemblages dans les 2 sites de référence en conditions géochimiques particulières des Mornes du Sud et semble s'adapter à des conditions larges (taxon plutôt euryète, largement distribué dans les relevés issus de sites fortement minéralisés).

De plus, il faut aussi avoir en tête que la conductivité et la minéralisation plus élevée de l'eau, qui semblent correspondre à son écologie, augmentent dans le continuum amont-aval et que les activités polluantes marquantes ont plus de chances d'exercer leur effet dans les secteurs aval. On a donc peut-être une conjonction statistique de facteurs entre hydrochimie fortement minéralisée et altération, mais pas forcément une corrélation réelle entre altération et abondance relative de NINC.

Enfin, point important, il est présent à 20% et au-dessus sur 4 classes et il régresse nettement dans la classe d'altération la plus forte (Classe 1), ce qui est un signe qu'il passe hors de son domaine écologique et qu'il subit des impacts mesurables.

On peut ensuite, pour essayer d'éclairer un peu plus le statut de cette espèce, examiner plus en détails les conditions écologiques et d'anthropisation attachées aux 2 espèces que nous avons commencé de comparer.



**Figure 82 :** Comparaison des boxplots des variables naturelles aux sites où les espèces ADEG et NINC sont respectivement présentes.

**Nota 1 :** Les box-plots de variables environnementales et d'anthropisation des espèces suffisamment courantes et abondantes pour faire l'objet d'une fiche-taxon spécifique sont présentés dans le guide iconographique.

**Nota 2 :** Les représentations de la **Figure 82**, qui met en perspective les box-plots des variables naturelles aux sites où les espèces ADEG et NINC sont respectivement présentes, et de la **Figure 83** concernant cette fois les variables d'anthropisation, ont été produites sur le domaine normal de répartition des valeurs en excluant les valeurs vraiment exceptionnelles et jugées comme tel (outliers). En effet, dans le cas des diatomées, du fait du protocole de préparation mis en oeuvre, il est possible qu'une espèce soit trouvée à une station spéciale en conditions nettement hors profil écologique classique. En effet, il existe un important drift d'espèces venant de l'amont, encore plus important quand les cours d'eau sont pentus. D'autre part, du fait du mode de préparation, on digère les échantillonnages à l'acide et aux peroxydes pour pouvoir bien voir les détails des ornementsations des frustules, critères nécessaires pour la détermination taxonomique et de ce fait, on perd l'information sur la viabilité et l'état physiologique des algues prélevées, qui peuvent très bien être mortes ou en survie. Les valeurs outliers amènent une information peu fiable par rapport aux préférences écologiques des espèces, qu'il serait nécessaire de vérifier avec des protocoles spécifiques (substrats artificiels placés verticalement dans la colonne d'eau et observations de vitalité des espèces en complément du protocole d'observation-comptage classique sur matériel digéré).

**Nota 3 :** Attention: Dans les représentations graphiques de ces 2 figures, les échelles sont auto-ajustées à la couverture de domaine de chaque Box-Plot, il faut donc se baser pour leur interprétation judicieuse à l'échelle respective de chacun.

A l'examen de la **Figure 82** permettant de comparer les boxplots des variables naturelles aux sites où les espèces ADEG et NINC sont respectivement présentes, on peut constater que ces 2 espèces ont des écologies assez similaires sur le plan des **conditions naturelles**. Les optimums de température, de conductivité électrique, de carbonatation et de teneurs en Ca++ sont proches.

La seule petite différence est que NINC a un optimum de pH un peu plus élevé qu'ADEG (7,7 au lieu de 7,5) ce qui, sur le nombre élevé d'occurrences et d'abondances relatives disponibles pour NINC, se révèle en conformité avec ses préférences pour des conditions géochimiques spéciales, très minéralisées, basiques et très carbonatées.

Au vu de ces variables abiotiques plutôt d'origine naturelle, la présence de NINC semble donc fortement déterminée par des eaux fortement minéralisées et carbonatées, à pH optimal au-dessus de 7,5 et pouvant même atteindre les 8,3 ou 8,4 hors outliers (niveaux auxquels on peut trouver la présence de CO<sub>3</sub> en excès, avec possibilités de dépôts d'encroûtements calco-magnésiens CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>). Cette espèce semble plutôt thermophile, ce qui peut se juger par sa gamme de préférences au niveau de la température de l'eau et aussi par le fait qu'elle est peu occurrente en altitude.

Sa présence semble donc surtout signifier une forte minéralisation de l'eau dans des pH sensiblement au-dessus de la neutralité, et un positionnement plutôt inféodé à des avals de bassins versants avec des températures de l'eau plutôt situées entre 25 et plus de 30 degrés, ce qui exclut les zones d'altitude et donne plus de chances aussi de la rencontrer dans des environnements plus sensiblement anthroposés.

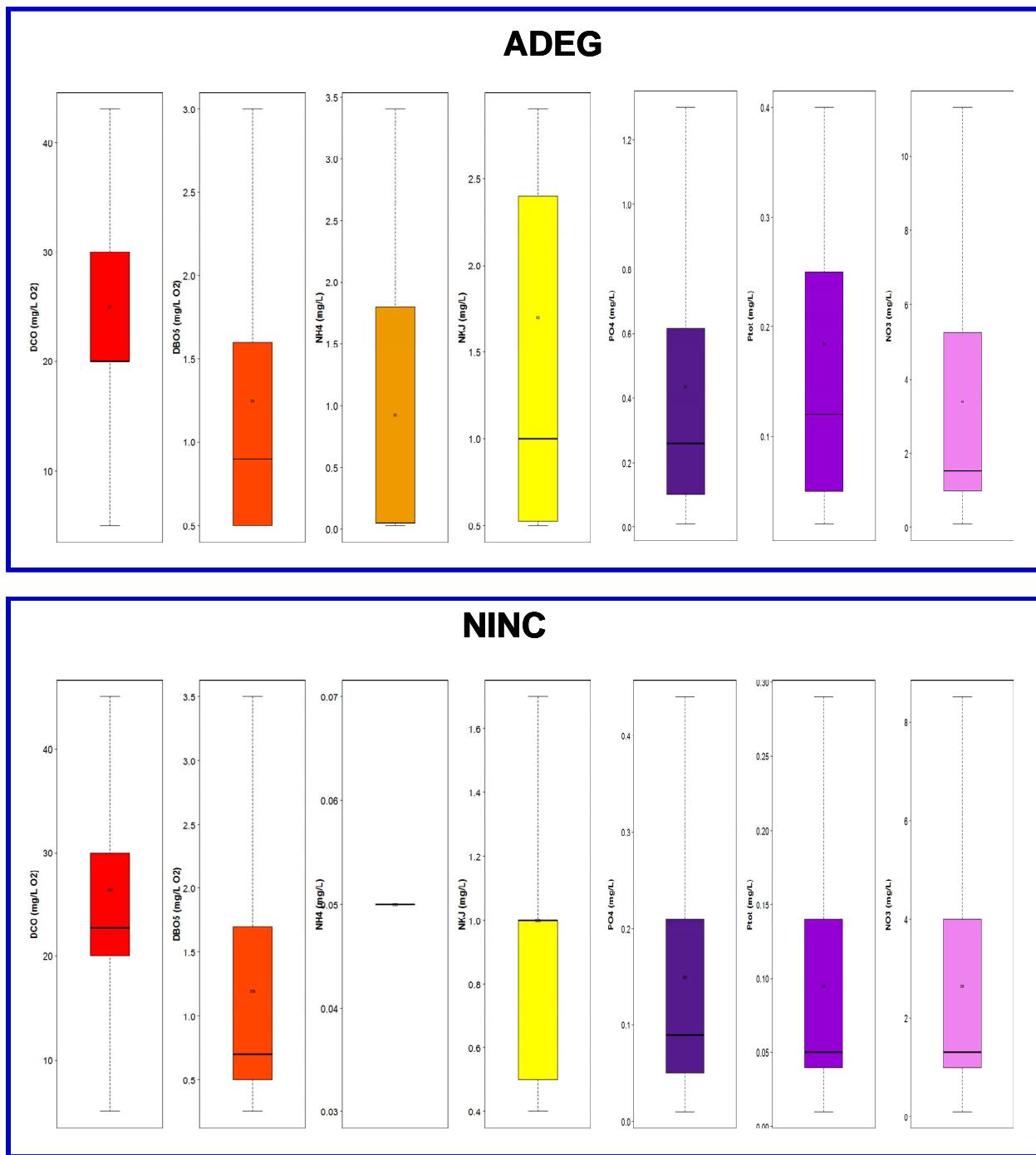
Voyons maintenant ce qu'il en est (**Figure 83** en page suivante) vis-à-vis des **descripteurs abiotiques d'anthropisation** provoquant un enrichissement des milieux aquatiques. En effet, c'est l'effet global de ce type de forçage sur les cortèges diatomiques que le nouvel indice tente de mesurer de façon sélective et efficace.

Dans les conditions tropicales et vu l'évolution rapide des échantillons (avec chute des valeurs, ce qui conduit à ne pas trop s'attacher aux valeurs absolues obtenues, mais plutôt aux inter-classements relatifs des sites), les valeurs de DB05 sont faibles pour les 2 espèces, ce qui n'est pas forcément le reflet exact de ce qui se passe dans le cours d'eau. Les valeurs optimales de DCO ne se différencient pas pour ces 2 espèces.

Par contre, ADEG a des référentiels de 2 à 3 fois plus élevés en valeurs médianes (outliers exclus) que NINC pour NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> et P Total, ce qui reflète bien son affinité plus forte avec la dégradation anthropique et matérialise bien les différences entre les deux profils de qualité vus en **Figure 81**.

NINC serait donc plutôt une espèce aimant les fortes minéralisations naturelles, elle peut s'en accommoder depuis des sites de référence jusqu'à des sites aval pollués présentant des caractéristiques hydrochimiques à fortes conductivités, à pH plutôt basiques et moyennement à fortement carbonatées. C'est un taxon euryète avec une certaine capacité d'adaptation, notamment au niveau de trophie et à l'altération anthropique. Cependant, l'examen des éléments précédents semblerait plutôt montrer (à confirmer par des protocoles complémentaires) que sa présence n'est pas déterminée par un enrichissement trophique ou organique des milieux, mais plutôt le degré élevé de minéralisation de l'eau et des pH plutôt alcalins.

Il n'est à ce stade pas possible de maintenir l'espèce dans des espèces synonymes de pollution en Martinique, au risque de bouleverser complètement le statut de sites de référence qui, s'ils ont une géochimie particulière, n'en sont pas moins exempts ou quasi-exempts de pression anthropique. Or cette espèce peut y être très largement dominante.



**Figure 83 :** Comparaison des box-plots des variables d'anthropisation aux sites ou ADEG et ou NINC sont respectivement présentes

Pour la Guadeloupe, il faut pousser un peu plus loin le diagnostic. Il serait tout d'abord intéressant de faire des profils en long de rivières sous influence carbonatée et de forte minéralisation pour repérer si l'occurrence et l'abondance relative de NINC est liée à l'apparition d'altérations ou si elle est déjà sensiblement représentée à leur amont (en prenant bien sûr en compte que l'espèce a un optimum plutôt thermophile. Elle sera difficilement présente en altitude sauf phénomène thermal influant sur la température de l'eau *in situ*), ce qui peut cependant exister dans certains bassins volcaniques avec influences minérales et thermiques liées à des sources thermales.

Il faudrait aussi regarder plus en détails *via* ce type d'approche complémentaire de terrain si, à côté de cette espèce aimant la carbonatation et les fortes conductivités, il n'existe pas de façon marquée dans les assemblages d'autres espèces (par exemple, d'autres espèces motiles nitzschiacées et certaines naviculacées de zones dégradées) dont la liaison avec l'altération est indiscutable et peut marquer de façon suffisante les notes indicielles (par exemple des espèces saprobes, d'autres eutrophes, d'autres sensibles à l'ammoniac, à la demande en O<sub>2</sub> etc...), dont l'augmentation réelle dans les assemblages serait provoquée par la pression de pollution.

Si c'est le cas, il serait possible de moduler différemment l'intervention des espèces-cibles dans le calcul d'indice en donnant un poids plus important aux taxons dont le statut vis-à-vis de l'altération est particulièrement net, et donner moins de poids dans le calcul à d'autres espèces au profil de qualité plus controversé. Une autre possibilité, si cette première piste ne se révèle pas à même de régler ce problème, serait de faire différer légèrement l'assise-taxons de l'indice pour la Martinique et la Guadeloupe. Ca peut bien sûr se concevoir mais, outre qu'il vaudrait mieux que ce soit justifié scientifiquement par des observations nettes dans ce sens sur le plan écologique (*cf* publication scientifique de l'indice en journaux peer-reviewed), ça risque de compliquer un peu, en pratique, la mise en œuvre différenciée sur une île et sur l'autre, notamment par des opérateurs de Marchés Publics.

A ce stade, donc, les tests réalisés pendant les démarches de création de l'indice n'ont pas encore permis de régler ce problème de façon complètement satisfaisante et il manque un peu d'information plus précise amont-aval de zones altérées pour conforter ce point de connaissance et adapter la méthode de façon la plus judicieuse. La réflexion est donc encore en cours, et les pistes ci-dessus devraient être creusées un peu plus avant pour essayer de trouver une bonne solution.

D'autres solutions que le tout ou rien pour NINC et que l'inclusion de l'espèce comme taxon d'alerte sur les massifs volcaniques et pas sur les zones carbonatées (grille plus sévère sans NINC, ré-adaptation de l'échelle d'EQRs) sont également possibles et à travailler courant 2013 pour résoudre le problème posé de façon satisfaisante.

Cependant, même s'il est certain qu'on arrivera à stabiliser une solution opérationnelle correcte pour le Plan de Gestion à venir, il n'est pas exclu qu'il faille attendre une base de donnée plus importante afin d'augmenter les référentiels sur l'importance de cette espèce, ou d'autres espèces qui aideraient à résoudre ce problème spécifique en Guadeloupe, permettant ainsi à moyen terme de consolider la liste et les profils des espèces constitutives, en particulier des taxons d'alerte, et au final la sensibilité et la performance de l'indice.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

**Partie III :**  
**Modifications du cadre interprétatif de**  
**l'IDA (Post-Copil du 14-12-2012)**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## VI. MODIFICATION DE L'INDICE DIATOMIQUE ANTILLES (POST-COPIL)

En préambule, il faut noter que quelques actualisations de la base taxonomique ont été prises en compte post-Copil, certaines sans incidence sur l'assise de l'indice, d'autres ayant entraîné une modification de la matrice spécifique (regroupements de quelques taxons, ainsi qu'une suppression d'espèce). De ce fait, la CCA restreinte destinée à définir le gradient d'anthropisation a dû être refaite, et les listes de taxons d'alerte (Annexe 10), de valeurs des profils de l'IDA (Annexe 11) et de représentation des profils de qualité des taxons de l'IDA (Annexe 12) ont été modifiées :

- Nombre d'espèces-cibles de l'IDA (taxons d'alerte) : 48 pour la version s'appliquant dans l'HER regroupée « Plaine », 49 pour la version s'appliquant dans l'HER regroupée « Volcan » avec inclusion de NINC
- Nombre d'espèces intervenant dans le calcul de l'IDA : 177 au lieu de 189, suite à des évolutions taxinomiques et à quelques regroupements.

Pendant le Comité de Pilotage du 14-12-2012 ont été longuement évoqués les problèmes liés à la présence de NINC. Cette espèce est à coup sûr révélatrice d'eaux dotées d'une forte conductivité électrique et très minéralisées, avec une forte charge en carbonates. Elle est fortement présente dans les sols très carbonatés des Mornes du Sud de la Martinique où elle est l'espèce dominante (abondance relative moyenne de 46%). De plus, elle peut aussi nettement dominer l'assemblage sur les sites de référence ou de pseudo-référence de cette HER à certaines dates et atteindre jusqu'à 77% de l'abondance relative d'un relevé. Les déterminants de sa présence semblent donc être plutôt naturels et il n'est pas possible dans une telle zone de lui donner un profil de taxon d'alerte. Par contre, sur les HERs Volcans, cette espèce n'apparaît qu'en cas d'augmentation de la conductivité électrique, souvent conjuguée avec des effets d'anthropisation sur ces zones à faible minéralisation des eaux. Mais certaines influences thermales naturelles ne sont pas exclues non plus.

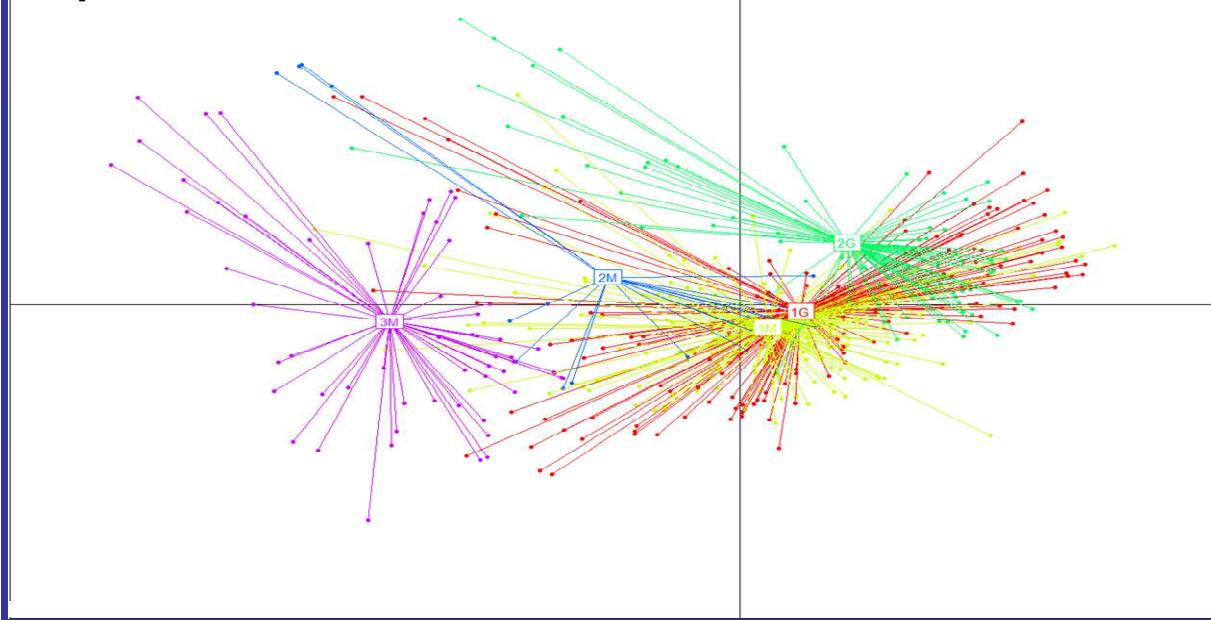
Le message porté par cette espèce est donc ambigu selon les caractéristiques géochimiques de la zone, et il apparaît nécessaire d'obtenir une information plus détaillée sur des profils en long de rivière afin de voir à quelle augmentation de descripteurs abiotiques correspond réellement l'apparition de cette espèce. Cette question est plus particulièrement à éclaircir sur l' HER 1 « Volcan humide » en Guadeloupe et sur l'HER 1M « Pitons du Nord » de Martinique pour démontrer si son apparition est plus liée à une augmentation naturelle de la minéralisation et de la thermique dans le cours d'eau ou à une origine anthropique. Sur la zone des Mornes, il est aussi question en 2013 d'effectuer des prospections complémentaires afin de valider ou non le statut de référence des 2 stations actuelles (VAUm, PILm), d'essayer d'en trouver d'autres et d'étudier la variabilité annuelle de l'hydrochimie de ces stations de référence.

Une suggestion formulée en Comité de Pilotage était d'essayer de regrouper les HERs fortement minéralisées, où NINC fait indiscutablement partie des flores naturelles, et de ne pas lui attribuer de statut d'espèce d'alerte dans ces zones. Par contre, et dans l'attente d'informations hydroécologiques complémentaires, il a été testé le scénario d'utiliser cette espèce comme taxon d'alerte dans les HERs moins minéralisées (volcans).

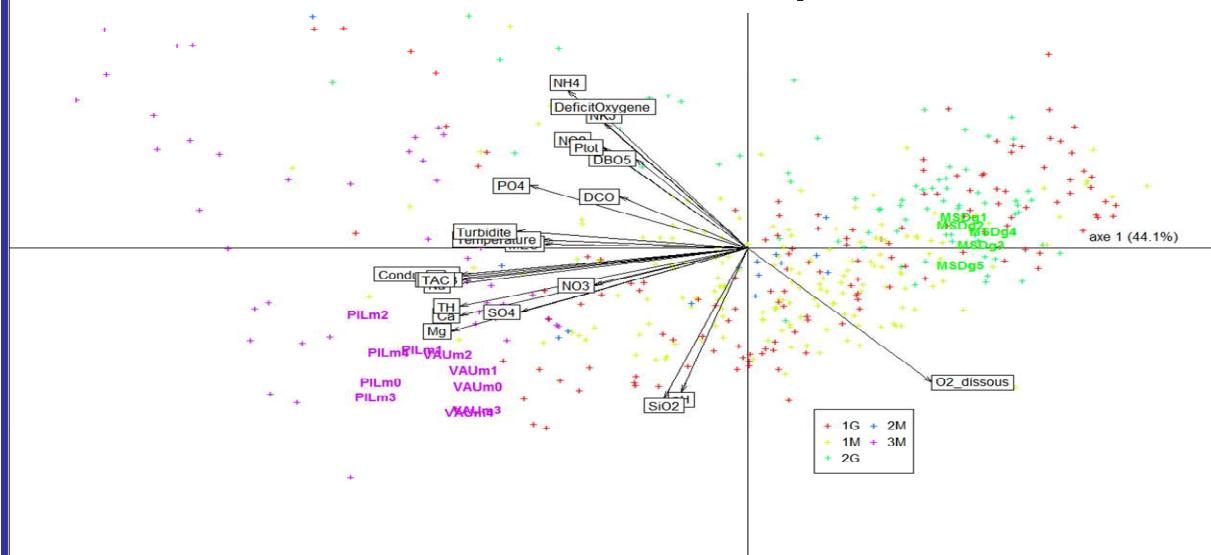
## A. Regroupement des HERs

Certaines HERs étant dépourvues ou presque dépourvues de sites de référence, il a tout d'abord été nécessaire d'étudier quels regroupements d'HERs étaient possibles sur le plan des caractéristiques abiotiques naturelles des sites, afin de procéder au regroupement des HERss aux conditions naturelles les plus proches (notion de référence adéquate recommandée par la DCE) et d'utiliser la grille d'EQRs la plus pertinente.

### a) Projection des HERs dans l'ACP complète



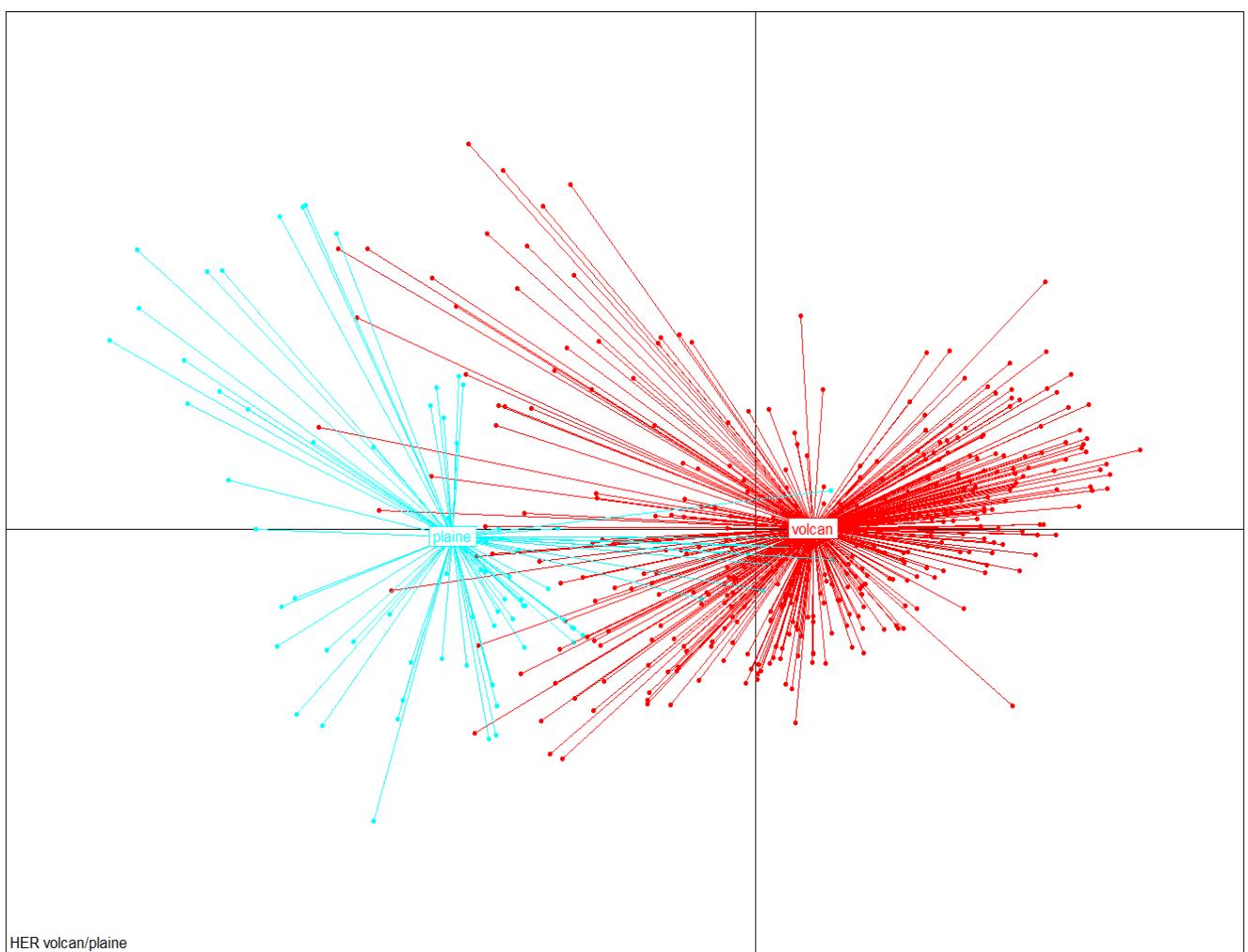
### b) Positionnement de sites de référence dans l'ACP complète



**Figure 84 :** a) projection des HERs dans l'ACP complète ; b) aperçu du positionnement des sites de références des HERs 2G (MSD, en vert) et 3M (PIL, VAU, en mauve)

La Figure 84 (page précédente) projette les HERs dans l'ACP complète associant toutes les variables chimiques disponibles (naturelles et d'anthropisation). L'important est d'associer de la façon la plus pertinente les HERs faiblement pourvues ou dépourvues de références (HER 2G « Plaines humides de Guadeloupe », HER 2M « Plaine du Lamentin ») avec les HERs les plus semblables et pourvues de sites de référence. La **Figure 40**, qui donne l'organisation des principaux gradients naturels et anthropiques, fournit le cadre interprétatif nécessaire pour asseoir et justifier les regroupements d'HERs proposés post-Copil. Il est rappelé en résumé que les situations de référence se localisent en bas du nuage de données, avec un gradient de minéralisation et carbonatation naturelle allant de la droite (sites sur substrats volcaniques peu altérés et peu minéralisés) vers la gauche (sites de référence de la zone des Mornes de Martinique, sur substrats de tufs et tufs altérés). Les points extrêmes à gauche sont des sites sous influence haline. Le gradient d'altération anthropique (variables trophiques et saprobiques) se déploie vers le haut et la gauche par rapport aux conditions de référence dans les mêmes clusters.

Vu le positionnement de la station MSD, unique site de référence de l'HER 2G « Plaines humides de Guadeloupe » (en vert, Figure 84 b), on repère le caractère peu minéralisé et peu carbonaté de cette zone naturelle (positionnement dans la zone plutôt en bas à droite du nuage de données). Il apparaît donc pertinent de regrouper cette HER avec les 2 HER peu minéralisées 1G « Basse-Terre Volcans humides » et 1M « Pitons du Nord ». **Ce groupe d'HERs dite HER regroupée « Volcan » fera l'objet d'un calcul d'IDA utilisant NINC comme taxon d'alerte.**



**Figure 85 :** Projection des nouvelles HERs regroupées (« Volcan » et « Plaine ») dans l'ACP complète.

**L'HER 2M « Plaine du Lamentin »**, dépourvue de référence, présente la minéralisation naturelle la plus proche de l'HER 3M « Mornes du Sud » et a été logiquement regroupée avec celle-ci **dans l'HER regroupée « Plaines minéralisées »**. Pour les calculs d'IDA sur cette zone, **NINC, qui est l'un des taxons les plus abondants en fonction des conditions fortement minéralisées et carbonatées**, a été considérée comme un taxon naturel.

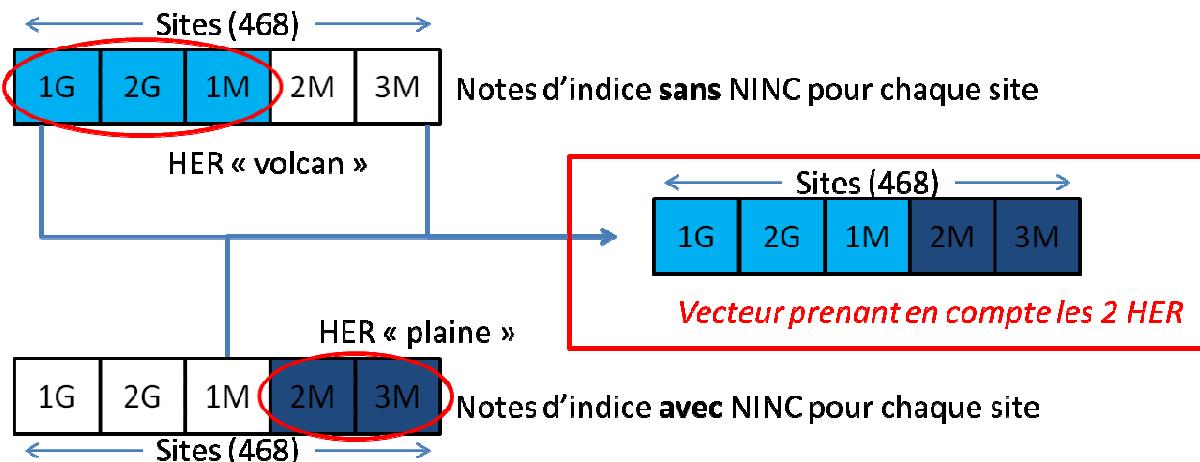
Les projections des relevés des 2 ensembles d'HERs regroupées selon leurs caractéristiques naturelles sont donc représentées dans l'ACP complète en Figure 85 (page précédente). Cette figure montre la réalité de la base naturelle de regroupement et, d'autre part, le déséquilibre numérique entre ces 2 types de substrats naturels (nette dominance de sites appartenant à la typologie « Volcan »).

## B. Création des classes d'Etat

La création des classes d'Etat (notion de classement basé sur les assemblages biologiques) passe par une interprétation des notes d'indice et la mise en place d'une grille de seuils. La difficulté est que, dans le schéma post-comité de pilotage, on utilise 2 variantes d'IDA, l'une sans intervention de NINC comme taxon d'alerte, réservée à l'HER regroupée « Plaine » correspondant aux zones fortement carbonatées de Martinique (cf Partie II du rapport), l'autre avec prise en compte de NINC comme taxon d'alerte (HER peu minéralisée « Volcan » associant aussi la Plaine du Nord de Guadeloupe).

Nous avons donc calculé les notes d'indice de chacun des sites en fonction de leur HER de regroupement et avec la variante d'indice correspondante.

Les notes d'indice de tous les sites ont ensuite été concaténées dans un nouveau vecteur prenant en compte les 2 HERs de regroupement (**Figure 86** ci-dessous).



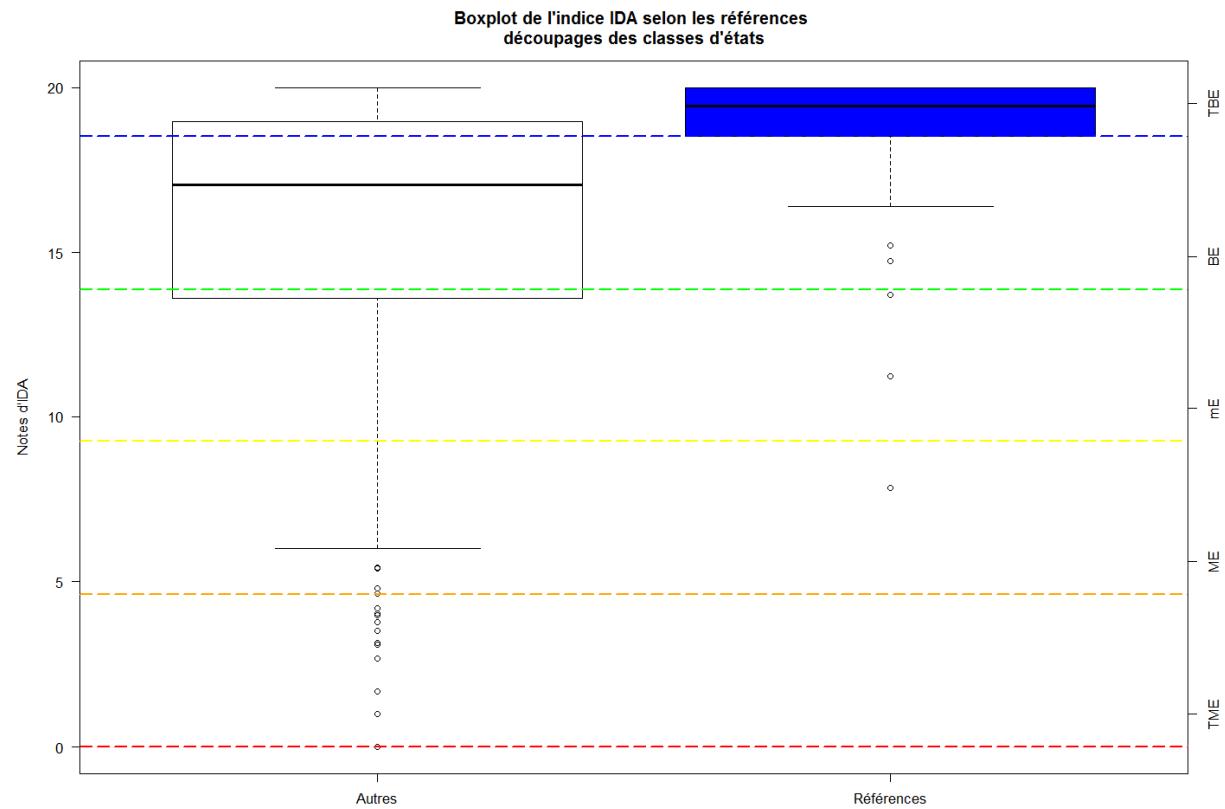
**Figure 86 :** Discrétisation des notes d'indice utilisant la variante adéquate d'IDA par regroupement d'HERs Post-Copil, en classes d'Etat

Le vecteur résultant a été ensuite discrétisé en classes d'état par la même méthode que dans la **Figure 69** (pré-Copil), à savoir la limite TBE-BE définie par le percentile 25 des notes des sites de référence, le reste du vecteur étant divisé en 4 classes équidistantes de valeurs d'indice.

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

La distribution des classes d'état basée sur la distribution des notes d'IDA sur les HERs regroupées Post-Copil est représentée en **Figure 87** ci-dessous.

On peut noter quelques changements de positionnement entre box-plots des sites et limites de classes d'état par rapport à la situation avant Copil (cf **Figure 69**).



**Figure 87 :** Discréétisation du vecteur des notes d'indice prenant en compte les nouvelles HERs regroupées (Post-Copil)

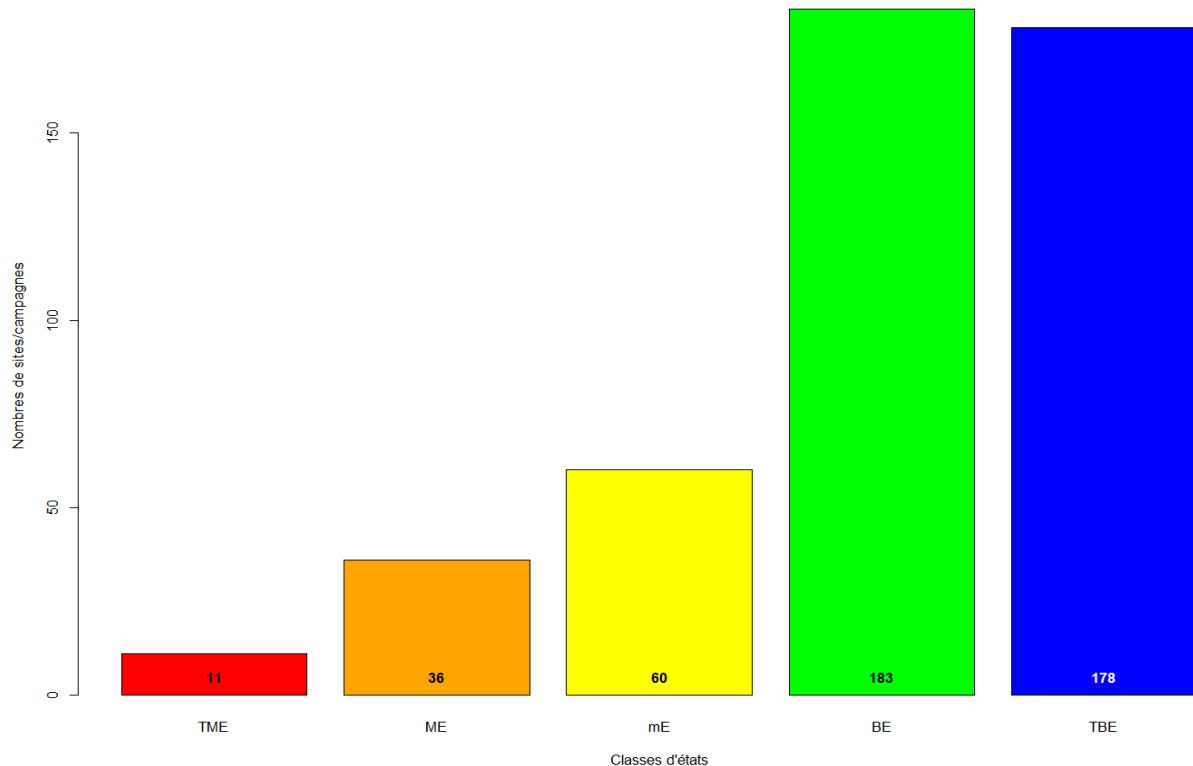
Les nouvelles limites de classes d'état sont données en **Tableau 22** : Limites des classes d'état biologique diatomique . Du fait de la prise en compte de NINC dans l'HER regroupée « Volcan », qui conduit à une baisse de note de certains sites de référence, le domaine de la classe de TBE s'élargit vers des notes un peu plus basses par rapport au **Tableau 19** : Limites des classes d'états. Limites des classes d'état pré-Copil.

TME	ME	mE	BE	TBE
[0-4.6]	]4.6-9.2]	]9.2-13.8]	]13.8-18.53]	]18.53-20]

**Tableau 22 : Limites des classes d'état biologique diatomique Post-Copil**

Pour la même raison d'étendue plus large du domaine de TBE, les classes de TBE et de BE se rééquilibrent et le gradient d'altération biologique est représenté de façon plus progressive.

La **Figure 88** donne les effectifs globaux de sites par classe d'état sur tout le jeu de données, selon les HERs regroupées. On peut remarquer, en fonction de la prise en compte d'une gamme de notes plus large et plus basse pour les sites de référence de l'HER regroupée « Plaines » concernant les sites fortement minéralisés de Martinique, un ré-équilibrage d'effectifs des classes de TBE et de BE (**Figure 88**) par rapport au scénario Pré-Copil (**Figure 70**).



**Figure 88 : Barplot des nombres de sites par classe d'état**

La proportion globale des sites altérés qui basculent sous le seuil du Bon Etat est plutôt réaliste et en conformité avec l'expertise de terrain.

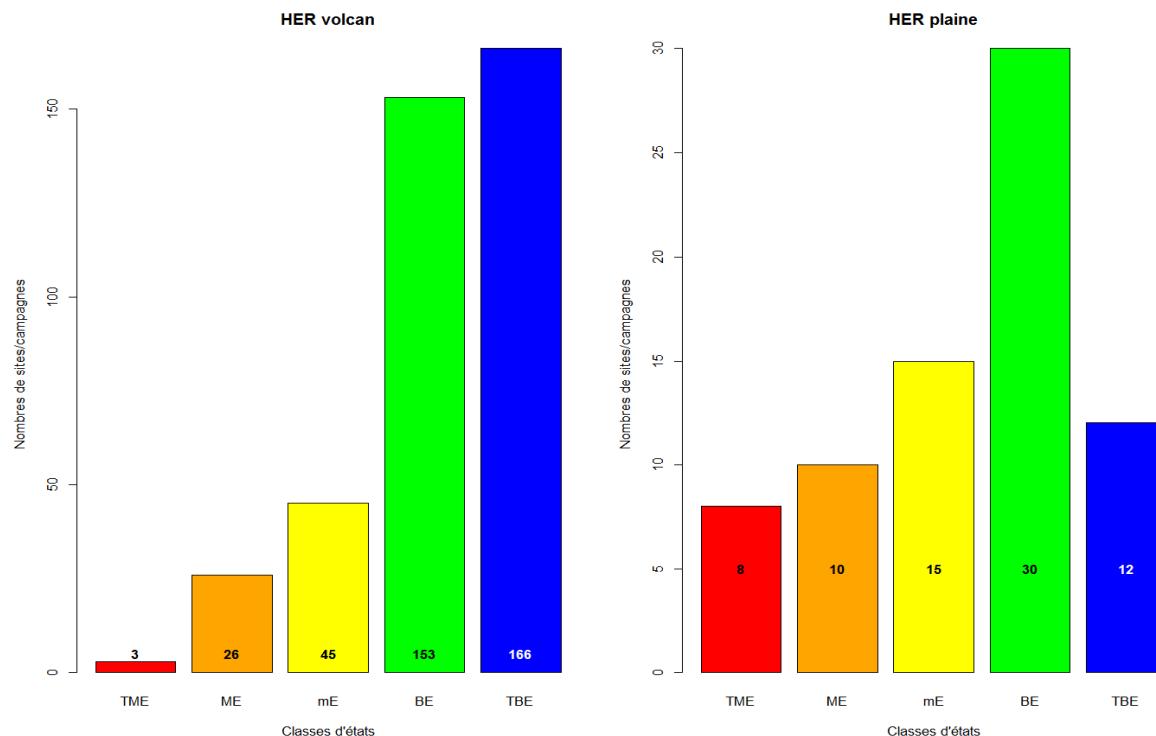
La ventilation en nombre de sites par Classe d'Etat (base biologique, notes d'IDA) en fonction des HERs regroupées, selon le scénario Post-Copil, est présentée en **Figure 89** (page suivante).

Les échelles d'effectifs sont différentes (nettement plus de sites d'étude dans HER «Volcan »). La répartition des sites en classes d'Etat biologique basées sur les notes brutes d'IDA est globalement en bon accord avec la connaissance et l'expertise du terrain. En effet, il y a sensiblement plus de sites en TBE et en BE dans l'HER « Volcans », peu anthropisée en altitude du fait du relief, de la pente et des milieux naturels préservés, que dans l'HER carbonatée (qui contient seulement 2 sites considérés comme de référence).

La proportion de sites altérés est plus forte dans l'HER « Plaine » que sur les reliefs. C'est lié à des conditions naturelles (plus faibles pentes, sols profonds, parfois proximité des zones littorales) favorisant les occupations ou activités anthropiques (villes et villages, grosses infrastructures de type aéroport, zones industrielles et commerciales, agriculture intensive...).

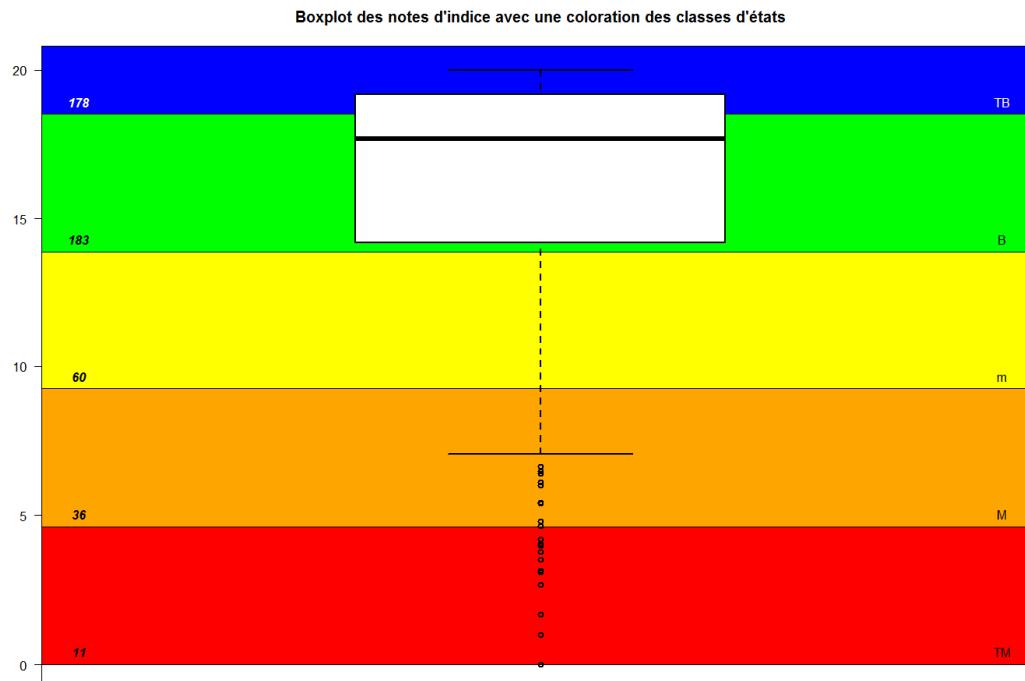
**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

Dans le scénario actuel (HER regroupée « volcan » avec NINC en taxon d'alerte, il semble que le degré d'altération sur la zone volcan soit un peu surévalué, ou du moins pose problème sur certains sites particuliers.



**Figure 89 : Barplot des nombres de sites par classe d'état en fonction du type d'HERs ,  
volcan (gauche) ou plaine (droite)**

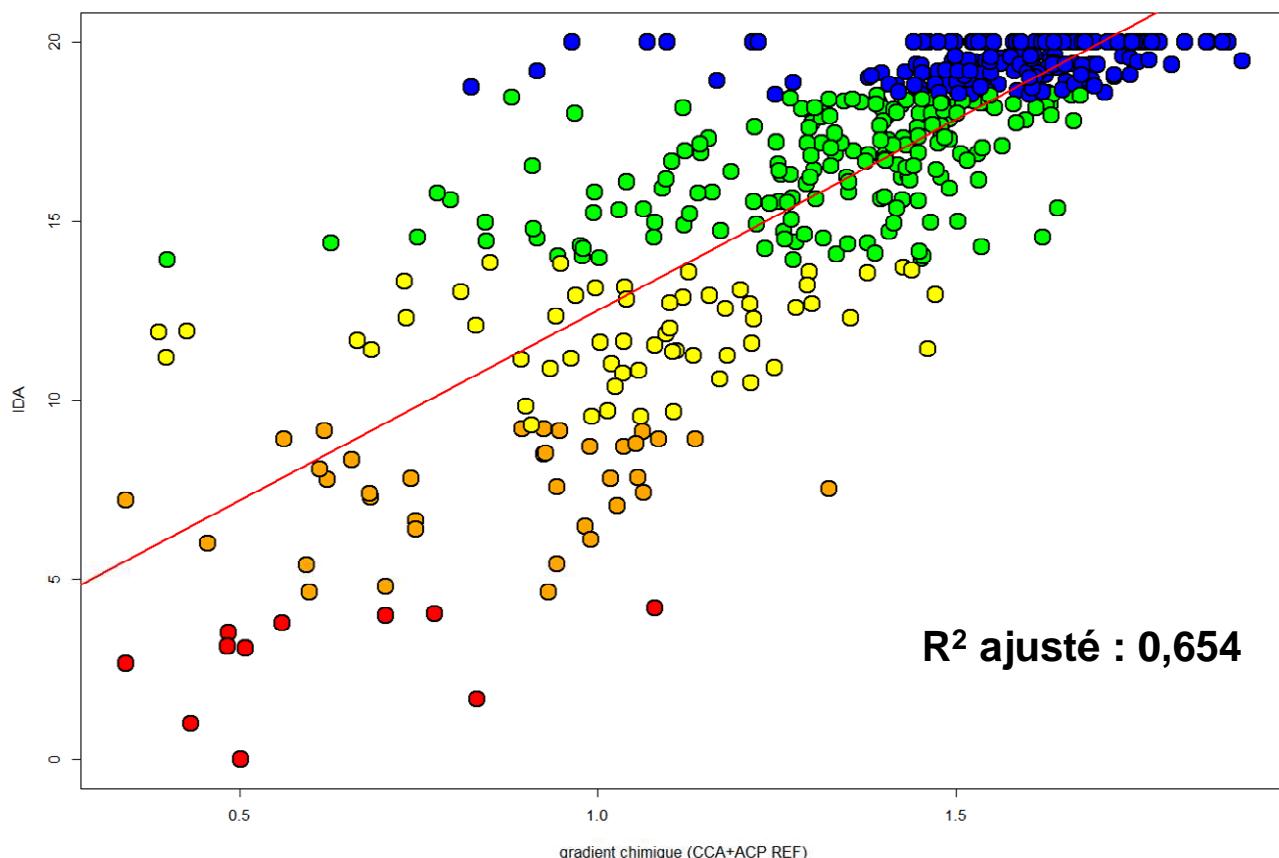
La **Figure 90** représente la distribution des notes d'indice selon le scénario Post-Copil.



**Figure 90 : Boxplot des notes d'indice. Les couleurs représentent les classes d'état après  
discrétisation du vecteur. Les chiffres à gauche représentent le nombre de sites par  
classe et les lettres à droite sont les noms des différentes classes**

La **Figure 90** a été construite toutes HERs confondues (notes d'indice calculées et concaténées comme indiqué en Figure 86), avec la contribution de NINC comme taxon d'alerte sur zone « Volcan », mais sans NINC comme taxon d'alerte sur zone fortement minéralisée.

La **Figure 91** représente la relation pression-impact entre score du GCMA et note d'indice par relevé (site x date).



**Figure 91 :** Notes d'IDA en fonction des valeurs du gradient d'anthropisation (GCMA)

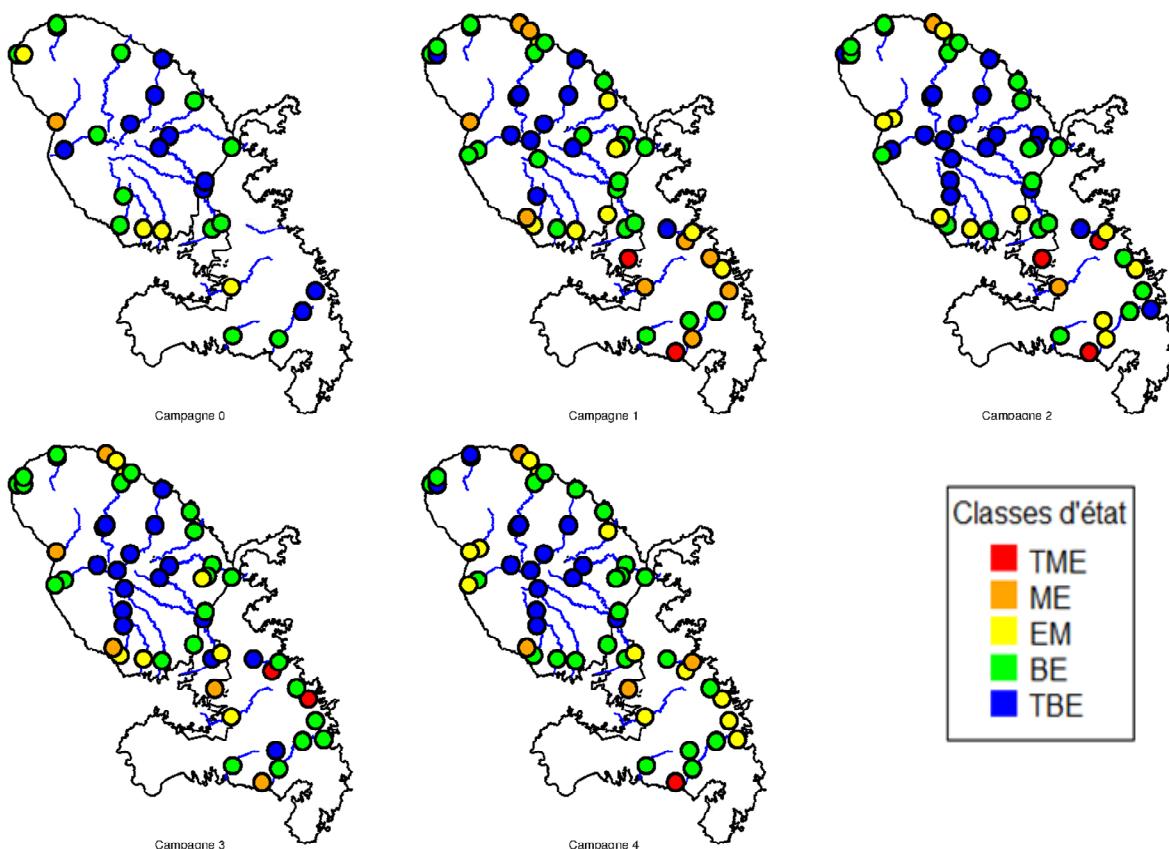
Dans cette relation, on peut repérer quelques points très décentrés qui sont un signe assez manifeste que l'intégration temporelle des descripteurs chimiques est parfois prise en défaut (une seule date de chimie sur échantillon ponctuel pour représenter de 2 à 3 mois d'ambiance chimique dans le milieu). Ces phénomènes de correspondance imparfaite entre chimie et biologie sont plus probables à l'aval d'installations collectives ou industrielles à rejets non constants en quantité et qualité (STEPs, usines agro-alimentaires...) ou en cas d'épisode hydrologique un peu particulier (instationnaire), non représentatif de l'ensemble de l'épisode temporel concerné par l'échantillon de biofilm diatomique (débits et niveaux plus élevés qu'en régime de base, avec notamment augmentation de charge en MES et en turbidité)...

A noter que dans une telle mise en relation, du fait de son pouvoir bio-intégrateur plus important (de l'ordre de 1,5 à 3 mois), la réponse biologique est considérée comme plus assise et plus fiable que la valeur de gradient abiotique correspondante, basée sur un échantillonnage ponctuel. C'est un intérêt reconnu de la bio-indication et une raison forte pour laquelle celle-ci a été mise en avant dans la DCE.

Malgré quelques points assez sensiblement décentrés et sans aucune suppression d'outliers, la qualité générale de la relation est plutôt bonne pour une métrique biologique, dont le coefficient de détermination s'établit à 0,654.

Les résultats d'évaluation de la qualité des relevés (site x date) selon leur appartenance à l'une ou à l'autre des « HERs regroupées » ressortent améliorés par rapport aux 2 référentiels d'indices proposés pré-Copil (respectivement sans ou avec NINC sur tous les sites Antilles). La physionomie générale de la qualité des sites est consistante et assez fidèle à la représentation qu'en ont les experts de terrain. Les attributions de classes de qualité selon les HER regroupées semblent assez fidèles aux altérations connues, qu'elles soient liées à de l'agriculture, à de la pollution diffuse d'origine mixte (agricole et domestique liée à de l'habitat rural mité), à des infrastructures collectives (on retrouve bien les impacts des STEPs, des distilleries) ou de l'urbanisation.

Observons les résultats de ce scénario post-Copil sur les cartes d'évaluation d'état biologique des sites par campagne.



**Figure 92 :** Nouvelle carte d'état de la Martinique à partir des notes d'IDA, selon la méthodologie « post-copil ».

**La Martinique (Figure 92) reste plus impactée en moyenne que la Basse-Terre de Guadeloupe (Figure 93), ce qui est conforme à la connaissance pré-existante.**

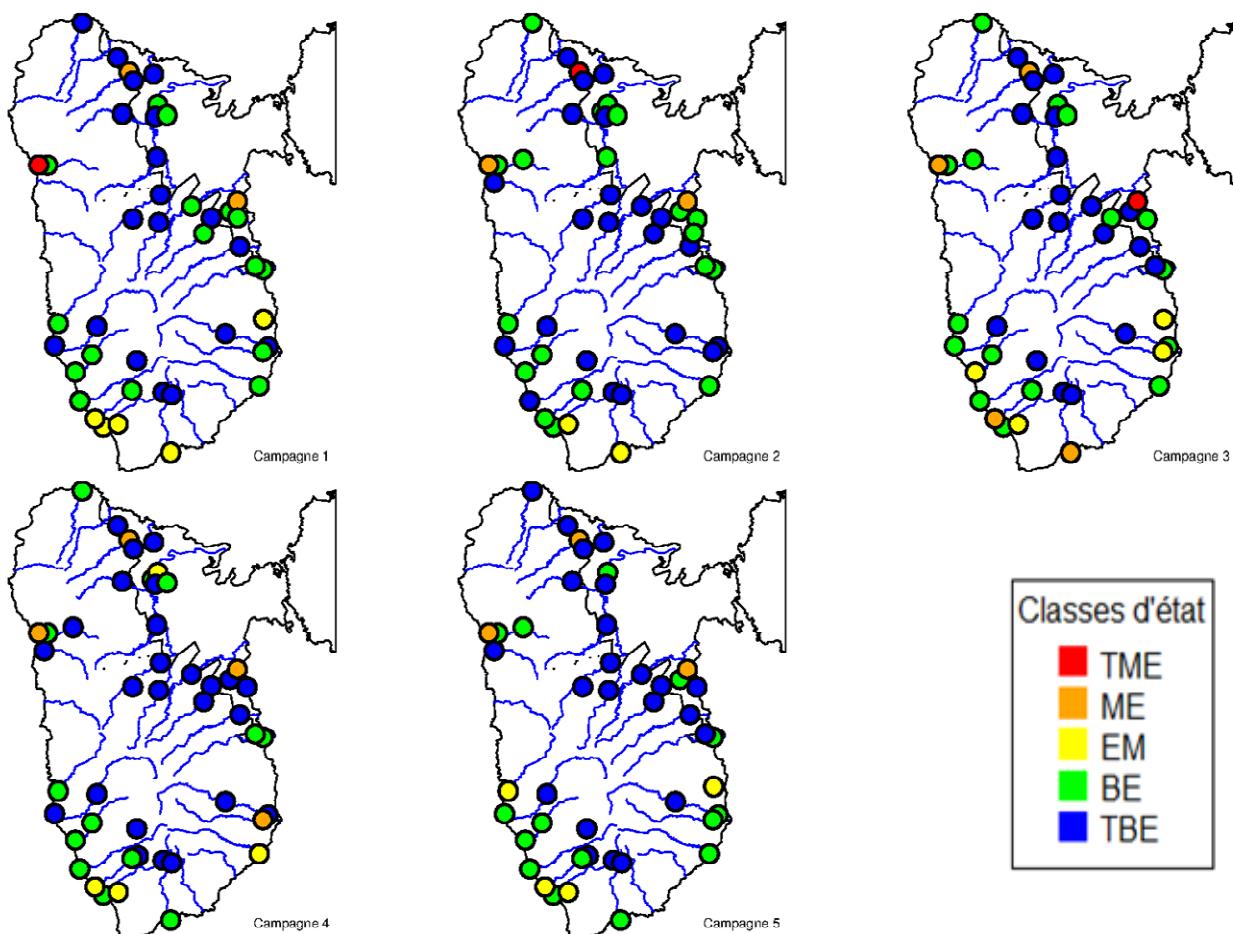
NINC n'étant pas considérée comme taxon d'alerte sur l'HER regroupée la plus minéralisée (HER « Plaine » de Martinique, regroupant la zone des Mornes et la Plaine du Lamentin), les sites de cette zone apparaissent le plus souvent altérés, ce qui est logique du fait que la plupart d'entre eux subissent des pressions anthropiques de non négligeables à fortes.

Par contre, les sites de la meilleure qualité (VAU, PIL) parviennent cette fois à ressortir en TBE (bleu) ou en BE (vert), ce qui est plus conforme à leur statut de référence ou pseudo-référence sur cette HER.

Sur les volcans et avec l'intervention de NINC comme taxon d'alerte, les sites en très bon état et les sites sous pression anthropique connue se classent de façon logique.

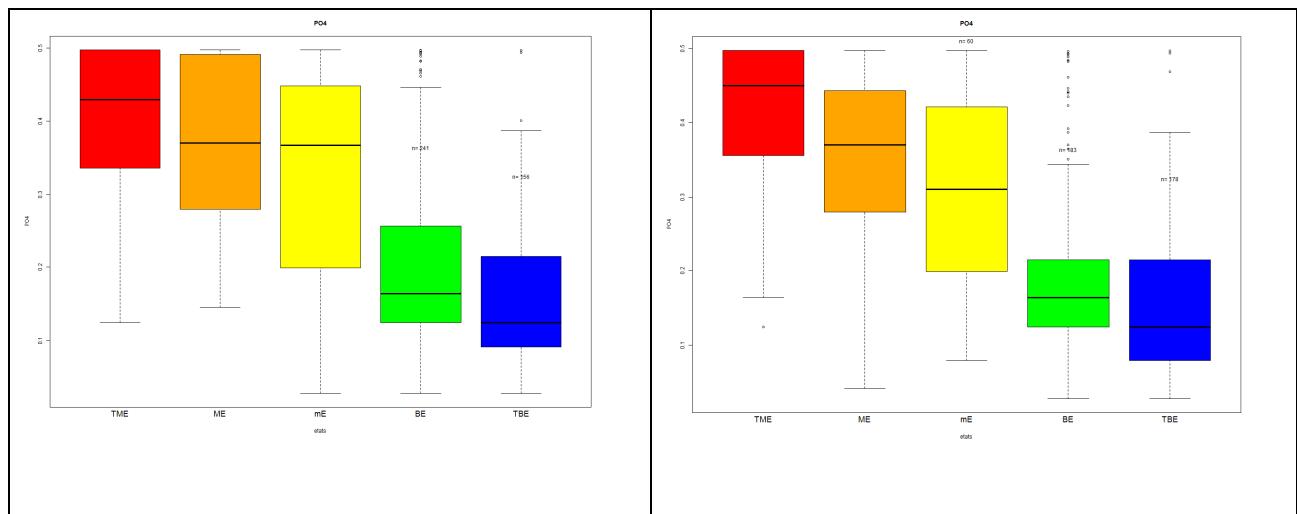
Cependant, même si la prise en compte ou la non prise en compte de NINC selon la zone géographique améliore le diagnostic dans la plupart des cas, il reste un petit nombre de sites dont le classement n'est pas jugé conforme à l'avis d'expert, au moins à certaines dates. C'est le cas notamment de l'Anse Céron (CER), site réputé à très faible pression anthropique qui peut se trouver classé en-dessous du Bon Etat, ce qui n'est pas conforme à l'avis d'expert. C'est la présence de NINC qui, à elle seule, semble provoquer le déclassement de ce site (cf campagne 0).

**Il faudra donc continuer à préciser l'écologie de cette espèce et les déterminants réels de sa présence**, qui paraissent être plus liés à une influence naturelle particulière (forte minéralisation, conditions thermiques de moyennes à élevées...) qu'aux déterminants synonymes d'anthropisation. Des études complémentaires pour acquérir plus d'information écologique, notamment sur ce taxon, sont envisagées en 2013 sur les 2 Antilles.



**Figure 93 :** Nouvelle carte d'état de la Guadeloupe à partir des notes d'IDA, selon la méthodologie « Post-Copil »

Le gradient composite sur lequel a été bâti l'indice propose une représentation intégrée de 9 variables influencées par l'anthropisation. La vérification globale de la bonne qualité de la relation pression-impact à partir de celui-ci a été illustrée précédemment (cf **Figure 91**). Pour la vérification de la bonne prise en compte du degré d'anthropisation par les notes d'indice, il peut aussi être intéressant d'observer la réponse de celui-ci aux différents descripteurs séparés, même si la pertinence du nombre de classes et la physionomie de la relation peuvent varier d'un descripteur à l'autre. A titre d'exemple, la **Figure 92** ci-dessous permet de représenter la répartition par classe d'état des notes d'IDA en fonction du gradient de PO4, qui est le paramètre d'anthropisation réputé le plus influent sur l'eutrophisation des cours d'eau.



**Figure 94 : Comparaison des valeurs de PO4 dans chacune des classes avant (gauche) et après (droite) la modification par le regroupement selon HER volcan et plaine.**

Sur la partie gauche de la figure, on voit la répartition pré-Copil, à droite, la répartition post-Copil. Dans les 2 cas, la réponse de l'indice aux orthophosphates se fait selon un gradient cohérent avec la classe d'état.

On note cependant quelques différences : la réponse au niveau du gradient des médianes, descripteur synthétique important, semble plus fidèle avec la méthode post-Copil, ce qui révèle une amélioration *via* ce scénario méthodologique. Cependant l'évolution n'est pas toujours aussi consistante si l'on se focalise sur la distribution complète des sites dans chaque classe.

## C. Transformation des notes d'IDA en EQRs

La re-normalisation de la mesure d'écart à la référence par le biais de la mise en place d'EQRs (= Ecological Quality Ratios) selon les HERs regroupées a ensuite été réalisée afin de comparer les sites anthropisés aux eaux peu minéralisées aux références de la zone « Volcan » et celles des zones fortement minéralisées à celles de la zone « Plaine ».

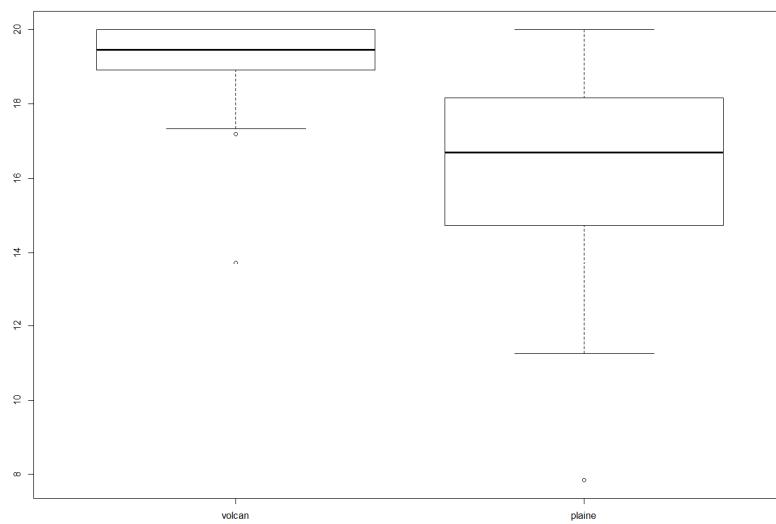
La procédure de calcul est la même que celle utilisée pré-Copil.

**Calcul de l'EQR pour un site i :**

$$NoteEQR_i = note_i / med(siteRef_{HERi}), \text{ où } HERi \text{ est l'HER auquel appartient le site } i.$$

**Rappel :** La médiane des notes de référence pour l'HER considérée aura par définition la valeur de 1 et servira de niveau de référence, la note indicelle minimale qu'il est possible d'atteindre dans l'HER considérée correspondra par construction à un EQR de 0.

La **Figure 95** représente les boxplots des sites de référence (partie gauche) et les valeurs de référence (partie droite) pour les HERs regroupées.



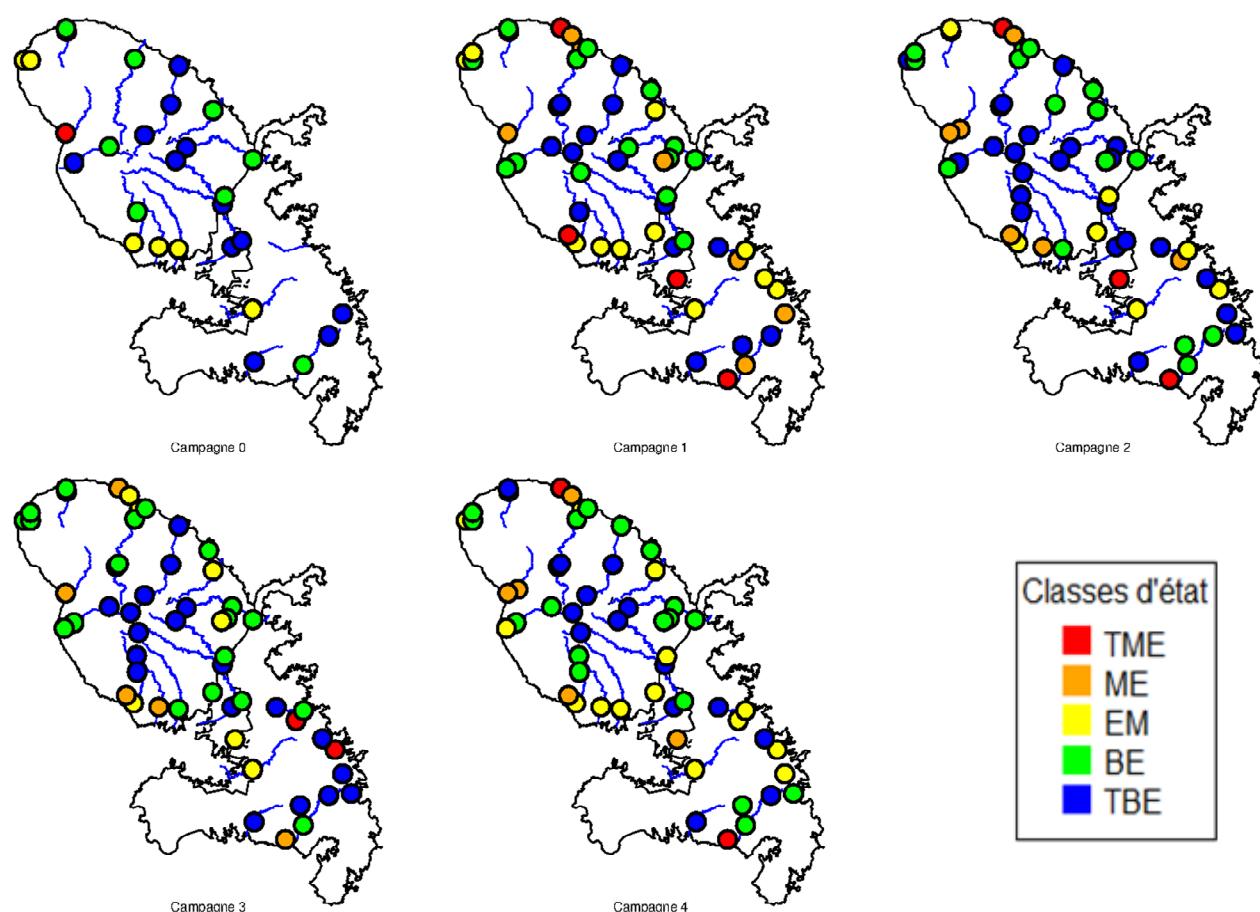
**Figure 95 : Boxplot des notes des sites de référence selon les HERs « Volcan » et « Plaine »**

Malgré la prise en compte de NINC comme taxon d'alerte, le regroupement d'HERs « Volcan » a des notes d'indice de référence sensiblement plus hautes que le regroupement « Plaine ». La re-normalisation permet donc la maîtrise d'une importante variabilité naturelle résiduelle et permet donc un gain pour l'isolation de l'effet anthropique.

Les cartes d'état des sites après re-normalisation en EQR sont données en **Figure 96** (Martinique) et **Figure 97** (Guadeloupe). L'expertise de ces cartes révèle que ce compromis est plus satisfaisant que la prise en considération ou la non-prise en considération univoque de l'espèce NINC comme taxon d'alerte (scénarios pré-Copil illustrés dans la Partie II du rapport (sans NINC) et dans l'Annexe 14 (avec NINC).

**En ce qui concerne la Martinique**, on peut globalement noter une classification de l'état des sites plus conforme à l'expertise de terrain dans l'HER « Plaine », les sites réputés altérés ressortant bien selon les dates (notamment FHS Ste Luce, distillerie La Mauny, canal de Dacos...). Les 2 sites identifiés comme référence ou pseudo-référence (PIL, VAU) subissent un classement biologique plutôt en bonne conformité avec leur statut (TBE ou BE selon les dates).

Pour l'HER regroupée « Volcan », le classement utilisant NINC comme taxon d'alerte gagne un peu en sévérité et en conformité avec l'expertise de la présence d'altération anthropique sur ces sites.



**Figure 96 :** Carte des classes d'état pour la Martinique avec la correction par les EQRs selon les HERs « Volcan », « Plaine ».

Les zones en périphérie assez éloignée du massif volcanique de la Montagne Pelée (Martinique) rendent bien compte de la présence de pollution diffuse agricole (bananeraies), de l'implantation d'habitat diffus et de villages, ou d'infrastructures industrielles (distilleries, STEPs). Cependant, ce classement plus sévère peut localement ne pas être justifié par l'effet d'altérations anthropiques connues et s'expliquer uniquement par la présence de NINC (cf cas le plus notable de CER, Anse Céron). Au-delà du gain de sensibilité procuré par cette grille, qui reflète bien la localisation de pressions anthropiques non négligeables, il est possible que certains sites de cette zone soient désormais évalués de façon un peu trop sévère.

**Pour la Guadeloupe,** la Basse-Terre étant intégralement concernée par l'HER regroupée « Volcan », cette méthodologie permet de faire ressortir plus de sites présentant des états altérés d'une part (59 relevés sites x dates en dessous du Bon Etat en **Figure 97** contre 26 dans le même cas dans le scénario pré-Copil basé sur les valeurs d'EQRs, cf Erreur ! Source du renvoi introuvable., soit plus du double), et d'autre part de donner un statut plus dégradé à certains sites altérés. Mais, là aussi, il est envisageable que la prise en compte de NINC en taxon d'alerte fasse évaluer certains sites de façon un peu trop sévère par rapport au niveau réel d'altération subi. D'autres procédés de sévérisation plus modérée des classifications d'Etat sont envisageables (grille d'EQR amendée, valeur la plus basse d'indice possible dans l'HER pour l'établissement de la grille d'EQR peut-être à reconsidérer avec un peu plus de recul...).

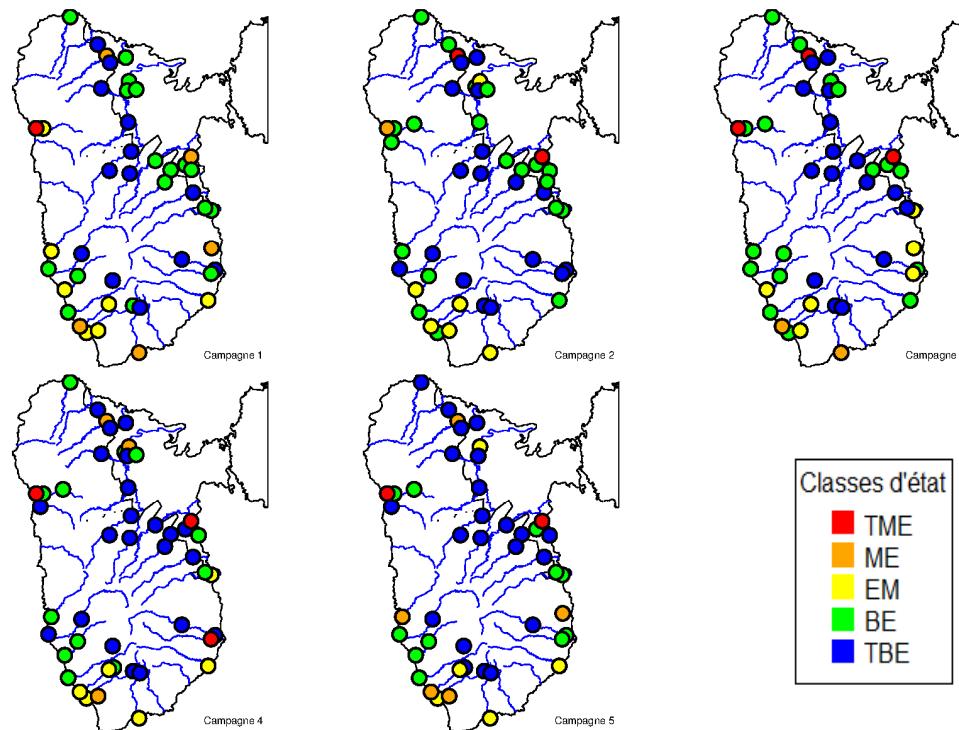


Figure 97 : Carte des classes d'état pour la Guadeloupe avec la correction par les EQRs selon les HERs « Volcan », « Plaine ».

Au bilan, donc, la méthodologie adoptée Post-Copil a, de façon pragmatique et selon un nouveau scénario (adoption ou non de NINC en taxon d'alerte selon la zone naturelle), résolu dans les grandes lignes le problème de classement éventuellement insuffisant du niveau d'altération en Guadeloupe, soulevé depuis 2 Copils. Néanmoins, comme déjà souligné précédemment, il est possible que le fait d'intégrer NINC comme taxon d'alerte sur la zone « Volcan » entraîne une évaluation désormais un peu trop sévère vis-à-vis de la connaissance des altérations anthropiques émanant du terrain, de façon non totalement justifiée par le niveau de pression connu (cas le plus typique : Anse Céron).

Bien que de façon moins marquée que pour ce cas évoqué en Copil, la présence de NINC peut entraîner le même type de conséquences à d'autres sites de Martinique et de Guadeloupe aux eaux naturellement minéralisées et carbonatées.

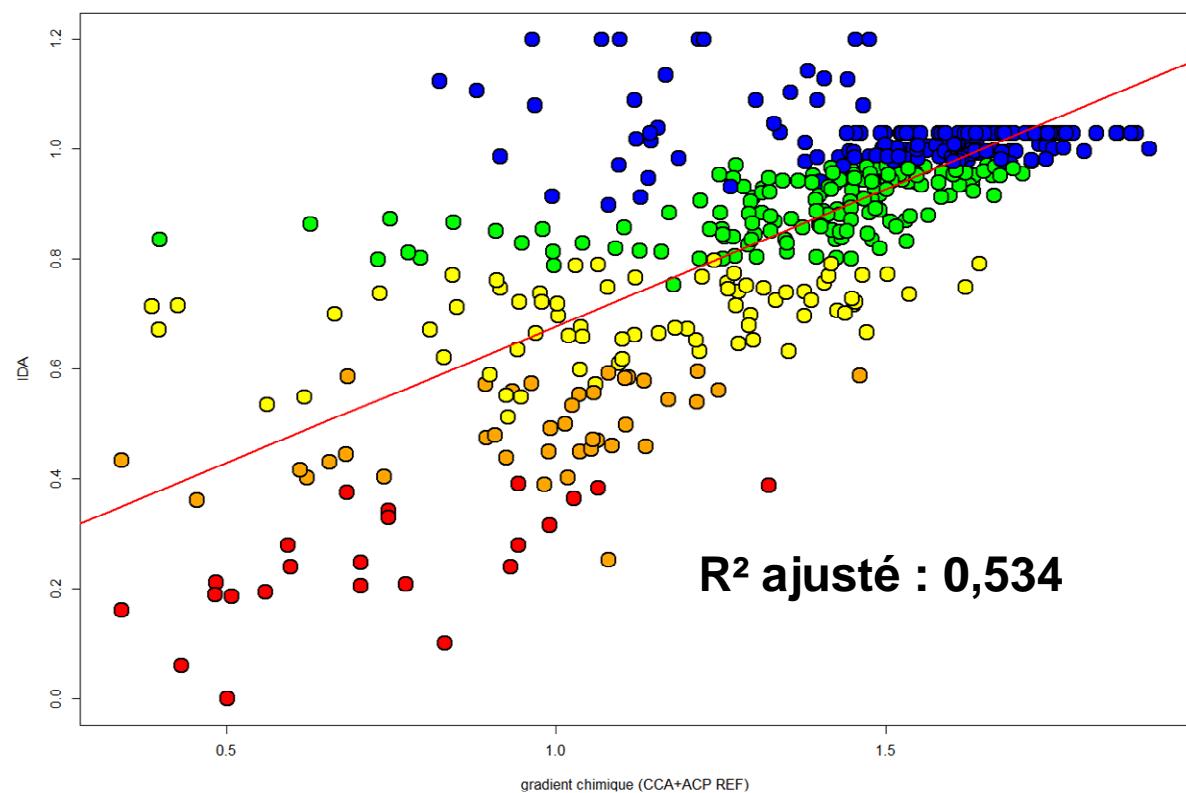
Ce constat rend donc indispensable la réalisation d'investigations complémentaires prévues en 2013, notamment sur des linéaires de cours d'eau suivis à plusieurs endroits dans le continuum amont-aval, de façon à bien préciser l'écologie de NINC et de résoudre de la façon la plus satisfaisante possible ce problème de détection judicieuse de l'impact anthropique sur la zone peu minéralisée « Volcan ».

Il restera donc dans l'année à venir à régler le problème du statut de NINC et, quel que soit le système d'évaluation retenu au final, à optimiser plus finement le niveau d'évaluation des altérations (i.e. calage minutieux de la limite inférieure de Bon Etat).

Pour l'instant, le niveau d'information écologique encore limité (cf faible occurrence et faible abondance relative moyenne) capitalisé sur la majorité des taxons intervenant dans l'indice réserve une part inévitable d'empirisme pour la réalisation de ce calage fin, qui sera de toute façon soigneusement discuté et optimisé avec l'avis de toutes les parties prenantes de l'étude.

## D. Relation pression-impact exprimée en EQRs

La **Figure 98** représente la relation globale entre valeurs du gradient d'anthropisation et classes d'état des sites exprimées en EQR dans leur système naturel d'appartenance (HER regroupée « Volcan » versus HER regroupée « Plaine »).



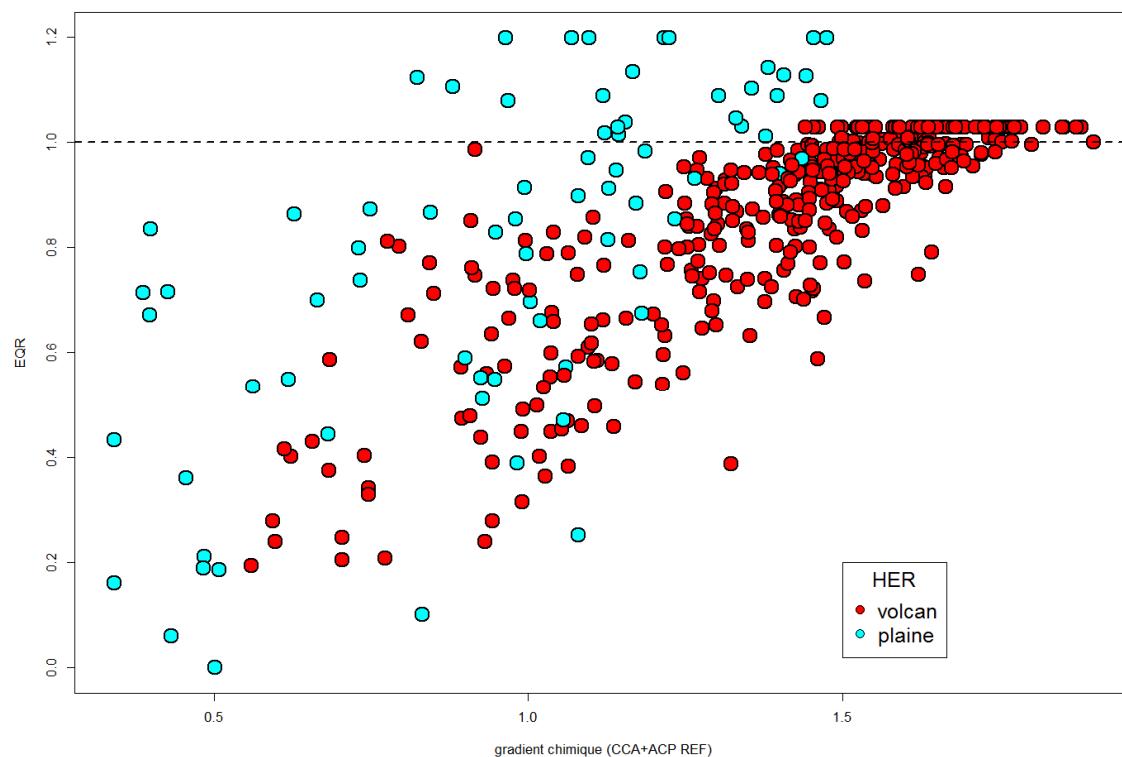
**Figure 98 : Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et EQR (équivalents de qualité écologique). Echelle de couleurs selon classes d'état.**

A l'instar de la relation exprimée sur les notes brutes d'indice (cf **Figure 91**), cette relation reste d'un bon niveau compte-tenu :

- 1) qu'il s'agit d'une métrique biologique établie avec des organismes vivants sensibles à l'anthropisation mais aussi à d'autres déterminants naturels,
- 2) du faible niveau de représentativité temporelle des descripteurs abiotiques basés sur de l'échantillonnage ponctuel, ce qui conduit à certains points très décentrés par rapport à la relation-type.

Le coefficient de détermination reste du même ordre que précédemment (0,53 par rapport à 0,65) mais est un peu altéré du fait d'un artefact méthodologique visible du côté des hautes valeurs d'EQRs. Cet artefact déjà rencontré lors d'exercices d'intercalibration européenne est lié à la grande différence de valeurs de référence en notes d'IDA (cf **Figure 95**, partie droite) entre l'HER carbonatée et la zone volcans, créant une discontinuité en haut de l'échelle d'EQRs s'accompagnant d'un effet d'escalier et d'un déséquilibre dans les résidus.

La **Figure 99**, qui différencie les sites selon l'HER regroupée d'origine (sites en rouge = HER « Volcan », sites en bleu = HER « Plaine »), permet de mieux visualiser le phénomène et son origine. Par construction, l'EQR est calculé par rapport à la valeur médiane de référence de l'ensemble naturel correspondant (cf **Figure 95**, partie droite). En zone volcan dont le niveau de référence est proche de 20 (19,45), l'EQR dans les sites à meilleure note d'indice (20) ne pourra pas monter sensiblement au-dessus de 1 (valeur maximale d'EQRs =  $20 / 19,45 = 1,028$ ). Par contre, en zone de plaine carbonatée, la valeur maximale d'EQRs possible peut devenir nettement plus élevée (valeur maximale d'EQRs =  $20 / 16,68 = 1,2$ ). Cette distorsion d'échelle provoque un défaut d'alignement et de normalité des résidus dans la partie haute du domaine de valeurs des EQRs et une érosion modérée de la qualité du  $R^2$  lorsqu'on fait l'analyse avec les HERs regroupées.

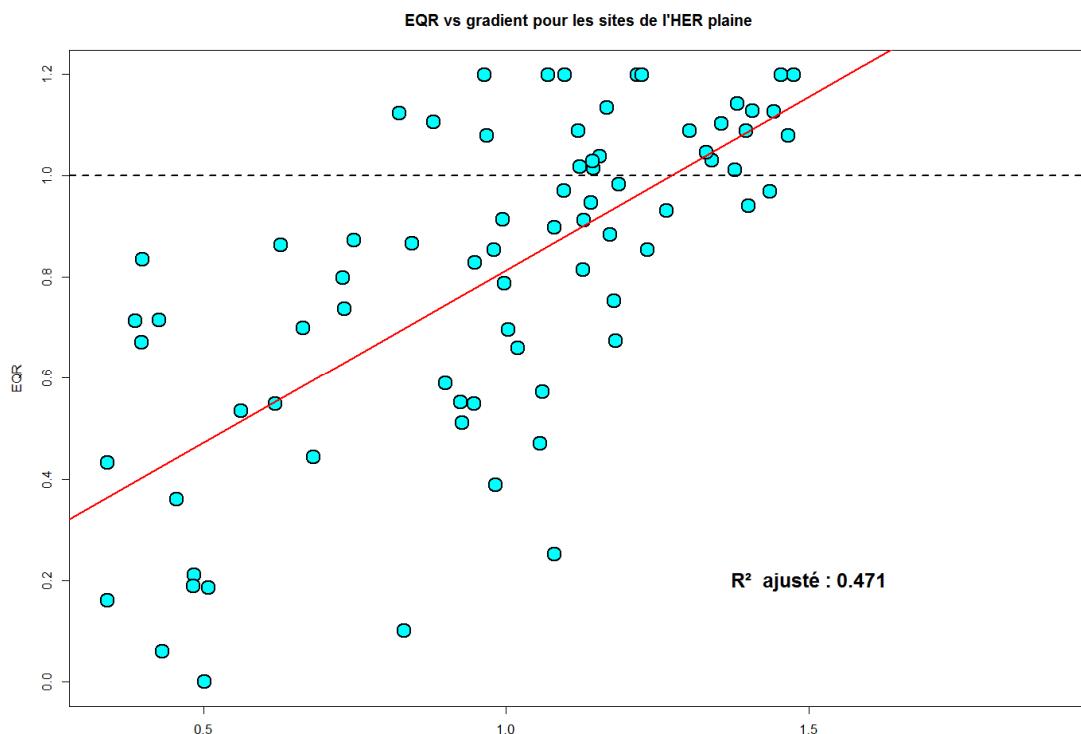


**Figure 99 :** Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) selon l'HER regroupée « Plaine » (bleu) et « Volcan » (rouge)

Nous avons procédé au même type d'analyse groupe d'HERs par groupe d'HERs afin de formaliser des relations « pression-impact » inféodées aux deux grandes zonations naturelles. Les relevés (site x date) appartenant à l'HER regroupée « Plaine », figurés en bleu, sont nettement moins nombreux (75) que ceux appartenant à la zone « Volcan » (393), figurés en rouge.

La **Figure 100** représente la relation pression-impact **sur la base d'EQRs-IDA calculés pour les sites situés en HER minéralisée « Plaine »** en utilisant la **variante d'IDA excluant NINC des taxons d'alerte**.

Dans le contexte où un tel jeu de données basé sur des relevés phytocénotiques est destiné à couvrir toute une gamme de conditions naturelles et de gradients d'anthropisation de types très variés (agricole, urbaine et péri-urbaine, agro-alimentaire, industrielle, STEPS, pollutions diffuses), cette relation pression-impact a été formalisée sur une assise de relevés qu'on peut qualifier de modeste (75 relevés site x date).

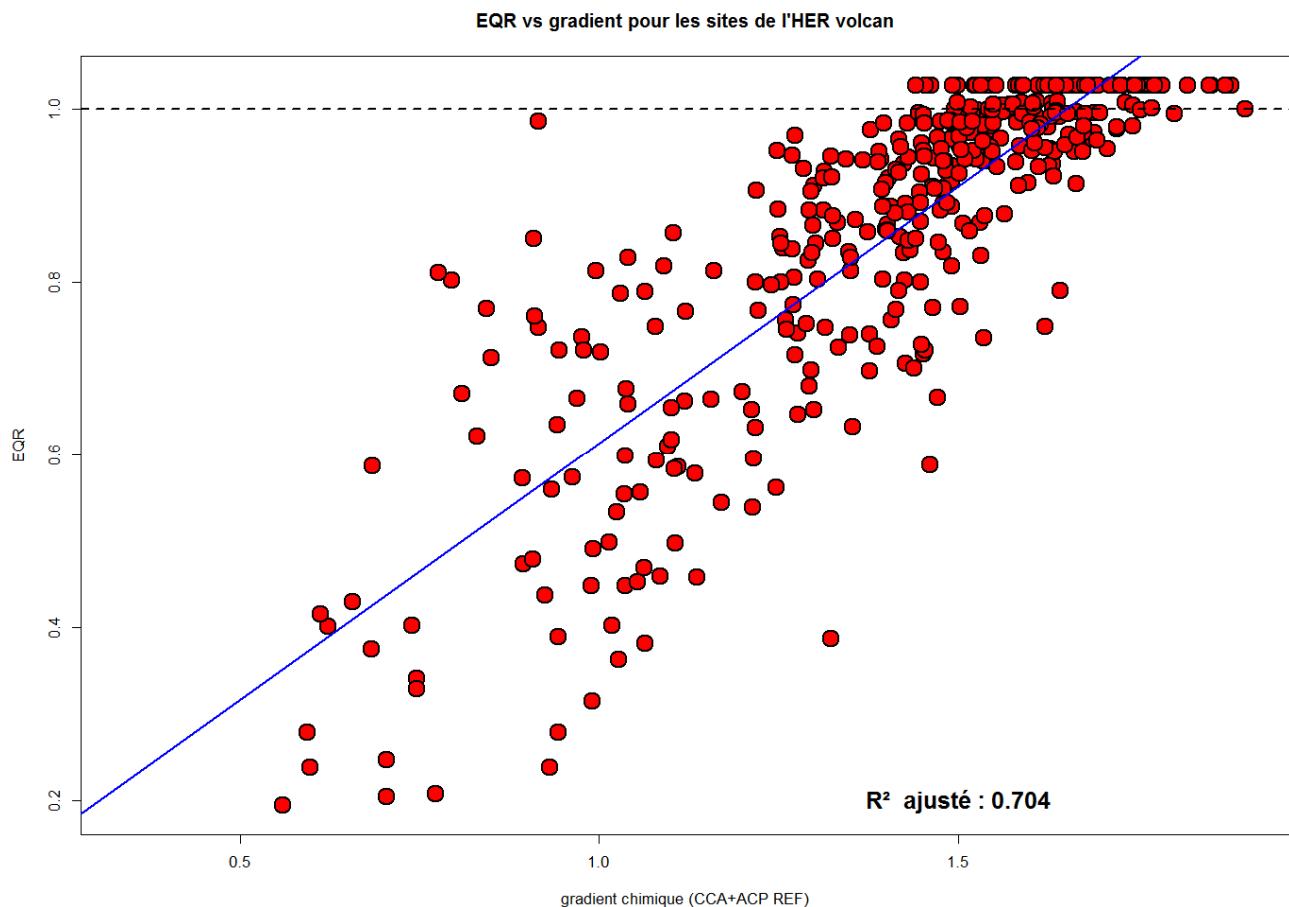


**Figure 100 :** Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) pour les sites l'HER regroupée « Plaine »

Cet effectif de relevés, encore un peu limité dans l'état sur ce regroupement de zones naturelles, autorise probablement une moindre consolidation statistique de ce type de relation basée sur des gradients diversifiés qu'un jeu de données plus important. D'autre part, le fait que cette zone naturelle est plus fortement anthropisée que, par exemple, celle de l'HER regroupée « Volcan est aussi de nature à dégrader un peu la qualité de relation qu'on peut attendre. En effet, l'ambiance chimique est moins stable et plus variable, selon la nature et la rythmicité de l'altération anthropique, dans une zone globalement plus polluée que dans une zone pseudo-naturelle ou la qualité de l'eau variera assez peu (hors épisodes de crues que les échantillonnages diatomiques s'attachent toutefois à éviter -cf norme d'échantillonnage nationale IBD, appliquée aussi aux Antilles-). Il y a donc *a priori* à redouter plus de défauts de représentativité temporelle des échantillonnages ponctuels d'eau dans cette zone que dans une zone aux conditions naturelles plus dominantes. Ce défaut s'illustre de façon particulièrement flagrante par la présence de quelques valeurs d'EQRs anormalement basses (en bas de graphique) pour le score de Gradient Composite obtenu au même site, trois d'entre elles étant des outliers manifestes. Symétriquement, il y a probablement aussi quelques valeurs d'EQRs-IDA anormalement hautes par rapport au score de GCMA observé sur ce site sur la base d'un échantillonnage ponctuel d'eau. Ces valeurs nettement décentrées sont un signe de la représentativité temporelle aléatoire et très perfectible d'un échantillonnage ponctuel de chimie, la valeur biologique mise en relation s'étant établie sur un pas de temps nettement plus long (selon stabilité des conditions naturelles et anthropiques, on considère que la composition floristique d'un assemblage diatomique est intégratrice de 1 à 3 mois de conditions abiotiques intégrées au site).

Malgré les limites de ce sous-jeu de données dans l'état et sans procéder à aucun tri préalable d'outliers alors que certains sont particulièrement flagrants, le  $R^2$  ressort à une valeur de 0,471, ce qui est déjà très correct pour des relations composites de ce type (l'IBD et l'IPS plafonnant souvent à 0,35 pour les paramètres abiotiques auxquels les diatomées sont très sensibles (PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, DBO<sub>5</sub>...)).

La **Figure 101** représente le même type de relation pression-impact sur la base d'EQRs-IDA calculés **pour les sites situés en HER « Volcan »** en utilisant la **variante d'IDA avec NINC incluse comme taxon d'alerte**. Par rapport à un effectif total conséquent de relevés (473), selon niveau du seuillage, il n'y a pas plus de 5 à 10 outliers plus ou moins manifestes dans cette régression, soit de l'ordre d'1 à 2 % au maximum. C'est de l'ordre de 5 à 10 fois moins important en proportion que dans la régression précédente et témoigne du risque moins élevé d'échantillonnages ponctuels très divergents en cas de région globalement moins soumise à anthropisation qu'en cas d'hydro-systèmes très perturbés. Dans ce cas, la relation générale qui était présentée à la **Figure 98** s'améliore encore suite à la maîtrise d'une variation naturelle par le dispositif d'EQRs (c'était un résultat attendu et cela correspond au but recherché, on a gagné en homogénéité de la relation pression-impact en intra-HER « Volcan » par rapport à la relation établie en inter-HERs), et on atteint sur la relation brute (sans aucun enlèvement préalable d'un pourcentage d'outliers) un excellent niveau de qualité dans cette zone ( $R^2 = 0,704$ ).



**Figure 101 :** Relation pression-impact entre valeurs de CGMA et équivalents de qualité écologique (EQR) pour les sites l'HER regroupée « Volcan » (rouge)

Il faudra creuser un peu plus l'interprétation du constat qui suit :

Avec inclusion de NINC comme taxon d'alerte sur cette zone « Volcan », on peut remarquer que la régression linéaire n'est pas forcément l'ajustement le plus optimisé et qu'il est possible d'observer une forme curvilinéaire de la relation avec déséquilibre complet des résidus dans le secteur des faibles notes d'EQRs (notes d'EQRs-IDA anormalement basses pour les scores de CGMA atteintes, dans un cadre référentiel identique à celui ayant servi à poser la régression EQR-IDA sans NINC en HER regroupée de plaine minéralisée). Ce constat, qui rejoint une interrogation précédente formulée en commentaire des Figures 96 et 97, peut laisser à penser que dans l'état, on noterait plus sévèrement l'état biologique des sites dégradés avec la variante d'IDA « Volcan » qu'avec la variante d'IDA utilisée sur les plaines minéralisées (sans NINC).

Si cette interprétation est exacte, cela pourrait rebondir immédiatement sur la question de l'écologie de cette espèce et de l'interprétation éventuellement incorrecte de sa présence avec cette variante d'indice. Dans le cas de l'HER « Volcan », on attribue à cette espèce un message d'altération, puisqu'elle est inclue dans la liste des taxons d'alerte. Comme elle peut être localement présente à des effectifs assez élevés, notamment sur les stations aval plus minéralisées, elle ferait descendre les notes d'indice de façon exagérée et peut-être injustifiée par rapport à la chimie intégrée constatée à ces sites – cf valeurs de CGMA systématiquement plus modérées que le niveau d'altération résumé par la note d'indice n'en rendrait compte. Dans ce cas et si l'on garde à terme cette variante (cf résultats des études complémentaires 2013), il faudra probablement réajuster un peu la grille d'interprétation des notes d'indices en zone « Volcan » et notamment le seuil inférieur de Bon Etat, possiblement trop sévère dans l'état actuel. Et vice versa si on ne l'inclut pas au final (grille d'interprétation sans NINC probablement à reconstruire et à rendre un peu plus sévère sur cette zone « Volcan »).

Sur la base de constats déjà établis en métropole, il serait aussi possible de proposer une autre interprétation de cette **Figure 101** : il a déjà été observé qu'avec le même niveau d'altération anthropique (mêmes apports en nutriments, même niveau de demande en O<sub>2</sub> etc...), les cours d'eau peu minéralisés subissaient un impact biologique plus fort que ceux ayant des eaux plus fortement minéralisées, carbonatées et tamponnées. Il peut y avoir à cela plusieurs explications et en particulier le fait qu'un apport chimique, trophique ou saprobique donné provoque moins de variations de la physico-chimie dans une eau minéralisée et tamponnée que dans une eau faiblement minéralisée dont la physico-chimie (pH, conductivité) sera plus versatile et plus vite influencée. De même, dans les eaux minéralisées et carbonatées, la fonction d'auto-épuration et de minéralisation de la matière organique et des formes de l'azote se passe mieux qu'en eaux plus acides et peu minéralisées.

Il faudra un peu plus de recul et quelques données et investigations complémentaires (cf approches complémentaires 2013) pour arriver à se faire une opinion plus définitive sur cette problématique.

Au dernier Comité de Pilotage, il a été posé la question de savoir s'il serait possible d'**affiner la détermination de seuils de qualité à partir de données issue de l'autoécologie des taxons**, le principal enjeu en la matière étant la fixation la plus judicieuse possible de la **limite inférieure du seuil de Bon Etat**.

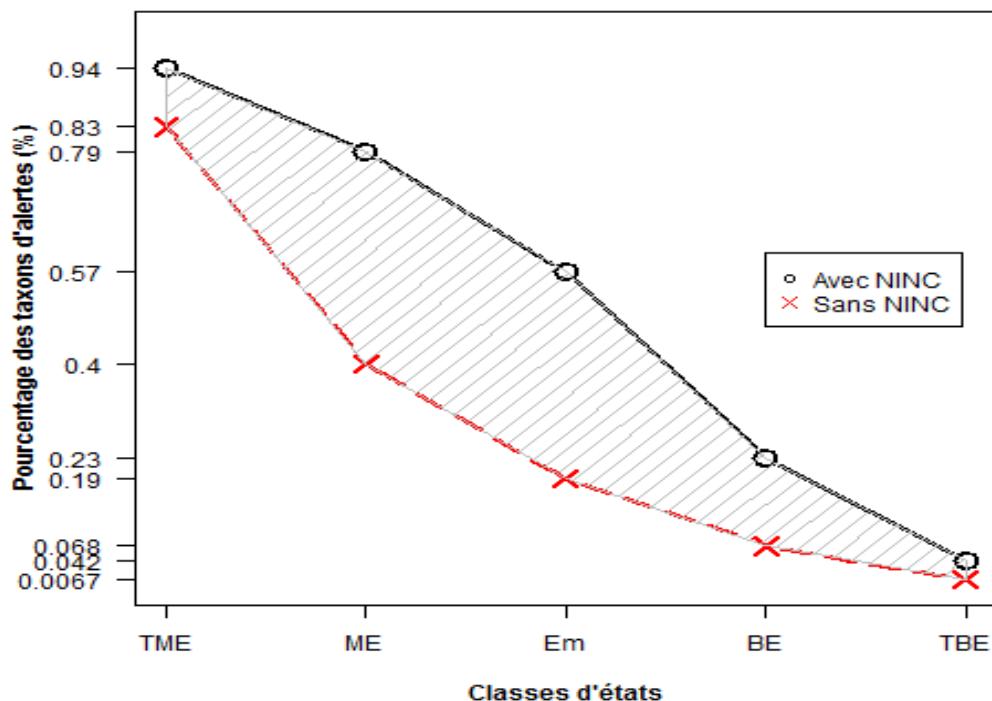
La difficulté évoquée à cet égard tient au fait que, contrairement aux flores de France ou d'Europe de l'Ouest dont l'autoécologie est bien connue, avec un long recul d'expertise (cf traits autoécologiques de van Dam, 1994, **Référence 50**) et un quasi-consensus se dégageant sur l'écologie spécifique de beaucoup d'entre elles, les flores des Antilles sont relativement nouvelles pour la science ou du moins pour ce contexte biogéographique, en bonne partie originales, et elles ont de plus été sélectionnées dans l'environnement biogéographique particulier des Antilles.

Il n'est donc pas possible de se baser sur une autoécologie européenne pour déduire ou extrapoler celle des espèces sélectionnées localement et pouvant être plus ou moins rapprochées, sur le plan morphologique, à des espèces rencontrées aussi en Europe. C'est même carrément impossible pour les espèces particulières à ce contexte sans aucune référence en Europe.

Concernant cette fois les données et les connaissances hydroécologiques acquises localement au cours de ce programme de 3 ans, hors quelques taxons plus ou moins ubiquistes et fortement dominants, les abondances relatives de la plupart des taxons inclus dans l'IDA sont d'assez faibles à faibles dans le jeu de données collecté. De ce fait, beaucoup de profils de qualité sont établis avec un minimum de données (parfois 3 occurrences seulement) et sont encore peu consolidés.

Enfin, compte-tenu du fort degré d'auto-corrélation de tous les descripteurs associés à une pression anthropique dans l'analyse du jeu de données Antilles, les profils de qualité utilisés pour la mise au point de l'indice ont été établis face à une intégration des 9 descripteurs d'anthropisation mobilisés et il n'y avait pas d'alternative scientifiquement valide à ce niveau (les variables d'anthropisation s'exerçant de façon groupée et absolument pas indépendante dans ce contexte Antillais : cf CCA complète et CCA restreinte réalisées). Une difficulté résultante est donc qu'il n'est pas non plus possible à ce stade d'isoler bien spécifiquement la réponse des différents taxons aux différents descripteurs d'anthropisation (par exemple, pollution organique, orthophosphates, ammoniac ou nitrates...).

En réponse à ce questionnement du CP, **il a donc été suggéré par notre équipe d'étudier globalement la réponse des taxons d'alerte** (en principe sensibles à certaines ou à toutes ces natures d'altération) au gradient global d'altération anthropique, afin de voir s'il était possible de repérer un critère empirique permettant de mieux fixer les seuils de classes de qualité, et plus particulièrement le seuil de basculement entre Bon Etat et Etat Moyen.



**Figure 102 : Pourcentage de taxons d'alerte par classe d'état (croix rouges : sans NINC ; cercles blancs : avec NINC)**

En première approche, la **Figure 102** en page précédente présente le pourcentage de taxons d'alerte par classe de qualité dans les 2 grilles d'évaluation proposées :

- L'une est calée sur le système adopté dans l'HER regroupée « Plaine », zone à forte minéralisation et dans laquelle l'IDA ne mobilise pas NINC comme taxon d'alerte (valeurs de pourcentages de taxons d'alerte par classe figurées avec des croix rouges).
- la seconde est calée sur le système adopté dans l'HER regroupée « Volcan », zone aux eaux peu minéralisées dans laquelle l'IDA mobilise NINC comme taxon d'alerte (% de taxons d'alerte figurés par des ronds blancs et traits noirs).

L'aire délimitée entre les 2 courbes (zone hachurée) est déterminée par la contribution de NINC. Il est patent, en fonction de cette aire, que cette espèce est assez fortement répandue et qu'elle contribue pour une part importante à la composition des assemblages. Le fait de la considérer ou de ne pas la considérer en taxon négatif impacte fortement le pourcentage de taxons d'alerte présents en moyenne par relevé, entraînant un plus que doublement dans toutes les classes sauf la classe 1 et la classe 5 et produisant donc par contrecoup immédiat un impact important sur les notes d'indice.

Au-delà de ce constat, il est notable que l'écologie de cette espèce est large et pas seulement limitée aux 2 classes les plus altérées. Elle est présente dans toutes les classes et réduit d'ailleurs sensiblement sa contribution dans la classe 1 de très mauvais état (9%), ce qui est le signe qu'elle ne semble pas se complaire spécialement dans cette écologie fortement altérée, et sa présence dans ces comptages peut très bien résulter au moins en partie d'un drift permanent depuis des situations plus amont. Du fait du protocole de pré-digestion avant comptage, on n'est pas sûrs non plus de sa bonne viabilité dans ces conditions très altérées ou sa contribution régresse sensiblement.

Concernant la classe 5, il y a un biais et un déséquilibre dans le jeu de données qui entraîne mécaniquement cette faible contribution statistique : si elle y a l'air peu présente, c'est surtout parce que les sites de très bonne qualité dans la zone naturelle minéralisée « Plaine » sont beaucoup plus rares (2 sites seulement, soit au maximum 8 relevés, y sont considérés en conditions de référence ou pseudo-référence) que dans la zone « Volcan » où elle ne peut pas faire partie des flores de référence pour cause de conductivité électrique trop basse. Et à certaines dates, les valeurs d'indice de ces 2 sites sortent du domaine de référence, ce qui diminue encore la représentation de la classe 5 dans sa globalité pour ce sous-jeu de données « Plaine ».

C'est principalement ce déficit de représentation de la classe de TBE et même de BE dans cette HER regroupée « Plaine » (classes très minoritaires **de ce sous-jeu de données de 75 relevés seulement**, pour cause d'altération plus omniprésente qu'ailleurs) qui explique ce faible pourcentage de NINC dans ces deux classes, faible présence renforcée du fait que cette espèce ne fait pas du tout partie des cortèges naturels de la zone de référence peu minéralisée « Volcan » (373 relevés dont beaucoup en référence et en bonne qualité), faute de minéralisation suffisante des eaux.

Pour confirmer cette distorsion de distribution, il est à noter que, dans les 2 sites de référence de l'HER « Plaine » (VAU et PIL), selon les dates de relevé, NINC peut être le taxon dominant (parfaitement adapté aux conditions de forte minéralisation naturelle), présent à 44 % en moyenne et pouvant même y atteindre jusqu'à 77 % de l'assemblage total. Il semble donc assez patent qu'il s'agit d'un taxon euryète dont les déterminants tiennent plus au degré de minéralisation de l'eau (influence géochimique-hydrochimique naturelle dominante) qu'à la forte altération anthropique (diminution très nette de cette espèce dans la Classe 1).

**Question du Copil du 14 :12 :2012 : Peut-on s'appuyer sur l'autoécologie des taxons pour mieux repérer le seuil adéquat de basculement d'état ?**

En première observation concernant la probabilité de présence par classe des taxons d'alerte, si l'on se réfère à la courbe rouge (sans NINC), il ne semble pas vraiment y avoir de point d'inflexion caractéristique qui pourrait marquer un basculement net de flore dans le secteur correspondant à la limite Bon Etat-Etat Moyen et aider à mieux cadrer cette limite sur le plan biologique. On peut noter une accélération régulière et progressive du pourcentage de taxons d'alerte de la classe 5 vers la classe 1, sans qu'un secteur de la courbe marque un point graphique particulier qui pourrait aider à mieux caler un basculement de flore et cette sortie du Bon Etat.

Les valeurs données sur le graphique sont des pourcentages d'abondance relative moyenne par classe (prise en compte de la proportion statistique d'abondance relative des taxons d'alerte sur toute la classe). Si l'on essaie de situer le seuil de limite de classe d'état, actuellement et en moyenne sur ces 2 HERs regroupées, la zone de basculement BE-EM peut être approximativement située, sur la base graphique présentée en **Figure 102**, dans le secteur de 10 à 15 % de taxons d'alerte dans le relevé.

Ce genre d'investigation et de figuration sera probablement à raffiner en 2013 :

- 1) séparation des HERs regroupées « Volcan » et « Plaine », les seuillages sur la base des réponses biologiques pouvant s'établir de façon différente sur ces deux sous-ensembles,
- 2) diminution de la profondeur des classes pour mieux rendre compte des particularités de tracé et mieux approcher ce qui pourrait constituer des limites de classes appuyées par la biologie. Par exemple, il pourrait être fait une nombre plus important de classes de notes d'IDA ou d'EQRs, du type une par point d'indice ou par 1/10<sup>ème</sup> d'EQR.

En fonction du nombre de relevés et des gradients représentés, ce travail pourra assez valablement être tenté en 2013 dans des modalités appropriées pour l'HER séparée « Volcan », selon l'information complémentaire acquise sur NINC et son statut final retenu.

Pour l'HER « Plaine », c'est plus délicat et il est difficile d'imaginer qu'une telle approche pourra apporter rapidement une information beaucoup plus précise, le sous-jeu de données actuel étant faible (75 relevés) et la répartition par classe, très déséquilibrée, étant principalement déficitaire justement dans la zone d'intérêt (passage des classes de meilleures qualités -TBE, BE- à la limite inférieure de Bon Etat). Dans ce cas, les limitations actuelles du jeu de données, à la fois pour des raisons d'effectif de sites trop limité et d'équilibre de répartition des sites par classe ne seront probablement pas résolues fin 2013. Il conviendra probablement de s'appuyer assez fortement sur l'expertise locale disponible pour un calage éventuellement optimisé de cette grille d'EQRs par rapport à la proposition actuelle.

## VII. CONCLUSIONS, PERSPECTIVES

Dans le contexte de la nécessité d'application de la DCE dans les DOM et en l'absence de méthode de bio-indication diatomique réellement utilisable sur place (indices métropolitains inadaptés à ce contexte biogéographique), un programme de Recherche-Développement visant à la mise au point d'un indice diatomique adapté au contexte Antillais a été initié par les DEAL Martinique et Guadeloupe ainsi que par les Offices de l'Eau de Martinique et de Guadeloupe en 2009, dans le cadre d'un dispositif financier s'appuyant sur les contributions de ces quatre organismes porteurs du projet, ainsi que sur une participation de l'ONEMA.

Dans le cadre du consortium chargé de la Maîtrise d'œuvre et de la réalisation, ASCONIT Consultants et l'IRSTEA, les deux Maîtres d'œuvre, ont également participé à la construction financière sous forme d'autofinancement en propre d'une partie de leurs prestations.

Bien que démarrés séparément et à quelques mois d'intervalle, ces deux programmes ont été menés en concertation et ont convergé au final vers des analyses de données communes permettant de conforter le jeu de données et de produire au final un indice de bioindication de la qualité de l'eau plus assis et robuste, sur une base commune à la Martinique et à la Guadeloupe (IDA, Indice Diatomique des Antilles).

Cette étude mêlant travail de terrain, travail d'inventaire taxinomique sur des flores encore peu connues et travail de recherche et transfert sur l'hydroécologie des diatomées des cours d'eau a représenté un effort très substantiel en termes de moyens et de travail, qu'il faut ici saluer et qui n'a été rendu possible que par la mobilisation déterminante des quatre acteurs locaux précités.

C'est en effet par la mobilisation synergique des moyens de surveillance de la qualité de l'eau et du maillon biologique diatomées (enveloppes annuelles destinées au fonctionnement des réseaux institutionnels) et de moyens additionnels destinés à soutenir l'effort de recherche-développement sur des sites présentant des spécificités de flores ou d'altérations qu'il a été possible de dégager le volant financier minimal nécessaire pour fonder ce nouvel outil de bio-indication.

A noter également, dans ce contexte, l'utilité déterminante des bases de données de réseaux constituées par les Offices de l'Eau de Martinique et de Guadeloupe qui ont été mobilisées pour coupler les analyses physico-chimiques et chimiques aux données d'inventaires diatomiques des sites d'étude.

Au bilan de ces 3,5 années de programme sur ces deux îles, **483 échantillonnages diatomiques** (244 en Martinique, 239 en Guadeloupe) assortis de mesures physico-chimiques et de prélèvements d'eau pour analyses de laboratoire ont été réalisés sur un dispositif ayant pu comprendre jusqu'à **110 stations différentes** (55 au maximum en Martinique et 55 au maximum en Guadeloupe en incluant les sites supplémentaires) au cours de 4 campagnes régulières et 2 campagnes complémentaires (une pour chaque île) calées entre le Carême 2009 et l'Hivernage 2011. Un petit nombre d'échantillonnages ayant présenté des problèmes divers, comme des problèmes d'influence hydrologique indésirable, de densité insuffisante des diatomées présentes etc..., **475** d'entre eux ont pu faire l'objet d'une exploitation biologique complète allant jusqu'à un calcul d'indice valide, ce qui est un excellent taux de réussite.

Plus d'une trentaine de descripteurs abiotiques, dont 27 descripteurs physico-chimiques et chimiques, ont fait l'objet d'une collecte pour chaque relevé (site x date) pouvant être rapportés à l'épisode de croissance des biofilms diatomiques échantillonnés. Il aurait été souhaitable de pouvoir mobiliser des doublets de valeurs de chimie pour mieux asseoir la correspondance entre l'exposition physico-chimique et chimique moyenne et les réponses des communautés diatomiques. Cependant, il n'existe presque jamais de doublets de relevés dans les 3 mois précédent l'échantillonnage biologique. Cela a entraîné quelques valeurs chimiques peu représentatives, s'illustrant par des points outliers complètement décentrés de la relation moyenne obtenue entre chimie et biologie.

Un flou subsistant sur la nature précise de la matrice analysée et du descripteur mesuré selon les lots de marché, et ces analyses n'ayant de plus pas été faites systématiquement selon l'opérateur et le lot (nombreux trous dans la matrice résultante), les données de carbone organique (COD, COT) n'ont pas été intégrées à l'analyse. Cependant, d'autres variables présentant une bonne part de redondance avec l'information portée par le carbone organique (DCO, NKJ, DBO5 notamment) ont permis de pallier à peu près à ce manque et à renseigner malgré tout l'écologie des espèces sur le plan de la sapробie et des effets de pollutions organiques.

les bases de données des Offices de l'Eau ont pu aussi être mobilisées occasionnellement pour combler quelques valeurs de descripteurs manquantes en liaison avec les dates de relevés biologiques, notamment si c'étaient des données hydrochimiques sous influence dominante du contexte géochimique, dont les caractéristiques sont relativement stables à un site dans un contexte hydrologique donné.

Concernant les flores diatomiques, un travail considérable de détermination et de comptage a été réalisé par Anne EULIN en Martinique et par Estelle LEFRANCOIS en Guadeloupe, deux Docteurs d'ASCONIT Consultants, sur des flores encore peu connues, avec l'appui-expert principal de Michel COSTE, Directeur de Recherche émérite à l'IRSTEA Bordeaux, et divers avis d'autres experts apportés sur communications orales ou posters dans des congrès de diatomistes (notamment les colloques annuels de l'ADLaF, Association des Diatomistes de Langue Française).

Ce travail ne partait pas de rien (il existait notamment quelques travaux préalables de débroussaillage taxonomique, certains datant déjà de plusieurs décennies (notamment mission et déterminations de Manguin, et un travail plus récent mais focalisé sur une seule île, la Guadeloupe et encore fortement incomplet au niveau du nombre de taxons décrits, à savoir le pré-atlas iconographique des rivières de la Guadeloupe de Tudesque et Ector, 2002), ce travail considérable de débroussaillage et de reconnaissance des espèces présentes sur place est un **acquis déterminant à l'actif de ce programme**. Ainsi, **467 taxons différents** ont pu être reconnus et comptés, appartenant à 61 genres différents dont 51 communs aux deux îles. Tous ne peuvent cependant pas participer au calcul de l'indice du fait de l'occurrence ou de l'abondance insuffisante de certains ne permettant pas de leur établir un profil écologique fiable vis-à-vis de l'altération anthropique.

Après application d'un double critère de seuillage (au moins 3 occurrences dans le jeu de données global, au moins 2,5 % dans au moins un relevé), **177 taxons** au total (réactualisation Post-Copil) ont été jugés suffisamment occurrents et/ou abondants pour participer d'une part à la démarche de biotypologie des assemblages et d'autre part, pour se voir calculer un profil permettant leur utilisation dans l'indice.

Il est à noter que seulement 180 taxons (38% du total des taxons déterminés ou repérés) sont communs aux deux îles, tandis que 28 % et 34 % respectivement sont «endémiques» de la Martinique et de la Guadeloupe. Les indéterminés jusqu'au nom d'espèce (le plus souvent, nom de genre confirmé et nom d'espèce sous numéro) concernent 39% des taxons communs aux deux îles, ils restent bien sûr plus élevés pour les taxons plus rares et «endémiques» d'une des Antilles (66% pour la Martinique, 69% pour la Guadeloupe).

Ceci montre bien le chemin encore à parcourir entre la reconnaissance d'un taxon permettant son dénombrement dans les inventaires et son identification dans la bibliographie mondiale ou sa description en tant que nouvelle espèce.

En pratique, une nette majorité d'espèces «endémiques» à une des deux îles a été rencontrée de façon insuffisante, en termes d'occurrence comme d'abondance, pour participer à la construction indicelle. Ces spécificités de flore ne posent donc pas de problème pratique réel pour la mise en place d'un indice commun (le problème s'il y en a un viendrait plutôt de taxons communs aux deux îles, comme par exemple l'espèce *Nitzschia inconspicua* (NINC), pour lesquels la fixation du même profil de qualité pose actuellement question). C'est donc cette solution de proposition d'un indice sur une base la plus commune possible qui a été choisie au final.

Une maquette d'atlas iconographique a été élaborée à l'issue du programme, qui comporte des fiches-taxons complètes renseignant à la fois sur la détermination, la chorologie, l'écologie des taxons suffisamment rencontrés au niveau des Antilles, et qui donne les illustrations disponibles sur des taxons insuffisamment rencontrés pour leur attribuer des données de répartition ou des préférences écologiques fiables.

Pour certains taxons non inclus dans l'indice et présentant des risques de confusion avec certains taxons de l'indice, quelques fiches-taxon additionnelles ont cependant été établies. En outre, d'autres taxons rencontrés mais non indicuels ont été présentés et nommés dans des planches photographiques en vue de constituer une aide efficace à la reconnaissance d'espèces, lorsque l'iconographie constituée pendant l'étude le permettait.

En effet, malgré sa rareté de détection pendant le programme, si le taxon pré-existe et est connu aux Antilles, il n'est pas exclu qu'à l'occasion de conditions particulières, il puisse être un jour trouvé à des niveaux plus élevés nécessitant son inclusion ultérieure dans l'indice, et en tout cas son comptage dans les inventaires concernés. Son catalogage dans le guide iconographique peut donc constituer une aide précieuse à l'opérateur futur chargé de la réalisation de marchés sur les réseaux, et c'est le plus sûr moyen de pouvoir obtenir des remontées d'informations sur le comptage de taxons encore non inclus dans la métrique indicelle et de pouvoir évaluer la nécessité ou non de les ajouter.

Sur la base des déterminations taxonomiques réalisées sur les inventaires collectés, il a été réalisé une étude biotypologique des assemblages diatomiques des Antilles, permettant de repérer les assemblages naturels représentatifs de différents substrats géologiques et de différentes conditions climatiques.

Neuf groupes diatomiques distincts ont ainsi été caractérisés, la plupart présentant des différences sur le plan de leurs préférences hydrochimiques plutôt naturelles, deux seulement d'entre eux (Biotype 3 et Biotype 9 du niveau de coupe 9 clusters) se différenciant plutôt du fait d'un basculement de typologie déterminé par l'altération anthropique. Contrairement au contexte de la Réunion, la variation saisonnière aux Antilles ne semble pas provoquer de basculements drastiques dans la biotypologie. Ce fait s'explique peut-être par un contraste thermique moindre entre la saison chaude et la saison froide, la saison hivernale étant assez notablement plus fraîche à la Réunion.

De ce fait, le découpage HER proposé par Wasson *et al* en 2004 procure une trame intéressante pour l'application d'EQRs et, même s'il est envisageable d'affiner la démarche ultérieurement si nécessaire (notamment entre les zones peu minéralisées et les zones plus minéralisées attachées aux volcans, souvent liées à des contributions d'eaux thermales), s'appuyer sur ce découpage abiotique améliore la consistance des résultats d'évaluation d'Etat Ecologique par rapport à l'utilisation d'une grille basé sur un cadre interprétatif global de notes brutes d'indices.

Suite à l'analyse biotypologique, il apparaît clairement que, dans un contexte îlien à reliefs importants et à hydrologie soutenue, la dérive amont-aval de cortèges d'espèces de bonne qualité augmente la résilience des assemblages de type naturel et retarde le basculement typologique lié aux altérations anthropiques. C'est pour cela que deux clusters seulement ont une biotypologie déterminée prioritairement par l'altération. Pour les 7 autres clusters, on peut constater que leur domaine dans l'espace des données abiotiques recouvre depuis le domaine de référence jusqu'à des sites déjà franchement altérés, mais où l'effet de l'anthropisation n'a pas été encore suffisant pour provoquer le basculement biotypologique. Cette résilience des peuplements naturels est probablement aidée par le soutien hydrologique (effet dilutif d'altérations) et par la dérive permanente et soutenue de formes de colonisation venant de l'amont.

La caractéristique pré-décrise de résilience typologique des peuplements a joué un rôle important dans le choix du principe méthodologique sous-tendant la conception du nouvel indice (IDA). En effet, il a été jugé préférable de ne pas baser la mesure d'altération sur la composition de l'assemblage dans son équilibre global au site, mais de privilégier le message associé à des taxons d'alerte dont la présence dans un assemblage est synonyme d'effet d'une altération anthropique très significative s'étant produite à l'amont, ne serait-ce que dans des conditions locales.

Ainsi, une liste réduite de **49 taxons d'alerte** a pour l'instant été sélectionnée, soit 48 taxons-cibles communs pour toutes les HERss et le rajout de NINC comme taxon-cible pour la zone d'HERs regroupées « Volcan », suite à la tenue du Copil du 14-12-2012. Dans cette liste, 43 espèces-cibles sont présentes en Martinique et 37 en Guadeloupe, île considérée comme moins polluée en général, du moins dans le contexte de la Basse-Terre.

C'est le cumul d'abondance relative des taxons d'alerte et des valeurs unitaires de dégradation qu'ils apportent qui fait chuter l'indice à partir de ses valeurs de référence. Si, en liaison avec un basculement biotypologique d'assemblage diatomique lié à une très forte altération, il n'y a plus que des taxons-cibles négatifs dans l'assemblage et l'indice peut alors atteindre ses plus basses valeurs.

Le nouvel indice bâti sur ce principe (**l'IDA, Indice Diatomique Antilles**) a déjà donné une évaluation assez sensible et réaliste de l'état écologique des cours d'eau sur la base d'une grille d'interprétation mobilisant ses notes brutes. Cependant, ce principe d'évaluation dans l'absolu n'est pas DCE-compatible car cette Directive demande d'évaluer l'Etat Ecologique d'un site et sa déviation de l'état de référence par rapport à la "référence adéquate".

Dans ce contexte, nous avons proposé dans la première version de rapport final, daté du 09-12-2012, un premier système d'EQRs basé sur la trame HER proposée par *Wasson et al* en 2004. Cette façon de faire DCE-compatible procurait déjà une amélioration très substantielle dans l'évaluation d'Etat Ecologique par rapport à l'utilisation directe de notes brutes d'indice. Suite aux discussions du Copil du 14-12-2012, il a été travaillé à une adaptation visant d'une part à regrouper des HERs dépourvues ou insuffisamment pourvues de références avec d'autres ensembles naturels à la fois les plus comparables sur le plan des conditions abiotiques et mieux pourvus en références, et d'autre part à inclure le taxon NINC comme taxon d'alerte sur les massifs volcaniques pour régler un problème d'évaluation, jugée insuffisamment discriminante, surtout rencontré en Basse-Terre de Guadeloupe, dans un contexte peu minéralisé.

Ce travail d'investigation complémentaire a d'une part conduit à regrouper les zones fortement minéralisées de Martinique dans une HER regroupée « Plaine », dans laquelle est utilisée une variante d'IDA sans NINC dans la liste des taxons d'alerte. Les ensembles naturels peu minéralisés des volcans et de la plaine humide du Nord-Est de Basse-Terre en Guadeloupe ont été associés dans une HER regroupée « Volcan » dans laquelle la variante d'IDA utilise 49 taxons d'alerte incluant NINC.

Ce dispositif adopté de façon pragmatique a assez largement résolu les problèmes d'évaluation trop optimiste rencontrés mais, de façon plus limitée, a pu en provoquer de nouveaux (par exemple, statut considéré comme altéré du site CER, Anse Céron en Martinique, du fait de la présence de NINC alors qu'il n'existe pas de pression anthropique notable répertoriée). Dans le système actuel, il est possible que l'inclusion de NINC procure désormais une évaluation trop sévère des sites de cette zone, qu'ils soient d'ailleurs naturels ou altérés, sous l'influence pénalisante de cette espèce qui peut vite devenir assez fortement présente si les eaux sont minéralisées, sans que ce soit automatiquement en lien avec une altération anthropique répertoriée (par exemple, des phénomènes naturels d'influence thermale dans le bassin versant peuvent conduire au même type de résultat).

Il est difficilement concevable qu'une même espèce sélectionnée dans la même zone biogéographique puisse présenter des écologies sensiblement différentes à peu de kilomètres de distance. Il reste donc à préciser plus clairement son statut, ce que les jeux de données de l'étude initiale ne permettaient pas vraiment (il n'y avait que peu de continuums en long des cours d'eau qui soient suivis en plusieurs points de l'amont vers l'aval). Des acquisitions de données complémentaires seront donc réalisées en 2013 afin d'apporter des informations écologiques plus précises et de décider sur quelle base assurer un système d'évaluation définitif ne provoquant pas ces distorsions inter-ensembles naturels. On conservera peut-être le recours à deux variantes d'indice (IDA), mais il paraît plus logique de mieux déchiffrer l'écologie de certains taxons-clés comme NINC, d'utiliser le même calcul d'indice et d'adapter autant que de besoin le cadre interprétatif des notes pour en déduire l'état de façon spécifique et éventuellement différente sur les deux sous-ensembles naturels identifiés (HER regroupée « Plaine » versus HER regroupée « Volcan »).

Il est aussi possible que l'actuel jeu de données présente ses propres limites qui ne soient pas indépendantes vis-à-vis de certains problèmes rencontrés. Même si le système proposé donne déjà des résultats d'évaluation de bonne consistance et ce, malgré l'aspect un peu limité de l'information écologique disponible pour forger les profils de qualité de la plupart des taxons inclus dans l'indice, la structure du jeu de données révèle un faible nombre de taxons bien adaptés au contexte, fortement occurrents et abondants et, assez rapidement derrière, l'intervention d'un grand nombre de taxons à occurrence et abondance relative très modérées, pour lesquelles l'information écologique collectée en 3 ans de programme n'est pas encore très consistante.

Une perspective à terme est donc de refaire et consolider, d'ici quelques années, la procédure biomathématique qui a été suivie afin de **compléter les listes de taxons susceptibles d'intervenir dans l'indice**, au vu d'un plus grand nombre de relevés, et de **consolider la connaissance écologique compilée sur chacun d'entre eux et leurs profils de qualité**, du fait du bagage-données accru les concernant.

Il reste un travail supplémentaire d'investigations de terrain à réaliser, souligné en Copil du 14/12/2012 :

- sur la zone fortement minéralisée de Martinique (HER regroupée « Plaine » et en particulier zone des Mornes). Outre le fait qu'il serait intéressant de compléter spécifiquement le dispositif de sites de référence sur cette zone ou sur la Plaine du Lamentin, qui en sont déficitaires, il sera très intéressant notamment de consolider la connaissance à diverses saisons sur des sites de référence valides, afin de mieux cerner l'étendue des possibles en matière d'hydrochimie entre la saison des pluies et les épisodes d'étiage intense. Ces apports permettraient d'affiner et de consolider le niveau de référence attribué en notes d'indice, ce qui est la pierre angulaire de la grille d'évaluation en EQRs. Sur ces zones très particulières, afin de préciser les cortèges de référence et l'écologie fine des espèces qui le composent, il faudrait aussi contrôler la liaison forçage thermique-flores (en référence à l'élévation de la température possible sous condition d'étiage sévère et de son rôle sur la sélection des espèces à cette saison) et la liaison apports saprobiques-flore (en référence à l'abondance des matériels végétaux et fruits tombant de façon naturelle avec une rythmicité saisonnière dans les cours d'eau) dans ce type naturel très particulier.
- en liaison également avec la problématique NINC (*Nitzschia inconspicua*) et son écologie (signe de dégradation ou non ?), hors le travail pré-cité de meilleure connaissance écologique des flores de référence de la zone des Mornes (point précédent) qui apportera, entre autres informations écologiques intéressantes, son lot d'informations complémentaires sur cette espèce faisant fortement partie de ses assemblages naturels, il convient aussi de progresser sur les déterminants de la présence de NINC sur la zone faiblement minéralisée de l'HER regroupée « Volcan », afin notamment de mieux cerner ses facteurs de forçage réels en Guadeloupe. Son apparition au long de certains bassins versants est-elle liée de façon forte à des influences directes d'altérations anthropiques ? Ou à l'apparition de conditions géochimiques assez fortement minéralisées et carbonatées et à une élévation thermique *in situ* (déterminant semblant aussi jouer un rôle dans le contexte des Antilles) qui expliqueraient sa présence à l'aval de rivières, en conjonction fortuite avec des pollutions anthropiques ? Pour avoir les moyens de bien préciser si cette espèce en Guadeloupe est révélatrice de pollutions ou plus indicatrice d'augmentation de la minéralisation de l'eau, il est important d'effectuer de façon complémentaire quelques profils en long de rivières où on trouve cette espèce à l'aval, souvent en situation associée à des pollutions, afin de mieux repérer si elle apparaît avec la pression anthropique ou déjà plus à l'amont, hors forçage anthropique, avec l'accroissement de forçages naturels (minéralisation, carbonatation et température *in situ*) qui lui conviennent.

Cette question est importante car, s'il se confirmait que ce taxon répond plus aux gradients géochimiques naturels qu'à la pollution, il vaudrait mieux éviter de « polluer » les résultats d'évaluation indicielle de toute l'HER « Volcan » par une interprétation erronée de l'écologie de certaines espèces dont celle-ci, au détriment de la sensibilité de l'outil.

Cette problématique principalement soulevée en Basse-Terre de Guadeloupe, au contexte général peu minéralisé, doit être résolue proprement car elle a aussi des répercussions sur la zone volcan de Martinique, où s'appliquent des conditions naturelles moyennes un peu plus minéralisées et où, au moins à certaines dates, le classement de certains sites semble trop sévère dans l'état (scénario d'évaluation Post-Copil développé en Partie III du rapport) sans qu'il semble y avoir une raison claire de pression anthropique.

Le cas du site CER, Anse Céron, qui se classe régulièrement en-dessous du Bon Etat Ecologique sans raison anthropique évidente et du seul fait d'une présence notable de NINC, est emblématique des conséquences de ce changement et de l'importance de bien préciser l'écologie de cette espèce pour une classification judicieuse de l'état écologique réel des sites. Mais de façon moins flagrante, il ne faudrait pas non plus noter de façon trop sévère d'autres sites de Martinique ou de Guadeloupe au seul fait que cette espèce y est sensiblement représentée, si cette notation n'est pas en conformité avec les descripteurs d'anthropisation mesurés ou analysés *in situ*.

Il y a donc aussi à ré-examiner les différences de composition hydrochimique naturelle des cours d'eau de l'HER regroupée « Volcan » (= fonds géochimique), qui portent probablement une part d'explication de l'absence ou de la présence de cette espèce, en liaison avec des influences thermales ou la présence ou l'absence sur le bassin versant d'inclusions métamorphiques fortement minéralisées à base de roches sédimentaires carbonatées.

Il reste enfin finir d'examiner en inter-HER si les populations de NINC semblent bien homogènes sur le plan taxonomique (vérifications par imagerie au microscope électronique), ce qui jusqu'à présent a semblé être systématiquement le cas mais nécessite un travail complémentaire pour clore définitivement cette question.

Il est à souligner que les investigations complémentaires qui seront réalisées en 2013 ont fait l'objet d'une réflexion inter-acteurs pour permettre une utilisation synergique des nouveaux référentiels à venir. Ils permettront : 1) de préciser le fonds géochimique de certains bassins versants encore insuffisamment qualifiés sur le plan de leur hydrochimie naturelle (questionnement actuel des Offices de l'Eau et DEALs de Guadeloupe et Martinique), et 2) de mieux renseigner certains aspects encore insuffisamment documentés sur l'écologie des cortèges diatomiques de ces cours d'eau, au service d'un meilleur diagnostic d'état écologique (questionnement partagé par toutes les parties prenantes de ce programme de bio-indication diatomique).

Ces référentiels complémentaires, qui vont venir en renforcement de ceux acquis pendant les 3 ans du présent programme, doivent aider à finaliser un dispositif optimisé permettant l'évaluation fiable de l'Etat Ecologique des cours d'eau, utilisable ensuite sur la durée du prochain plan de gestion. Certains travaux viseront à renforcer la couverture des sites de référence ou pseudo-référence, notamment en zones géographiques actuellement déficitaires. Les données obtenues permettront de conforter le niveau de référence fixé pour les zones géographiques naturelles d'application et d'optimiser, si nécessaire, les grilles d'interprétation en EQRs. D'autres données obtenues, notamment pour préciser certaines relations entre hydrochimie naturelle ou anthropique et flores (cf problématique autour de l'écologie de NINC), permettront d'éclairer le questionnement actuel suivant, et d'aider à la prise de décision finale :

- **est-ce qu'un seul et même indice**, moyennant adaptation du cadre interprétatif selon le zonage naturel de référence, **peut servir sur le réseau hydrographique permanent des deux Antilles ?** (ce qui serait bien sûr le plus simple pour l'utilisation pratique actuelle et les opérations ultérieures de maintenance et de ré-actualisation des méthodes)
- ou faut-il envisager une assise de calcul un peu différente au niveau des listes d'espèces entrant en jeu sur une HER regroupée ou l'autre ? (cas de figure actuel d'utilisation de **2 variantes de l'IDA** portant sur une **liste légèrement différente de taxons d'alerte**)

Dans tous les cas, il faut que le système qui sera consolidé trouve sa légitimité dans l'information écologique sur les flores procurée par les données locales, et notamment par une réponse claire des espèces aux gradients d'anthropisation.

Le premier indice proposé, l'IDA, base son diagnostic sur **une métrique intégratrice de 8 descripteurs d'anthropisation**, dont il n'a pas été possible d'isoler les effets particuliers compte-tenu de la structuration particulière de ce jeu de données Antilles (trop forte auto-corrélation de tous ces descripteurs d'une part, et vecteurs de composantes principales exerçant en outre un effet complètement groupé dans l'espace des données). Le gradient global d'altération anthropique a été représenté en utilisant le référentiel de valeurs du GCMA (Gradient Composite Multimétrique d'Anthropisation), valeurs calculées en chaque site à partir des résultats correspondants d'analyses de l'eau. A ce titre, ce nouvel indice est conçu pour évaluer l'altération d'état écologique lié à une **altération composite de la qualité de l'eau**.

A l'instar de l'IPS et de l'IBD pour la métropole et l'Europe de l'Ouest, et même s'il a été construit selon une philosophie et une méthodologie assez différentes (cf recours pour l'IDA à une liste limitée de taxons d'alerte), **il permet de diagnostiquer de façon assez fiable et sensible les pollutions trophiques** (enrichissement en éléments minéraux inorganiques liés à l'eutrophisation), **les pollutions saprobiques** (enrichissement en matière organique fermentescible), **les pollutions chimiques générales** (altération des milieux par une minéralisation excessive ou par l'intervention d'effets acidifiants ou alcalinisants, en liaison avec des apports chimiques industriels ou collectifs).

Par contre, cet indice n'est pas spécifiquement conçu pour un diagnostic de pollutions toxiques et dans l'état, ne contient pas de métrique(s) calée(s) sur des effets de substances toxiques. Il répondra probablement à de telles pollutions par le changement de composition biocénotique éventuellement induit par ce type d'impacts, mais de façon ni spécifique, ni très sensible. Il pourrait donc être envisagé à l'avenir de mettre en place un programme et un indice plus à même de diagnostiquer l'effet de pollutions à toxiques, ce qui passe par le repérage de métriques susceptibles de répondre de façon assez sensible aux effets de telles altérations.

Les principaux micropolluants-cibles pour lesquels les diatomées seraient susceptibles d'apporter de l'information intéressante, du fait de leur sensibilité déjà constatée et publiée, seraient les métaux lourds et, bien sûr, les catégories de pesticides dont l'activité xénobiotique aurait le plus de chances de s'exercer sur ce maillon végétal phototrophe ou ses flores commensales (herbicides mais aussi fongicides et plus largement, biocides totaux utilisant des principes toxiques à action générale). Parmi les substances émergentes et notamment la pharmacopée médicamenteuse, certains travaux relatent aussi des réponses diatomiques assez convaincantes à l'exposition à des antibiotiques ...

Par ailleurs, dans le cadre d'études essayant en premier lieu d'envisager les conséquences d'expositions au niveau de la composition biocénotique (modification des cortèges d'espèces), il pourrait aussi être tiré parti de la fonction de bio-accumulation des biofilms et de leur pouvoir intégratif de la dimension temporelle de la contamination pour mesurer, de façon plus intégrative que par des prélèvements ponctuels d'eau, le niveau de contamination intégré *in situ* d'hydrosystèmes en divers pesticides.

A ce titre, outre la problématique locale liée à la pollution historique assez généralisée de l'environnement par des pesticides lipophiles très conservatifs dans les milieux naturels (exemples : chlordécone, Mirex...), il serait aussi souhaitable d'examiner le degré d'atteinte aux hydrosystèmes posé par la protection phytosanitaire de certaines cultures emblématiques des Antilles, notamment sur le plan des substances désherbantes qui, une fois les insecticides organochlorés retirés d'usage, sont les plus susceptibles de laisser une empreinte durable sur les écosystèmes et de migrer vers les hydrosystèmes. La question peut aussi se poser (elle est régulièrement re-soulevée) du devenir environnemental de substances fongicides pouvant présenter une certaine rémanence (notamment matières actives de la famille des triazoles employées régulièrement sur les cultures bananières vis-à-vis de la cercosporiose noire).

## Liste des Références

Référence 1 : AFNOR, 2007. Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD). Norme NF T: 90-354.

Référence 2 : Bertolli L.M. 2010 *Diatomacea soperifiticas em substrates natural e artificial, reservatorio do rio passauna, regiao metropolitan de Curitiba, Parana*. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Botânica, Departamento de Botânica, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná. pp229

Référence 3 : Blanco S., Cjugo-Figueiras C., Alvarez-Blanco I., Bécaries E., Hoffmann L. & Ector L. 2010 *Atlas de las diatomeas de la Cuenca del Duero*. Universidad de Leon - Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann. p.49-52 et 180-191

Référence 4 : Bourrelly, P. and Manguin, E. 1952 *Algues d'eau douce de la Guadeloupe et dépendances*. Centre National de la Recherche Scientifique, Société d'Edition d'Enseignement Supérieur, Paris. 281 pp

Référence 5 : Boutry, S., Gassiole, G., Rosebery, J., Giraudel, J.L., Peres, F., Coste, M., Delmas, F. 2012. Mise au point d'un indice diatomique pour les cours d'eau de la Réunion (IDR) : Rapport final sur la démarche d'élaboration de l'indice. Rapport OLE Réunion-Asconit-Irstea, Version finale, 10-10-2012, 98 pages + annexes

Référence 6 : Bottin Marius (2012) Rapport de thèse « Structure des assemblages de diatomées benthiques en rivière : l'environnement explique-t-il tout ? ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale « Sciences et Environnements » Spécialité « Ecologie », soutenue à l'Université Bordeaux 1, Talence (France) le 28/08/2012.

Référence 7 : Box, G. E. P. and D. R. Cox (1964). "An Analysis of Transformations." *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 26(2): 211-252.

Référence 8 : ter Braak, C. (1987). "The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis." *Vegetatio* 69: 69-77.

Référence 9 : Chandesris A., Wasson J-G, Pella H. 2005 Hydro-écorégions de la Martinique. Proposition de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre sur l'Eau. Rapport Cemagref.

Référence 10 : Compère P. et Riaux-Gobin C. 2009 Diatomées de quelques biotopes marins, saumâtres et dulçaquicoles de Guinée (Afrique occidentale). *Systematics and Geography of Plants* 79 : 33-66

Référence 11 : Coste M., Boutry S., Tison-Rosebery J. et Delmas F. 2009 Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators*, 9 : 621-650

Référence 12 : Coste M. in CEMAGREF, 1982. Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. CEMAGREF rapport Q.E. Lyon A.F. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, 218 pp (IPS Coste).

Référence 13 : Danielidis D.B. and Mann D.G. 2002 The systematics of *Seminavis* (Bacillariophyta) : the lost identities of *Amphora angusta*, *A. ventricosa* and *A. macilenta*. *European Journal of Phycology* 37(3) : 429-448

Référence 14 : Danielidis Daniel B. and Mann David G. 2003 New species and new combinations in the genus *Seminavis* (Bacillariophyta). *Diatom Research* 18(1) : 21-39

Référence 15 : Dray, S. and Dufour, A.B. (2007): The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*. 22(4): 1-20.

Référence 16 : Dufrene M, and Legendre, P, 1997. Species assemblages and indicator species : the need for a flexible asymmetrical approach. Ecological Monographs, 67: 345-66 (Indval).

Référence 17 : Hlubikova D., Ector L. & Hoffmann L. 2011 Examination of the type material of some diatom species related to *Achnanthidium minutissimum* (Kütz) Czarn. (Bacillariophyceae). Algological Studies 136/137 : 19-43

Référence 18 : Jahn R., Kusber W-H & Romero O.E. 2009 *Cocconeis pediculus* Ehrenberg and *C. placentula* Ehrenberg var. *placentula* (Bacillariophyta) : Typification et taxonomy. Fottea 9(2) : 275-288

Référence 19 : Jari Oksanen, F. Guillaume Blanchet, Roeland Kindt, Pierre Legendre, Peter R. Minchin, R. B. O'Hara, Gavin L. Simpson, Peter Solymos, M. Henry, H. Stevens and Helene Wagner (2012). vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-3. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Référence 20 : J.O.C.E. 09/2000 - European Parliament and Council 2000 Water Framework Directive 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities L327, 1-73.

Référence 21 : Jüttner I., Chimonides J. & Cox E.J. 2011 Morphology, ecology and biogeography of diatom species related to *Achnanthidium pyrenaicum* (Hustedt) Kobayasi (Bacillariophyceae) in streams of the Indian and Nepalese Himalaya. Algological Studies 136/137 : 45-76

Référence 22 : Kelly M.G., Bennett C., Coste M., Delmas F., Denys L., Ector L., Fauville C., Ferreol M., Golub M., Jarlmann A., Kahlert M., Lucez J., Ni Chatain B., Pardo, I., Pfister P., Pinciska-Faltynowicz J., Schranz C., Tison J., Van Dam H. & Vilbaste S. 2007 Central/Baltic GIG Phytobenthos Intercalibration Exercise.

[http://circa.europa.eu/Public/irc/jrc/jrc\\_eewai/library?l=/intercalibration\\_2/latest\\_committee/rivers/phytobenthosdoc/\\_EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/jrc/jrc_eewai/library?l=/intercalibration_2/latest_committee/rivers/phytobenthosdoc/_EN_1.0_&a=d)

Référence 23 : Kelly M. G. & Whitton B.A. 1995 The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. Journal of Applied Phycology 7: 433-444.

Référence 24 : Kermarrec L. 2012 Apport des outils de la biologie moléculaire pour l'utilisation des diatomées comme bioindicateurs de la qualité des écosystèmes aquatiques lotiques et pour l'étude de leur taxonomie. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble

Référence 25 : Kohonen T., 1995. Self-Organizing Maps, volume 30 of Springer Series in Information Sciences}. Springer, Berlin, Heidelberg. (Second Extended Edition 1997).

Référence 26 : Krammer K. 1988 The *Gibberula*-group in the genus *Rhopalodia* O. Müller (Bacillariophyceae) II. Revision of the group and new taxa. Nova Hedwigia 47(1-2) : 159-205

Référence 27 : Lange-Bertalot H. and Krammer K. 1993 Observations on *Simonsenia* and some small species of *Denticula* and *Nitzschia*. Nova Hedwigia 106 : 121-131

Référence 28 : Legendre, P. & Legendre, L. Numerical Ecology. (Elsevier, 2012).

Référence 29 : Lenoir A. & Coste M. 1996 Development of a practical diatom index of overall water quality applicable to the French National Water Board network. In Whitton, B. A. & E. Rott (eds), Use of Algae for Monitoring Rivers II. Institut für Botanik. Universität Innsbruck: 29-43.(IBD Lenoir & Coste)

Référence 30 : Monnier O., Lange-Bertalot H., Bertrand J. 2002 La flore des diatomées d'un aquarium d'eau douce tropicale I. Observations taxinomiques. Actes du 21ème Colloque de l'ADLaF

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
Rapport final

Référence 31 : Morales E. A. 2005 Observations of the morphology of some know and new fragilaroid diatoms (Bacillariophyceae) from rivers in the USA. Phycological Research 53 : 113-133

Référence 32 : Morales E.A., Ector L., Fernandez E., Novais M.H., Hlubikova D., Hamilton P.B., Blanco S., Vis M.L., Kociolek J.P. 2011 The genus *Achnanthidium* Kütz (Achnanthales, Bacillariophyceae) in Bolivian streams : a report of taxa found in recent investigations. Algological Studies 136/137 : 89-130

Référence 33 : Morales E.A., Vis M.L. 2007 Epilithic diatoms (bacillariophyceae) from cloud forest and alpine streams in Bolivia, South America. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 156 : 123-155.

Référence 34 : Nisbet M. et Verneaux J. 1970 Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classe en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. Annales de Limnologie 6(2) : 161-190

Référence 35 : Reichardt E. 1997 Taxonomische Revision des Artenkomplexes um *Gomphonema pumilum* (Bacillariophyceae). Nova Hedwigia 65 (1-4) : 99-129

Référence 36 : Reichardt E. 2005 Die Identität von *Gomphonema entolejum* Ostrup (Bacillariophyceae) sowie Revision ähnlicher Arten mit weiter Axialarea. Nova Hedwigia 81(1-2) : 115-144

Référence 37 : Rott E., Hofmann G., Pall K., Pfister P. & Pipp E. 1997 Indikationslisten für Aufwuchsalgen. Teil 1: Saprobielle Indikation. Publ. Wasserwirtschaftskataster, BMfLF: 1-73.(SI Rott)

Référence 38 : Rott E., Van Dam H., Pfister P., Pipp E., Pall K., Binder N. & Ortler K. 1999 Indikationslisten für Aufwuchsalgen. Teil 2: Trophieindikation, geochemische Reaktion, toxikologische und taxonomische Anmerkungen. Publ. Wasserwirtschaftskataster, BMfLF: 1-248.(TI Rott)

Référence 39 : Schoeman F.R. & Archibald R.E.M. 1979 The Diatom Flora of Southern Africa N°5: *Navicula tenera*. CSIR Special Report WAT 50

Référence 40 : Segura-Garcia V., Israde-Alcantara I., Maidana N.I The genus *Navicula sens stricto* in the upper Lerma basin, México.I

Référence 41 : Siver P.A. & Kling H. 1997 Morphological observations of *Aulacoseira* using scanning electron microscopy. Can. J. Bot. 75 : 1807-1835

Référence 42 : Snoeijs P. 1992 Studies in the *Tabularia fasciculata* complex. Diatom Research 7 (2) : 313-344

Référence 43 : Sterrenburg F.A.S. 2001 Studies on the genera *Pleurosigma* and *Gyrosigma*. Academy of Naturel Sciences of Philadelphia 151 : 121-127

Référence 44 : Tison J., Coste M., Delmas F., Chandesris A., Mengin N. et Wasson J.G. 2005 Flores diatomiques des cours d'eau : Typologie des assemblages de référence au niveau du territoire Français. Proposition de valeurs limites du « Bon Etat » pour l'IPS et l'IBD. Rapport Cemagref

Référence 45 : 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, p. 3177 – 3188.

Référence 46 : Trobajo R., Rovira L., Ector L., Wetzel C.E., Kelly M. and Mann D.G. 2012 Morphology and identity of some ecologically important small *Nitzschia* species. Diatom Research 27 : 1-23

Référence 47 : Tudesque L., Ector L., 2002. Pré-atlas iconographique des rivières de la Guadeloupe. p78.

Référence 48 : Tuji A. & Williams D.M. 2008 Typification and type examination of *Synedra familiaris* Kütz. And related taxa. Diatom 24 : 25-29

Référence 49 : Ueda A., Watanaba T., Akaneya K. and Katano N. 2009 Diatoms in Akita Prefecture, northern part of Japan, part 1—Diatoms in strongly acidic hot springs. Diatom 25 : 116-119

Référence 50 : Van Dam, H., A. Mertens, et al. (1994). "A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands." Netherlands Journal of Aquatic Ecology 28(1): 117-133.

Référence 51 : Ward, J. H. (1963). "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function." Journal of the American Statistical Association 58(301): 236-244.

Référence 52 : Wasson J-G, Chandesris A., Pella H. 2004 Hydro-écorégions de la Guadeloupe. Proposition de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre sur l'Eau. Rapport Cemagref

Référence 53: Williams D.M. and Round F.E. 1987 Revision of the genus *Fragilaria*. Diatom Research, 2 (2) : 267-288

Référence 54 : Wydrzycka U., Lange-Bertalot H. 2001 Las diatomeas (Bacillariophyceae) acidofilas del río Agrio y sitios vinculados con su cuenca, volcán Poás, Costa Rica. BRENESIA 55-56. pp68

## **ANNEXES**

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## Annexe 1 : Liste des taxons inventoriés selon leur abondance relative

TAXONS DOMINANTS			
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale	commentaires
Achnanthes brevipes Agardh var. <i>intermedia</i> (Kütz.) Cleve	ABIN	8	espèce haline
Achnanthes rupestoides Hohn var. <i>uniseriata</i> Lange-Bertalot & Monnier	ARPU	115	
Achnanthidium catenatum (Bily & Marvan) Lange-Bertalot	ADCT	164	
<b>Achnanthidium exiguum (Grunow) Czarnecki</b>	<b>ADEG</b>	<b>58</b>	<b>espèce cible</b>
Achnanthidium minutissimum (Kützing) Czarnecki	ADMI	155	
Achnanthidium sp10	AD10	48	
Achnanthidium sp11	AD11	22	
Achnanthidium sp13	AD13	28	
Achnanthidium sp19	AD19	53	
Achnanthidium sp5	AD05	59	
Achnanthidium sp7	AD07	39	
Achnanthidium sp8	AD08	24	
Achnanthidium subhudsoni (Hustedt) H. Kobayasi	ADSH	313	
Adlafia muscoria (Kociolek & Reviers) Moser Lange-Bertalot & Metzeltin	AMUS	222	
Brachysira neoexilis forme 1	BNE1	11	
Brachysira neoexilis forme 2	BNE2	23	
Brachysira sp1	BR01	33	
Cocconeis euglypta Ehrenberg	CEUG	317	
Cocconeis sp1	CO01	18	
<b>Cyclotella atomus var. <i>gracilis</i> Genkal &amp; Kiss</b>	<b>CAGR</b>	<b>9</b>	<b>espèce cible</b>
Cymbella tropica Krammer var. <i>tropica</i> Krammer	CTRO	44	
Denticula sp1	DEN1	248	
Diadesmis confervacea Kützing f. <i>rostrata</i> (Krasske) Metzeltin & Lange-Bertalot	DCRS	29	
<b>Diadesmis confervacea Kützing var. <i>confervacea</i></b>	<b>DCOF</b>	<b>54</b>	<b>espèce cible</b>
Diadesmis contenta (Grunow ex V. Heurck) Mann	DCOT	209	
Eolimna minima(Grunow) Lange-Bertalot	EOMI	208	
Eolimna ruttneri (Hustedt) Lange-Bertalot & Monnier	EORU	210	
Eolimna sp1	EO01	326	
Eolimna sp2	EO02	95	
Eolimna sp3	EO03	67	
<b>Eolimna sp5</b>	<b>EO05</b>	<b>70</b>	<b>espèce cible</b>
Eolimna sp6	EO06	271	
Eolimna sp8	EO08	13	
<b>Eolimna subminuscula (Manguin) Moser Lange-Bertalot &amp; Metzeltin</b>	<b>ESBM</b>	<b>127</b>	<b>espèce cible</b>
Epithemia adnata (Kützing) Brebisson	EADN	10	
Eunotia exigua forme 1	EEX1	8	
Fallacia tenera (Hustedt) Mann in Round	FTNR	106	
<b>Fallacia tenera forme 1</b>	<b>FTN1</b>	<b>13</b>	<b>espèce cible</b>
Fistulifera saprophila (Lange-Bertalot & Bonik) Lange-Bertalot	FSAP	114	
Fragilaria fonticola Hustedt	FFON	87	
Fragilaria gouldii (Brébisson) Lange-Bertalot	FGOU	166	
Frustulia crassinervia (Breb.) Lange-Bertalot et Krammer	FCRS	21	
Geissleria decussis (Ostrup) Lange-Bertalot & Metzeltin	GDEC	91	
Geissleria sp1	GE01	83	
Gomphonema bourbonense E. Reichardt et Lange-Bertalot	GBOB	292	
Gomphonema designatum E. Reichardt	GDES	359	
Gomphonema lagenua Kützing	GLGN	50	
Gomphonema parvulum (Kützing) Kützing var. <i>parvulum</i> f. <i>parvulum</i>	GPAR	263	
Gomphonema sp48	GO48	3	
Gomphonema sp51	GP51	153	
Gomphonema sp53	GO53	67	
Gomphonema sp54	GO54	41	
<b>Gomphonema sp58</b>	<b>GO58</b>	<b>22</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Gomphonema sp59</b>	<b>GO59</b>	<b>21</b>	<b>espèce cible</b>
Gomphonema sp63	GO63	11	
<b>Gomphonema sp66</b>	<b>GO66</b>	<b>24</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Gomphonema sp70</b>	<b>GO70</b>	<b>3</b>	<b>espèce cible</b>
Gomphonema sp71	GO71	62	
<b>Gomphonema sp74</b>	<b>GO74</b>	<b>38</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Gomphonema sp75</b>	<b>GO75</b>	<b>4</b>	<b>espèce cible</b>
Gomphonema sp76	GO76	35	
Gomphonema sp91	GO91	15	
Gomphosphenia oahuensis (Hustedt) Lange-Bertalot	GOAH	26	espèce haline
Gomphosphenia sp1	GPP1	33	
<b>Halamphora subturgida (Hustedt) Levkov</b>	<b>HTSU</b>	<b>161</b>	<b>espèce cible</b>
Luticola mutica (Kützing) D.G. Mann	LMUT	28	espèce haline
Luticola sp1	LU01	9	espèce haline
<b>Mayamaea atomus var. <i>permisis</i> (Hustedt) Lange-Bertalot</b>	<b>MAPE</b>	<b>169</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Navicula arvensis Hustedt</b>	<b>NARV</b>	<b>129</b>	<b>espèce cible</b>
Navicula cruxmeridionalis Metzeltin, Lange-Bertalot & Garcia-Rodriguez	NCXM	307	

## Annexe 1 (2)

TAXONS DOMINANTS			
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale	commentaires
<i>Navicula erifuqa</i> forme 2	NER2	76	
<i>Navicula incarum</i> Lange-Bertalot & Rumrich	NINK	197	
<i>Navicula quasidisjuncta</i> Lange-Bertalot & Rumrich	NQDJ	69	
<i>Navicula simulata</i> Manguin	NSIA	263	
<i>Navicula(dicta) seminulum</i> forme 2	ND02	101	
<b><i>Navicula(dicta) seminulum</i> forme 3</b>	<b>ND03</b>	<b>87</b>	espèce cible
<i>Naviculadicta nanogomphonema</i> Lange-Bertalot & Rumrich	NNGO	246	
<b><i>Nitzschia amphibia</i> Grunow f.amphibia</b>	<b>NAMP</b>	<b>169</b>	espèce cible
<i>Nitzschia aurariae</i> Cholnoky	NAUR	9	espèce haline
<i>Nitzschia clausii</i> Hantzsch	NCLA	94	
<i>Nitzschia denticula</i> Grunow	NDEN	5	
<b><i>Nitzschia frustulum</i> forme 2</b>	<b>NIF2</b>	<b>19</b>	espèce cible
<i>Nitzschia frustulum</i> forme 3	NIF3	2	
<i>Nitzschia frustulum</i> (Kützing)Grunow var. <i>frustulum</i>	NIFR	214	
<i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow	NINC	309	
<b><i>Nitzschia kurzii</i> Rabenhorst</b>	<b>NKUZ</b>	<b>9</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W.Smith</b>	<b>NPAL</b>	<b>191</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia palea</i> forme 2</b>	<b>NPA2</b>	<b>81</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia palea</i> forme 3</b>	<b>NPA3</b>	<b>22</b>	espèce cible
<i>Nitzschia palea</i> forme 5	NPA5	20	
<i>Nitzschia palea</i> forme 6	NPA6	52	
<i>Nitzschia</i> sp41	NI41	188	
<b><i>Nitzschia</i> sp44</b>	<b>NI44</b>	<b>29</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia</i> sp45</b>	<b>NI45</b>	<b>28</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia</i> sp47</b>	<b>NI47</b>	<b>31</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia</i> sp50</b>	<b>NI50</b>	<b>7</b>	espèce cible
<b><i>Nitzschia</i> sp64</b>	<b>NI64</b>	<b>17</b>	espèce cible
<i>Nupela rumrichorum</i> Lange-Bertalot	NURU	38	
<i>Nupela</i> sp1	NUP1	179	
<i>Planothidium robustius</i> (Hustedt) Lange-Bertalot	PRBU	260	
<i>Rhopalodia</i> sp1	RH01	19	
<i>Sellaphora</i> <i>seminulum</i> (Grunow) D.G. Mann	SSEM	265	
<b><i>Seminavis strigosa</i> (Hustedt) Danieleidis &amp; Economou-Amilli</b>	<b>SMST</b>	<b>60</b>	espèce cible
<i>Thalassiosira</i> sp1	TAS1	3	espèce haline
<i>Thalassiosira</i> sp2	TAS2	4	espèce haline
<b><i>Tryblionella balatonis</i></b>	<b>TRBA</b>	<b>5</b>	espèce cible
<i>Tryblionella debilis</i> Arnott ex O'Meara	TDEB	106	
<i>Ulnaria pseudogaillonii</i> (Kobayasi & Idei) Idei	UPSG	57	
108 taxons dont			
100 taxons indicuels dont			
<b>29 taxons cibles</b> "-"			

## Annexe 1 (3)

TAXONS PRINCIPAUX			
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale	Commentaires
Achnanthidium sp14	AD14	25	
Cocconeis placentula Ehrenberg var.lineata (Ehr.)Van Heurck	CPLI	24	
Craticula molestiformis (Hustedt) Lange-Bertalot	CMLF	72	
Diadesmis sp5	DI05	54	
Eunotia exigua forme 2	EEX2	4	
Eunotia sp20	EU20	15	
Eunotia subarcuatoides Alles Nörpel & Lange-Bertalot	ESUB	13	
<b>Fragilaria sp2</b>	<b>FR02</b>	<b>8</b>	<b>espèce cible</b>
Gomphonema brasiliense ssp.pacificum Moser Lange-Bertalot & Metzeltin	GBPA	91	
Gomphonema exilissimum(Grun.) Lange-Bertalot & Reichardt	GEXL	47	
<b>Gomphonema sp52</b>	<b>GO52</b>	<b>7</b>	<b>espèce cible</b>
Gomphonema sp62	GO62	25	
Gomphonema sp67	GO67	7	
Gomphonema sp68	GO68	4	
Gomphonema sp69	GO69	5	
Gomphonema sp72	GO72	27	
Gomphonema sp77	GO77	4	
Gomphonema sp82	GO82	10	
Gomphonema sp85	GO85	19	
Gyrosigma reimieri Sterrenburg	GYRE	25	
Halamphora montana (Krasske) Levkov	HLMO	57	
Luticola sp4	LU04	16	
Navicula cryptotenella Lange-Bertalot	NCTE	22	
<b>Navicula erifuga forme 3</b>	<b>NER3</b>	<b>10</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Navicula erifuga Lange-Bertalot</b>	<b>NERI</b>	<b>101</b>	<b>espèce cible</b>
Navicula escambia (Patrick) Metzeltin & Lange-Bertalot	NESC	17	
Navicula notha Wallace	NNOT	43	
Navicula salinicola Hustedt	NSLC	72	
<b>Navicula sp54</b>	<b>NA54</b>	<b>39</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Navicula supergregaria Lange-Bertalot &amp; Rumrich</b>	<b>NSGG</b>	<b>29</b>	<b>espèce cible</b>
Nitzschia acidoclinata Lange-Bertalot	NACD	65	
Nitzschia filiformis var.conferta (Richter) Lange-Bertalot	NFIC	70	
Nitzschia sp49	NI49	12	
<b>Nitzschia sp78</b>	<b>NI78</b>	<b>10</b>	<b>espèce cible</b>
Planothidium frequentissimum(Lange-Bertalot)Lange-Bertalot	PLFR	45	
Simonsenia delognei Lange-Bertalot ssp. rossii	SDRO	41	
Skeletonema sp1	SKS1	1	
Ulnaria lanceolata (Kütz.) Compère	ULAN	33	
38 taxons dont			
37 taxons indicuels dont			
<b>7 taxons cible "-"</b>			

## Annexe 1 (4)

TAXONS SECONDAIRES			
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale	Commentaires
Achnanthidium sp15	AD15	4	
Achnanthidium sp16	AD16	6	
Achnanthidium sp9	AD09	6	
Actinocyclus sp.	ACTC	1	
<b>Adlafia sp1</b>	<b>ADS1</b>	<b>9</b>	
Amphora sp1	AM01	4	
Amphora sp8	AM08	1	
Brachysira sp2	BR02	3	
Caloneis lancettula (Schulz) Lange-Bertalot & Witkowski	CLCT	46	
Caloneis sp2	CA02	1	
Caloneis sp3	CA03	1	
Cocconeis placentula Ehrenberg var. placentula	CPLA	30	
<b>Cocconeis placentula var. placentula sensu Jahn &amp; al. (2009)</b>	<b>CPL1</b>	<b>22</b>	
Cocconeis placentula var.euglypta (Ehr.) Grunow abnormal form	CPEA	10	
<b>Cocconeis sp2</b>	<b>CO02</b>	<b>15</b>	
Cocconeis sp3	CO03	1	
Craticula sp1	CRA1	14	
<b>Cyclotella atomus Hustedt</b>	<b>CATO</b>	<b>4</b>	<b>espèce cible</b>
Cyclotella meneghiniana Kützing	CMEN	6	
Cyclotella sp1	CYL1	1	
Cyclotella sp2	CYL2	1	
<b>Cymbella sp1</b>	<b>CYM1</b>	<b>19</b>	
<b>Diadesmis confervaceoides Lange-Bertalot &amp; Rumrich</b>	<b>DCFD</b>	<b>5</b>	<b>espèce cible</b>
Diadesmis sp1	DI01	26	
Diadesmis sp3	DI03	3	
Diadesmis sp4	DI04	11	
Diploneis sp2	DP02	1	
Discostella pseudostelligera (Hustedt) Houk et Klee	DPST	9	
Encyonema silesiacum (Bleisch in Rabh.) D.G. Mann	ESLE	48	
<b>Encyonema sp2</b>	<b>EN02</b>	<b>4</b>	
Eolidina comperei Ector, Coste et Iserentant	ELOC	1	
Eolidina lepidula (Manguin) Metzeltin & Lange-Bertalot	ELEP	20	
<b>Eolidina sp7</b>	<b>EO07</b>	<b>9</b>	
<b>Eunotia exigua (Brebisson ex Kützing) Rabenhorst</b>	<b>EEXI</b>	<b>6</b>	
Eunotia minor (Kützing) Grunow in Van Heurck	EMIN	1	
<b>Eunotia sp22</b>	<b>EU22</b>	<b>7</b>	
<b>Eunotia sp23</b>	<b>EU23</b>	<b>9</b>	
Eunotia sp25	EU25	5	
Fallacia insociabilis (Krasske) D.G. Mann	FINS	23	
<b>Fragilaria sp1</b>	<b>FR01</b>	<b>15</b>	<b>espèce cible</b>
Fragilaria sp8	FR08	2	
Frustulia sp1	FU01	6	
Geissleria ignota (Krasske)Lange-Bertalot & Metzeltin	GINO	2	
Gomphonema affine Kützing	GAFF	22	
Gomphonema angustatum (Kützing) Rabenhorst	GANG	13	
Gomphonema sp60	GO60	3	
Gomphonema sp61	GO61	14	
Gomphonema sp64	GO64	11	
<b>Gomphonema sp73</b>	<b>GO73</b>	<b>4</b>	
Gomphonema sp78	GO78	7	
Gomphonema sp79	GO79	6	
Gomphonema sp80	GO80	9	
Gomphonema sp81	GO81	15	
Gomphonema sp83	GO83	7	
Gomphonema sp84	GO84	3	
Gomphonema sp92	GO92	3	
Gomphonema sp96	GO96	9	
Gomphonema sp99	GO99	1	
<b>Gomphosphenia tenerima (Hustedt) Reichardt</b>	<b>GTNR</b>	<b>23</b>	<b>espèce cible</b>
Gyrosigma sciotense (Sullivan et Wormley) Cleve	GSCI	28	
Inconnue n°1	IN01	4	
Inconnue n°3	IN03	27	
Inconnue n°5	IN05	5	
Luticola aequatorialis (Heiden)Lange-Bertalot et Ohtsuka	LAEQ	18	
Luticola sp12	LU12	3	
Luticola sp2	LU02	5	
Mayamaea sp2	MA02	2	
Mayamaea sp3	MA03	7	
Navicula arvensis forme 1	NAR1	12	
Navicula difficillima Hustedt	NDIF	24	
Navicula erifuga forme 1	NER1	3	espèce haline
<b>Navicula gregaria Donkin</b>	<b>NGRE</b>	<b>27</b>	
Navicula humboldtiana Lange-Bertalot & Rumrich	NHUB	52	
<b>Navicula jacobii Manguin</b>	<b>NJAC</b>	<b>29</b>	<b>espèce cible</b>
Navicula longicephala Hustedt var.longicephala	NLGC	11	
<b>Navicula rostellata Kützing</b>	<b>NROS</b>	<b>80</b>	<b>espèce cible</b>
Navicula sp31	NA31	3	

## Annexe 1 (5)

TAXONS SECONDAIRES			
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale	Commentaires
Navicula sp32	NA32	4	
<b>Navicula sp33</b>	<b>NA33</b>	<b>3</b>	<b>espèce cible</b>
Navicula sp40	NA40	3	
Navicula sp41	NA41	2	
Navicula sp44	NA44	1	
Navicula sp46	NA46	6	
Navicula sp56	NA56	1	
Navicula sp60	NA60	2	
Navicula sp61	NA61	2	
Navicula sp62	NA62	7	
Navicula subrhynchocephala Hustedt	NSRH	8	
Navicula vilaplani(Lange-Bert. & Sabater) Lange-Bertalot & Sabater	NVIP	11	
Naviculadicta cosmopolitana Lange-Bertalot	NDCM	9	
Naviculadicta sassiana Metzeltin & Lange-Bertalot	NDSA	4	
Nitzschia amplectens Hustedt	NAMC	4	espèce haline
Nitzschia capitellata Hustedt in A.Schmidt & al.	NCPL	3	
<b>Nitzschia dissipata(Kützing)Grunow fo.maewensis Foged</b>	<b>NDMA</b>	<b>39</b>	
<b>Nitzschia filiformis (W.M.Smith) Van Heurck var. filiformis</b>	<b>NFIL</b>	<b>14</b>	
Nitzschia ingenua Hustedt	NING	11	
Nitzschia intermedia Hantzsch ex Cleve & Grunow	NINT	8	
Nitzschia lange-bertalotii Coste & Ricard	NZLB	13	
Nitzschia lorenziana Grunow in Cleve et Möller	NLOR	11	
Nitzschia palea forme 4	NP04	3	
Nitzschia semirobusta Lange-Bertalot morphotype semirobusta	NSRB	4	
Nitzschia serrata Manguin	NISE	4	
Nitzschia sp43	NI43	7	
Nitzschia sp69	NI69	1	
Nitzschia sp74	NI74	5	
<b>Nitzschia sp76</b>	<b>NI76</b>	<b>9</b>	
Nitzschia sp77	NI77	3	
Nitzschia subacicularis Hustedt in A.Schmidt et al.	NSUA	4	
Nitzschia umbonata(Ehrenberg)Lange-Bertalot	NUMM	8	
Nupela sp2	NUP2	9	
Orthoseira sp1	ORT1	1	
Pinnularia acrospheria W. Smith var. acrospheria	PACR	6	
<b>Pinnularia sp31</b>	<b>PI31</b>	<b>8</b>	<b>espèce cible</b>
<b>Pinnularia sp38</b>	<b>PI38</b>	<b>7</b>	<b>espèce cible</b>
Pinnularia sp41	PI41	1	
Planothidium biporumum (Hohn & Hellerman) Lange-Bertalot	PLBI	21	
Platessa sp1	PTS1	20	
Pleurosira laevis (Ehrenberg) Compere f.laevis Ehrenberg	PLEV	5	
Reimeria sinuata (Gregory) Kocolek & Stoermer	RSIN	1	
Rhopalodia gibba (Ehr.) O.Muller var.gibba	RGIB	2	
Rhopalodia sp2	RH02	4	
<b>Rhopalodia sp3</b>	<b>RH03</b>	<b>5</b>	
Sellaphora pupula (Kützing) Mereschkowsky	SPUP	21	
<b>Sellaphora sp1</b>	<b>SE01</b>	<b>7</b>	<b>espèce cible</b>
Sellaphora sp2	SE02	29	
Stauroneis thermicola (Petersen) Lund	STHE	24	
Surirella sp1	SU01	1	
Surirella stalagma Hohn & Hellerman	SSTG	6	
Thalassiosira sp3	TAS3	3	
Thalassiosira weissflogii (Grunow) Fryxell & Hasle	TWEI	5	
<b>Tryblionella apiculata Gregory</b>	<b>TAPI</b>	<b>7</b>	<b>espèce cible</b>
Tryblionella calida (grunow in Cl. & Grun.) D.G. Mann	TCAL	10	
<b>Tryblionella levidensis Wm. Smith</b>	<b>TLEV</b>	<b>7</b>	<b>espèce cible</b>
Tryblionella salinarum (Grunow in Cleve & Grunow) Pelletan	TSAL	6	
Tryblionella sp5	TR05	2	
135 taxons dont			
34 taxons indicuels dont			
<b>12 taxons cible "-"</b>			

## Annexe 1 (6)

TAXONS RARES		
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale
Achnanthes inflata (Kützing) Grunow	AINF	12
Achnanthidium sp17	AD07	1
Achnanthidium sp18	AD18	1
Achnanthidium sp4	AD04	3
Alveovallum sp1	ALV1	1
Amphora fontinalis Hustedt	AFON	8
Amphora pediculus (Kützing) Grunow	APED	1
Amphora sp10	AM10	1
Amphora sp3	AM03	3
Amphora sp4	AM04	1
Amphora sp5	AM05	5
Amphora sp6	AM06	3
Amphora sp9	AM09	2
Aulacoseira ambigua (Grunow) Simonsen	AAMB	3
Aulacoseira granulata (Ehr.) Simonsen var.angustissima (O.M.)Simonsen	AUGR	4
Bacillaria paxillifera(O.F. Müller) Hendey var.paxillifera	BPAX	3
Biremis clarensis W.Vyverman, Sabbe & R.Vyverman	BCLA	1
Caloneis hyalina Hustedt	CHYA	2
Caloneis molaris (Grunow) Krammer	CMOL	3
Caloneis sp1	CA01	8
Caloneis sp4	CA04	1
Caloneis sp5	CA05	1
Capartogramma crucicula(Grun.ex Cl.)Ross	CCRU	1
Chamaepinnularia sp1	CHA1	3
Cocconeis sp4	CO04	1
Cocconeis sp5	CO05	2
Cocconeis sp6	CO06	2
Craticula accomodiformis Lange-Bertalot	CACM	1
Cyclostephanos dubius (Fricke) Round	CDUB	1
Cyclostephanos invisitatus(Hohn & Hellerman)Theriot Stoermer & Hakansson	CINV	1
Cyclotella gamma Sovereign	CGAM	4
Denticula sundayensis Archibald	DSUN	5
Diadesmis arcuatooides Lange-Bertalot	DATO	2
Diadesmis paracontenta Lange-Bertalot & Werum ssp.paracontenta	DPCT	2
Diadesmis sp6	DI06	7
Diadesmis sp9	DI09	1
Diploneis sp1	DP01	8
Diploneis sp4	DP04	1
Diploneis sp5	DP05	1
Encyonema minutum (Hilse in Rabh.) D.G. Mann	ENMI	5
Encyonema sp1	EN01	1
Encyonopsis sp3	EN03	1
Encyonopsis subminuta Krammer & Reichardt	ESUM	4
Entomoneis sp.	ETOS	1
Eolimna minima(Grunow) Lange-Bertalot abnormal form	EOMT	2
Eolimna subminuscula (Mang.) Moser Lange-Bert.&Metzeltin abnormal form	ESBT	1
Eunotia formica Ehrenberg	EFOR	1
Eunotia monodon Ehrenberg var. monodon	EMON	2
Eunotia mucophila (Lange-Bert.&Norpel Schempp) Lange-Bertalot	EMUC	2
Eunotia muscicola Krasske var. muscicola	EMUS	2
Eunotia muscicola Krasske var. tridentula Norpel et Lange-Bertalot	EMTR	2
Eunotia naegeli Migula	ENAE	1
Eunotia sp21	EU21	3
Eunotia sp24	EU24	1
Eunotia sp28	EU28	1
Eunotia sp30	EU30	3
Eunotia sp31	EU31	1
Fallacia pygmaea (Kützing) Stickle & Mann ssp.pygmaea Lange-Bertalot	FPYG	1
Fragilaria capucina Desmazieres var.capitellata (Grunow) Lange-Bertalot	FCCP	1
Fragilaria goulardii (Brébisson) Lange-Bertalot abnormal form	FGOT	4
Fragilaria sp3	FR03	2
Fragilaria sp4	FR04	3
Fragilaria sp5	FR05	1
Fragilaria sp6	FR06	1
Frustulia neomundana Lange-Bertalot & Rumrich	FNMD	2
Frustulia pumilio Lange-Bertalot & Rumrich	FPUM	6
Frustulia vulgaris (Thwaites) De Toni	FVUL	7
Frustulia weinholdii Hustedt	FWEI	7
Gomphonema augur Ehrenberg	GAUG	2
Gomphonema sp47	GO47	4
Gomphonema sp49	GO49	3

## Annexe 1 (7)

TAXONS RARES		
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale
Gomphonema sp86	GO86	2
Gomphonema sp87	GO87	1
Gomphonema sp89	GO89	5
Gomphonema sp90	GO90	2
Gomphonema sp93	GO93	1
Gomphonema sp94	GO94	2
Gyrosigma acuminatum (Kützing) Rabenhorst	GYAC	1
Gyrosigma nodiferum (Grunow) Reimer	GNOD	1
Gyrosigma scalpoides (Rabenhorst) Cleve	GSCA	8
Hantzschia amphioxys (Ehr.) Grunow in Cleve et Grunow 1880	HAMP	5
Inconnue n°11	IN11	3
Inconnue n°13	IN13	1
Inconnue n°25	IN25	1
Inconnue n°6	IN06	3
Lemnicola hungarica (Grunow) Round & Basson	LHUN	2
Luticola saxophila (Bock ex Hustedt) D.G. Mann	LSAX	2
Luticola sp10	LU10	1
Luticola sp11	LU11	1
Luticola sp13	LU13	1
Luticola sp14	LU14	2
Luticola sp15	LU15	1
Luticola sp3	LU03	1
Luticola sp8	LU08	1
Luticola sp9	LU09	2
Mayamaea atomus var. alcimonica (Reichardt) Reichardt	MALC	7
Mayamaea sp1	MA01	5
Mayamaea sp6	MA06	1
Melosira nummuloides (Dillwyn) C.A. Agardh	MNUM	1
Navicula antonii Lange-Bertalot	NANT	12
Navicula arctotenelloides Lange-Bertalot et Metzeitin	NATT	2
Navicula cryptocephala Kützing	NCRY	3
Navicula cryptotenelloides Lange-Bertalot	NCTO	5
Navicula densilineolata (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	NDSL	1
Navicula germaniae Wallace	NGER	1
Navicula phyllepta Kützing	NPHY	2
Navicula recens (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	NRCS	1
Navicula rivulorum Lange-Bertalot & Rumrich	NRVL	7
Navicula sp30	NA30	1
Navicula sp37	NA37	1
Navicula sp38	NA38	1
Navicula sp39	NA39	1
Navicula sp42	NA42	1
Navicula sp45	NA45	1
Navicula sp49	NA49	2
Navicula sp55	NA55	1
Navicula sp63	NA63	1
Navicula sp66	NA66	10
Navicula sp67	NA67	1
Navicula sp68	NA68	1
Navicula tridentula Krasske	NTRI	1
Navicula vitabunda Hustedt	NVTB	2
Naviculadicta pseudoventralis (Hustedt) Lange-Bertalot	NDPV	6
Neidium sp1	NEI1	4
Neidium sp2	NEI2	1
Nitzschia amphibia Grunow abnormal form	NATG	1
Nitzschia bergii Cleve-Euler	NBRG	1
Nitzschia dissipata(Kützing)Grunow var.dissipata	NDIS	6
Nitzschia fasciculata (Grunow)Grunow in V.Heurck	NFAS	8
Nitzschia gracilis Hantzsch	NIGR	3
Nitzschia linearis(Agardh) W.M.Smith var.linearis	NLIN	7
Nitzschia perminuta(Grunow) M.Peragallo	NIPM	1
Nitzschia pusilla(Kützing)Grunow	NIPU	4
Nitzschia sigma(Kützing)W.M.Smith	NSIG	2
Nitzschia sociabilis Hustedt	NSOC	2
Nitzschia sp40	NI40	5
Nitzschia sp42	NI42	1
Nitzschia sp51	NI51	1
Nitzschia sp54	NI54	1
Nitzschia sp56	NI56	1
Nitzschia sp58	NI58	2
Nitzschia sp60	NI60	3

## Annexe 1 (8)

TAXONS RARES		
Désignation du taxon	code ASCONIT	occurrence globale
<i>Nitzschia</i> sp63	NI63	1
<i>Nitzschia</i> sp68	NI68	1
<i>Nitzschia</i> sp71	NI71	3
<i>Nitzschia</i> sp75	NI75	1
<i>Nitzschia terrestris</i> (Petersen) Hustedt	NTER	34
<i>Nitzschia tubicola</i> Grunow	NTUB	1
<i>Nitzschia vermicularis</i> (Kützing)Hantzsch	NVER	1
<i>Nupela</i> sp4	NUP4	2
<i>Pinnularia joculata</i> (Manguin) Krammer	PJOC	1
<i>Pinnularia parvulissima</i> Krammer	PPVS	2
<i>Pinnularia</i> sp30	PI30	4
<i>Pinnularia</i> sp32	PI32	4
<i>Pinnularia</i> sp33	PI33	1
<i>Pinnularia</i> sp34	PI34	3
<i>Pinnularia</i> sp39	PI39	2
<i>Pinnularia</i> sp40	PI40	1
<i>Pinnularia</i> sp46	PI46	1
<i>Pinnularia</i> sp47	PI47	2
<i>Pinnularia</i> sp50	PI50	1
<i>Pinnularia</i> sp51	PI51	1
<i>Pinnularia tabellaria</i> Ehrenberg	PTAB	1
<i>Placoneis</i> sp3	PLA3	3
<i>Placoneis</i> sp5	PLA5	1
<i>Placoneis symmetrica</i> (Hustedt) Lange-Bertalot	PSYM	2
<i>Planothidium frequentissimum</i> forme 1	PLF1	1
<i>Planothidium lanceolatum</i> (Brebisson ex Kützing) Lange-Bertalot	PTLA	1
<i>Planothidium robustius</i> (Hustedt) Lange-Bertalot abnormal form	PRBT	4
<i>Planothidium rostratum</i> (Oestrup) Lange-Bertalot	PRST	2
<i>Platessa</i> sp2	PTS2	3
<i>Reimeria uniseriata</i> Sala Guerrero & Ferrario	RUNI	4
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (C.Agardh) Lange-Bertalot	RABB	1
<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O.Muller	RGBL	4
<i>Rhopalodia operculata</i> (Agardh) Hakansson	ROPE	6
<i>Rhopalodia</i> sp4	RH04	3
<i>Sellaphora seminulum</i> (Grunow) D.G. Mann abnormal form	SSET	1
<i>Stauroneis prominula</i> (Grun.) Hustedt	STPR	2
<i>Stauroneis pseudosuboptusoides</i> Germain	STPO	3
<i>Stauroneis</i> sp1	STA1	1
<i>Stauroneis tenera</i> Hustedt	STTE	4
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow in Cl. & Grun. 1880	SHAN	2
<i>Stephanodiscus parvus</i> Stoermer et Hakansson	SPAV	1
<i>Surirella</i> sp2	SU02	1
<i>Tryblionella</i> sp2	TR02	2
<i>Tryblionella</i> sp3	TR03	1
<b>186 taxons rares</b>		

## Annexe 2 : Méthodologies et limites de quantification proposées par les laboratoires

	paramètre	unité	laboratoire	méthode	Norme	LQ
Matières Organiques Oxydables	DBOS	mg/L O <sub>2</sub>	LDA	méthode sans dilution		0,5
			Laboratoire des pyrénées	méthode sans dilution	NF EN 1899-2	0,5
			Institut Pasteur	méthode sans dilution		0,5
			Laboratoire Carso	congélation des échantillons, méthode sans dilution (ou avec dilutions et ensemencement sur certains échantillons)	NF EN 1899-2	0,5
	DCO	mg/L O <sub>2</sub>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	potentiométrie	NF T90-101	10
			Institut Pasteur		NF T90-101	30
	Carbone organique dissous (COD)	mg/L C	Laboratoire Carso	spectrophotométrie	ISO 15705	20
			LDA			
			Laboratoire des pyrénées	oxydation sulfochromique		0,2
			Institut Pasteur	lignes directrices pour le dosage du carbone organique total (COT) et du organique dissous (COD)	NF EN 1484	0,5
	Carbone organique total (COT)	mg/L C	Laboratoire Carso	Pyrolyse ou oxydation par voie humide et IR	NF EN 1484	0,2
			LDA			
			Laboratoire des pyrénées	méthode après minéralisation au sélénium	NF EN 25663	1
			Institut Pasteur		NF EN 25663	0,4
	Azote Kjeldahl	mg/L N	Laboratoire Carso	distillation	NF EN 25663	1 (Camp 1,2) 0,5 (Camp 3,5)
			LDA			
			Laboratoire des pyrénées	méthode spectrophotométrique au bleu d'Indophénol	NF T90-015-2	0,05
Matières azotées	Ammonium	mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Institut Pasteur	analyse en flux		0,05
			Laboratoire Carso	spectrophotométrie automatisée	selon NF T90-015-2	0,05
			LDA			
			Laboratoire des pyrénées		NF EN ISO 13395	0,05
	Nitrites	mg/L NO <sub>2</sub>	Institut Pasteur	analyse en flux	NF EN ISO 13995 et EN ISO 11732	0,02
			Laboratoire Carso	flux continu (CFA)		
Particules en suspension	Nitrates	mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
			Institut Pasteur	analyse en flux	NF EN ISO 13395	1
			Laboratoire Carso	flux continu (CFA) ou chromatographie ionique pour certains échantillons (LQ = 0,1 dans ce cas)	NF EN ISO 13995	1

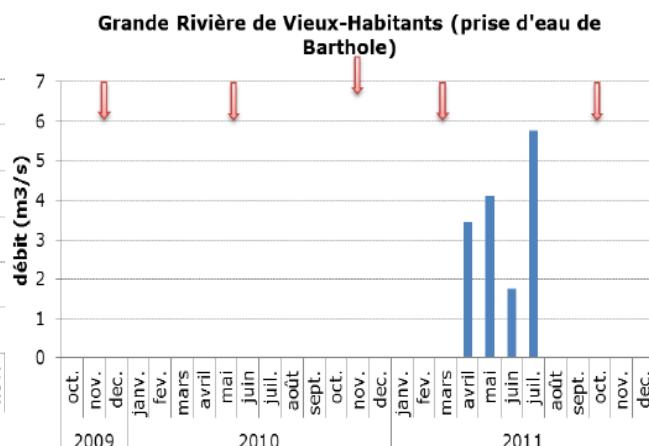
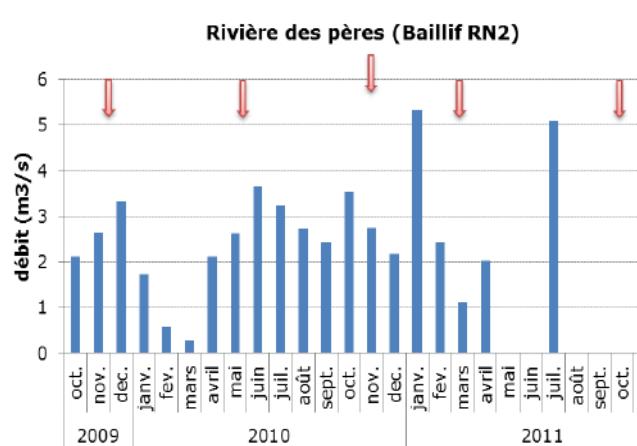
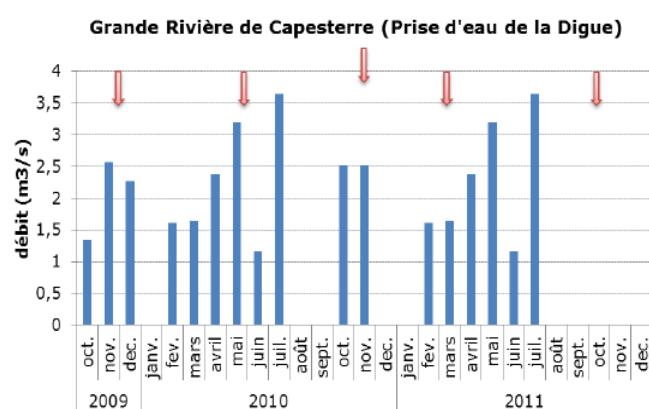
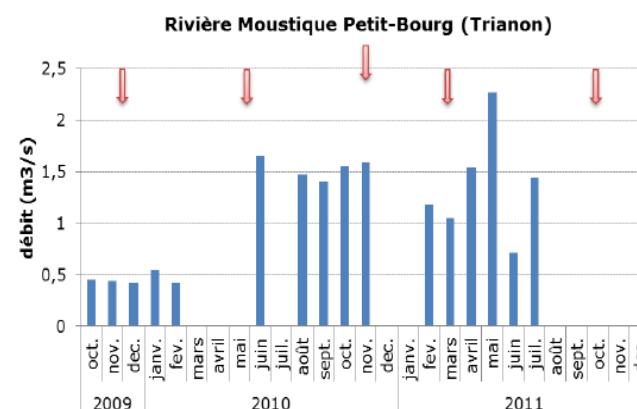
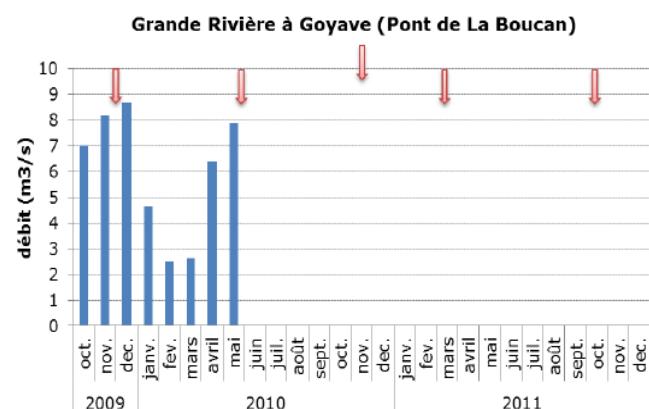
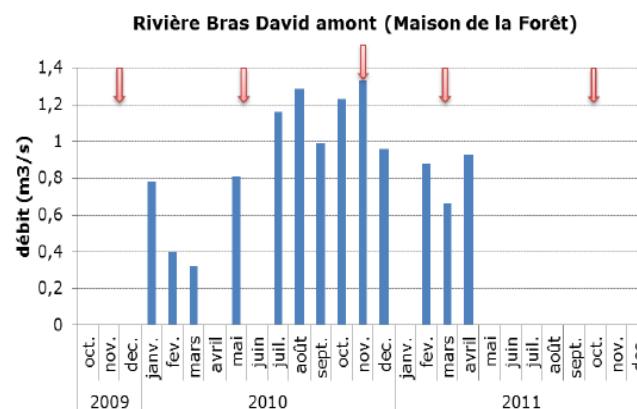
	paramètre	unité	laboratoire	méthode	Norme	LQ
Phosphore	Phosphore total	mg/L P	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	méthode spécifique		0,02
			Institut Pasteur	Détermination spectrométrique	NF EN ISO 6878	0,01
			Laboratoire Carso	Minéralisation et spectrophotométrie (Ganimède)	NF EN ISO 6878	0,02
	Orthophosphates	mg/L PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	méthode spécifique		0,06
			Institut Pasteur	chromatographie des ions en phase liquide		0,1
			Laboratoire Carso	spectrophotométrie automatisée	selon NF EN ISO 6878	0,01
Particules en suspension	Turbidité	NTU	LDA			
	Turbidité néphéломétrique NPU	FNU	Laboratoire des pyrénées	néphéломétrie	NF EN ISO 7027	
	Turbidité	NTU	Institut Pasteur		NF EN ISO 7027 (mars 2000)	0
	Turbidité	NTU	Laboratoire Carso	néphéломétrie	NF EN ISO 7027	2
	Matières en suspension totales	mg/L	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	gravimétrie après filtration	NF EN 872	2
			Institut Pasteur	méthode par filtration		2
Dureté et alcalinité de l'eau	Titre hydrotométrique (TH)	°T	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	par calcul		0,5
			Institut Pasteur	Méthode titrimétrique à l'EDTA	NF T90-003	0,5
			Laboratoire Carso	potentiométrie	NF T90-003	0,5
	Titre Alcalinométrique Complet (TAC)	°T	LDA			
			Laboratoire des pyrénées		NF T90-036	0,1
			Institut Pasteur		NF EN ISO 9963	1,5
			Laboratoire Carso	Potentiométrie	NF EN 9963-1	0
	Bicarbonates	mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	LDA			
	Hydrogénocarbonates		Laboratoire des pyrénées		NF T90-036	6,1
	Bicarbonate <sup>1</sup>		Institut Pasteur			6,1
	Laboratoire Carso		Potentiométrie	NF EN 9963-1	6,1	

## Annexe 2 (suite): Méthodologies et limites de quantification proposées par les laboratoires

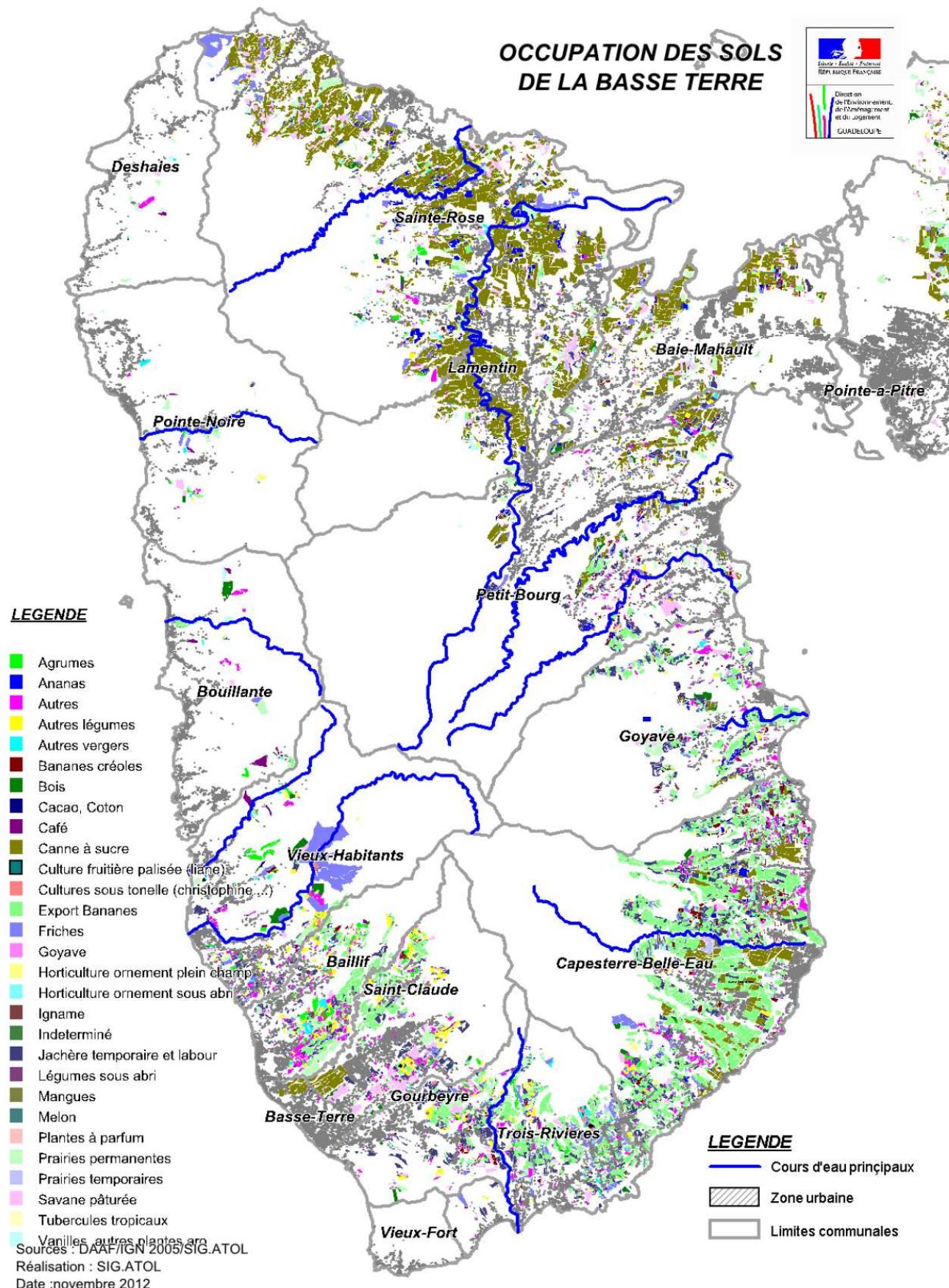
	paramètre	unité	laboratoire	méthode	Norme	LQ
Cations	Calcium	mg/L Ca <sup>++</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	spectroscopie d'émission optique	NF EN ISO 11885	0,5
			Institut Pasteur	chromatographie ionique		0,5
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,5
	Magnésium	mg/L Mg <sup>++</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	spectroscopie d'émission optique	NF EN ISO 11885	0,1
			Institut Pasteur	chromatographie ionique		0,4
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,1
	Sodium	mg/L Na <sup>+</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	spectroscopie d'émission atomique	NF T90-036 et NF EN ISO 11885	1
			Institut Pasteur	chromatographie ionique		0,2
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	1
	Potassium	mg/L K <sup>+</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	spectroscopie d'émission atomique	NF T90-036 et NF EN ISO 11885	0,5
			Institut Pasteur	chromatographie ionique		0,4
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 14911	0,5
Anions	Chlorures	mg/L Cl <sup>-</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
			Institut Pasteur	chromatographie des ions en phase liquide		1
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,1
	Sulfates	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,2
			Institut Pasteur	chromatographie des ions en phase liquide		1
			Laboratoire Carso	chromatographie ionique	NF EN ISO 10304-1	0,2
Silice	Silicate dissous	mg/L SiO <sub>2</sub>	LDA			
			Laboratoire des pyrénées	spectrométrie d'absorption	NF T90-007	1
			Institut Pasteur	méthode colorimétrique	NF T90-007	0,02
			Laboratoire Carso	flux continu (CFA)	ISO 16264	1

## Annexe 3 : Conditions hydrologiques en Guadeloupe durant le programme

Les campagnes de prélèvements de diatomées sont représentées par les flèches rouges



## Annexe 4 : Carte du plan d'occupation du sol en Guadeloupe



## Annexe 5 : Carte d'état biologique des sites supplémentaires de Guadeloupe

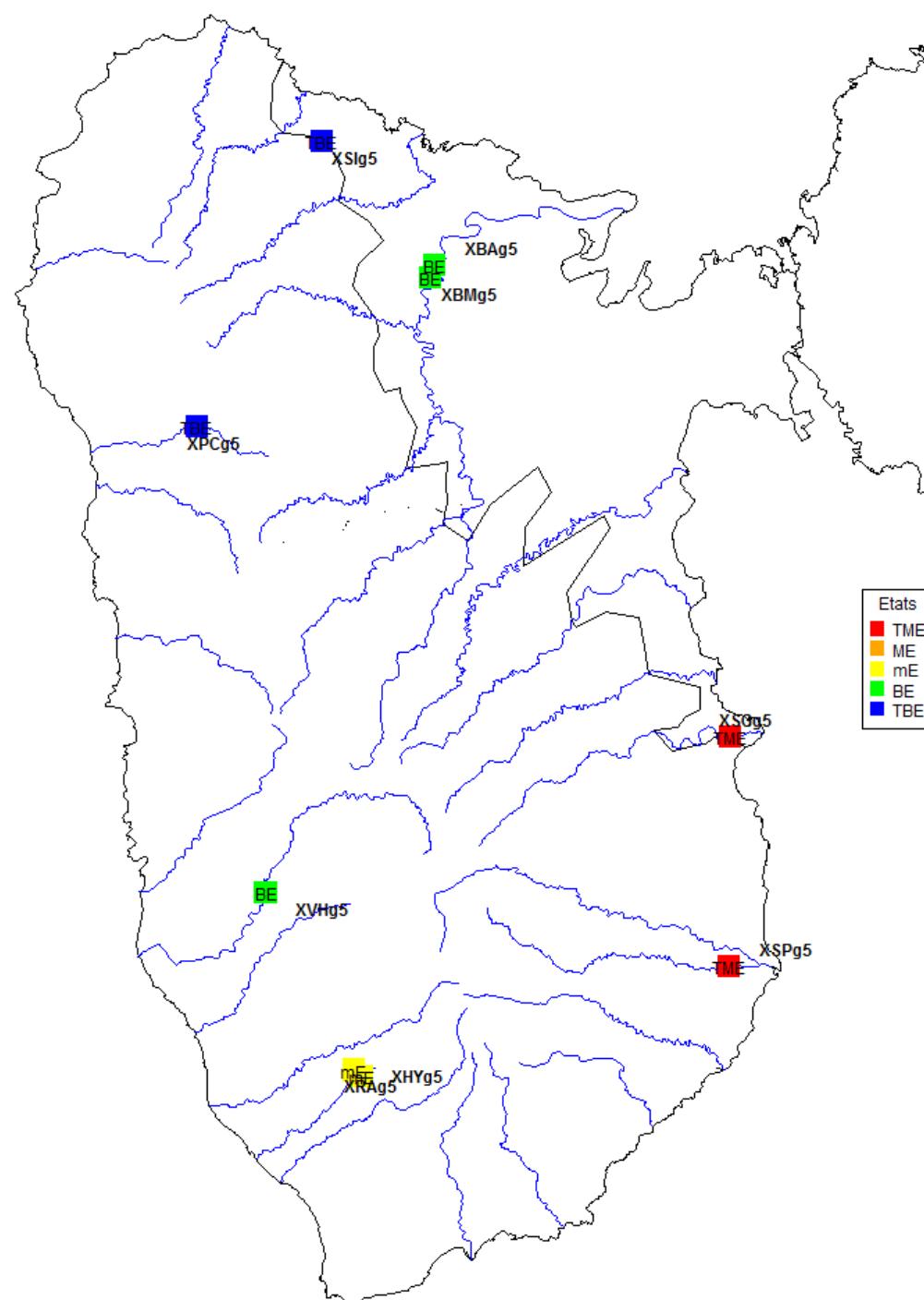
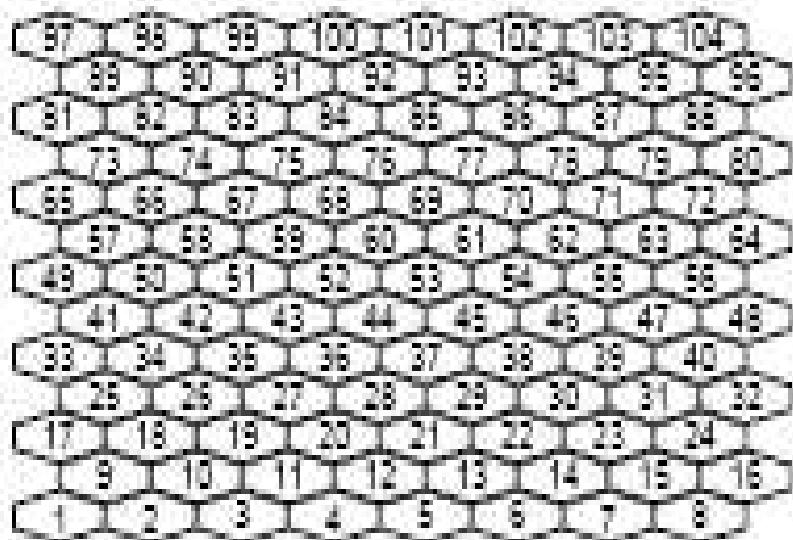


Figure 103 : Carte d'état biologique pour les sites supplémentaires de Guadeloupe (Campagne 5). Les classes d'état sont créées avec les même limites que pour l'ensemble du jeu de données

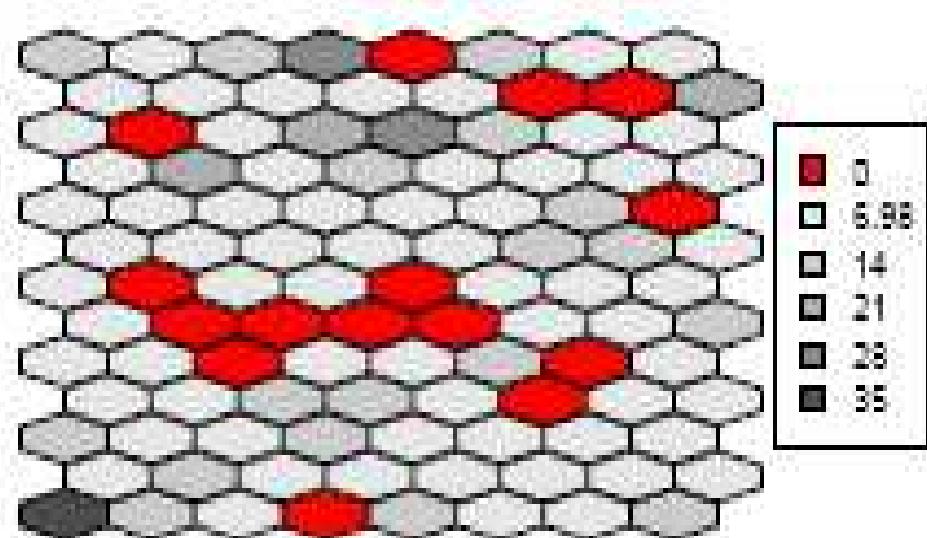
**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## Annexe 6 : Sites et cellules dans la carte SOM

### Principe de numérotation des cellules de la SOM



### Densité de relevés dans chaque cellule de la SOM



## Annexe 6(2) : relevés contenus dans chaque cellule de la SOM

Cellule_1	ABSm3	ABSm4	ACRm0	ACRm1	ACRm2	ACRm3	ACRm4	CAFm1	CANm1	CARm1
	CAVm0	CAVm1	CAVm2	CAVm3	CAVm4	CERm0	CERm1	CERm2	CERm3	CERm4
	COCm1	COCm2	COCm3	GAPg3	GAPg5	GRDm1	GRDm2	GRDm3	GRSm0	GRSm1
	GRSm2	GRSm3	RORm1	RORm2	RORm4					
Cellule_2	CAFm0	CAFm2	CAFm4	CANm0	CARm3	GRDm0	LORm3			
Cellule_3	CAMm3	CAMm4	FRPm2	LOPm4	LOSm4					
Cellule_5	CAAg1	CAAg2	CAAg4	CAAg5	CAPg2	PEEg3	PEEg4	PEEg5	PEPg2	PGPg5
	VHEg1	VHEg3	VHEg5							
Cellule_6	PEEg2	PEPg1	PEPg5							
Cellule_8	MPPg3	MPSg2	MPSg3	MPSg4	MPSg5	PGGg1	PGGg2	PGGg3	PGGg4	PGGg5
Cellule_9	BLAm1	BLAm2	GRDm4	GRSm4						
Cellule_10	BLAm3	CANm3	CANm4	CARm2	CARm4	FRPm1	FRPm3	FRPm4	LORm0	LOSm3
Cellule_11	CARm0	LOPm0	LOPm2	LOPm3	LOSm0	LOSm1				
Cellule_12	CAPg3	CAPg5	PPGg2	ROJg1	VHEg2	VHGg2				
Cellule_13	MPTg2	ROJg2	ROJg3							
Cellule_16	BSCg2	PGPg1								

**Rapport final**

<b>Cellule_17</b>	ABSm2	CADm1	CADM2	CADM3	CADM4	GABg1	HECg1	HECg2	HECg3	HECg4
	HECg5									
<b>Cellule_18</b>	BLAm4	CANm2	LORM4							
<b>Cellule_19</b>	LOPm1	LORM1	LORM2	LOSm2						
<b>Cellule_20</b>	CAPg1	CAPg4	VHEg4	VHGg1	VHGg3	VHGg4	VHGg5			
<b>Cellule_21</b>	LEDg2	LEDg5	MPDg1	MPDg2	MPDg3	MPTg3				
<b>Cellule_22</b>	BDIg2	MPPg2	MPPg5	ROJg4						
<b>Cellule_23</b>	MPPg4	PGPg3	PGPg4							
<b>Cellule_25</b>	GPAg2	PPCg5								
<b>Cellule_26</b>	PLVg1	PLVg2	PLVg3							
<b>Cellule_27</b>	BDIg1	BDIg5	BDMg1	BDMg5	LEDg3	MPDg5	MPTg1	MPTg5		
<b>Cellule_28</b>	BDIg3	BDMg2	BDMg3	GGPg1	GGPg2	GGPg3	GGPg4	GGPg5	MPDg4	MPTg4
<b>Cellule_29</b>	LEDg4	PBSg2								
<b>Cellule_32</b>	NOAg2	NOAg4								
<b>Cellule_33</b>	HEYg1	HEYg2	HEYg3	HEYg4	HEYg5					
<b>Cellule_37</b>	BDMg4	BSCg1								
<b>Cellule_38</b>	BSCg3	BSCg4	BSCg5	GGAg1	GGAg3	GGAg4	GGAg5	PBSg1	PBSg3	PBSg4
	PBSg5									

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées

Rapport final

<b>Cellule_41</b>	PPCg2	SJFm1								
<b>Cellule_46</b>	CABg2	GGAg2	MSDg2	MSDg4	MSDg5					
<b>Cellule_48</b>	CABg4	MSAg1	MSAg2	MSAg3	MSAg4	SAEg1	SAEg2	SAEg3	SAEg4	SAEg5
<b>Cellule_55</b>	GABg3	GABg5								
<b>Cellule_58</b>	LEPm4	PLBm4								
<b>Cellule_59</b>	LEGm1	LEPm2								
<b>Cellule_60</b>	GAGm0	GAGm1	LEPm0	LTDm1						
<b>Cellule_61</b>	GAGm2	LEGm0								
<b>Cellule_62</b>	CAMm1	CAMm2	GALm0	GALm2	PALm0	PALm1	PALm2	PALm3		
<b>Cellule_63</b>	GABg2	GABg4	GALm3	GALm4	GAMg2	GAMg3	GAMg5	MSAg5		
<b>Cellule_65</b>	COPm3	MACm4	MOMm0	MOMm1	MOMm2	MOMm4				
<b>Cellule_67</b>	PLBm2	PRBm1								
<b>Cellule_68</b>	GASm3	GASm4	LEPm1	LTDm4	SJFm2	SJFm4				
<b>Cellule_69</b>	GASm2	LEGm2	LEGm3	PLBm0						
<b>Cellule_71</b>	GALm1	GAMg4	GPAg4	GPAg5	ROMg1	ROMg2	ROMg3	ROMg4	ROMg5	
<b>Cellule_74</b>	CAFm3	CASm1	CASm3	GAGm3	GAGm4	LEPm3	LOTm3	LOTm4	LTSm4	MOMm3
	PLBm1	PRBm2	PRBm3	RORm3						
<b>Cellule_75</b>	BERm0	CBNm1	CBNm3	PLBm3						

**Rapport final**

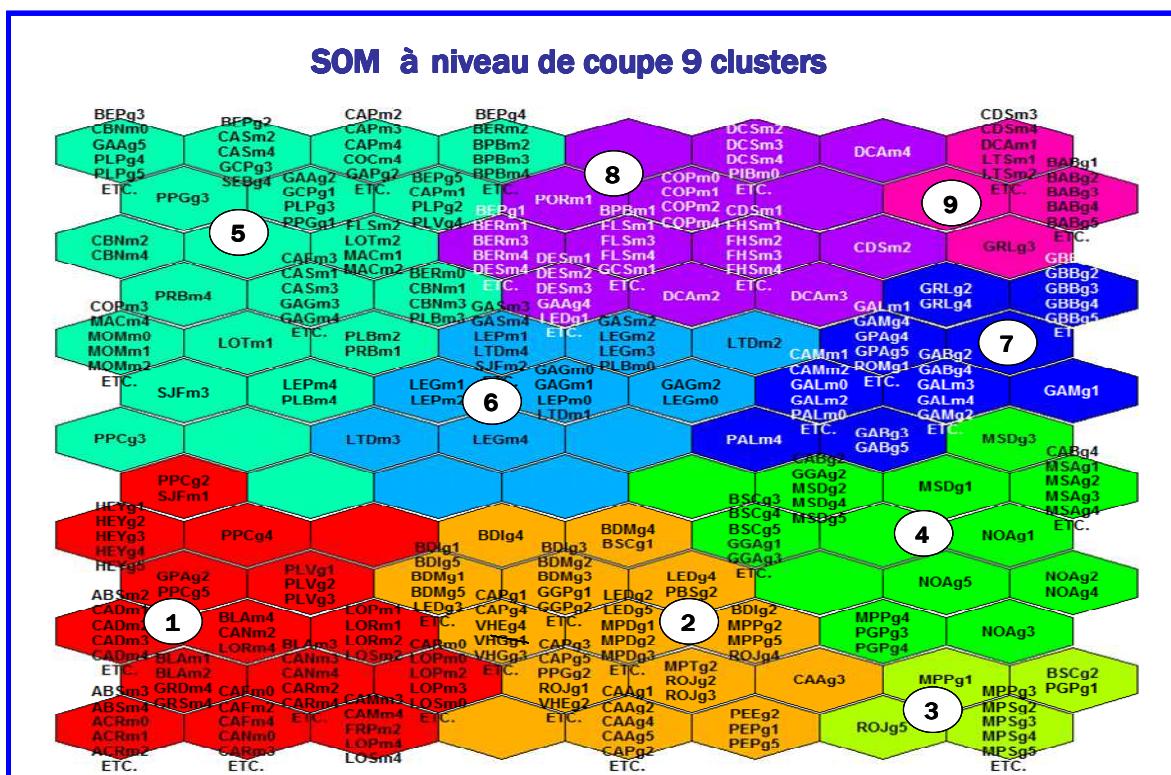
<b>Cellule_76</b>	DESm1	DESm2	DESm3	GAAg4	LEDg1	OMDm1	PILm0	PILm1	PILm4	PPMm1
	VAUm0	VAUm1								
<b>Cellule_79</b>	GRLg2	GRLg4								
<b>Cellule_80</b>	GBBg1	GBBg2	GBBg3	GBBg4	GBBg5	GRLg1				
<b>Cellule_81</b>	CBNm2	CBNm4								
<b>Cellule_83</b>	FLSm2	LOTm2	MACm1	MACm2						
<b>Cellule_84</b>	BEPg1	BERm1	BERm3	BERm4	DESm4	GAAg1	MACm0	MACm3	OMDm2	OMDm3
	PPMm2	PPMm3	PPMm4	PRBm0	SEBg3	SIFm4				
<b>Cellule_85</b>	BPBm1	FLSm1	FLSm3	FLSm4	GCSm1	OMDm0	OMDm4	PAQm2	PAQm3	PAQm4
	PIBm3	PILm2	PILm3	RBAg1	RBAg3	RBAg4	RBAg5	SIFm1	SIFm2	SIFm3
	VAUm2	VAUm3	VAUm4							
<b>Cellule_86</b>	CDSm1	FHSm1	FHSm2	FHSm3	FHSm4	GCSm2	GCSm3	GCSm4	RBAg2	
<b>Cellule_90</b>	GAAg2	GCPg1	PLPg3	PPGg1						
<b>Cellule_91</b>	BEPg5	CAPm1	PLPg2	PLVg4						
<b>Cellule_93</b>	COPm0	COPm1	COPm2	COPm4						
<b>Cellule_96</b>	BABg1	BABg2	BABg3	BABg4	BABg5	CCLg1	CCLg3	CCLg5	OHPg1	OHPg2
	OHPg3	OHPg4	OHPg5	PEPg3	PEPg4					
<b>Cellule_97</b>	BEPg3	CBNm0	GAAg5	PLPg4	PLPg5	PPGg4	PPGg5	SAPg2	SEBg2	

**Rapport final**

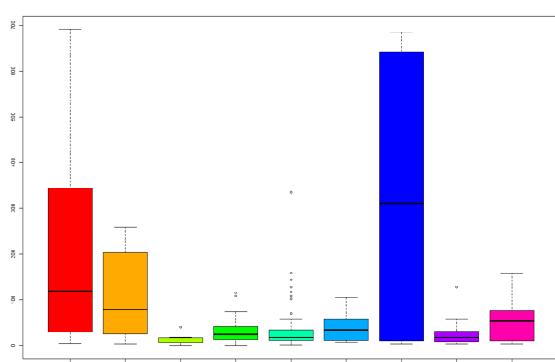
<b>Cellule_98</b>	BEPg2	CASm2	CASm4	GCPg3	SEBg4					
<b>Cellule_99</b>	CAPm2	CAPm3	CAPm4	COCm4	GAPg2	GAPg4	GASm1	GCPg2	GCPg4	GCPg5
	PEEg1	PGPg2	SNMg1							
<b>Cellule_100</b>	BEPg4	BERm2	BPBm2	BPBm3	BPBm4	GAAg3	GAPg1	HEMg1	HEMg2	HEMg3
	HEMg4	HEMg5	PLPg1	PLVg5	PORm2	PORm3	PORm4	RODm2	RODm4	ROSm0
	ROSm1	ROSm2	ROSm3	ROSm4	SEBg1	SEBg5				
<b>Cellule_102</b>	DCSm1	DCSm2	DCSm3	DCSm4	PIBm0	PIBm1	PIBm2	PIBm4		
<b>Cellule_104</b>	CDSm3	CDSm4	DCAm1	LTSm1	LTSm2	LTSm3				

**Tableau 23 : Tableau des sites contenus dans chacune des cellules de la carte SOM**

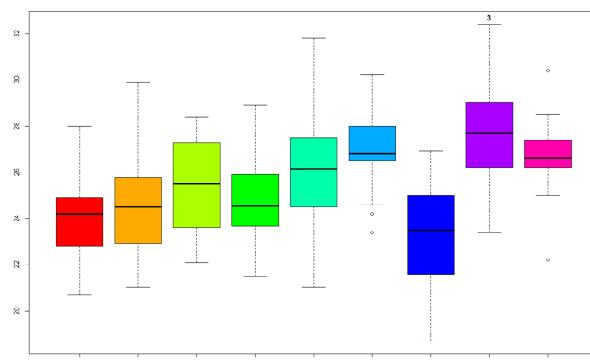
## **Annexe 7 : Conditions environnementales des 9 biotypes diatomiques Antillais repérés dans la carte SOM**



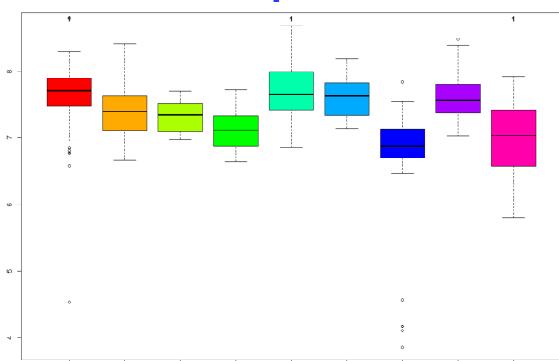
### Altitude (m)



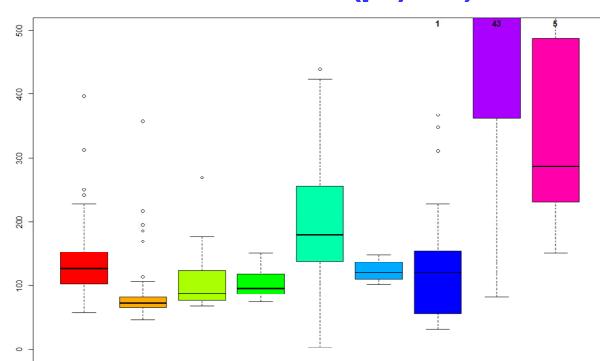
## Température (°C)



pH

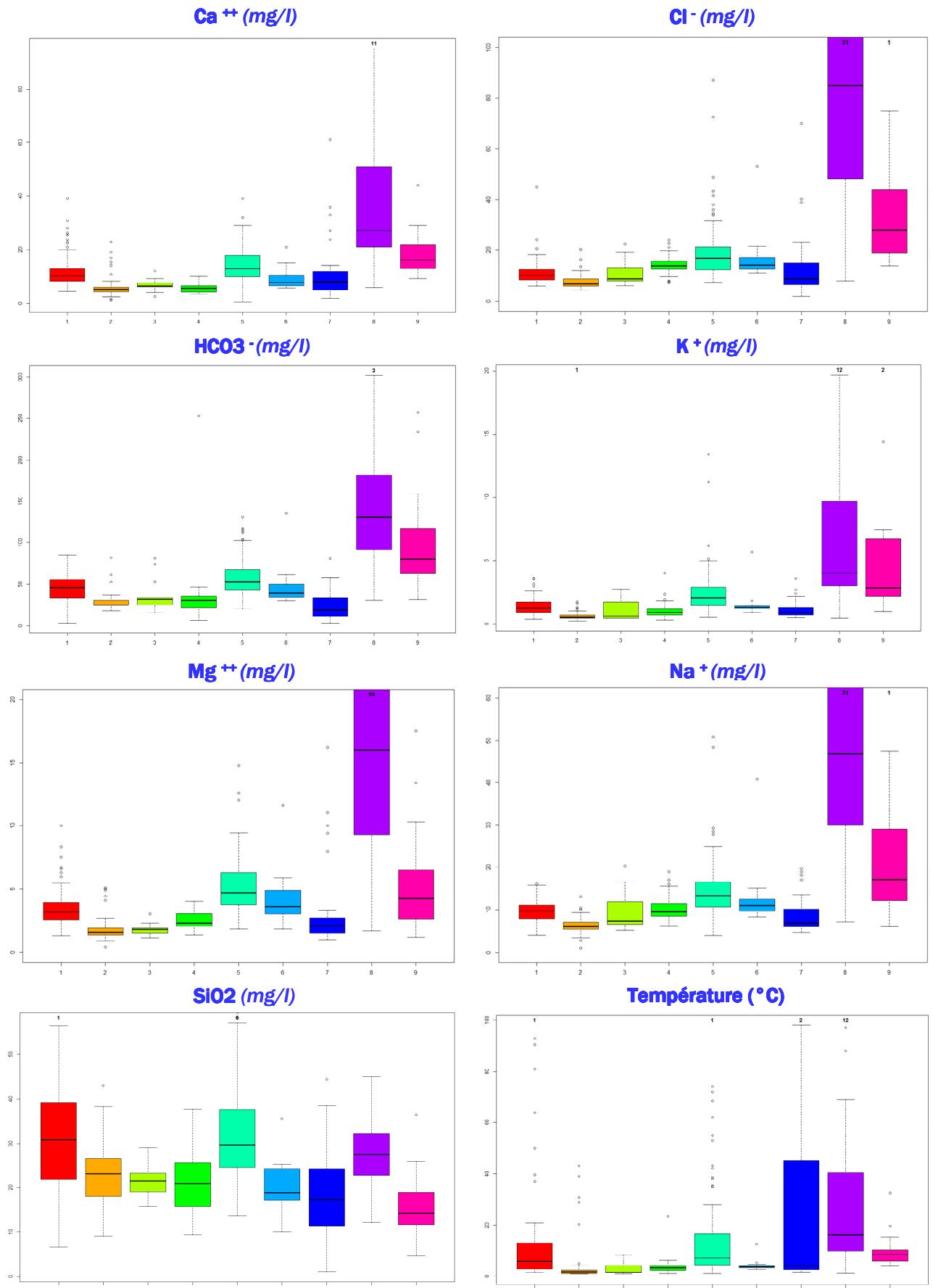


## Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )



Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

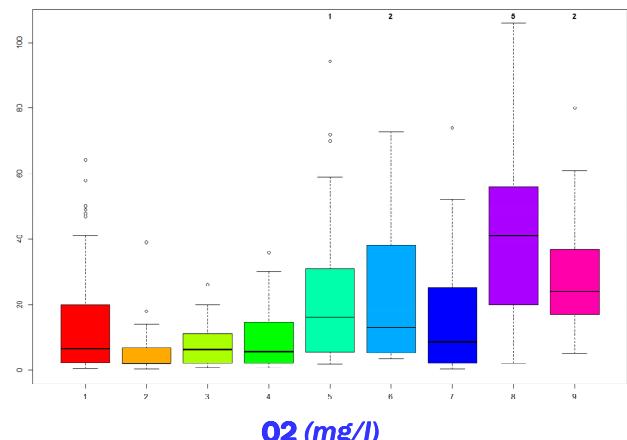
## Annexe 7 (2)



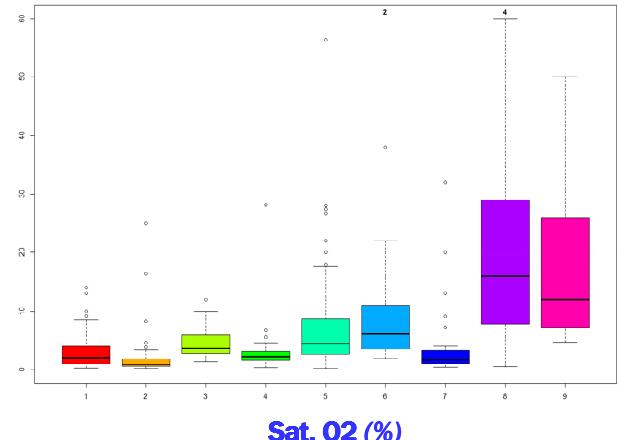
Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 7 (3)

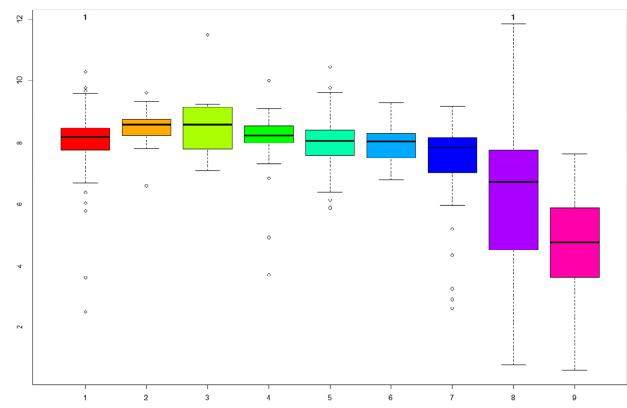
**MES (mg/l)**



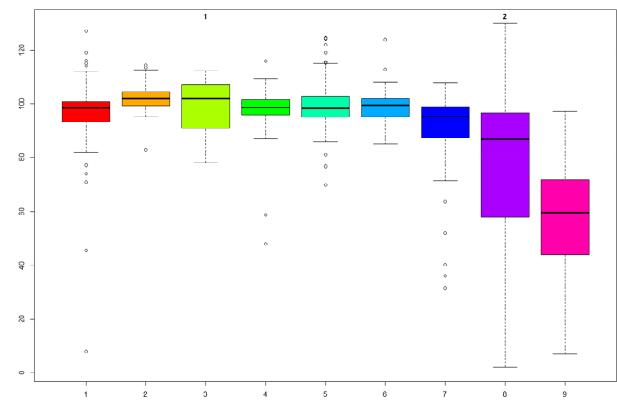
**Turbidité (NTU)**



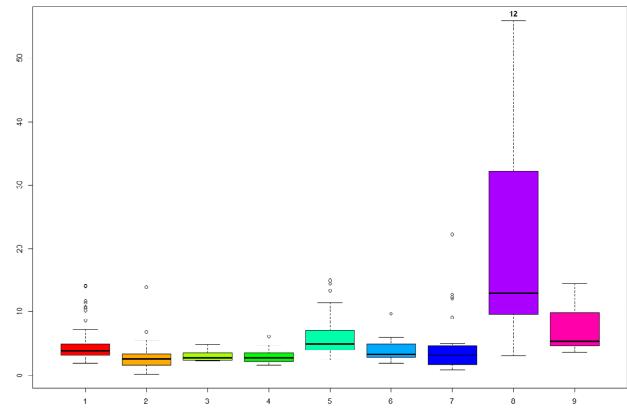
**O2 (mg/l)**



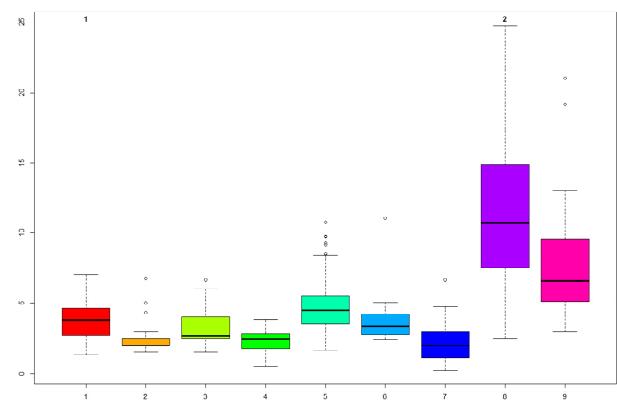
**Sat. O2 (%)**



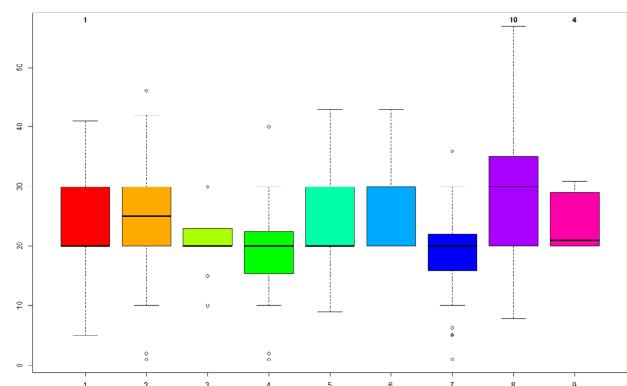
**t H (° Français)**



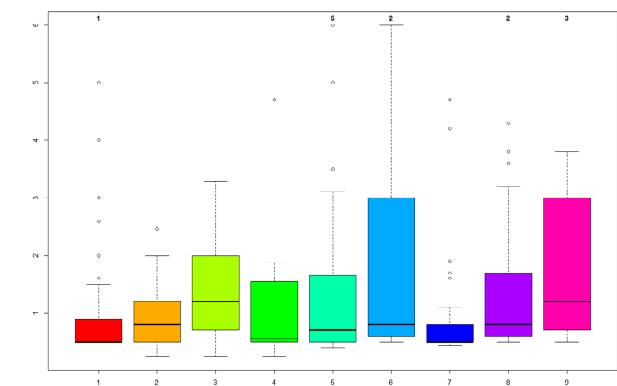
**TAC**



**DCO (mg O2/l)**



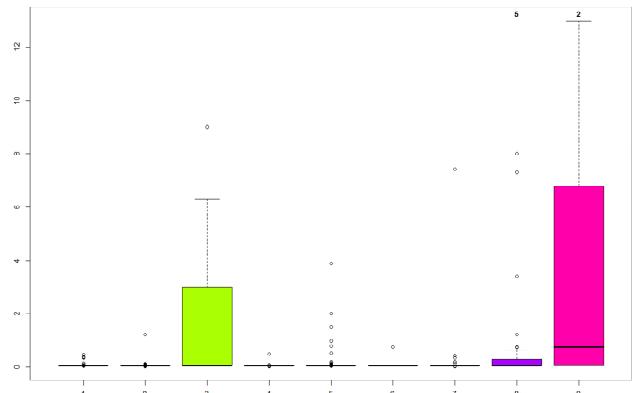
**DBO5 (mg O2/l)**



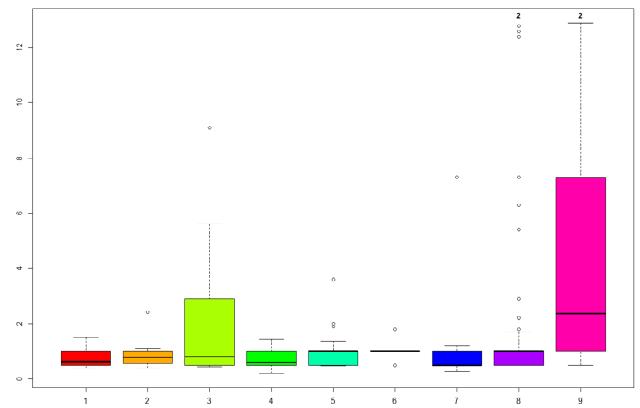
**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

## Annexe 7 (4)

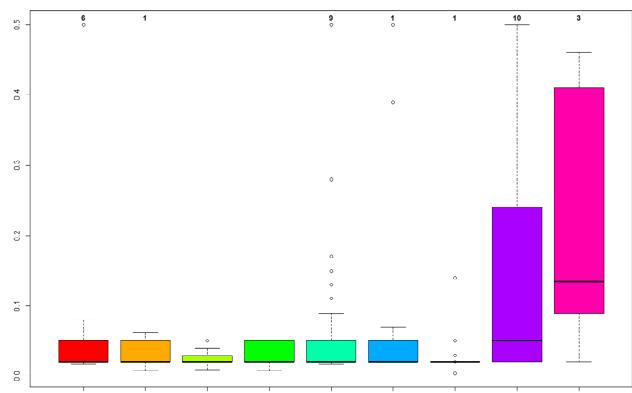
**NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/l)**



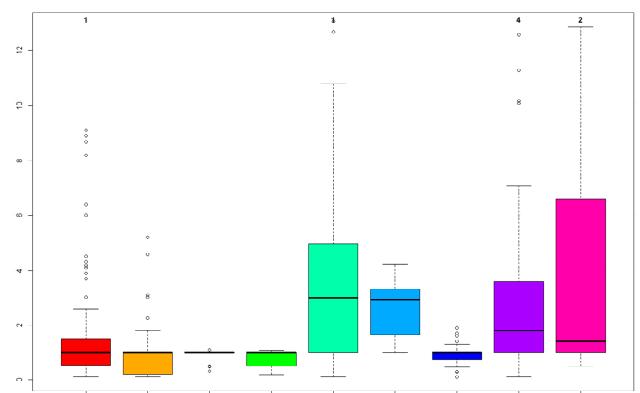
**NKj (mg/l)**



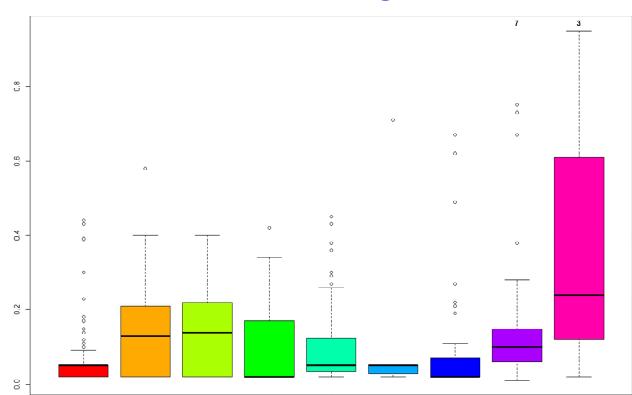
**NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/l)**



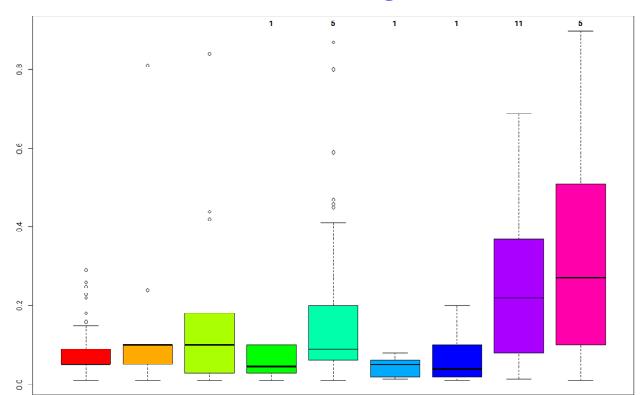
**NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)**



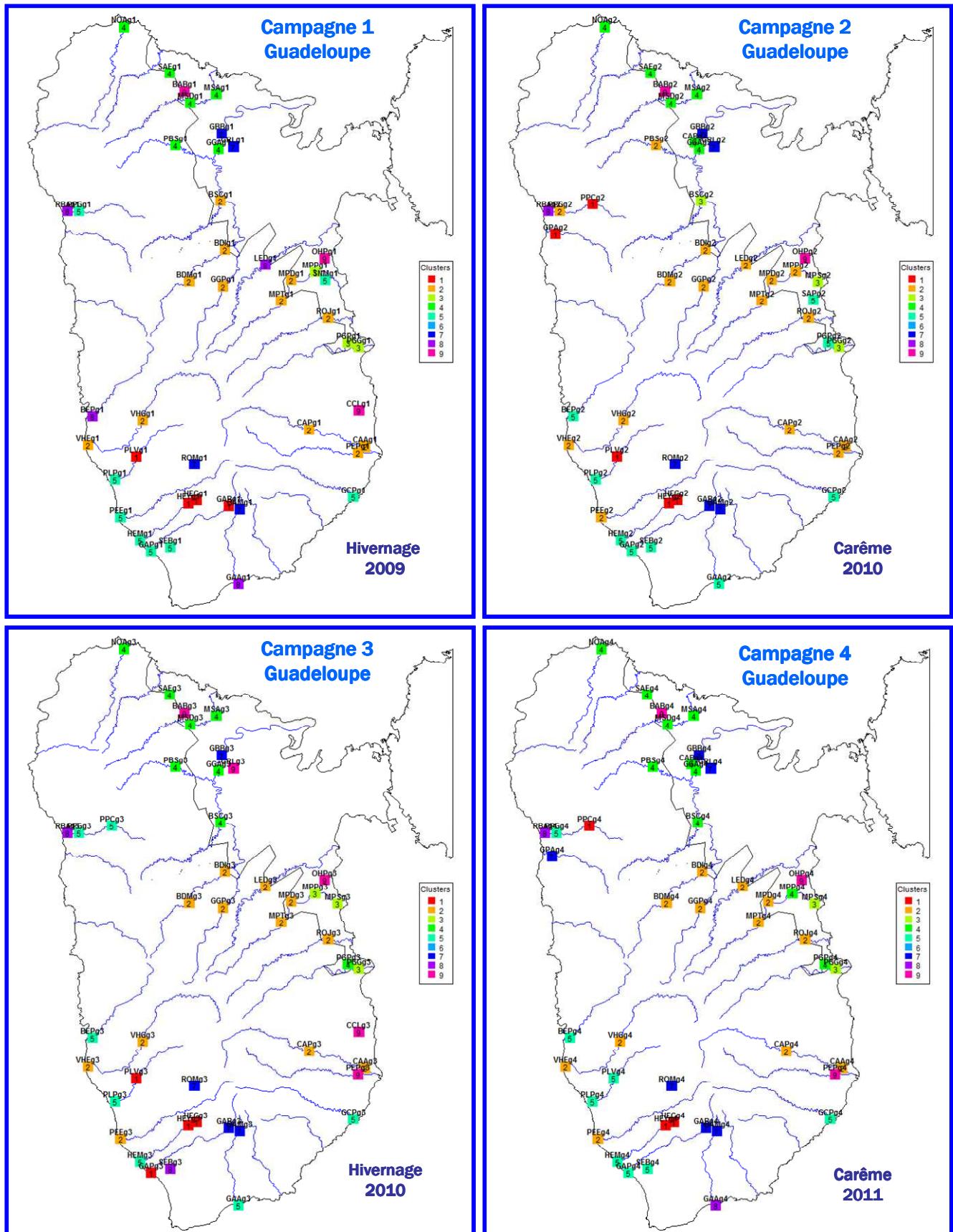
**P total (mg/l)**



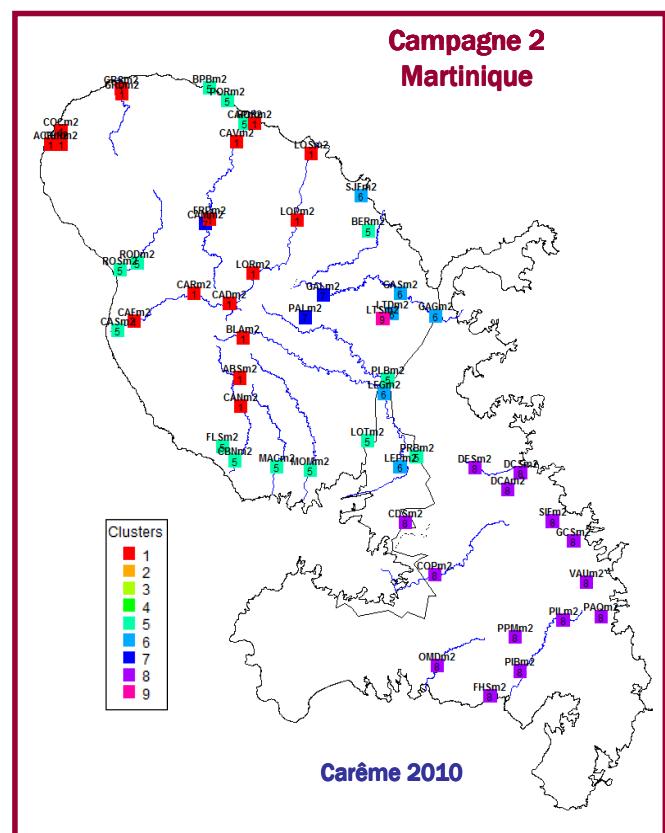
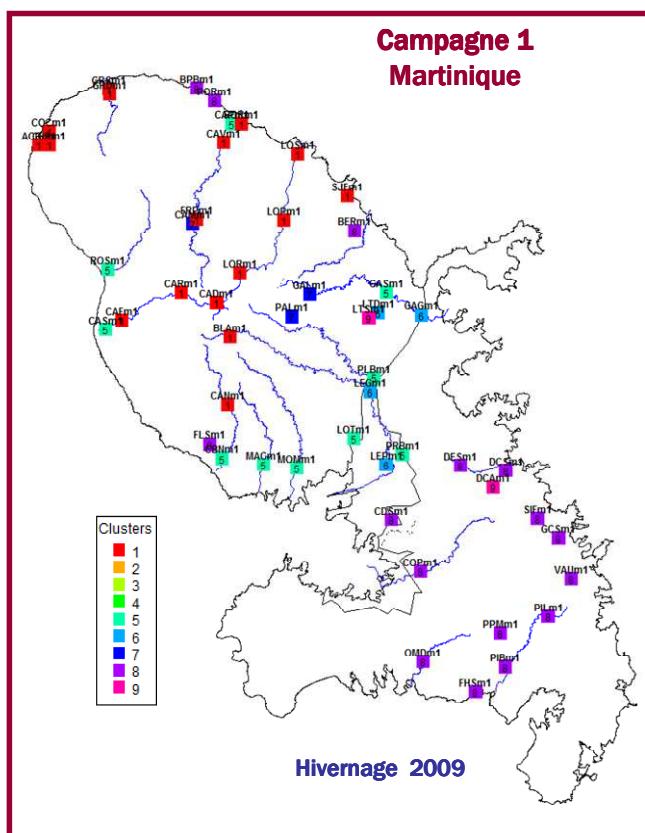
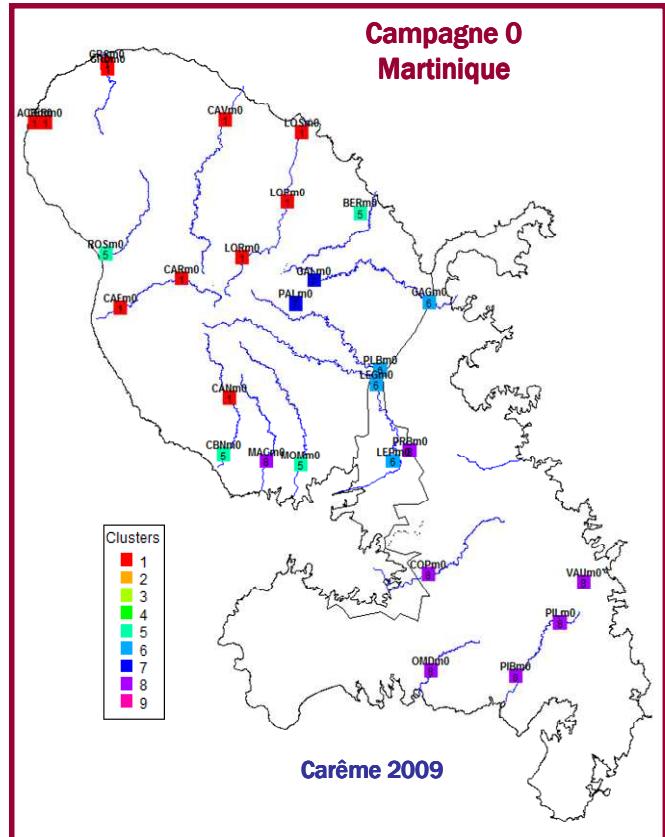
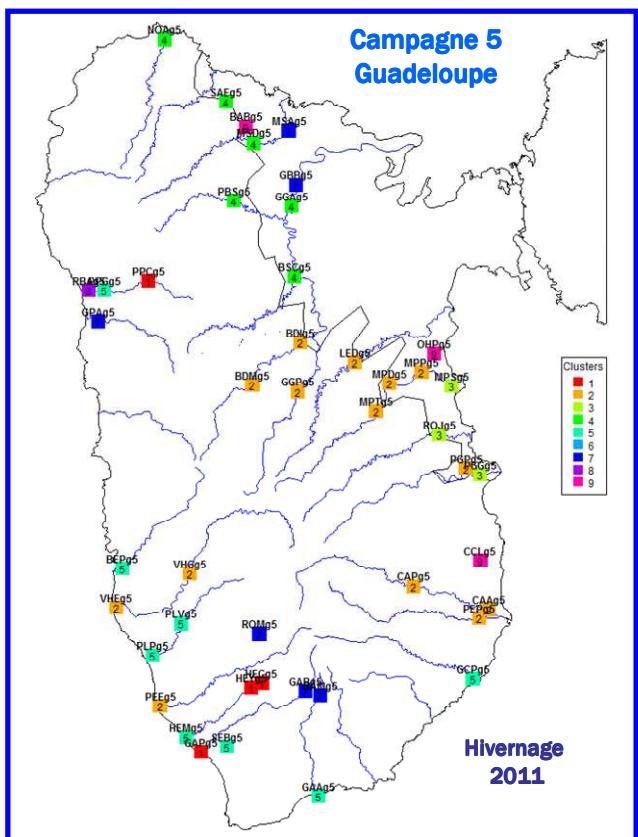
**PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (mg/l)**



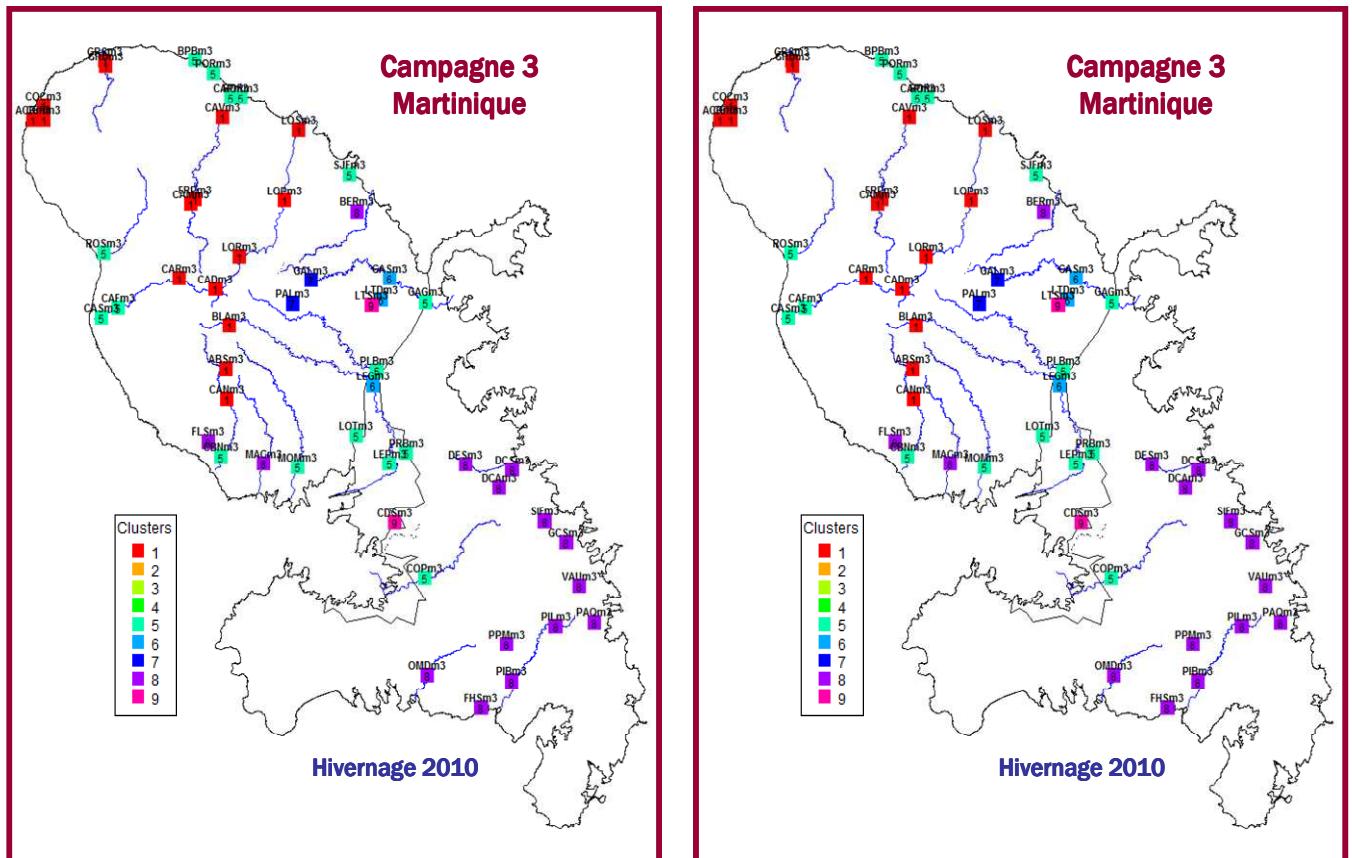
## Annexe 8: Localisation des biotypes diatomiques selon les campagnes de terrain



## Annexe 8 (2)

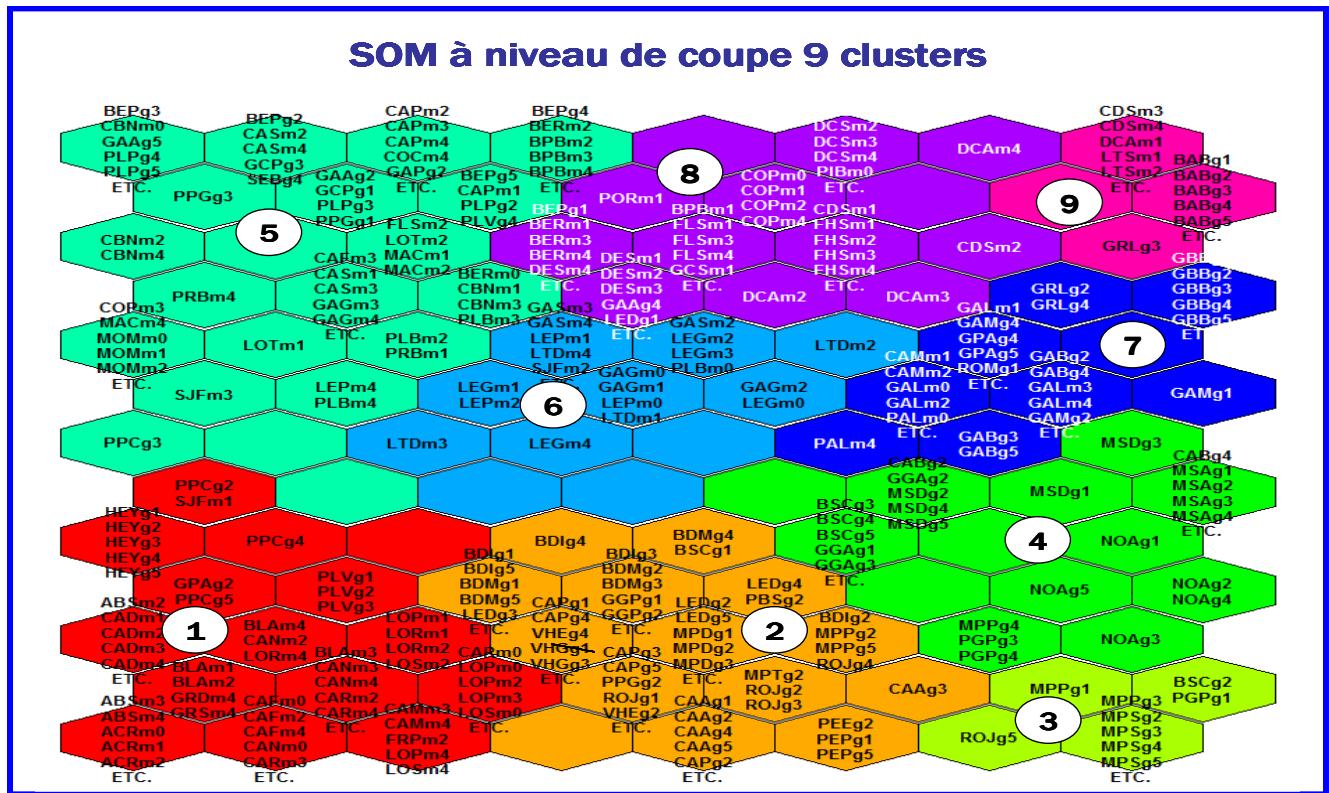


## Annexe 8 (3)

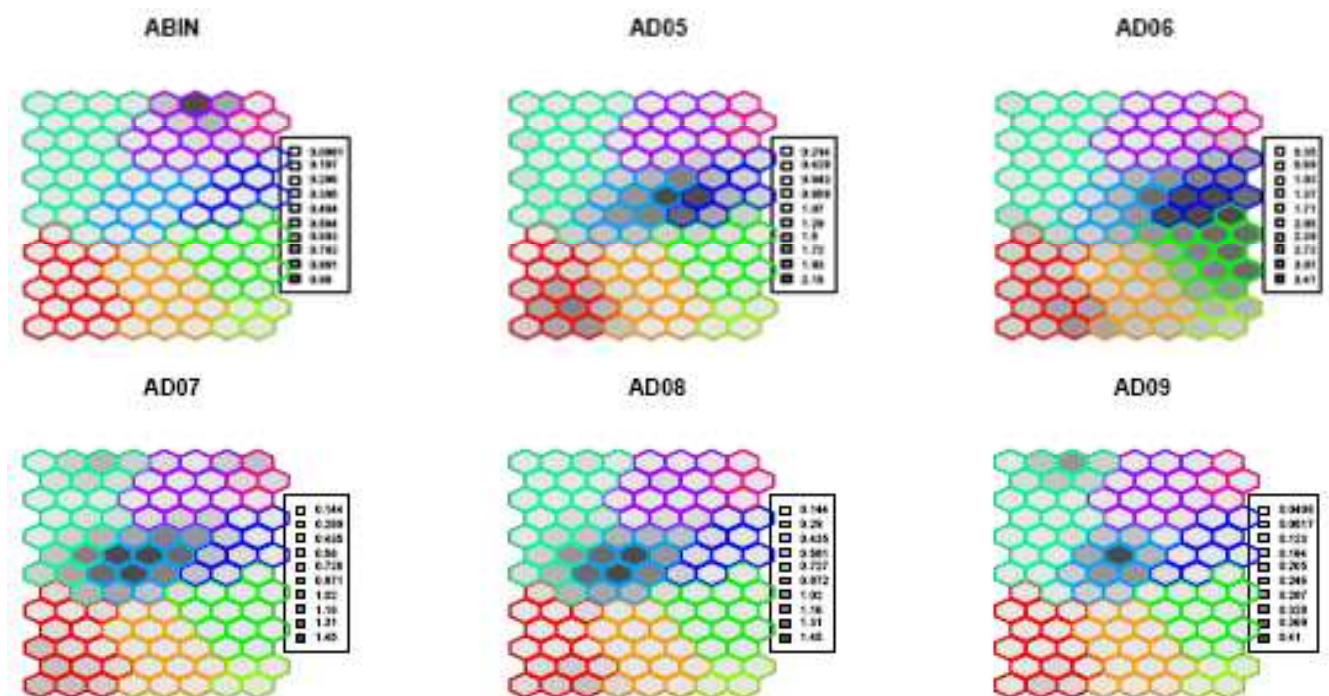


## **Annexe 9 (1): Profils de distribution des taxons dans la SOM**

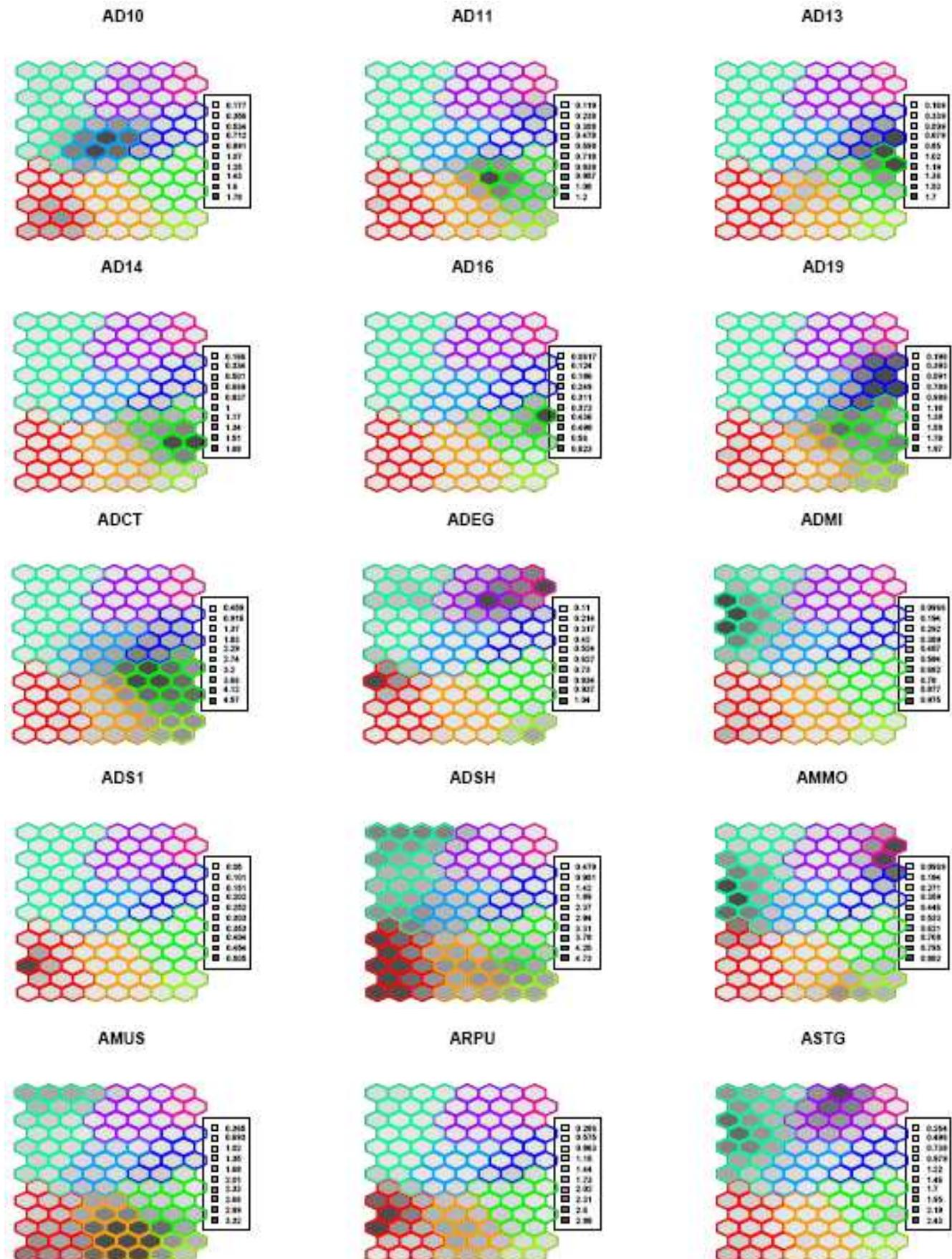
## Localisation des clusters sur la SOM



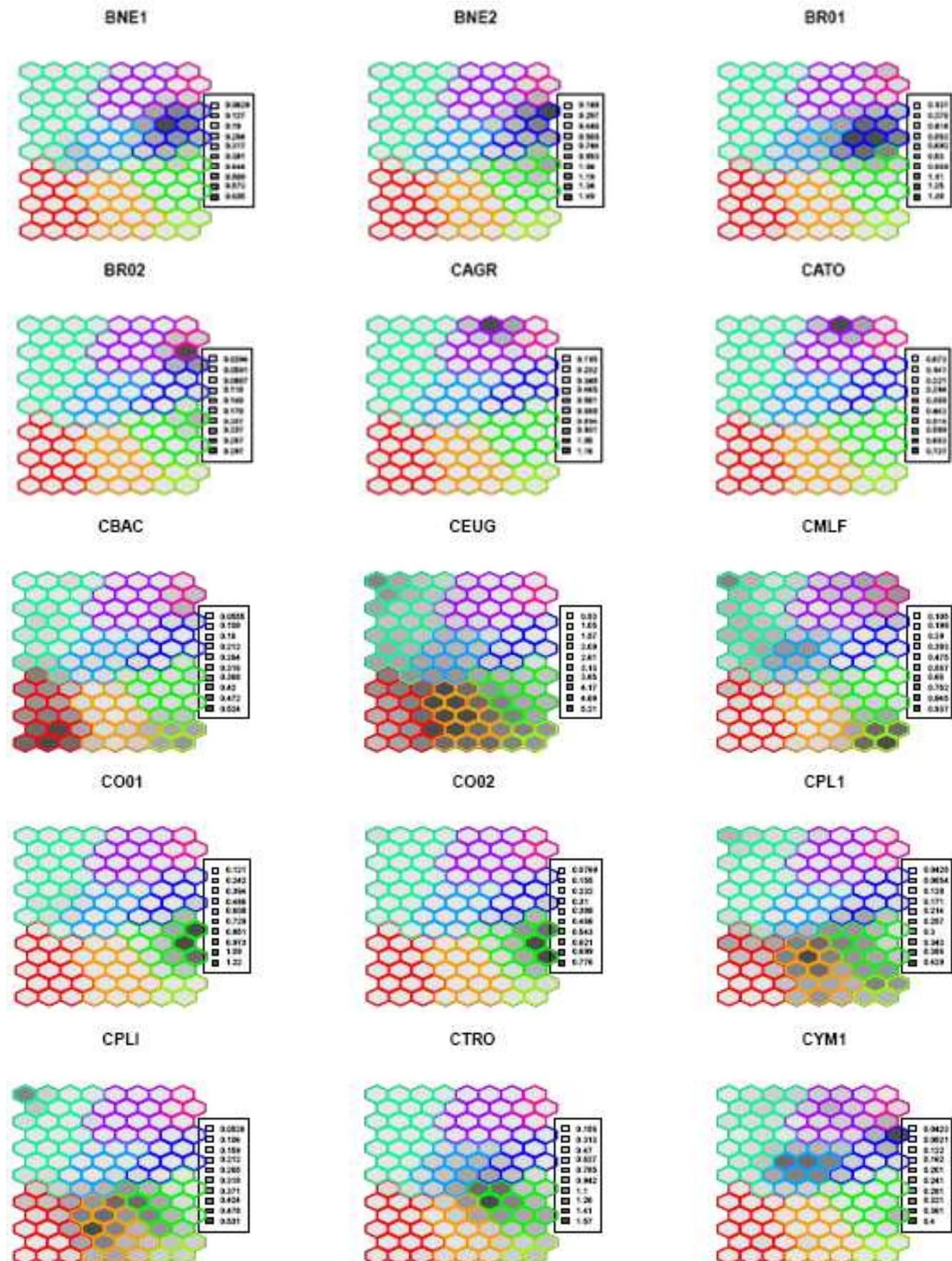
## Profils des espèces sur la SOM



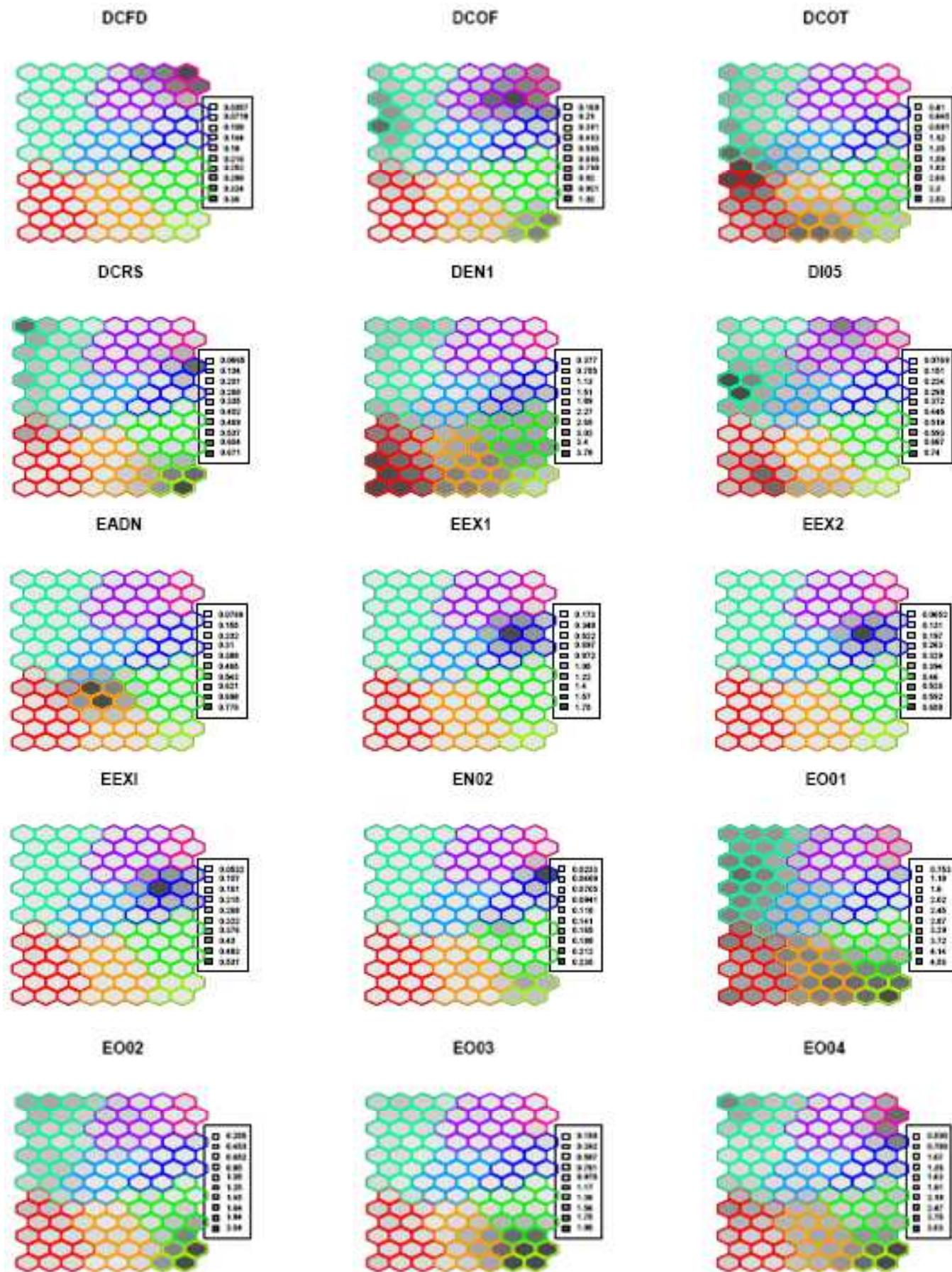
## Annexe 9 (2)



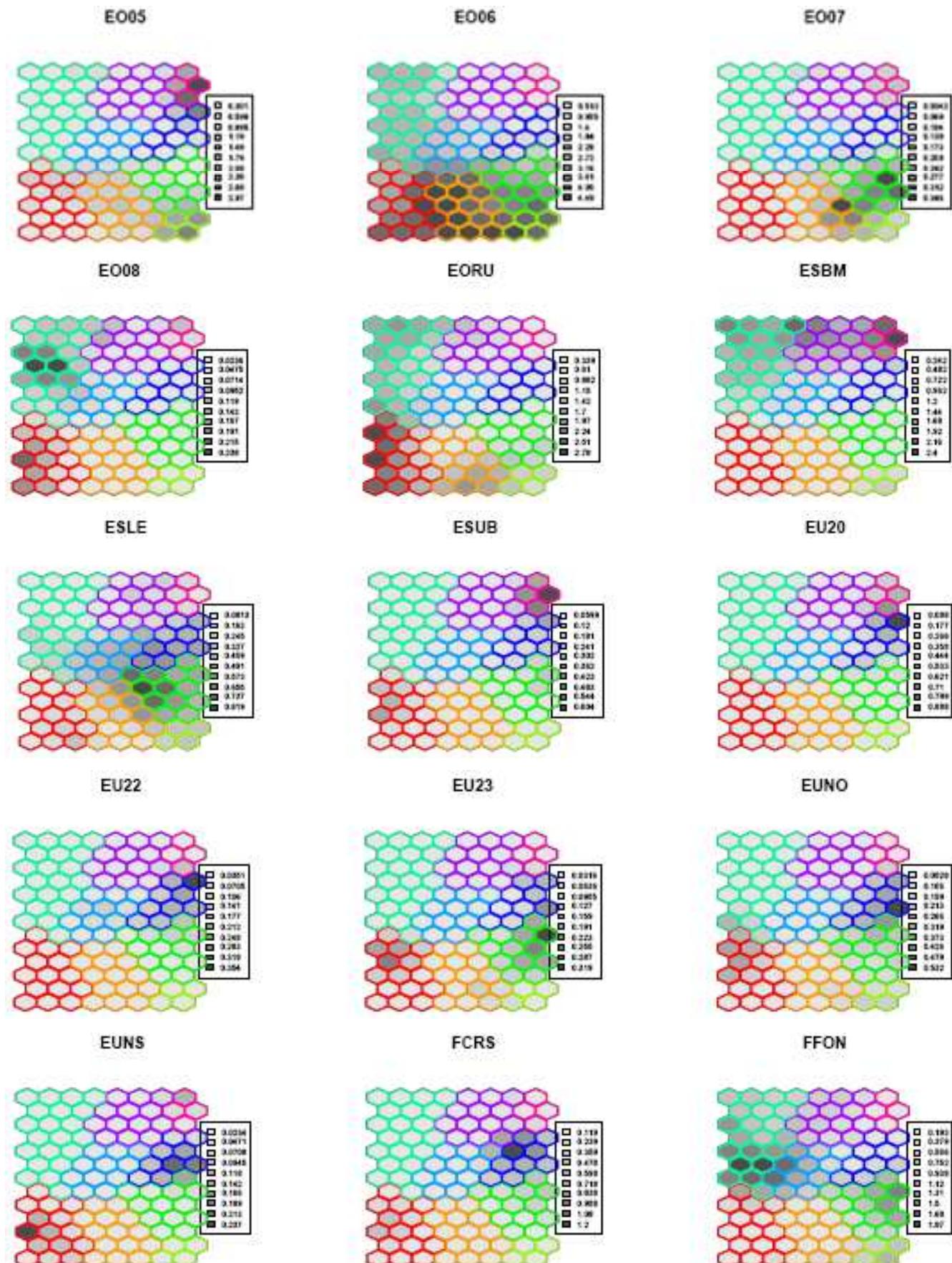
## Annexe 9 (3)



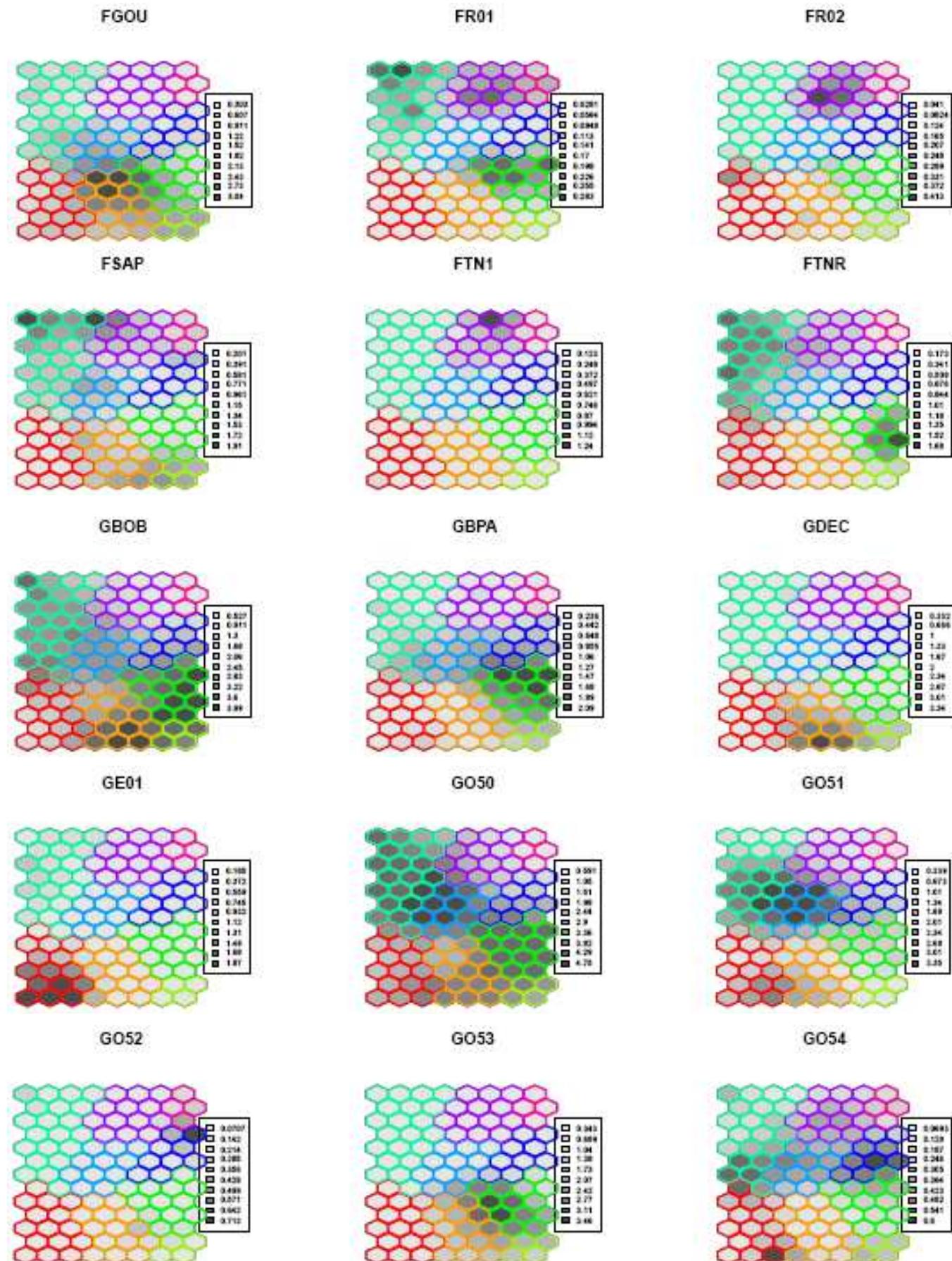
## Annexe 9 (4)



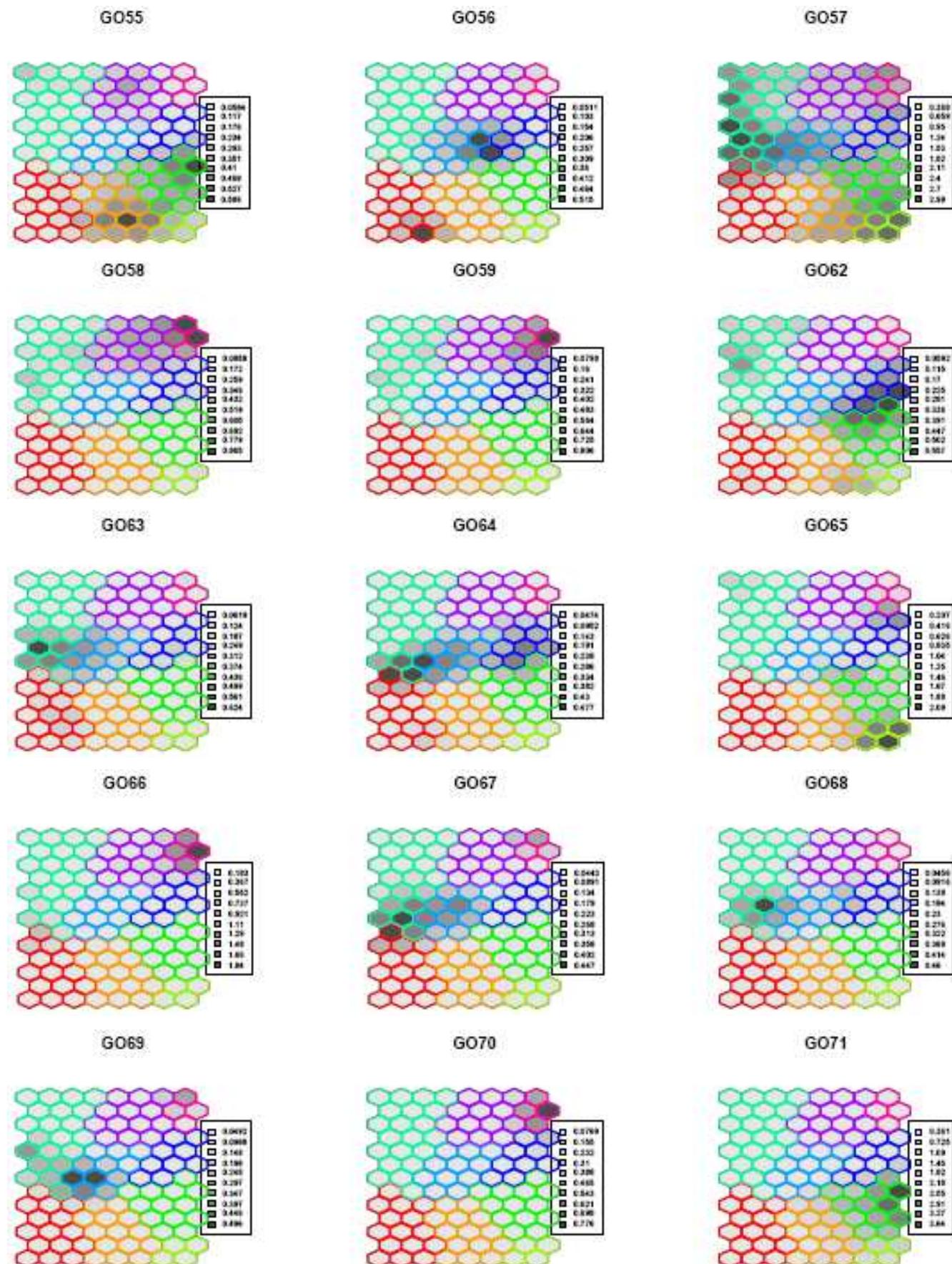
## Annexe 9 (5)



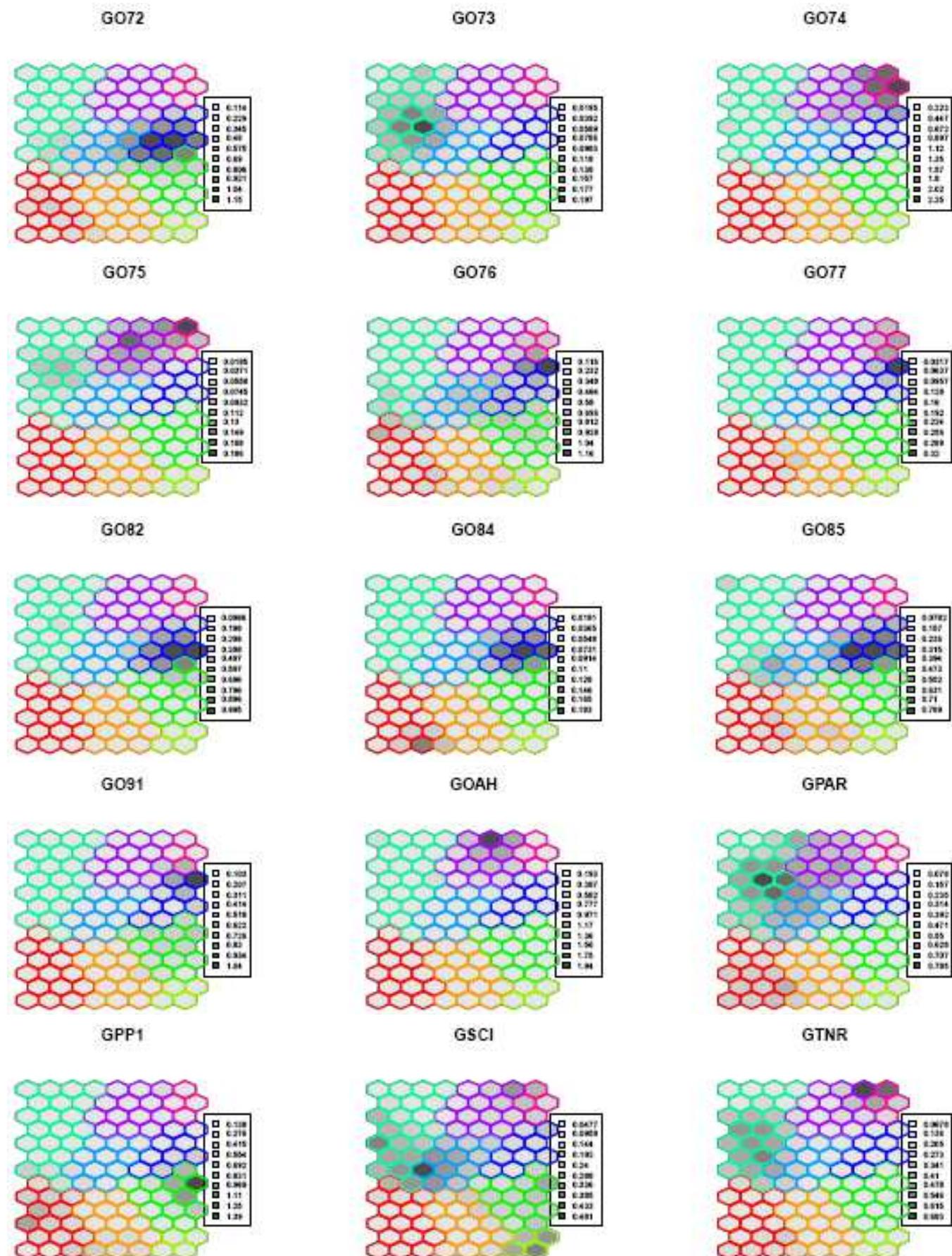
## Annexe 9 (6)



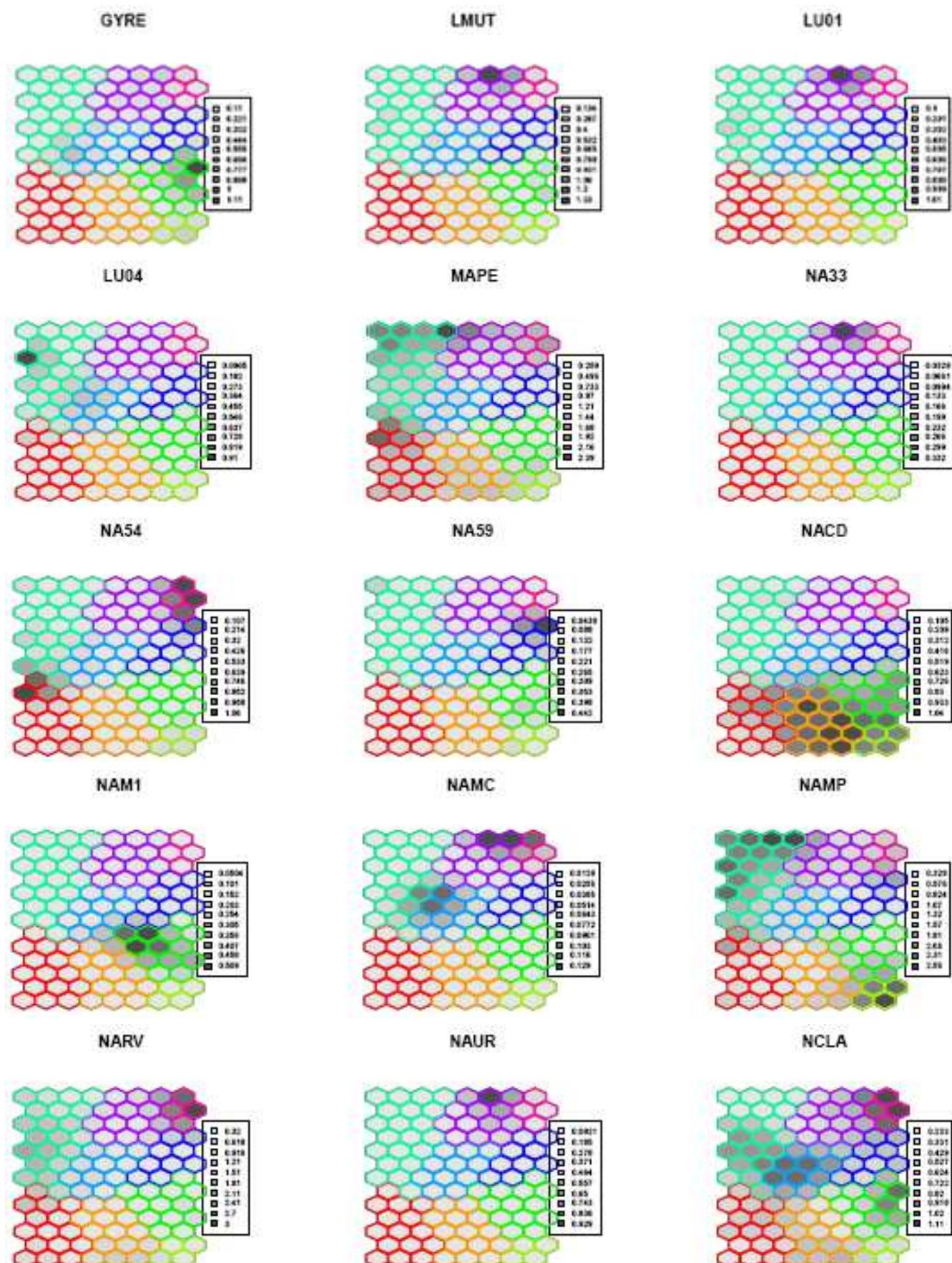
## Annexe 9 (7)



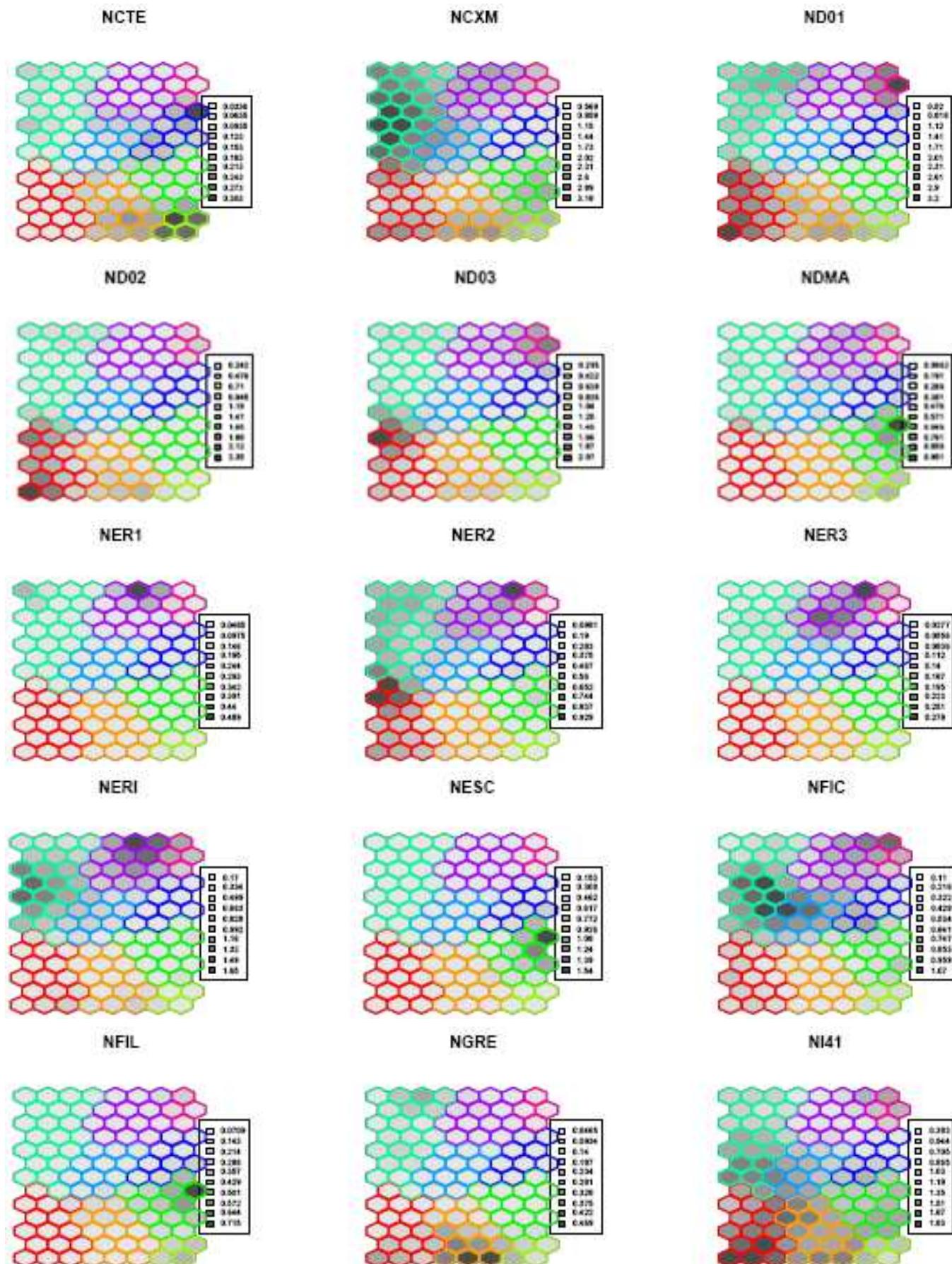
## Annexe 9 (8)



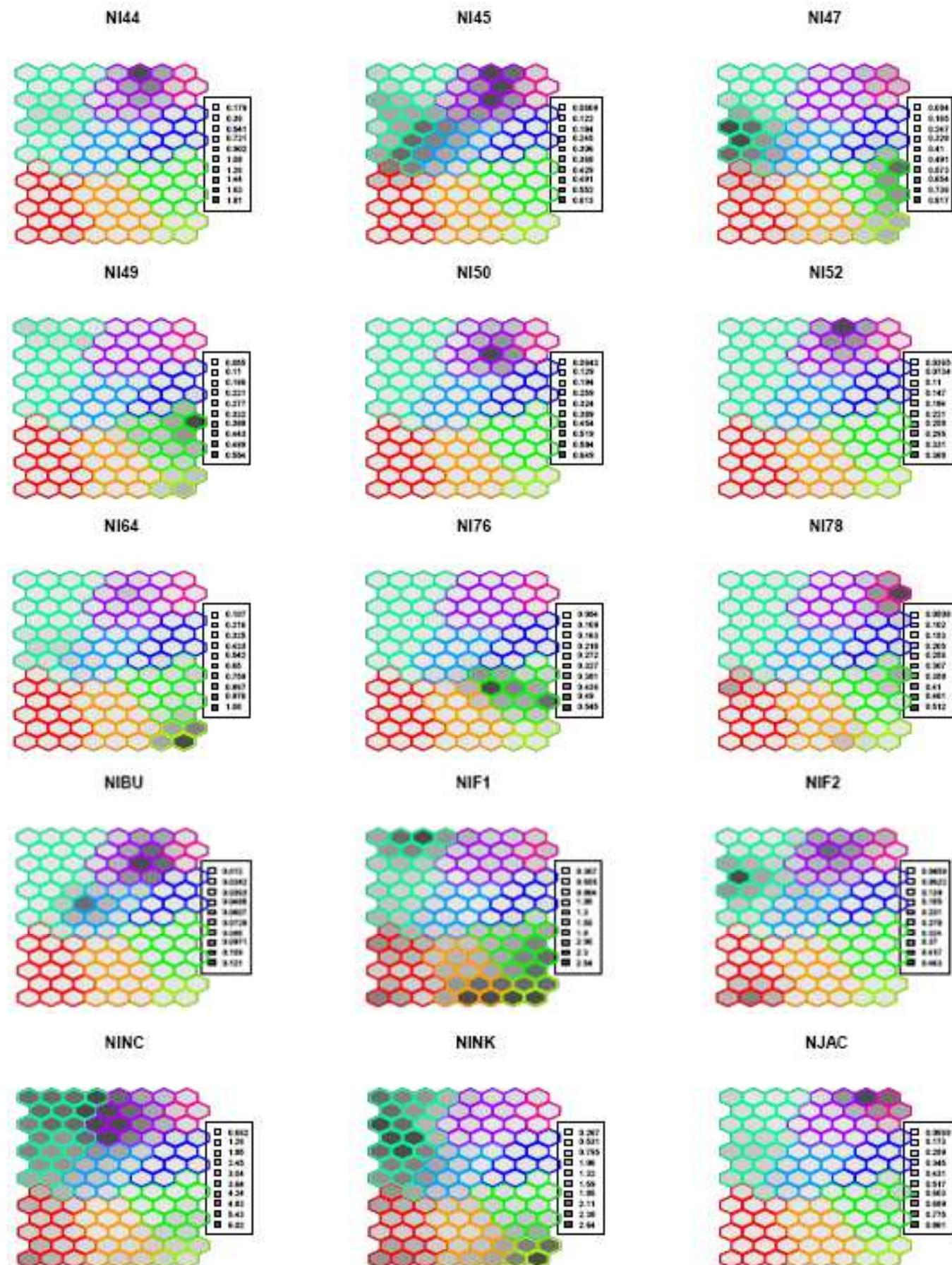
## Annexe 9 (9)



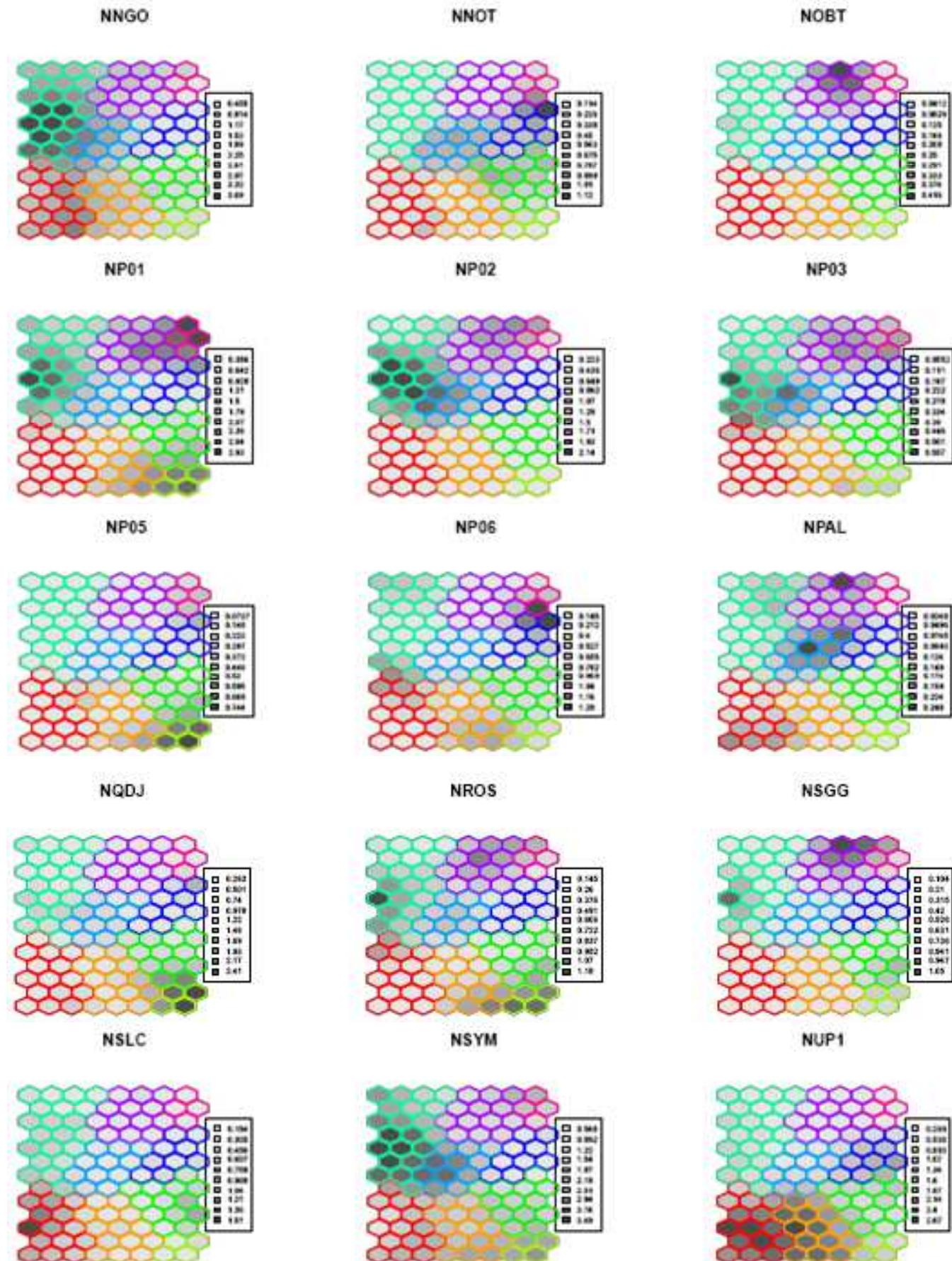
## Annexe 9 (10)



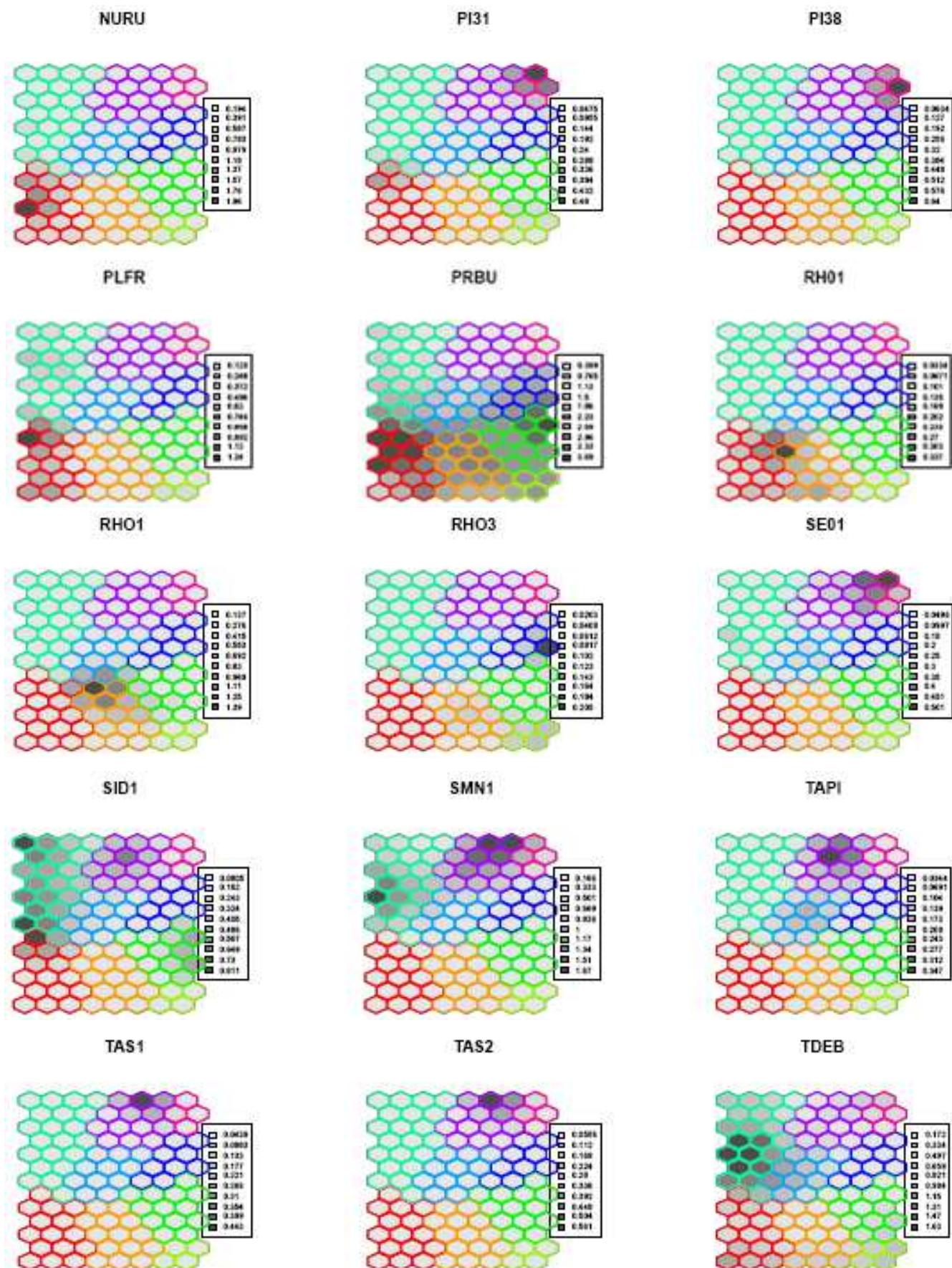
## Annexe 9(11)



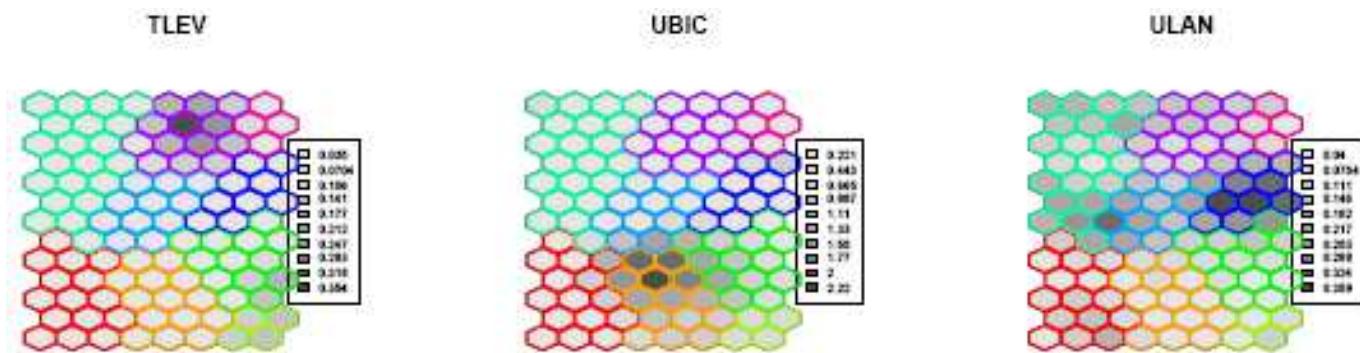
## Annexe 9 (12)



## Annexe 9 (13)



## Annexe 9 (13)



## Annexe 10 : Liste des taxons d'alerte

Espèces (1)	Type	Espèces (2)	Type
ADEG	--	ND03	--
CAGR	--	NER3	--
CATO	--	NERI	--
DCFD	--	NI44	--
DCOF	--	NI45	--
EN02	--	NI47	--
E005	--	NI50	--
ESBM	--	TRBA	--
FR01	--	NI64	--
FR02	--	NI78	--
FTN1	--	NIF2	--
G052	--	NINC	--
G058	--	NJAC	--
G059	--	NKUZ	--
G066	--	NP02	--
G070	--	NP03	--
G074	--	NROS	--
G075	--	NSGG	--
G077	--	PI31	--
GTNR	--	PI38	--
MAPE	--	SE01	--
NA33	--	SMST	--
NA54	--	TAPI	--
NAMP	--	TLEV	--
NARV	--		

	NINC	Espèce d'alerte dans l'IDA "volcan" seulement			

## Annexe 11 : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA

Espèces (1)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
<b>ABIN</b>	0,999	0,000	0,001	0,000	0,000
<b>AD05</b>	0,000	0,004	0,084	0,106	0,806
<b>AD07</b>	0,019	0,033	0,435	0,455	0,059
<b>AD08</b>	0,000	0,022	0,703	0,253	0,022
<b>AD09</b>	0,000	0,000	0,980	0,008	0,013
<b>AD10</b>	0,001	0,055	0,354	0,274	0,315
<b>AD11</b>	0,000	0,003	0,005	0,003	0,989
<b>AD13</b>	0,000	0,000	0,000	0,001	0,999
<b>AD14</b>	0,004	0,000	0,075	0,141	0,780
<b>AD16</b>	0,000	0,000	0,015	0,115	0,870
<b>AD19</b>	0,001	0,000	0,009	0,018	0,972
<b>ADCT</b>	0,000	0,001	0,039	0,051	0,910
<b>ADEG</b>	0,885	0,111	0,000	0,002	0,001
<b>ADS1</b>	0,000	0,014	0,014	0,056	0,916
<b>ADSH</b>	0,018	0,108	0,181	0,277	0,416
<b>HLMO</b>	0,519	0,075	0,278	0,081	0,047
<b>AMUS</b>	0,003	0,016	0,155	0,230	0,596
<b>ARPU</b>	0,005	0,023	0,061	0,255	0,656
<b>HTSU</b>	0,210	0,301	0,330	0,124	0,036
<b>BNE1</b>	0,000	0,002	0,008	0,000	0,989
<b>BNE2</b>	0,000	0,136	0,227	0,007	0,631
<b>BR01</b>	0,061	0,001	0,097	0,025	0,817
<b>BR02</b>	0,095	0,000	0,000	0,000	0,905
<b>CAGR</b>	0,998	0,000	0,000	0,000	0,002
<b>CATO</b>	0,992	0,008	0,000	0,000	0,000
<b>CLCT</b>	0,014	0,006	0,168	0,237	0,575
<b>CEUG</b>	0,005	0,027	0,084	0,211	0,672
<b>CMLF</b>	0,375	0,093	0,361	0,062	0,109
<b>C001</b>	0,000	0,005	0,002	0,028	0,965
<b>C002</b>	0,000	0,000	0,038	0,069	0,893

## **Annexe 11 (2) : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA**

<b>Espèces (2)</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
CPL1	0,004	0,000	0,123	0,009	0,864
CPLI	0,001	0,009	0,032	0,003	0,955
CTRO	0,000	0,000	0,001	0,173	0,825
CYMI	0,022	0,040	0,054	0,880	0,004
DCFD	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
DCOF	0,895	0,063	0,023	0,007	0,012
DCOT	0,063	0,040	0,121	0,189	0,586
DCRS	0,170	0,090	0,699	0,024	0,017
DEN1	0,002	0,012	0,073	0,247	0,665
DI05	0,305	0,109	0,434	0,019	0,134
EADN	0,004	0,000	0,000	0,000	0,996
EEX1	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
EEX2	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
EEXI	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
EN02	0,000	0,732	0,000	0,056	0,211
E001	0,074	0,134	0,224	0,278	0,290
E002	0,090	0,273	0,358	0,100	0,179
E003	0,063	0,491	0,221	0,079	0,146
E005	0,723	0,118	0,085	0,023	0,050
E006	0,002	0,006	0,136	0,242	0,615
E007	0,038	0,000	0,007	0,226	0,729
E008	0,037	0,060	0,812	0,037	0,054
EOMI	0,170	0,145	0,106	0,316	0,263
EORU	0,043	0,140	0,281	0,286	0,251
ESBM	0,730	0,240	0,027	0,003	0,001
ESLE	0,033	0,020	0,102	0,137	0,708
ESUB	0,844	0,022	0,000	0,000	0,135
EU20	0,444	0,145	0,373	0,008	0,030
EU22	0,518	0,000	0,330	0,015	0,138
EU23	0,000	0,000	0,010	0,000	0,990

## **Annexe 11 (3) : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA**

<b>Espèces (3)</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
<b>FCRS</b>	0,000	0,000	0,002	0,006	0,992
<b>FFON</b>	0,048	0,195	0,571	0,068	0,118
<b>FGOU</b>	0,000	0,009	0,036	0,150	0,805
<b>FR01</b>	0,879	0,014	0,077	0,019	0,012
<b>FR02</b>	0,974	0,000	0,000	0,000	0,026
<b>FSAP</b>	0,173	0,166	0,143	0,334	0,184
<b>FTN1</b>	0,886	0,074	0,041	0,000	0,000
<b>FTNR</b>	0,053	0,140	0,553	0,206	0,048
<b>GBOB</b>	0,020	0,139	0,170	0,198	0,473
<b>GBPA</b>	0,016	0,011	0,207	0,069	0,697
<b>GDEC</b>	0,001	0,006	0,029	0,186	0,779
<b>GE01</b>	0,001	0,005	0,041	0,399	0,554
<b>GEXL</b>	0,033	0,005	0,017	0,071	0,874
<b>GDES</b>	0,032	0,127	0,285	0,187	0,369
<b>G051</b>	0,055	0,170	0,317	0,221	0,237
<b>G052</b>	0,569	0,146	0,285	0,000	0,000
<b>G053</b>	0,000	0,000	0,031	0,027	0,942
<b>G054</b>	0,134	0,104	0,298	0,233	0,231
<b>G058</b>	0,878	0,120	0,001	0,000	0,001
<b>G059</b>	0,729	0,265	0,000	0,000	0,006
<b>G062</b>	0,000	0,332	0,057	0,065	0,546
<b>G063</b>	0,062	0,019	0,608	0,107	0,205
<b>G064</b>	0,000	0,011	0,592	0,011	0,386
<b>GLGN</b>	0,009	0,066	0,131	0,050	0,744
<b>G066</b>	0,983	0,013	0,003	0,000	0,000
<b>G067</b>	0,176	0,036	0,787	0,000	0,000
<b>G068</b>	0,000	0,000	0,955	0,032	0,013
<b>G069</b>	0,416	0,000	0,462	0,122	0,000
<b>G070</b>	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>G071</b>	0,000	0,000	0,001	0,077	0,922

## **Annexe 11 (4) : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA**

<b>Espèces (4)</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
G072	0,000	0,001	0,009	0,059	0,932
G073	0,000	0,000	0,989	0,000	0,011
G074	0,891	0,103	0,006	0,000	0,000
G075	0,415	0,585	0,000	0,000	0,000
G076	0,197	0,105	0,464	0,141	0,093
G077	0,232	0,757	0,000	0,000	0,011
G082	0,000	0,000	0,000	0,015	0,985
G084	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
G085	0,000	0,002	0,182	0,203	0,613
G091	0,107	0,128	0,623	0,019	0,123
GOAH	0,983	0,013	0,002	0,001	0,000
GPP1	0,001	0,002	0,000	0,093	0,904
GSCI	0,234	0,057	0,486	0,122	0,101
GTNR	0,512	0,194	0,292	0,000	0,002
GYRE	0,058	0,042	0,183	0,056	0,662
LMUT	0,943	0,017	0,020	0,013	0,007
LU01	0,996	0,004	0,000	0,000	0,000
LU04	0,036	0,036	0,304	0,612	0,013
MAPE	0,322	0,376	0,099	0,166	0,036
NA33	0,983	0,000	0,017	0,000	0,000
NA54	0,659	0,216	0,090	0,017	0,018
NACD	0,000	0,010	0,018	0,083	0,888
NDEN	0,000	0,000	0,000	0,009	0,991
NAMC	0,890	0,018	0,092	0,000	0,000
NAMP	0,229	0,390	0,307	0,059	0,015
NARV	0,682	0,147	0,094	0,052	0,026
NAUR	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NCLA	0,361	0,167	0,125	0,121	0,226
NCTE	0,004	0,610	0,070	0,096	0,221
NCXM	0,124	0,148	0,402	0,219	0,107

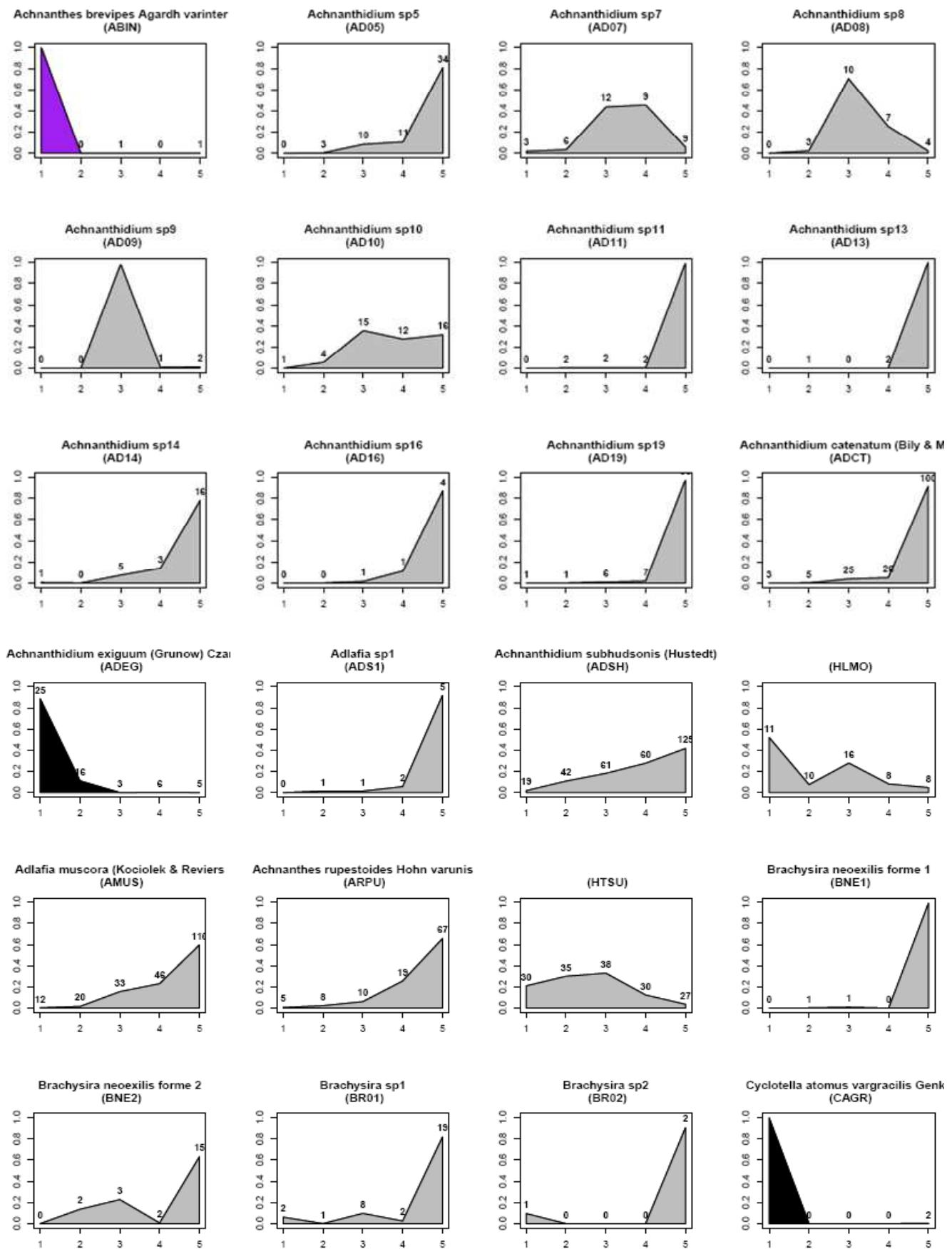
## **Annexe 11 (5) : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA**

<b>Espèces (5)</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
SSEM	0,305	0,174	0,064	0,187	0,270
ND02	0,058	0,050	0,064	0,224	0,605
ND03	0,621	0,111	0,053	0,126	0,089
NDMA	0,161	0,264	0,216	0,036	0,323
NER1	0,828	0,000	0,172	0,000	0,000
NER2	0,346	0,157	0,198	0,259	0,039
NER3	0,041	0,746	0,213	0,000	0,000
NERI	0,686	0,151	0,101	0,053	0,009
NESC	0,000	0,000	0,010	0,018	0,972
NFIC	0,163	0,140	0,585	0,060	0,052
NFIL	0,005	0,172	0,000	0,005	0,818
NGRE	0,002	0,019	0,025	0,071	0,882
NI41	0,025	0,039	0,236	0,250	0,450
NI44	0,940	0,051	0,007	0,001	0,001
NI45	0,317	0,622	0,054	0,006	0,000
NI47	0,207	0,509	0,076	0,097	0,110
NI49	0,007	0,034	0,537	0,030	0,392
NI50	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TRBA	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NI64	0,005	0,961	0,019	0,002	0,014
NI76	0,000	0,000	0,000	0,107	0,893
NI78	0,973	0,000	0,003	0,009	0,015
NIF2	0,586	0,366	0,015	0,015	0,019
NIFR	0,134	0,077	0,156	0,341	0,292
NINC	0,216	0,510	0,165	0,095	0,015
NINK	0,027	0,104	0,369	0,232	0,269
NJAC	0,674	0,105	0,189	0,015	0,017
NNGO	0,027	0,133	0,415	0,204	0,222
NNOT	0,044	0,004	0,126	0,148	0,678
NKUZ	0,956	0,044	0,000	0,000	0,000

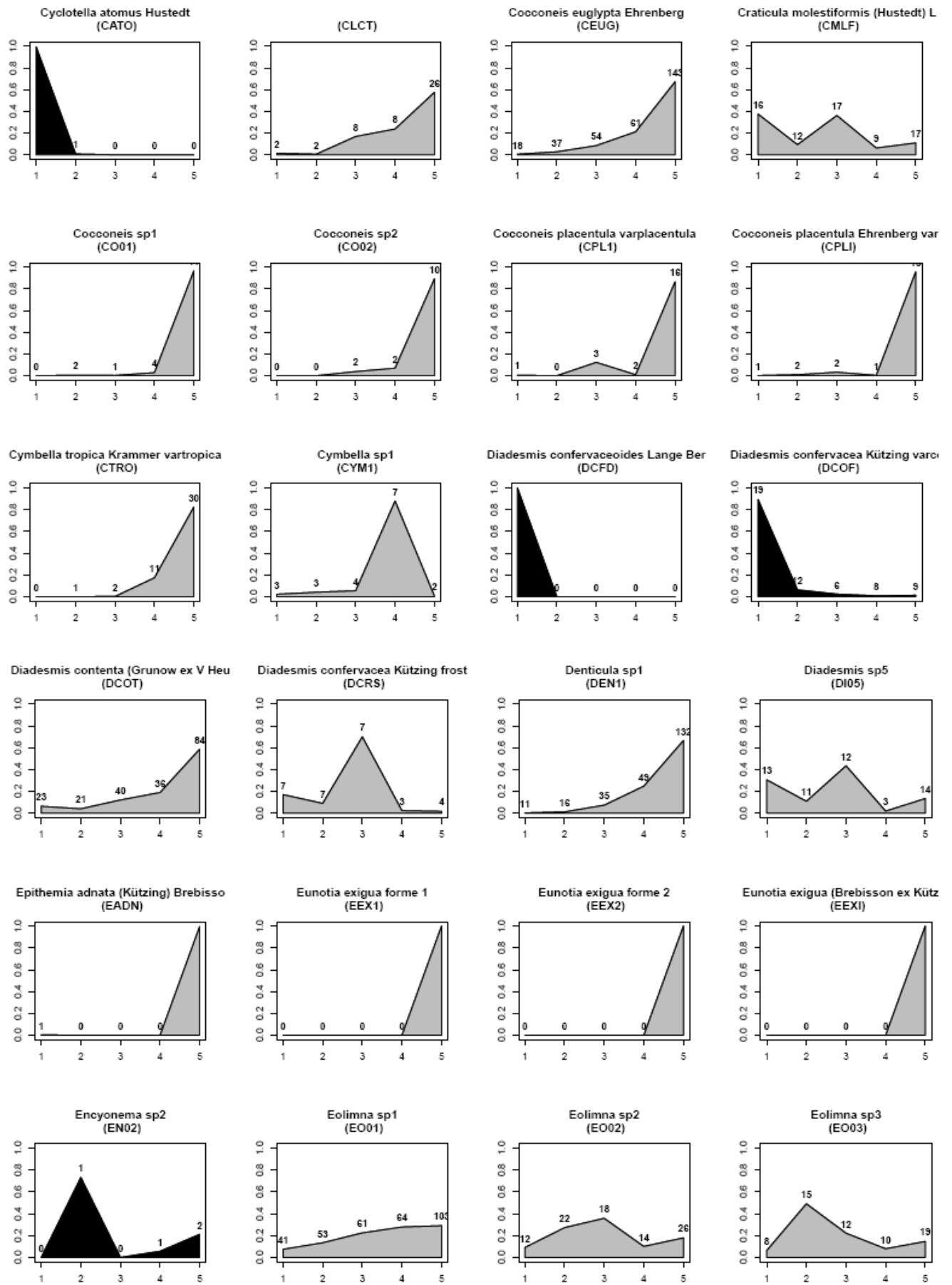
## **Annexe 11 (6) : Valeurs des profils de qualité des taxons de l'IDA**

<b>Espèces (5)</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
NP02	0,383	0,280	0,240	0,095	0,002
NP03	0,804	0,054	0,126	0,015	0,001
NP05	0,189	0,007	0,007	0,127	0,670
NP06	0,011	0,011	0,028	0,469	0,481
NQDJ	0,021	0,117	0,317	0,177	0,367
NROS	0,284	0,432	0,110	0,043	0,130
NSGG	0,553	0,395	0,048	0,004	0,000
NSLC	0,013	0,082	0,318	0,347	0,239
NSIA	0,051	0,190	0,369	0,199	0,191
NUP1	0,000	0,001	0,016	0,050	0,932
NURU	0,031	0,018	0,365	0,466	0,120
PI31	0,825	0,159	0,000	0,009	0,007
PI38	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PLFR	0,107	0,047	0,175	0,210	0,461
PRBU	0,008	0,009	0,072	0,121	0,791
RH01	0,000	0,000	0,000	0,183	0,816
RH03	0,000	0,000	0,000	0,086	0,914
SE01	0,947	0,046	0,000	0,008	0,000
SDRO	0,060	0,185	0,560	0,135	0,060
SMST	0,621	0,345	0,032	0,002	0,000
TAPI	0,255	0,681	0,000	0,065	0,000
TAS1	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TAS2	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TDEB	0,027	0,200	0,628	0,114	0,032
TLEV	0,387	0,472	0,020	0,121	0,000
UPSG	0,000	0,002	0,019	0,015	0,964
ULAN	0,048	0,160	0,251	0,022	0,519

## Annexe 12 : Représentation des profils de qualité des taxons de l'IDA

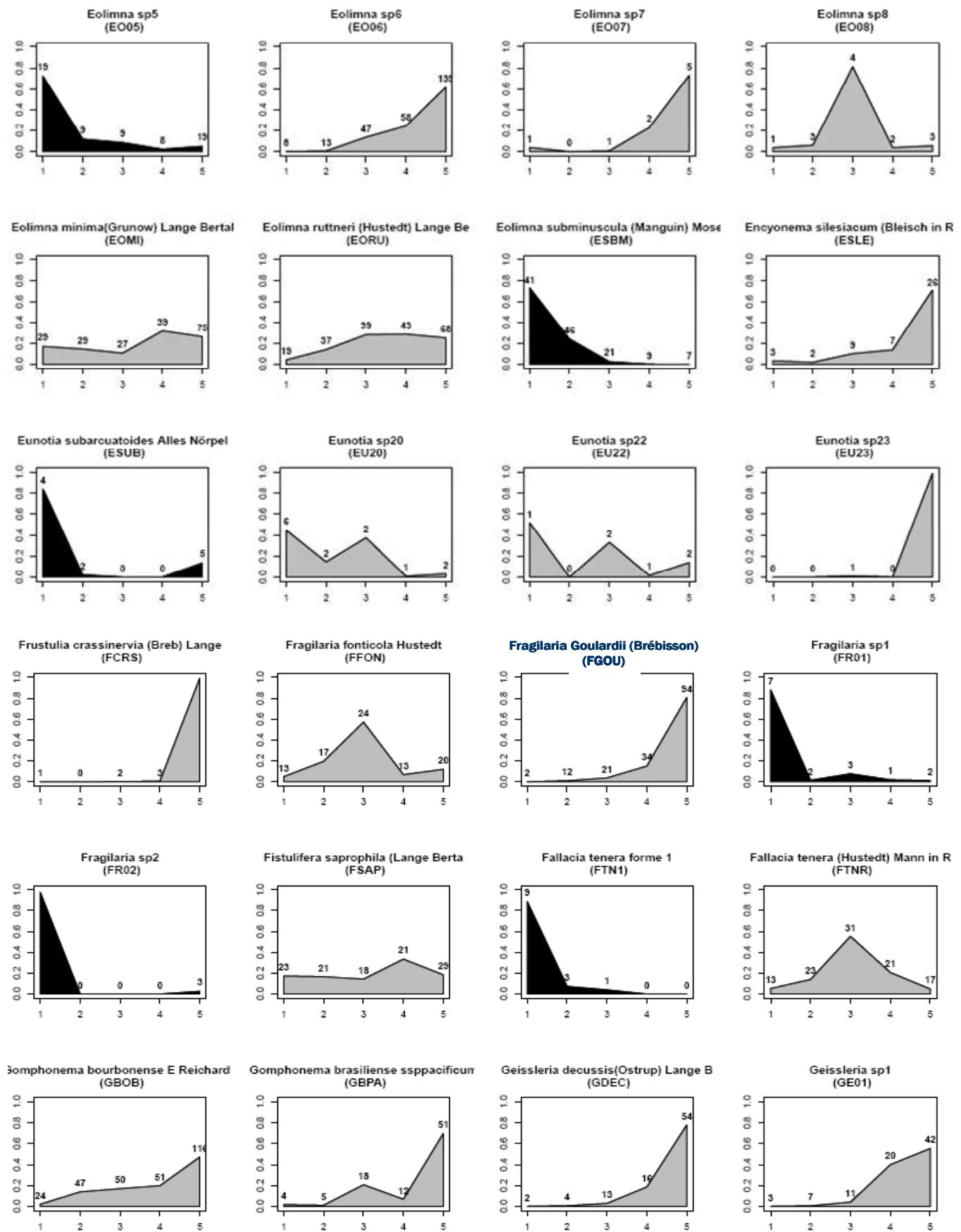


## Annexe 12 (2)



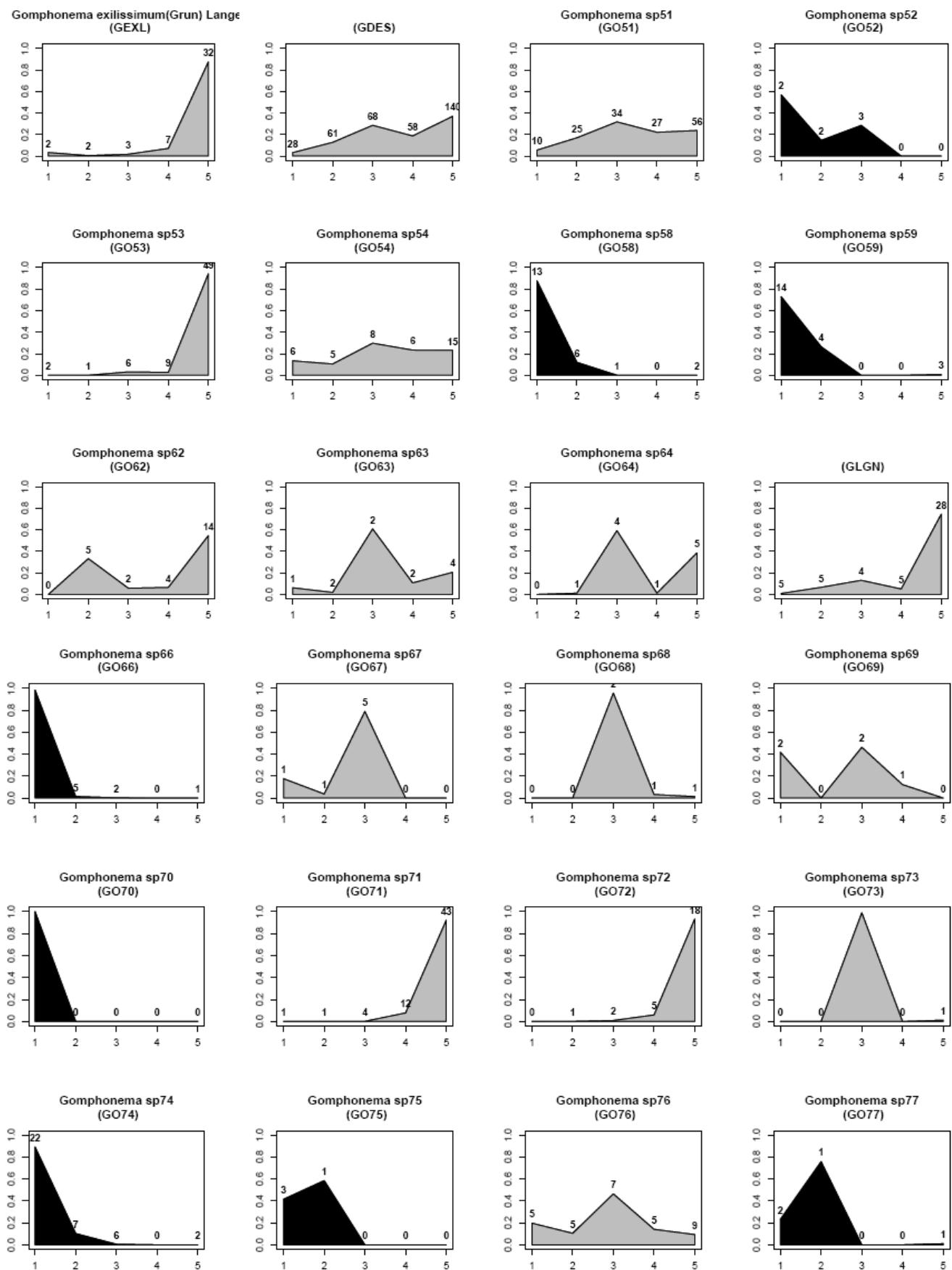
Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 12 (3)



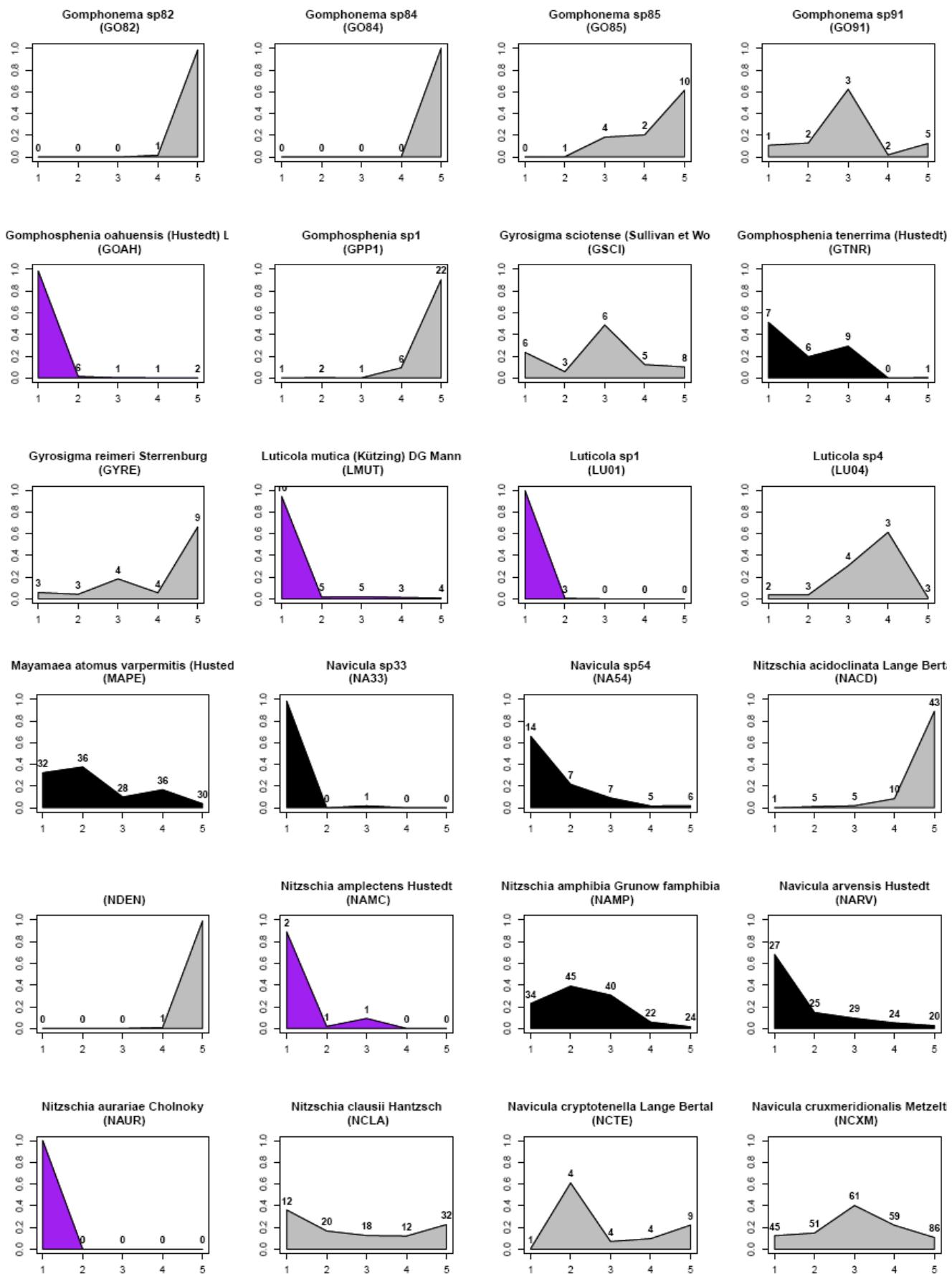
Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 12 (4)



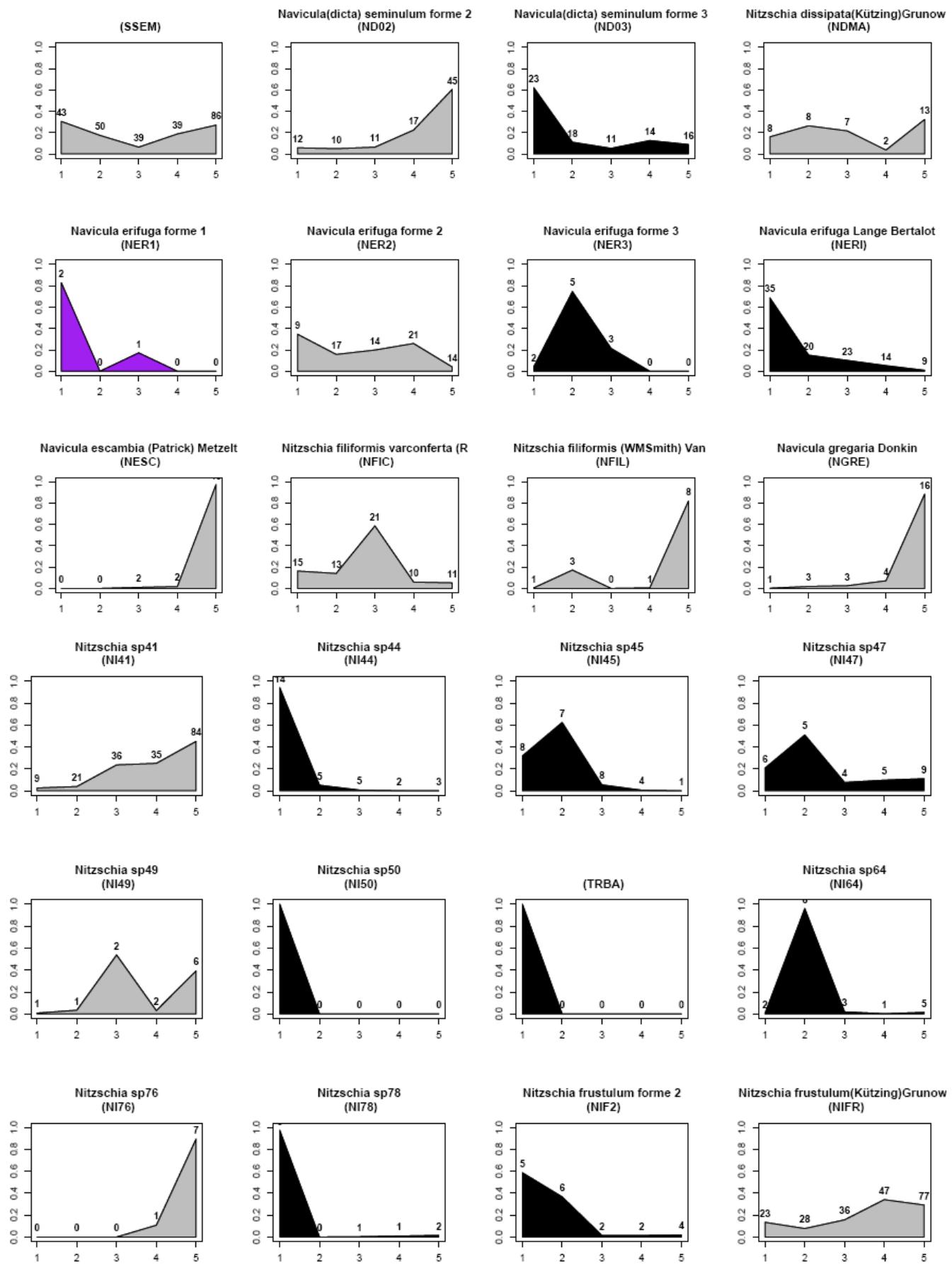
Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 12 (5)



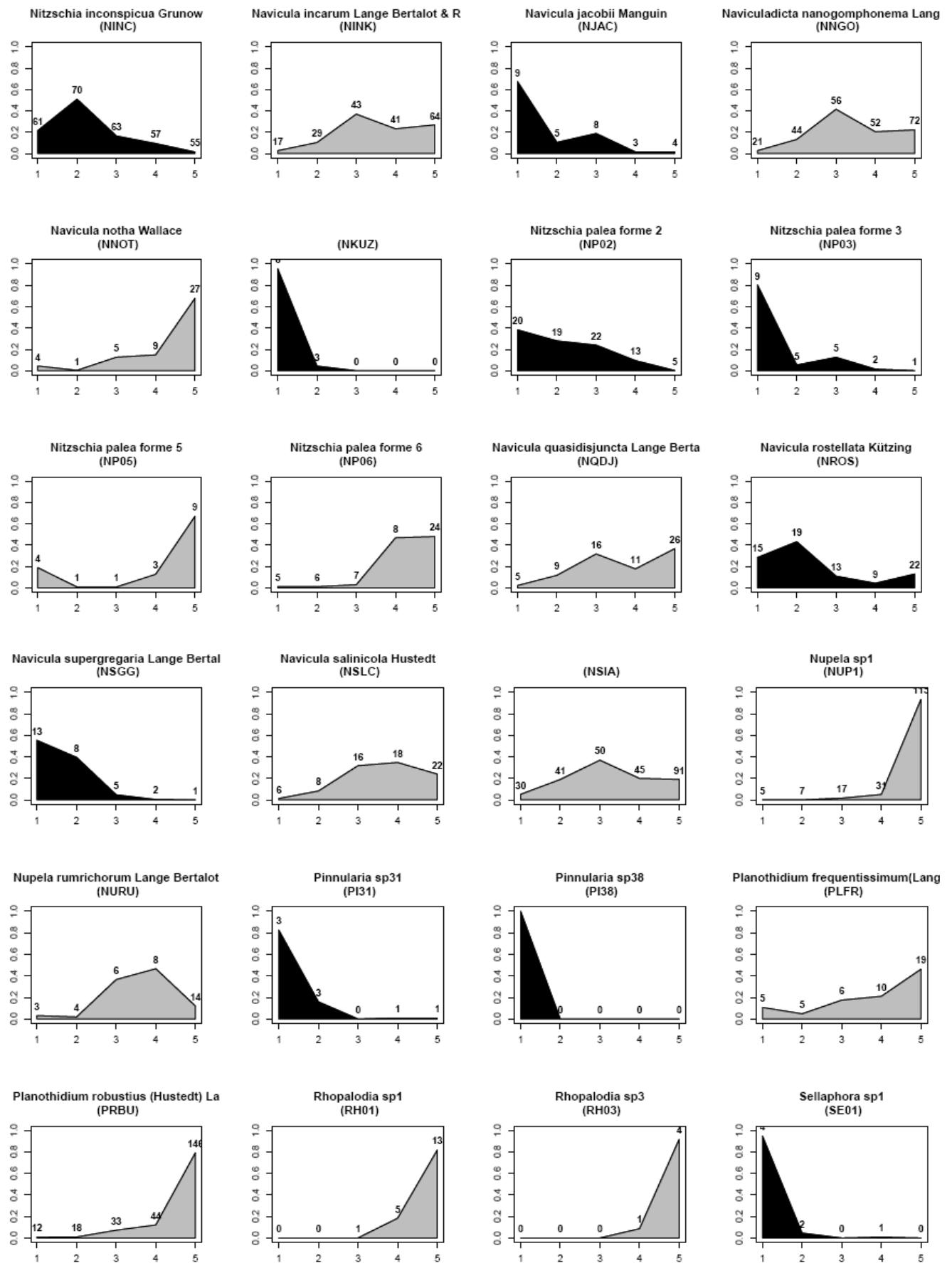
Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 12 (6)

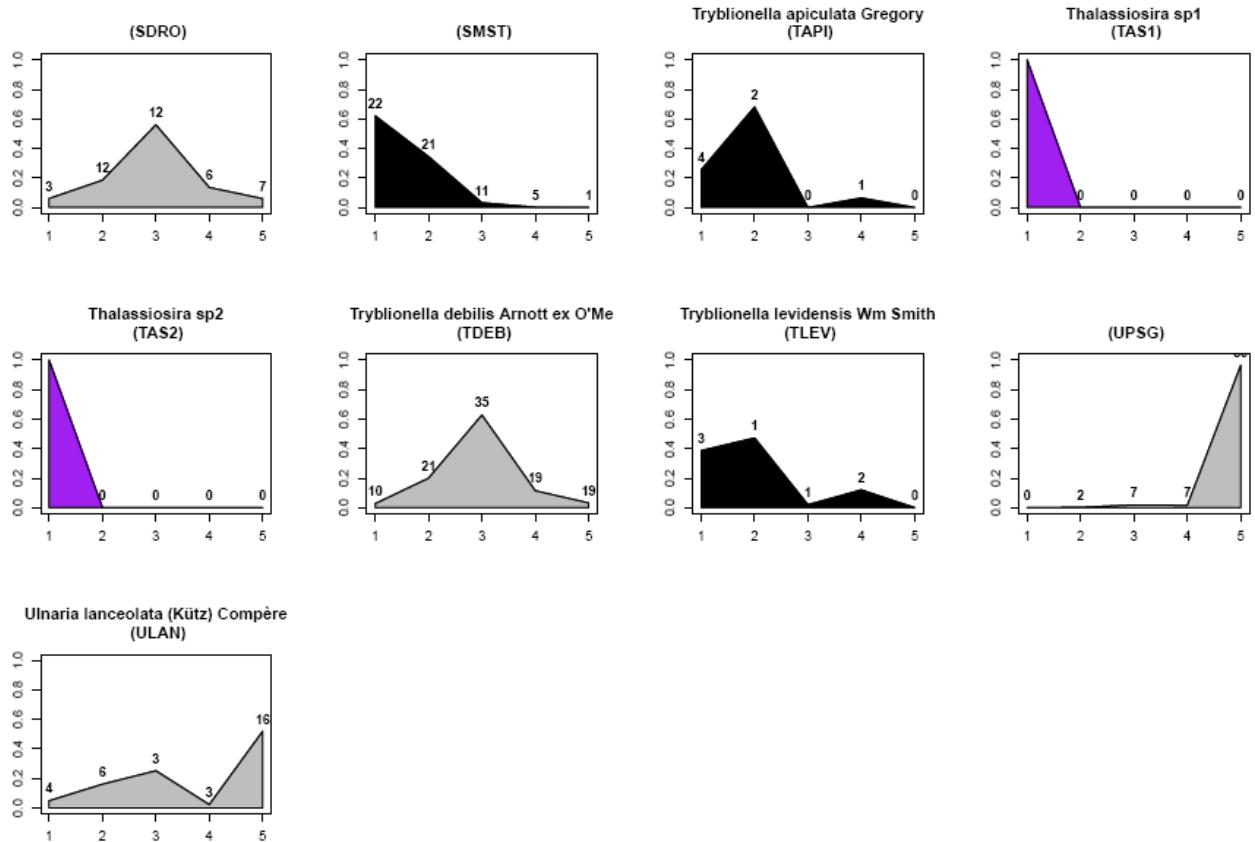


Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées  
**Rapport final**

## Annexe 12 (7)



## Annexe 12 (8)



### Légende :

- En gris** : espèces non déclassantes de l'IDA
- En noir** : taxons d'alerte
- En mauve** : taxons halins, non pris en compte dans l'IDA

## **Annexe 13 : Valeurs non transformées des boxplots du paramètre PO4 selon les classes d'états**

**Valeurs non transformées de PO4 (mg/l) par Classe d'Etat (avant COPIL cf.)**

Classes d'Etats	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
TME	0,07	0,175	0,49	1,774	2,78	5,8
ME	0,015	0,1325	0,22	0,7146	0,44	7,3
EM	0,03	0,09	0,18	0,3117	0,335	2,8
BE	0,01	0,05	0,065	0,1238	0,1	1,62
TBE	0,01	0,03	0,05	0,0795	0,1	2,1

**Valeurs non transformées de PO4 (mg/l) par Classe d'Etat (HER regroupée "Volcan")**

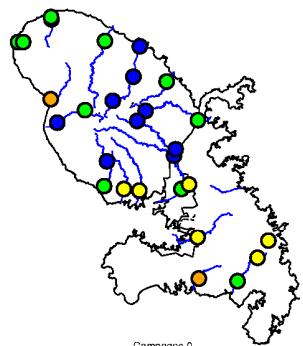
Classes d'Etats	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
TME	0,21	0,24	0,27	0,3233	0,38	0,49
ME	0,015	0,1525	0,265	0,6929	0,4575	4,93
EM	0,03	0,09	0,18	0,3169	0,38	1,36
BE	0,01	0,05	0,06	0,1184	0,1	1,62
TBE	0,01	0,03	0,05	0,08127	0,1	2,1

**Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours d'eau antillais à partir des diatomées**  
**Rapport final**

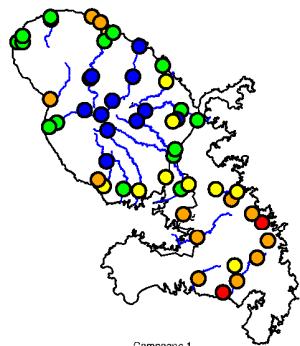
**Valeurs non transformées de P04 (mg/l) par Classe d'Etat (HER regroupée "Plaine")**

Classes d'Etats	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
TME	0,05	0,265	2,12	2,049	2,725	5,8
ME	0,06	0,1625	0,25	0,575	0,315	2,8
EM	0,05	0,085	0,14	1,145	0,325	7,3
BE	0,015	0,05	0,07	0,1615	0,2075	1,14
TBE	0,05	0,05	0,09	0,165	0,2425	0,62

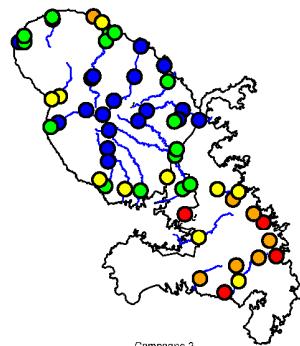
## Annexe 14 : Cartes d'états en prenant en compte l'espèce NINC dans la liste des espèces cibles



Campagne 0



Campagne 1



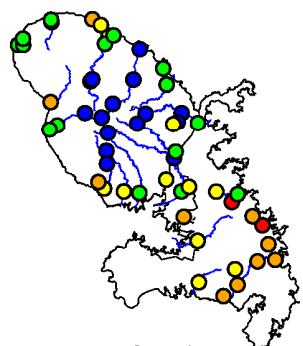
Campagne 2

### Récapitulatif classes d'états Martinique (test18\_31\_10)

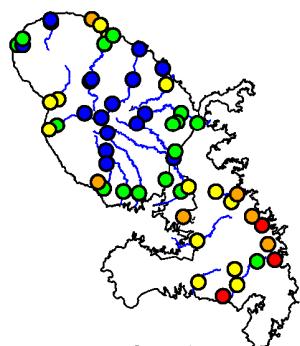
TME	ME	mE	BE	TBE
11	37	50	74	72

Classes d'état  
 TME  
 ME  
 mE  
 BE  
 TBE

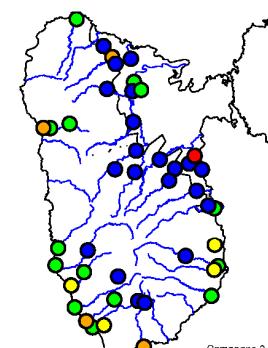
Limites des classes :  
 TME : ]1;5.3021]  
 ME : ]5.3021;9.6042]  
 mE : ]9.6042;13.906]  
 BE : ]13.906;18.21]  
 TBE : ]18.21;20]



Campagne 3



Campagne 4



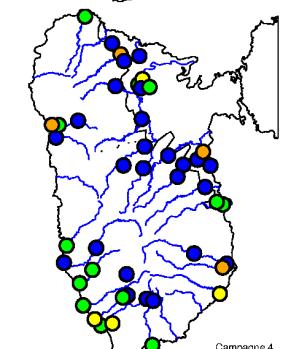
Campagne 3

### Récapitulatif classes d'états Guadeloupe (test18\_31\_10)

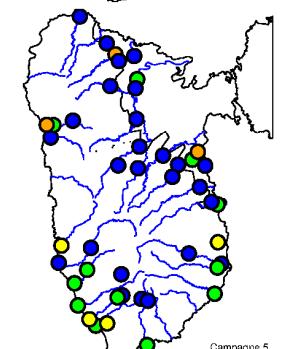
TME	ME	mE	BE	TBE
3	15	20	68	118

Classes d'état  
 TME  
 ME  
 mE  
 BE  
 TBE

Limites des classes :  
 TME : ]1;5.3021]  
 ME : ]5.3021;9.6042]  
 mE : ]9.6042;13.906]  
 BE : ]13.906;18.21]  
 TBE : ]18.21;20]



Campagne 4



Campagne 5