



DIREN Martinique
Immeuble Massal
4 Boulevard Verdun
97200 Fort-de-France



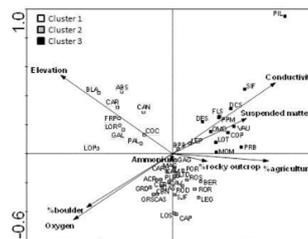
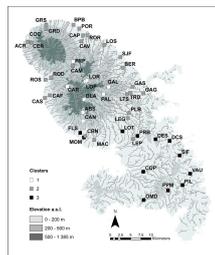
O.D.E. Martinique
7 Avenue Condorcet
BP 32
97201 FORT DE FRANCE



Programme d'étude et de recherche 2010-2013 :

Mise au point d'un indice de bioindication de la qualité de l'eau des cours de Martinique à partir des macroinvertébrés benthiques

Rapport final – Version 1 (janvier 2013)



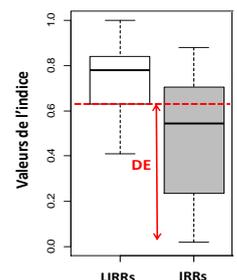
Richesse
ET/Diptères
% Oligochètes

Shannon

EQR



ASCONIT
CONSULTANTS
Agence Caraïbes
ZI Champigny
97224 DUCOS





PRINCIPAUX CONTACTS

ODE Martinique :

- Loïc Mangeot loic.mangeot@eaumartinique.fr
- Julie Gresser julie.gresser@eaumartinique.fr

DEAL Martinique :

- Bruno Capdeville Bruno.CAPDEVILLE@developpement-durable.gouv.fr
- Corinne Figueras Corinne.FIGUERAS@developpement-durable.gouv.fr

ASCONIT CONSULTANTS :

- Nicolas BARGIER nicolas.bargier@asconit.com
- Caroline BERNADET caroline.bernadet@asconit.com

UNIVERSITE Paul SABATIER TOULOUSE III / CNRS UMR5245 ECOLAB :

- Pr. Régis Céréghino regis.cereghino@univ-tlse3.fr

ONEMA :

- Olivier Monnier omonnier@mnhn.fr

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE DE L'ETUDE	6
2. PRESENTATION DES DONNEES	8
2.1. LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	8
2.2. LES SITES DE L'ETUDE	10
2.3. CARACTERISATION DE LA QUALITE DE L'EAU.....	14
2.4. DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET OCCUPATION DES SOLS SUR LES BASSINS VERSANTS AU NIVEAU DES SITES D'ETUDES.....	15
2.5. FREQUENCE DES PRELEVEMENTS	19
2.6. TECHNIQUES DE PRELEVEMENT DES MACROINVERTEBRES BENTHIQUES	21
2.7. TECHNIQUES DE TRI ET DETERMINATION	22
3. DEVELOPPEMENT DE L'INDICE	23
3.1. SELECTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES.....	23
3.2. TYPOLOGIE DES STATIONS.....	25
3.2.1. <i>Matériel et méthode</i>	26
3.2.2. <i>Résultats</i>	28
3.2.3. <i>Résumé et conclusions de la typologie</i>	35
3.3. STATIONS LIRRS VS. STATIONS IRRS.....	35
3.3.1. <i>Choix des stations LIRRS</i>	36
3.3.2. <i>Qualité de l'eau et qualité de l'habitat des stations LIRRS vs. IRRs</i>	37
3.4. PRESENTATION DES METRIQUES.....	44
3.5. NORMALISATION DES METRIQUES	46
3.5.1. <i>Les valeurs de référence</i>	46
3.5.2. <i>Calcul des écarts à la référence (EQR : Ratio de Qualité Ecologique)</i>	48
3.6. SELECTION DES METRIQUES PERTINENTES	49
3.6.1. <i>Quatre critères de sélection</i>	50
3.6.2. <i>Métriques finales</i>	51
3.7. CALCUL DE L'INDICE BIOLOGIQUE MACROINVERTEBRE DES ANTILLES POUR LA MARTINIQUE (IBMA-972)	53
4. TEST DE L'INDICE.....	54
4.1. COMPARAISON AVEC L'INDICE DE SHANNON	54
4.2. APPLICATION AUX DONNEES DE CAREME 2010 ET CAREME 2012	55
4.3. DEFINITION DES CLASSES DE QUALITE	56
4.4. RESULTATS : CARTES D'ÉTATS DES SITES DE 2010 ET 2012	57
5. BILAN.....	59
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	61
<i>ANNEXES</i>	63

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LOCALISATION DE LA MARTINIQUE DANS LES ANTILLES	8
FIGURE 2. LE RELIEF ET LA PLUVIOMETRIE DE LA MARTINIQUE (SOURCE : CHANDESRIS ET AL., 2005).	9
FIGURE 3. CARTE DES HYDRO-ECOREGIONS DE LA MARTINIQUE.	25
FIGURE 4. CARTE DE LOCALISATION DES STATIONS ET APPARTENANCE AUX CLUSTERS	29
FIGURE 5. RESULTATS DE L'ANALYSE CANONIQUE DES CORRESPONDANCES (CCA).	30
FIGURE 6. ABONDANCES RELATIVE (%) DES PRINCIPAUX GROUPS DE MACROINVERTEBRES BENTHIQUES DANS LES CLUSTERS.	32
FIGURE 7. DISTRIBUTIONS DES METRIQUES DE DIVERSITE (RICHESSSE TAXONOMIQUE, REGULARITE DE SIMPSON, ENTROPIE DE SHANNON) POUR LES TROIS CLUSTERS	34
FIGURE 8. DISTRIBUTION DES VALEURS DE CHACUNE DES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU POUR LES STATIONS LIRRS ET LES STATIONS IRRS, ET POUR LES DONNEES DE CAREME 2011.	38
FIGURE 9. DISTRIBUTION DES VALEURS DE CHACUNE DES VARIABLES D'OCCUPATION DU SOL POUR LES STATIONS LIRRS ET LES STATIONS IRRS, ET POUR LES DONNEES DE CAREME 2011.	40
FIGURE 10. DISTRIBUTION DES VALEURS DE CHACUNE DES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU POUR LES STATIONS LIRRS ET LES STATIONS IRRS POUR CHACUN DES CLUSTERS, ET POUR LES DONNEES DE CAREME 2011.	41
FIGURE 11. DISTRIBUTION DES VALEURS DES TROIS VARIABLES D'OCCUPATION DU SOL POUR LES STATIONS LIRRS ET LES STATIONS IRRS POUR CHACUN DES CLUSTERS, ET POUR LES DONNEES DE CAREME 2011.	44
FIGURE 12. ILLUSTRATION DES TYPES DE REponses DES METRIQUES AUX PRESSIONS ANTHROPIQUES : (A) METRIQUES DEcroISSANTES (TYPE II) ET (B) METRIQUES CroISSANTES (TYPE III).	47
FIGURE 13. HISTOGRAMME DES FREQUENCES DES VALEURS DE DE (A) ET CV (B) DES METRIQUES	51
FIGURE 14. DISTRIBUTION DES RESULTATS ET EFFICACITE DE DISCRIMINATION DE L'INDICE DE SHANNON ET DE L'IBMA-972 POUR UN MEME JEU DE DONNEES.	54
FIGURE 15. DISTRIBUTION DES SCORES DE L'IBMA-972 : COMPARAISON ENTRE LE JEU DE CONSTRUCTION (BOITES A MOUSTACHES BLANCHES) ET LES JEUX DE DONNEES TESTS (BOITES A MOUSTACHES GRISES).	55
FIGURE 16. DECOUPAGE DES CLASSES D'ETATS SUIVANT LA DISTRIBUTION DES SCORES DE L'IBMA-972.	57
FIGURE 17. CARTE D'ETAT DES SITES SELON LES CAMPAGNES.	58
FIGURE 18. DISTRIBUTION DES VALEURS DE L'INDICE CREE SUIVANT LA METHODE DE BARBOUR EN CONDITIONS DE REFERENCES (IRRS) ET IMPACTEES (IRRS) ET LIMITES DES CLASSES DE QUALITE. BOITES A MOUSTACHES BLANCHES : JEU DE DONNEES DE CAREME 2011 QUI A SERVI A LA CONSTRUCTION DE L'INDICE ; BOITES A MOUSTACHES GRISES : JEU DE DONNEES TEST (CAREME 2010 ET 2012).	69

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION GENERALE DE L'ENSEMBLE DES STATIONS DE L'ETUDE.	11
TABLEAU 2. METHODE D'ANALYSE, NORME ET LIMITE DE QUANTIFICATION POUR CHACUN DES PARAMETRES DE L'EAU MESURES.....	14
TABLEAU 3. DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET OCCUPATION DES SOLS SUR LES BASSINS VERSANTS DES SITES D'ETUDES (DONNEES CORINE LAND COVER 2012)	16
TABLEAU 4. SUIVI DES STATIONS SUR LA DUREE DE L'ETUDE	19
TABLEAU 5. ORDRE DE PRIORITE DE PRELEVEMENT DES SUBSTRATS (DU PLUS HABITABLE AU MOINS HABITABLE) ET CLASSES DE VITESSE DU COURANT.	22
TABLEAU 6. ANALYSES DE PARTITION DE VARIANCE SUR LE JEU DE DONNEES ENTIER (TOUS LES SITES) ET POUR CHACUN DES CLUSTERS PRIS SEPAREMENT.	32
TABLEAU 7. STATIONS LIRRS POUR CHACUN DES TROIS CLUSTERS.....	36
TABLEAU 8. RESULTATS DE DE, CV, ET SPECIFICITE DES METRIQUES FINALES	52
TABLEAU 9. EFFICACITE DE DISCRIMINATION ET COEFFICIENT DE VARIATION DE L'IBMA-972 DE 2010 A 2012.....	56
TABLEAU 10. LIMITES DES CLASSES D'ETAT.	56
ANNEXE. TABLEAU 11. DISTRIBUTION DES DIFFERENTS MACROINVERTEBRES PRIS EN COMPTE DANS LA TYPOLOGIE POUR LES DIFFERENTS CLUSTERS (DONNEES CAREME 2010).	64
TABLEAU 12. SELECTION DES METRIQUES SELON BARBOUR ET AL., 1999 : EXEMPLES DE METRIQUES POTENTIELLES POUR CHACUNE DES 4 CATEGORIES DE METRIQUES (EXTRAIT DU TABLEAU ORIGINAL).	67
TABLEAU 13. LES 69 METRIQUES CANDIDATES ET LES 4 METRIQUES FINALES POUR CHACUNE DES 4 CATEGORIES DE METRIQUES	68
TABLEAU 14. LIMITES DES CLASSES DE QUALITE POUR L'INDICE CREE SUIVANT LA METHODE DE BARBOUR.	69
ANNEXE. TABLEAU 15. LISTE DES METRIQUES A TESTER	70
ANNEXE. TABLEAU 16. VALEURS DE DE ET CV DES 69 METRIQUES CANDIDATES, ET RESULTATS DES REGRESSIONS LINEAIRES SIMPLES (CRITERE DE FAIBLE SELECTIVITE DES VARIABLES) POUR LA SELECTION DES METRIQUES.	73

1. Introduction et contexte de l'étude

A travers la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE ; European Council, 2000) adoptée le 23 octobre 2000, l'Union européenne a établi un cadre communautaire pour la protection et la gestion de l'eau.

Cette directive poursuit plusieurs objectifs tels que la prévention et la réduction de la pollution, la promotion d'une utilisation durable de l'eau, la protection de l'environnement, l'amélioration de l'état des écosystèmes aquatiques et l'atténuation des effets des inondations et des sécheresses. L'objectif majeur est d'atteindre un « bon état » écologique et chimique de toutes les eaux communautaires d'ici à 2015.

Cela implique pour les Etats membres d'évaluer l' « état écologique », qui peut être défini comme une appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés aux eaux de surface. L'état écologique comprend principalement l'évaluation biologique, mais également l'évaluation d'un certain nombre de paramètres physico-chimiques de qualité générale, conditionnant directement l'état biologique.

Pour chaque masse d'eau, le « bon état » écologique est défini par de faibles écarts à un état de référence correspondant à l'état de la masse d'eau dans des conditions préservées de toute perturbation anthropique majeure. Les conditions de référence pouvant naturellement varier entre cours d'eau, la DCE introduit la notion de « typologie » des eaux. Cette typologie, basée sur les facteurs majeurs influençant le fonctionnement des cours d'eau à l'échelle du territoire (notamment la géologie, le climat, l'altitude et la biogéographie) permet de prendre en compte les principaux facteurs d'hétérogénéité des conditions de référence, et aussi des réponses aux pressions.

L'évaluation biologique s'appuie sur des critères appelés « Eléments de Qualité Biologique » (EQB), c'est-à-dire des communautés biologiques servant de support à l'évaluation de l'état. Concernant les écosystèmes d'eau douce lotiques, la DCE prescrit l'utilisation de 4 EQB pour évaluer l'état (combinaison ou pertinence selon les catégories de masses d'eau) : l'ichtyofaune, les macroinvertébrés benthiques, le phytoplancton et les macrophytes. Depuis longtemps utilisé en bio-évaluation, le groupe des macroinvertébrés benthiques est un des groupes les plus utilisés en Europe pour révéler les pressions anthropiques sur les écosystèmes, et est à la base de nombreuses méthodes/indices de bioindication (e.g. ASPT, SPEAR, AQEM).

En France métropolitaine, l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) (AFNOR, 1992, 2004) est la méthode normalisée utilisée depuis 1992 pour évaluer la qualité écologique des cours d'eau peu profonds à partir des macroinvertébrés. Actuellement, les indices créés dans la zone européenne sont pour beaucoup remaniés, et de nouveaux indices sont développés afin de satisfaire les exigences de la DCE, parmi lesquelles : 1) l'évaluation doit impérativement être réalisée par rapport à une situation de référence et 2) la typologie des masses d'eau doit être considérée. En plus de ces critères, les outils de bio-évaluation basés sur les EQB doivent prendre en compte pour les communautés : 1) l'abondance, 2) la diversité et 3) un ratio espèces sensibles sur espèces tolérantes.

Bien que géographiquement éloignée, la Martinique, comme tous les Départements d'Outre-Mer français, fait partie intégrante de l'Union Européenne. Elle est alors soumise aux mêmes obligations et objectifs que l'Europe continentale en termes de politiques

environnementales. Notamment, l'état écologique devra être évalué à partir des communautés de macro-invertébrés benthiques. Or, ni l'IBGN utilisé en métropole jusqu'à maintenant ni le nouvel indice de bioévaluation DCE-compatible développé récemment pour la France (l'Indice Invertébrés Multi-Métrique (I₂M₂) (Mondy *et al.*, 2012)) ne peuvent être directement appliqués en Martinique. Pour exemple, l'indice I₂M₂ prend en compte l'abondance de taxons présentant plus d'une génération par an, mais on ignore les valeurs de ce trait pour la faune martiniquaise, tout simplement par manque de travaux fondamentaux. Jusqu'alors, une combinaison de trois indices structuraux classiques (Shannon, Simpson et Equitabilité de Pielou) était utilisée pour évaluer la qualité écologique des cours d'eau. Il est donc nécessaire de développer un indice de bio-évaluation basé sur les macroinvertébrés benthiques qui soit adapté au contexte martiniquais.

On constate d'une manière générale un manque de connaissances des macroinvertébrés-benthiques des Antilles françaises, qu'il s'agisse de leur degré de sensibilité aux pollutions, de leurs préférences d'habitat, de leur distribution longitudinale suivant des gradients environnementaux naturels, ou encore des traits biologiques des espèces (ex. caractéristiques du cycle de vie, comportement). Peu de travaux scientifiques ont porté sur la macroinvertébrée des Antilles françaises. On peut noter toutefois qu'un travail important d'inventaire et de description de cette faune a été réalisé par le CESAC (CESAC, 2001 pour la Martinique ; CESAC 2002 pour la Guadeloupe). Plus particulièrement, les mollusques et crustacés d'eau douce ont aussi fait l'objet de travaux importants (respectivement : Pointier, 2008 ; LIM *et al.*, 2002).

Compte tenu de ces observations et des objectifs fixés par la DCE, la démarche pour développer un indice basé sur le groupe des macroinvertébrés, adapté à la Martinique et DCE-compatible, a été la suivante :

- 1) Acquisition des données faunistiques (159 relevés de terrain) et des données physico-chimiques de l'eau associées, pour chaque station et pour chacune des trois campagnes de terrain ;
- 2) Réalisation d'une typologie des stations de Martinique sur la base de la faune. Elle permet de mettre en évidence des groupes de stations homogènes du point de vue de leurs peuplements. Elle permet aussi de mettre en exergue les paramètres environnementaux naturels ou d'origines anthropiques structurant les communautés.
- 3) Calcul des métriques descriptives des communautés, et normalisation en « écart à la situation de référence » (EQR) ;
- 4) Sélection des métriques pertinentes, et agrégation des métriques sélectionnées en un indice multimétrique final ;
- 5) Test de l'indice développé sur un jeu de données différent (jeu test). Les limites des classes de qualité ont été établies, et l'état écologique de chaque site évalué.

Toutes ces étapes sont présentées dans ce rapport. Elles aboutissent à la proposition d'un indice multimétrique DCE-compatible adapté à la Martinique.

Ainsi, nous sommes tournés pour ce programme vers la création d'un indice multimétrique. Comme son nom l'indique, il est composé de plusieurs métriques, qui sont des paramètres décrivant une fonctionnalité de l'écosystème. Les indices multimétriques sont des outils majeurs en bioindication dans le cadre de la DCE (Hering *et al.* 2006, Lucke *et Johnson*, 2009). Ils ont le potentiel d'évaluer efficacement et simultanément les réponses des communautés à différentes catégories de pressions puisque les métriques considèrent différentes caractéristiques des communautés qui peuvent répondre de manière spécifique à différentes catégories de pression. En Martinique, de nombreuses stations sont soumises à plusieurs perturbations à la fois (contexte multipression), c'est pourquoi le choix d'un indice multimétrique semble pertinent. De plus, cela permet de garder une certaine « cohérence/unité » avec la métropole puisque l'indice de bio-évaluation mis au point récemment pour le territoire métropolitain pour satisfaire les exigences de la DCE est multimétrique.

2. Présentation des données

2.1. Le contexte géographique

La Martinique est une île volcanique située dans l'arc des Petites Antilles, à 14° de latitude Nord et 61° de longitude Ouest. Elle est baignée à l'Est par l'océan Atlantique, et à l'Ouest par la mer des Caraïbes. A la fois département d'Outre-mer et région française, la Martinique est située à 7000 km de Paris.



Figure 1. Localisation de la Martinique dans les Antilles

Le climat, de type tropical, est chaud (26° de température moyenne annuelle) et humide (hygrométrie de 80 % en mars-avril et 87% en octobre-novembre). La chaleur due à l'ensoleillement est modérée par l'influence océanique des alizés. On distingue deux saisons :

- la première, le Carême, chaud et sec, s'étend de Décembre à Mai, avec une période de grande sécheresse en février/avril ; l'ensoleillement est alors maximal.

- la seconde, l'Hivernage, caractérisée par des pluies plus fréquentes et intenses, dure de juin à novembre et se caractérise par un risque cyclonique important.

D'une superficie de 1100 km², la Martinique est une petite île qui toutefois présente une variété de paysages :

- La partie Nord est constituée d'un massif montagneux, dominé par les pitons du Carbet (1207m) et la Montagne Pelée (1397m), un volcan toujours en activité. Très accidentée, le Nord de l'île est essentiellement recouvert par des forêts.
- Dans la partie Sud de l'île, le relief est constitué d'une succession de reliefs moyens, les mornes, pouvant atteindre jusqu'à 507 m d'altitude (Montagne du Vauclin). Ces mornes sont des massifs volcaniques anciens.
- Une seule plaine se dégage dans ce relief accidenté. Il s'agit de la plaine du Lamentin, au centre de l'île.

Ces différences de reliefs contribuent à la création de climats locaux et configurent nettement le réseau hydrographique. Aux deux saisons décrites se rajoute l'influence du relief qui joue un rôle déterminant dans la variabilité spatiale des pluies et permet de distinguer une *Martinique humide* (région nord) d'une *Martinique sèche* (région sud). Ainsi, il pleut beaucoup plus sur la Pelée et les Pitons du Carbet que dans le sud (pluviosité jusqu'à cinq fois plus que dans la moitié sud) car les hauts reliefs accrochent les nuages.

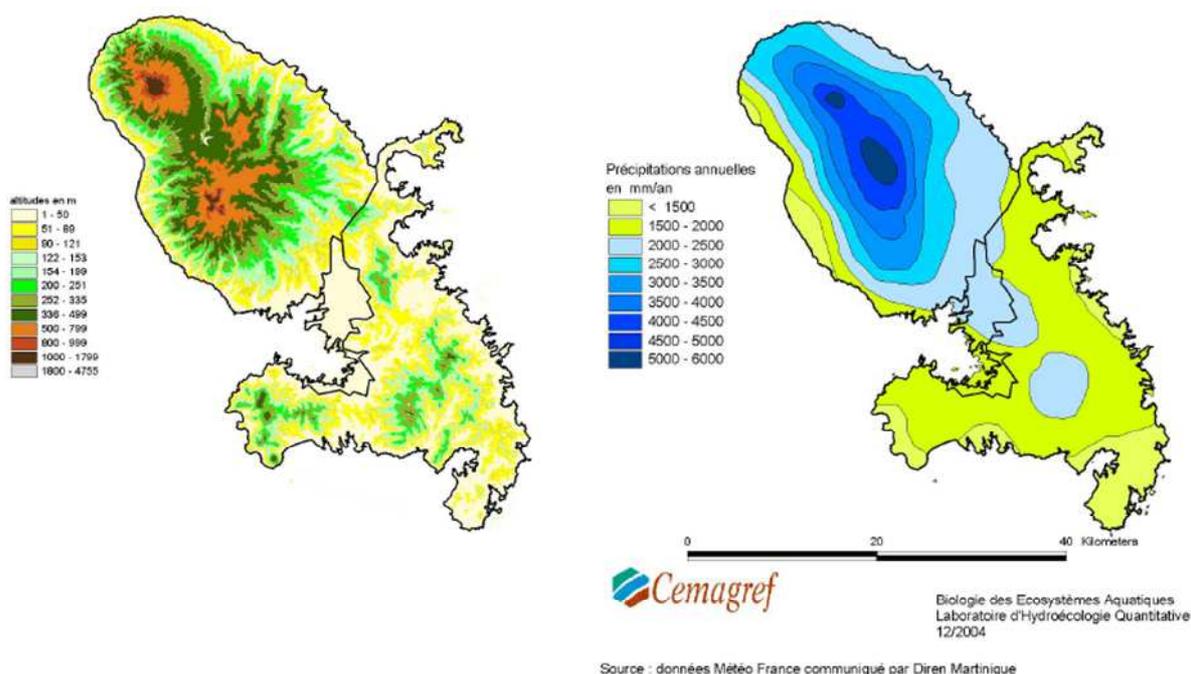


Figure 2. Le relief et la pluviométrie de la Martinique (source : Chandesris et al., 2005).

Les cours d'eau de montagne sont donc 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.

La répartition de la population sur le territoire est très inégale. Cette population se concentre particulièrement au niveau des pôles urbains et industriels dont le plus important est la zone agglomérée de Fort-de-France, Schoelcher et le Lamentin (plaine

du Lamentin). Dans la partie Nord, la population s'est établie essentiellement le long des côtes. Dans le sud, l'habitat rural est très dispersé.

La population martiniquaise était estimée au 1er janvier 2010 à 402.000 habitants. Répartie sur 1.128 km², cette population est très dense : 356 habitants au km², contre 112 au niveau national (<http://www.insee.fr/fr/regions/martinique/default.asp?page=faitsetchiffres/presentation/presentation.htm>).

2.2. Les sites de l'étude

65 sites ont été sélectionnés pour l'étude. 38 de ces sites font partie des réseaux nationaux : 9 sont intégrés au réseau des sites de référence (RSR), 22 au réseau de contrôle de surveillance (RCS), et 7 font partie du réseau de suivi des pesticides. Ces réseaux sont gérés par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) ou par l'Office De l'Eau (ODE) Martinique. Un réseau de sites complémentaires à ces deux stations a été créé afin de répondre aux besoins de l'étude. Ces sites ciblent plus précisément un panel de pollutions ou conditions physico-chimiques particulières, et permettent de disposer de gradients de perturbations. Les perturbations ciblées sont les suivantes :

- pollutions liées aux rejets de stations d'épuration ;
- pollutions domestiques diffuses : pollutions liées aux rejets d'eaux usées dans l'environnement. Les stations sont situées dans des zones densément peuplées. Il faut savoir qu'en Martinique, 50 % des eaux usées ne sont pas collectées par un réseau public de collecte. Elles sont souvent traitées dans un système d'assainissement non collectif plus ou moins performant, ou rejetées directement dans la nature.
- Pollutions par les pesticides : les stations font partie du réseau national « Pesticides ». Elles sont situées dans des zones où l'agriculture est intensive. En Martinique, les principales cultures sont celles de la banane, de la canne à sucre, et les cultures maraîchères.
- pollutions industrielles : stations situées en aval immédiat de rejets industriels (ex. industrie agroalimentaire telles que distillerie ou confiserie, station essence) ;
- conditions physico-chimiques particulières : stations exemptées de pollution anthropique et pouvant compléter alors le réseau de référence existant, et stations présentant naturellement des conditions physico-chimiques particulières (conductivité naturellement très élevée).

L'ensemble des sites est présenté dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. Description générale de l'ensemble des stations de l'étude.

Station	Cours d'eau	Code station	Latitude	Longitude	Réseau
			N	W	
WGS84					
Tunnel Didier	Rivière Case-Navire	CAN	705162	1621467	RSR
Source Pierrot	Rivière du Carbet	CAR	701674	1629625	RSR
Amont Habitation Céron	Rivière de l'Anse Céron	CER	691794	1640424	RSR
Gommier	Rivière du Galion	GAL	711262	1629583	RSR
Trou Diablesse	Grande Rivière	GRD	696324	1644090	RSR
Trace des Jésuites	Rivière du Lorrain	LOR	706115	1631217	RSR
Palourde	Rivière Lézarde	PAL	710050	1627862	RSR
Beauregard	Grande Rivière Pilote	PIL	729013	1606072	RSR
Pont RD5 La Broue	Rivière du Vauclin	VAU	730829	1608795	RSR
RD10 Habitation Céron	Rivière de l'Anse Céron	ACR	691734	1640376	RCS
Pont RD24 St-Marie	Rivière de Bezaudin	BER	714639	1634206	RCS
Fond Baise	Rivière du Carbet	CAF	697164	1627610	RCS
Pr AEP-Vivé Capot	Rivière Capot	CAV	704748	1640542	RCS
Case Navire (bourg Schoelcher)	Rivière Case-Navire	CBN	704663	1617496	RCS
Petit Bourg	Rivière les Coulisses	COP	719588	1609280	RCS
Grand Galion	Rivière du Galion	GAG	719611	1628057	RCS
Amont stade Grand'Rivière	Grande Rivière	GRS	696307	1644431	RCS
Gué de la Désirade	Rivière Lézarde	LEG	715897	1622096	RCS
Pont RN1	Rivière Lézarde	LEP	717040	1617140	RCS
Amont confluence Pirogue	Rivière Petit Nicolas	LOP	705760	1630873	RCS
Séguineau	Rivière du Lorrain	LOS	710261	1639662	RCS
Pont de Chaîne	Rivière Madame	MAC	707832	1616898	RCS
Pont de Montgérald	Rivière Case-Navire	MOM	704666	1617492	RCS

Dormante	Rivière Oman	OMD	719698	1602495		RCS
Aval bourg Rivière Pilote	Grande Rivière Pilote	PIB	725514	1602043		RCS
Amont Bourg Rivière Pilote	Grande Rivière Pilote	PIBam	726657	1603264		RCS
Pont Belle-Ile	Rivière Petite Lézarde	PLB	716103	1623345		RCS
Pocquet Pont RN1	Rivière Pocquet	POR	704179	1643574		RCS
Pont Madeleine	Petite Rivière Pilote	PPP	725757	1603484		RCS
Brasserie Lorraine	Petite Rivière	PRB	718203	1617851		RCS
St-Pierre (ancien pont)	Rivière Roxelane	ROS	696106	1631298		RCS
Absalon	Ravine Absalon	ABS	705065	1623519	RC	Pas d'impact anthropique
Pont de l'Alma	Rivière Blanche	BLA	705302	1626424	RC	Pas d'impact anthropique
Couleuvre	Rivière Anse Couleuvre	COC	691790	1641408	RC	Pas d'impact anthropique
Deux Choux	Rivière du Carbet	CAD	704306	1628907	RC	Pas d'impact anthropique
Quartier Propreté	Rivière Capot	PRO	703700	1631947	RC	Pas d'impact anthropique
Amont confluence Ferré	Rivière Madame	ROX	699491	1634967	RC	Pas d'impact anthropique
Pont Massel	Rivière Massel	MAP	731336	1604255	RC	Géochimie particulière (conductivité naturellement élevée)
Paquemar	Rivière paquemar	PAQ	731919	1606276	RC	Géochimie particulière (conductivité naturellement élevée)
STEP Carbet	Rivière du Carbet	CAS	696010	1626951	RC	Station d'épuration
STEP Vauclin	Rivière Grande Case	GCS	729886	1611734	RC	Station d'épuration
Aval Eloigné GCS	Rivière Grande Case	GCSav	729567	1612435	RC	Station d'épuration
Ravine Fond Henry STEP	Ravine de Fond Henry	FHS	723676	1600530	RC	Station d'épuration
Fond Lahaye STEP	Rivière Fond Lahaye	FLS	703782	1618576	RC	Station d'épuration
La Tracée STEP	Rivière La Tracée	LTS	715694	1627831	RC	Station d'épuration
Desroses	Rivière Desroses	DES	722536	1617050	RC	Pollution domestique diffuse
Volcart (amont OMD)	Rivière Madame	MAV	721492	1603104	RC	Pollution domestique diffuse

Baudelle	Petite Rivière Pilote	PPB	725094	1606189	RC	Pollution domestique diffuse
Fond St Jacques	Rivière Saint-Jacques	SJF	714088	1636705	RC	Pollution domestique diffuse
Pont McIntosh	Rivière Capot	CAM	702511	1634674	RC	Réseau pesticides
Feral	Rivière les Coulisses	COF	720347	1609549	RC	Réseau pesticides
BPB amont	Rivière de Basse-Pointe	BPBam	701893	1642429	RC	Réseau pesticides
Bourg Basse Pointe RN1	Pont Rivière de Basse-Pointe	BPB	702822	1644504	RC	Réseau pesticides
Deux Courants Séraphin	pont Rivière Deux Courants	DCS	725931	1616649	RC	Réseau pesticides
Pont RN1	Rivière Rouge	ROR	706185	1641934	RC	Réseau pesticides
Fontane	Rivière du Simon	SIF	728309	1613162	RC	Réseau pesticides
Décharge Le Poteau	Rivière Capot	CAP	705429	1641927	RC	Pollution industrielle
Abattoir de volailles	Rivière Deux Courants	DCA	725008	1615429	RC	Pollution industrielle
Porcherie SOPODA	Rivière François	FRP	702794	1634988	RC	Pollution industrielle
Siapoc Peintures	Rivière du Galion	GAS	717018	1629620	RC	Pollution industrielle
Longvilliers Station Total	Rivière du Longvilliers	LOT	714566	1618959	RC	Pollution industrielle
Distillerie La Mauny	Petite Rivière Pilote	PPM	725529	1604780	RC	Pollution industrielle
Aval Brasserie Lorraine	Petite Rivière	PRBav	718202	1617729	RC	Pollution industrielle
Distillerie Depaz	Rivière Roxelane	ROD	697460	1631825	RC	Pollution industrielle
Deynel Confiturerie	Rivière la Tracée	TRD	716378	1628171	RC	Pollution industrielle

2.3. Caractérisation de la qualité de l'eau

Au niveau de chaque station et durant chaque campagne de terrain, la température, le pH, la conductivité et l'oxygénation (mg/L et % de saturation) de l'eau ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde multi-paramètres, dans la veine centrale du chenal principal. Des prélèvements d'eau ont aussi été réalisés pour être analysés en laboratoire. 21 paramètres ont été mesurés par le Laboratoire Départemental d'Analyse (LDA) de la Martinique (cas des stations des réseaux RSR et RCS) ou le Laboratoire Santé Environnement Hygiène de Lyon (LSEHL-CARSO) (cas du des stations du réseau complémentaire). La liste des paramètres, ainsi que les méthodes, normes, et limites de quantification apparaissent dans le Tableau 2.

Tableau 2. Méthode d'analyse, norme et limite de quantification pour chacun des paramètres de l'eau mesurés

Paramètre	Unité	Norme	Limite de Quantification (LQ)	Méthode de mesure
DBO ₅	mg/l O ₂	NF EN 1899-2	0.5	Sans dilution
Demande Chimique en Oxygène	mg/l O ₂	NF T90-101	10	Potentiométrie
Carbone organique Total	mg/l C	NF EN 1484	0.2	Oxydation sulfochromique
Ammonium	mg/l NH ₄	NF T 90-015-2	0.05	Spectrophotométrie
Azote Kjeldahl	mg/l N	NF EN 25663	0.5	Méthode après minéralisation au sélénium
Nitrites	mg/l NO ₂ ⁻	NF EN ISO 13395	0.02	Analyse en flux et spectrométrie
Nitrates	mg/l NO ₃ ⁻	NF EN ISO 13395	0.1	Analyse en flux et spectrométrie
Orthophosphates	mg/l PO ₄ ³⁻	NF EN ISO 6878	0.06	Méthode spectrométrique
Phosphore total	mg/l	NF EN ISO 6878	0.06	Méthode spectrométrique
Matières en suspension	mg/l	NF EN 872	2	Gravimétrie après filtration
Turbidité	NTU	NF EN ISO 7027	0.2	Méthode néphélométrique
Calcium	mg/l Ca ²⁺	NF EN ISO 11885	0.5	Chromatographie ionique
Magnésium	mg/l Mg ²⁺	NF EN ISO 11885	0.1	Chromatographie ionique
Sodium	mg/l Na ⁺	NF T90-136 NF EN ISO 11885	1	Chromatographie ionique
Potassium	mg/l K ⁺	NF T90-136 NF EN ISO 11885	0.5	Chromatographie ionique
Chlorures	mg/l Cl ⁻	NF EN ISO 10304-1	0.1	Chromatographie ionique

Sulfates	mg/l SO ₄ ²⁻	NF EN ISO 10304-1	0.2	Chromatographie ionique
Bicarbonates	mg/l HCO ₃ ⁻	NF T90-036	0.5	Potentiométrie
TAC	d°F	NF T90-036	0.1	Potentiométrie
TH	d°F	NF T 90-003	0.5	Méthode titrimétrique à l'EDTA
SiO ₂	mg/l SiO ₂	NF T90-007	1	Méthode colorimétrique

2.4. Données topographiques et occupation des sols sur les bassins versants au niveau des sites d'études

Un Système d'Information Géographique (SIG, ESRI ArcGIS 10) a été utilisé afin de déterminer l'altitude (m) de chacune des stations, sa distance à la source (m), ainsi que la pente moyenne (%) sur la station et le numéro d'ordre (classification de Strahler) de la rivière concernée.

Aussi, l'occupation des sols sur les bassins versants des cours d'eau au niveau de chacune des stations a été déterminée. Trois variables de couverture/terrains ont été extraites pour chaque station :

- le pourcentage de terres recouvertes par la forêt (zones occupées par des forêts de feuillus, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée) ;
- le pourcentage de terres urbanisées (zones industrielles ou commerciales et réseaux de communications; espaces verts artificialisés, non agricoles) ;
- le pourcentage de terres agricoles (terres arables, cultures permanentes et prairies).

Ces pourcentages ont été estimés sur un corridor riverain (zone tampon) de 1000 m de long et de 100 m de large, situé immédiatement en amont de la station (voir Compin et Céréghino (2007) pour les détails méthodologiques et théoriques). Les informations numériques d'occupation des sols ont été extraites de la base de données européenne Corine Land Cover pour la Martinique (Ministère français de l'Ecologie, voir aussi Cruikshank et Tomlison (1996)). Cette base de données est obtenue par photo-interprétation humaine d'images satellites orthorectifiées de précision 20 mètres. Elle fournit des couches cartographiques thématiques SIG, en particulier 24 classes d'occupation du sol avec une cartographie à l'échelle de 1/100 000.

Tableau 3. Données topographiques et occupation des sols sur les bassins versants des sites d'études (données Corine Land Cover 2012)

	Cours d'eau	Code station	Numéro	Distance	Altitude	Pente Moyenne	Surfaces urbanisées	Surfaces agricoles	Forêts	Surfaces en eau
			Ordre	à la source						
			STRAHLER	m	m	%	%	%	%	%
Source Pierrot	Rivière du Carbet	CAR	1	111	353	94.7	0	0	100	0
Paquemar	Rivière paquemar	PAQ	1	417	39	12.4	0	22	78	0
Aval Eloigné GCS	Rivière Grande Case	GCSav	1	1016	20	4.2	0	0	100	0
STEP Vauclin	Rivière Grande Case	GCS	1	422	51	5.6	0	78	22	0
Absalon	Ravine Absalon	ABS	2	1567	362	20.4	0	0	100	0
Deux Choux	Rivière du Carbet	CAD	2	474	573	12.9	0	0	100	0
Ravine Fond Henry STEP	Ravine de Fond Henry	FHS	2	2631	6	3.8	16	0	84	0
Desroses	Rivière Desroses	DES	2	1235	20	4.4	17	35	48	0
Volcart	Rivière Madame Marie	MAV	2	3057	61	5.7	14	41	45	0
Amont confluence Pirogue	Rivière Petit Nicolas	LOP	3	2486	348	13.3	0	0	100	0
Tunnel Didier	Rivière Case-Navire	CAN	3	6687	211	16.5	0	0	100	0
Couleuvre	Rivière Anse Couleuvre	COC	3	2230	19	9.8	0	0	100	0
Pont RN1	Rivière Rouge	ROR	3	6366	18	4.5	6	94	0	0
bourg Basse Pointe Pont RN1	Rivière de Basse-Pointe	BPB	3	9709	20	10.2	36	10	54	0
La Tracée STEP	Rivière La Tracée	LTS	3	676	149	5.9	0	26	74	0
Fond Lahaye STEP	Rivière Fond Lahaye	FLS	3	3882	18	5.2	0	62	38	0
Abattoir de volailles	Rivière Deux Courants	DCA	3	1772	12	1.5	0	85	15	0
Porcherie SOPODA	Rivière François	FRP	3	2005	321	12.3	0	6	94	0
Amont confluence Ferré	Rivière Madame	ROX	3	3026	396	9.6	0	0	100	0
Quartier Propreté	Rivière Capot	PRO	3	2614	359	2.3	0	90	10	0
BPB amont	Rivière de Basse-Pointe	BPBam	3	7290	150	10.0	0	4	96	0

Baudelle	Petite Rivière Pilote	PPB	3	1754	81	4.4	34	15	51	0
RD10 Habitation Céron	Rivière de l'Anse Céron	ACR	4	5251	39	4.9	0	0	100	0
Pont RD24 St-Marie	Rivière de Bezaudin	BER	4	8705	12	4.5	4	96	0	0
Pont Belle-Ile	Rivière Petite Lézarde	PLB	4	9162	56	1.9	0	47	53	0
Brasserie Lorraine	Petite Rivière	PRB	4	9349	10	0.3	0	100	0	0
Pont de Chaîne	Rivière Madame	MAC	4	9690	11	2.0	100	0	0	0
Dormante	Rivière Oman	OMD	4	5825	5	2.3	0	33	67	0
Palourde	Rivière Lézarde	PAL	4	3545	243	4.5	0	48	52	0
Pont de Montgérald	Rivière Case-Navire	MOM	4	12540	7	2.9	41	0	59	0
Case Navire (bourg Schoelcher)	Rivière Case-Navire	CBN	4	12538	7	2.8	41	0	59	0
Amont Habitation Céron	Rivière de l'Anse Céron	CER	4	5144	43	7.0	0	0	100	0
Trace des Jésuites	Rivière du Lorrain	LOR	4	4297	304	10.8	0	0	100	0
Gommier	Rivière du Galion	GAL	4	3205	304	14.0	0	27	73	0
Palourde	Rivière Lézarde	PAL	4	3545	243	4.5	0	48	52	0
Pont RD5 La Broue	Rivière du Vauclin	VAU	4	4438	21	1.5	0	100	0	0
Beauregard	Grande Rivière Pilote	PIL	4	2155	32	6.4	0	80	20	0
Pont de l'Alma	Rivière Blanche	BLA	4	2967	452	15.3	0	0	100	0
Pocquet Pont RN1	Rivière Pocquet	POR	4	9149	25	11.0	0	32	68	0
Deux Courants pont Séraphin	Rivière Deux Courants	DCS	4	4484	5	0.5	27	73	0	0
Fontane	Rivière du Simon	SIF	4	1558	12	1.6	18	80	2	0
Fond St Jacques	Rivière Saint-Jacques	SJF	4	6041	26	2.6	45	55	0	0
Deynel Confiturerie	Rivière la Tracée	TRD	4	2957	97	5.3	0	100	0	0
Longvilliers Station Total	Rivière du Longvilliers	LOT	4	8264	10	3.0	9	91	0	0
Distillerie La Mauny	Petite Rivière Pilote	PPM	4	3765	39	1.8	0	81	19	0
Distillerie Depaz	Rivière Roxelane	ROD	4	7117	63	6.6	0	88	12	0
Pont Massel	Rivière Massel	MAP	4	1526	25	3.4	0	51	49	0
Aval brasserie Lorraine	Petite Rivière	PRBav	4	9515	10	0.6	0	100	0	0

Pont Madeleine	Petite Rivière Pilote	PPP	4	6065	9	4.8	0	65	35	0
Amont stade Grand'Rivière	Grande Rivière	GRS	5	7035	39	7.3	0	0	100	0
St-Pierre (ancien pont)	Rivière Roxelane	ROS	5	8757	5	1.2	42	54	3	0
Pr AEP-Vivé Capot	Rivière Capot	CAV	5	18711	56	5.4	0	0	100	0
Fond Baise	Rivière du Carbet	CAF	5	11822	27	3.4	0	0	96	4
Petit Bourg	Rivière les Coulisses	COP	5	9813	5	0.1	2	98	0	0
Séguineau	Rivière du Lorrain	LOS	5	17070	14	3.4	0	70	30	0
Aval bourg Rivière Pilote	Grande Rivière Pilote	PIB	5	10182	1	1.5	34	54	13	0
Trou Diabliesse	Grande Rivière	GRD	5	6570	49	9.1	0	0	100	0
Pont McIntosh	Rivière Capot	CAM	5	8361	318	2.8	0	81	19	0
STEP Carbet	Rivière du Carbet	CAS	5	13215	4	3.1	10	0	11	79
Siapoc Peintures	Rivière du Galion	GAS	5	15353	50	1.5	24	51	25	0
Décharge Le Poteau	Rivière Capot	CAP	5	20473	25	0.9	0	82	18	0
Feral	Rivière les Coulisses	COF	5	8798	5	0.3	0	100	0	0
Amont Bourg Rivière Pilote	Grande Rivière Pilote	PIBam	5	8085	5	3.1	0	87	13	0
Gué de la Désirade	Rivière Lézarde	LEG	6	20849	29	7.4	0	100	0	0
Pont RN1	Rivière Lézarde	LEP	6	29459	10	0.1	10	11	79	0
Grand Galion	Rivière du Galion	GAG	6	20143	7	1.6	0	100	0	0

2.5. Fréquence des prélèvements

Au total trois campagnes de prélèvements ont été réalisées. Deux campagnes ont été réalisées en saison de carême (basses-eaux) en avril 2010 et avril 2011, et une en saison d'hivernage (hautes eaux), en octobre 2010. Le *Tableau 4* récapitule le suivi des différentes stations sur toute la durée de l'étude. Respectivement 54, 43 et 62 sites ont été prélevés au carême 2010, hivernage 2010 et carême 2011.

Les fortes pluies liées au passage de l'ouragan Thomas non loin de la Martinique le 30 novembre 2010 ont fortement perturbé le déroulement de la campagne de prélèvements d'hivernage 2010, qui était déjà difficile compte tenu de l'abondance des pluies cette année-là (la turbidité de l'eau liée aux fortes pluies empêche l'application de protocole de prélèvement des macroinvertébrés-benthiques). Finalement, onze stations prélevées au carême 2010 n'ont pu être prélevées à l'hivernage 2010. Pour compenser ce manque, la campagne de prélèvement de carême 2012 a été enrichie de 11 stations.

Après avis d'expert (V. Archaimbault, Irstea), trois sites du réseau complémentaire (RC) ont été supprimés de l'étude à cause de leur géomorphologie particulière (il s'agit des sites Deux Choux, Abattoirs de volaille, et La Tracée STEP).

Tableau 4. Suivi des stations sur la durée de l'étude

Station	Code station	Prélèvements (eau + faune)		
		Carême 2010	Hivernage 2010	Carême 2011
Tunnel Didier	CAN	x	x	x
Source Pierrot	CAR	x	x	x
Amont Habitation Céron	CER	x	x	x
Gommier	GAL	x	x	x
Trou Diabliesse	GRD	x	x	x
Trace des Jésuites	LOR	x	x	x
Palourde	PAL	x	x	x
Beauregard	PIL	x	x	x
Pont RD5 La Broue	VAU	x	x	x
RD10 Habitation Céron	ACR	x	x	x
Pont RD24 St-Marie	BER	x		x
Fond Baise	CAF	x	x	x
Pr AEP-Vivé Capot	CAV	x	x	x
Case Navire (bourg Schoelcher)	CBN	x	x	x
Petit Bourg	COP	x	x	x
Grand Galion	GAG	x		x
Amont stade Grand'Rivière	GRS	x	x	x
Gué de la Désirade	LEG	x	x	x
Pont RN1	LEP	x		x
Amont confluence Pirogue	LOP	x	x	x
Séguineau	LOS	x	x	x

Pont de Chaîne	MAC	x		x
Pont de Montgérald	MOM	x	x	x
Dormante	OMD	x	x	x
Aval bourg Rivière Pilote	PIB	x	x	x
Amont Bourg Rivière Pilote	PIBam			x
Pont Belle-Ile	PLB	x	x	x
Pocquet Pont RN1	POR	x	x	x
Pont Madeleine	PPP			x
Brasserie Lorraine	PRB	x		x
St-Pierre (ancien pont)	ROS	x	x	x
Absalon	ABS	x	x	x
Pont de l'Alma	BLA	x	x	x
Couleuvre	COC	x		x
Deux Choux	CAD	x	x	
Quartier Propreté	PRO			x
Amont confluence Ferré	ROX			x
Pont Massel	MAP			x
Paquemar	PAQ	x	x	x
STEP Carbet	CAS	x		x
STEP Vauclin	GCS	x	x	x
Aval Eloigné GCS	GCSav			x
Ravine Fond Henry STEP	FHS	x	x	x
Fond Lahaye STEP	FLS	x	x	x
La Tracée STEP	LTS	x	x	
Desroses	DES	x	x	x
Volcart (amont OMD)	MAV			x
Baudelle	PPB			x
Fond St Jacques	SJF	x	x	x
Pont McIntosh	CAM	x	x	x
Feral	COF			x
BPB amont	BPBam			x
Bourg Basse Pointe Pont RN1	BPB	x	x	x
Deux Courants pont Séraphin	DCS	x	x	x
Pont RN1	ROR	x		x
Fontane	SIF	x	x	x
Décharge Le Poteau	CAP	x		x
Abattoir de volailles	DCA	x	x	
Porcherie SOPODA	FRP	x	x	x
Siapoc Peintures	GAS	x	x	x
Longvilliers Station Total	LOT	x	x	x
Distillerie La Mauny	PPM	x	x	x
Aval Brasserie Lorraine	PRBav			x
Distillerie Depaz	ROD	x		x
Deynel Confiturerie	TRD	x		x

2.6. Techniques de prélèvement des macroinvertébrés benthiques

Le **protocole normalisé XP T 90-233** (AFNOR, 2009) intitulé « Prélèvements des macroinvertébrés aquatiques en rivières peu profondes » a été appliqué sur l'ensemble des stations et campagnes de prélèvements. Ce protocole présente des avantages :

- il repose en partie sur un échantillonnage des principaux substrats présents (i.e. de surface relative supérieure ou égale à 5% de la surface de la station) sur une station au prorata de leurs surfaces de recouvrement relatives, ce qui permet d'obtenir une image globale moyenne du peuplement invertébré de la station ;
- Ce protocole amène aussi à considérer les habitats peu représentés (i.e. de surface relative inférieure à 5% de la surface de la station) qui souvent abritent un ensemble d'espèces spécifique (ex. litières, chevelus racinaires).

Suivant ce protocole, **12 prélèvements** unitaires sont réalisés, et regroupés en trois « bocal » (notés « B1 », « B2 » et « B3 »). Concernant la première campagne de prélèvements, ce regroupement en trois bocal a été réalisé. Les 12 prélèvements n'ont pas été regroupés mais conservés dans 12 bocal distincts lors des deuxième et troisième campagnes afin de pouvoir déterminer certains préférences écologiques des taxons (e.g. vitesse de courant, nature du substrat).

Les 12 prélèvements unitaires sont réalisés à l'aide d'un filet Surber (1/20 m², 0.5 mm de vide de maille). Les surfaces relatives de recouvrement des différents substrats présents sur la station sont estimées visuellement. Ensuite, chaque substrat repéré est classé en substrat « dominant » (i.e. de surface relative supérieure ou égale à 5% de la surface de la station) ou « marginal » (i.e. de surface relative strictement inférieure à 5% de la surface de la station). Une fois le repérage et le classement des substrats réalisés, le plan d'échantillonnage peut être établi pour chaque station :

- Premièrement, les substrats marginaux sont échantillonnés en fonction de l'ordre de priorité préconisé (prélèvements numéros 1 à 4, bocal B1) (*Tableau 5*) ;
- Les substrats dominants sont ensuite échantillonnés en fonction de l'ordre de priorité préconisé (prélèvements numéros 5 à 8, bocal B2) ;
- Pour finir, les substrats dominants sont échantillonnés au prorata de leurs surfaces de recouvrement relatives, tout en prenant en compte (1) les prélèvements déjà réalisés en B1 et B2 et (2) l'ordre de priorité préconisé dans les cas où plus de quatre substrats dominants sont présents simultanément sur la station.

Le plan d'échantillonnage étant établi suivant les substrats en présence sur une station à un instant t, il est propre à chaque station est établi de nouveau à chaque campagne de prélèvement des macroinvertébrés benthiques.

Sur le terrain, les éléments organiques et minéraux grossiers sont éliminés des prélèvements après avoir été soigneusement lavés et examinés. Chaque prélèvement est ensuite fixé sur le terrain avec du formaldéhyde (concentration finale : 4%) pour sa conservation.

Tableau 5. Ordre de priorité de prélèvement des substrats (du plus habitable au moins habitable) et classes de vitesse du courant.

Substrat (Sandre)	SANDRE	Habitabilité	CLASSE VITESSE (cm/s)	SANDRE	VITESSE
Bryophytes (B)	S1	11	$v < 5$	N1	Nulle
Hydrophytes (Hy)	S2	10	$25 > v \geq 5$	N3	Lente
Litières (L)	S3	9	$75 > v \geq 25$	N5	Moyenne
Branchage, racines (R)	S28	8	$150 > v \geq 75$	N4	Rapide
Pierres, galets (PG)	S24	7			
Blocs (B)	S30	6			
Granulats (G)	S9	5			
Hélophytes (He)	S10	4			
Vases (V)	S11	3			
Sables, limons (S)	S25	2			
Algues (A)	S18	1			
Dalles, argiles (D)	S29	0			

2.7. Techniques de tri et détermination

Les prélèvements sont traités au laboratoire. Les individus sont extraits puis déterminés sous loupe binoculaire généralement au niveau du genre ou de l'espèce, excepté pour les diptères et oligochètes qui sont déterminés à un niveau taxonomique supérieur comme la famille ou l'ordre, ou la tribu pour les Chironominae (voir ANNEXE. Tableau 11). Les ouvrages de base pour la détermination des macro-invertébrés des Antilles sont les clefs martiniquaises et guadeloupéennes établies par CESAC (CESAC 2001 et 2002) et la clé Nord Américaine de Merritt & Cummins (Merritt *et al.*, 2008).

3. Développement de l'indice

3.1. Sélection des variables environnementales

Dans le contexte d'acquisition très récente de la connaissance de base sur la taxonomie et l'écologie des espèces de macroinvertébrés présents en Martinique, l'objectif réaliste assigné à cet indice est de réaliser un diagnostic fiable de l'altération physico-chimique des sites, à l'exception des altérations toxiques liées aux micropolluants (pesticides, métaux). Faute de connaissances sur les réponses écologiques des macroinvertébrés Antillais aux micropolluants, cet aspect ne peut être actuellement traité.

Avant de réaliser la typologie, une analyse des corrélations entre variables physico-chimiques sur les données de 2010 a été réalisée, afin d'éliminer les variables redondantes et de simplifier le jeu de données en 14 variables, les plus pertinentes pour qualifier la qualité de l'eau. Ces paramètres sont couramment utilisés pour étudier la qualité physico-chimique des eaux douces.

En plus du pH, de la conductivité et de l'oxygène dissous mesurés in situ, les descripteurs physico-chimiques retenus pour le projet sont donc les suivants :

Turbidité (exprimée en NTU): La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules suspendues qui la troublent. Plus la turbidité est élevée et moins la photosynthèse pourra avoir lieu influençant directement la production primaire de l'écosystème.

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 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.

DBO5 (exprimée en mg d'O₂/L) : C'est l'un des descripteurs primordiaux pour marquer les altérations anthropiques, et notamment les rejets de matière organique fortement biodisponibles et minéralisables. La déplétion de la saturation en O₂ provoquée par de fortes teneurs en DBO5 est fortement dommageable à la plupart des maillons biologiques des hydrosystèmes.

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 hydrosystèmes. Entre

autres maillons biologiques, les diatomées répondent nettement à cette altération. Ce descripteur a été pris en compte dans la matrice de données.

Bicarbonates (exprimés en mg (HCO₃)-/L) : Cette variable représentera les sites aux eaux carbonatées riches en hydrogénocarbonates (H₂CO₃- et (HCO₃)-

Chlorures (exprimés en mg Cl-/L) : Ils constituent le meilleur descripteur des influences halines naturelles trouvées à proximité du littoral. Ils peuvent aussi être localement présents dans des rejets d'origine anthropique (rejets d'IAA, d'industries chimiques...)

Sulfates (exprimés en mg (SO₄)-/L) : Ils peuvent être présents de façon naturelle dans les eaux (influence géologique du volcanisme). 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.

Nitrate (exprimé en mg (NO₃)-/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'ammonitrate, 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 stressseurs (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.

Silice (exprimé en mg/L SiO₂) : La silice est abondante dans les roches volcaniques. De plus, la température élevée, l'intensité des pluies et les écoulements turbulents caractéristiques du contexte guadeloupéen favorisent l'altération des roches affleurantes et enrichissent naturellement les cours d'eau en silicate dissous

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 lessivielles.

Potassium (exprimé en mg/L K+) : Les concentrations naturelles en potassium sont très faibles dans les rivières ou les fleuves (<5 mg/l) du fait de la faible solubilité des ions potassium présents dans les roches. Des augmentations discrètes des teneurs en potassium ont été observées avec l'usage d'engrais.

Aussi, **la qualité de l'habitat** au sens large est qualifié avec les paramètres du land-cover (3 variables définissant l'utilisation des terres en amont de la station de prélèvement) (§2.4) et avec les observations de terrain à travers le plan d'échantillonnage des macroinvertébrés (9 variables décrivant la nature et/ou la taille des substrats et qui renvoient notamment à l'hydrologie et à la position d'une station sur le gradient longitudinal amont-aval d'une rivière ; § 2.6).

3.2. Typologie des stations

La typologie (classification) des stations permet de classer des sites en regroupements homogènes du point de vue de certaines caractéristiques naturelles. Elle est l'**élément essentiel permettant de définir les conditions de référence et le bon état écologique**, qui sont établis par « type de milieu » (regroupement de sites présentant des caractéristiques communes). Elle permet aussi de tenir compte de la variabilité environnementale des communautés et de s'en affranchir dans une certaine mesure.

Une typologie peut être établie suivant deux approches différentes :

- **Classification *a priori*** : la classification des sites est établie à partir des connaissances et d'hypothèses sur les facteurs de contrôle de la biodiversité des communautés (les facteurs de contrôle étant d'une manière générale l'habitat physique à l'échelle locale, et à plus large échelle l'hydrologie, la géomorphologie des cours d'eau, la végétation riveraine, la géologie, le relief et le climat). La classification *a priori* regroupe les sites en unités homogènes appelées « hydro-écorégions » (HER) sur la base des facteurs géologiques, climatiques, et topographiques.
- **Classification *a posteriori*** : la classification des sites est obtenue par des méthodes d'analyses multivariées de la distribution de la faune.

Une classification *a priori* a été établie à l'échelle nationale (métropole et DOM) par le Cemagref en 2005 (Chanderis *et al.*, 2005). La figure suivante présente la typologie établie pour la Martinique :

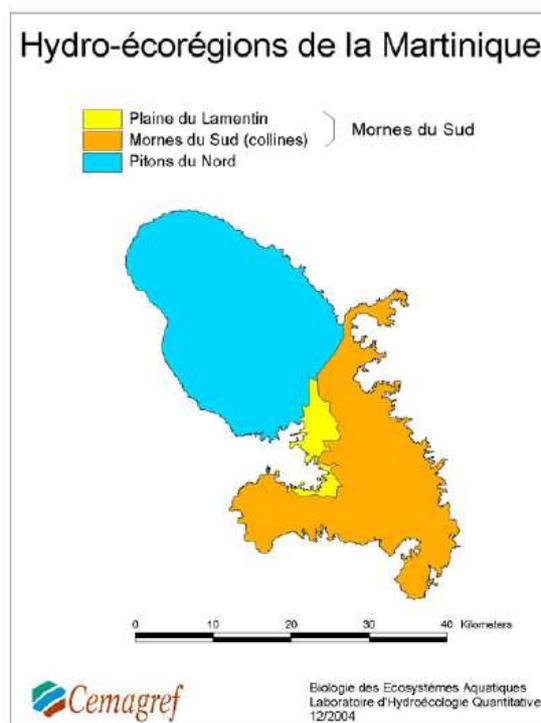


Figure 3. Carte des hydro-écorégions de la Martinique.

Cette typologie distingue deux grandes HER en Martinique : « les Pitons du Nord » et « les Mornes du Sud », cette dernière pouvant être subdivisée en deux HER de niveau 2 en isolant la « plaine du Lamentin » sur la base des caractéristiques géomorphologiques. Il est précisé dans le rapport du Cemagref que « dans la région des Pitons du Nord, les cours d'eau présentent probablement des conditions de référence biologiques différentes entre des secteurs amont et aval, mais **une confirmation sur la base de données hydrobiologiques reste nécessaire** » (Chandesris *et al.*, 2005).

Afin de réaliser une typologie plus fine des stations, notamment de la partie Nord de la Martinique, une typologie *a posteriori* a été réalisée à partir des communautés de macroinvertébrés. Les données physico-chimiques, géomorphologiques et les données relatives à l'occupation du sol ont été associées aux données biologiques afin de dégager les profils de distribution des macroinvertébrés en fonction des conditions environnementales (Analyse multivariée : Analyse Canonique des Correspondances (CCA)). Au commencement de cette étude, nous ignorions l'importance de la géomorphologie sur la distribution des invertébrés, et dans quelle mesure les perturbations anthropiques surpassent les facteurs géomorphologiques dans la distribution des macroinvertébrés à l'échelle locale (site) et régionale (île). Afin de déterminer l'importance relative des variables géomorphologiques et des perturbations anthropiques sur la distribution des espèces, une partition de variance a été réalisée.

Cette typologie a fait l'objet d'une publication scientifique (Bernadet *et al.*, *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, sous presse). La méthode et les résultats sont présentés et discutés dans les chapitres suivants.

3.2.1. Matériel et méthode

La typologie a été réalisée sur les données de carême 2010.

Sites d'étude

51 sites distribués sur 45 rivières ont été considérés, parmi lesquels des sites non-impactés (réseau de référence) et des sites présentant un panel de perturbations d'origine humaine (stations des réseaux RCS et complémentaire soumises à des rejets domestiques, industriels, de station d'épuration, et/ou des pollutions agricoles). Les sites présentant des valeurs extrêmes pour certains paramètres chimiques, soit Deux Courants Pont séraphin, Fond Henry STEP et Rivière Pilote Bourg, ont été écartés de l'analyse.

Données faunistiques

Lors d'une analyse multivariée de type CCA, les taxons rares contribuent fortement aux distorsions du nuage de points. Les taxons présents sur moins de 5% des stations ont été écartés de l'analyse afin de réduire les distorsions. 84 taxons ont été retenus (voir ANNEXE. Tableau 11)

Variables environnementales

Les 14 paramètres chimiques sélectionnés, les trois variables relatives à l'occupation des sols et les pourcentages de recouvrement des substrats sur les stations ont été pris en compte (§ 3.1).

Analyse des données

Une analyse multivariée a été réalisée pour examiner les relations entre les 26 variables environnementales, les sites d'échantillonnage et les données d'abondance pour les 84 taxa d'invertébrés.

Les données d'abondances ont été transformées ($\log(n + 1)$) avant l'analyse. Une analyse des correspondances initiale (DCA) effectuée sous CANOCO v4.5 (Ter Braak et Šmilauer, 1998) a mis en évidence un turnover d'espèces élevé (gradient = 2,629) ; dans ce cas il est recommandé d'utiliser une **Analyse Canonique des Correspondances (CCA)** pour examiner les relations des invertébrés avec les sites d'échantillonnage et les variables environnementales (LEPS et Šmilauer, 2010). La méthode de sélection « forward » (méthode d'intégration progressive des variables à un modèle) a été utilisée pour identifier les variables environnementales expliquant de façon significative ($p < 0.05$) la variance des espèces. Un test de permutation de Monte-Carlo (500 permutations) a été utilisé afin de tester la significativité des variables explicatives. Enfin, un algorithme de Ward a été appliqué aux scores des sites d'échantillonnage sur les axes du CCA, afin de regrouper les stations du nuage de point en groupes homogènes. Pour faciliter l'interprétation, ces groupes (« clusters ») ont été figurés sur une carte géographique de l'île de localisation des stations (Figure 4).

Afin de préciser l'influence relative des contrôles géomorphologiques et des perturbations d'origine anthropique sur la structure des communautés d'invertébrés, la **partition de variance** a été appliquée comme suit:

- (1) CCA partielle de la matrice faunistique avec pour variables les paramètres géomorphologiques significatifs (altitude, pourcentage de blocs, pourcentage de dalle rocheuse, la conductivité, cf. les résultats) et en covariables les paramètres anthropiques significatifs (pourcentage de terres agricoles, matières en suspension, l'oxygène dissous, taux d'ammonium) ;
- (2) CCA partielle de la matrice faunistique avec pour variables les paramètres anthropiques significatifs et en covariables les paramètres géomorphologiques significatifs ;
- (3) CCA de la matrice faunistique avec pour variables chaque groupe de variables (un groupe à la fois, sans covariables).

Nous avons finalement estimé les effets partiels de la géomorphologie et des perturbations anthropiques comme la somme des valeurs propres des axes canoniques dans les analyses (1) et (2), respectivement. L'effet partagé par les deux groupes de variables (fraction de la variance commune) a été obtenu en soustrayant la somme de la variabilité de (1) et (2) à la variabilité expliquée en (3).

Cette partition de variance a été réalisée sur l'ensemble du jeu de données (51 stations), puis pour chacun des clusters.

Enfin, afin de fournir une indication supplémentaire de réponses des communautés d'invertébrés, les distributions de la richesse des espèces, la régularité de la communauté (indice de Simpson) et l'entropie (indice de Shannon) ont été comparés entre les clusters (tests de Kruskal-Wallis).

Des gradients naturels (ex. altitude, taille du substrat) devraient délimiter des sous-régions écologiques qui englobent chacune des assemblages d'espèces qui lui sont spécifiques. Aussi, la dégradation de l'habitat par les activités humaines devrait générer des discontinuités dans ses gradients naturels, au travers de la perte d'espèce ou de changement de dominance des espèces dans les communautés touchées.

3.2.2. Résultats

Classification des sites

Les axes 1 et 2 de la CCA expliquent 19,9% de la variance totale en espèces et 29,8% de la relation espèces-environnement. Les valeurs propres pour les axes 1 et 2 sont respectivement de 0,31 et 0,22, respectivement.

8 variables environnementales ont une influence significative sur la distribution des espèces : l'altitude, les terres agricoles, l'oxygénation de l'eau ($p=0.002$), les matières en suspension et l'ammonium ($p=0.018$), le pourcentage de blocs sur les stations et la conductivité ($p=0.022$), le pourcentage de dalle sur les stations ($p=0.024$).

L'algorithme de Ward a permis de dégager 3 groupes de stations (« clusters »). Représentés sur une carte (*Figure 4*), les sites des clusters 1, 2 et 3 délimitent 3 grandes sous-régions géographiques : une zone nord de haute altitude, une zone nord de moyenne et basse altitudes, et une zone sud, respectivement.

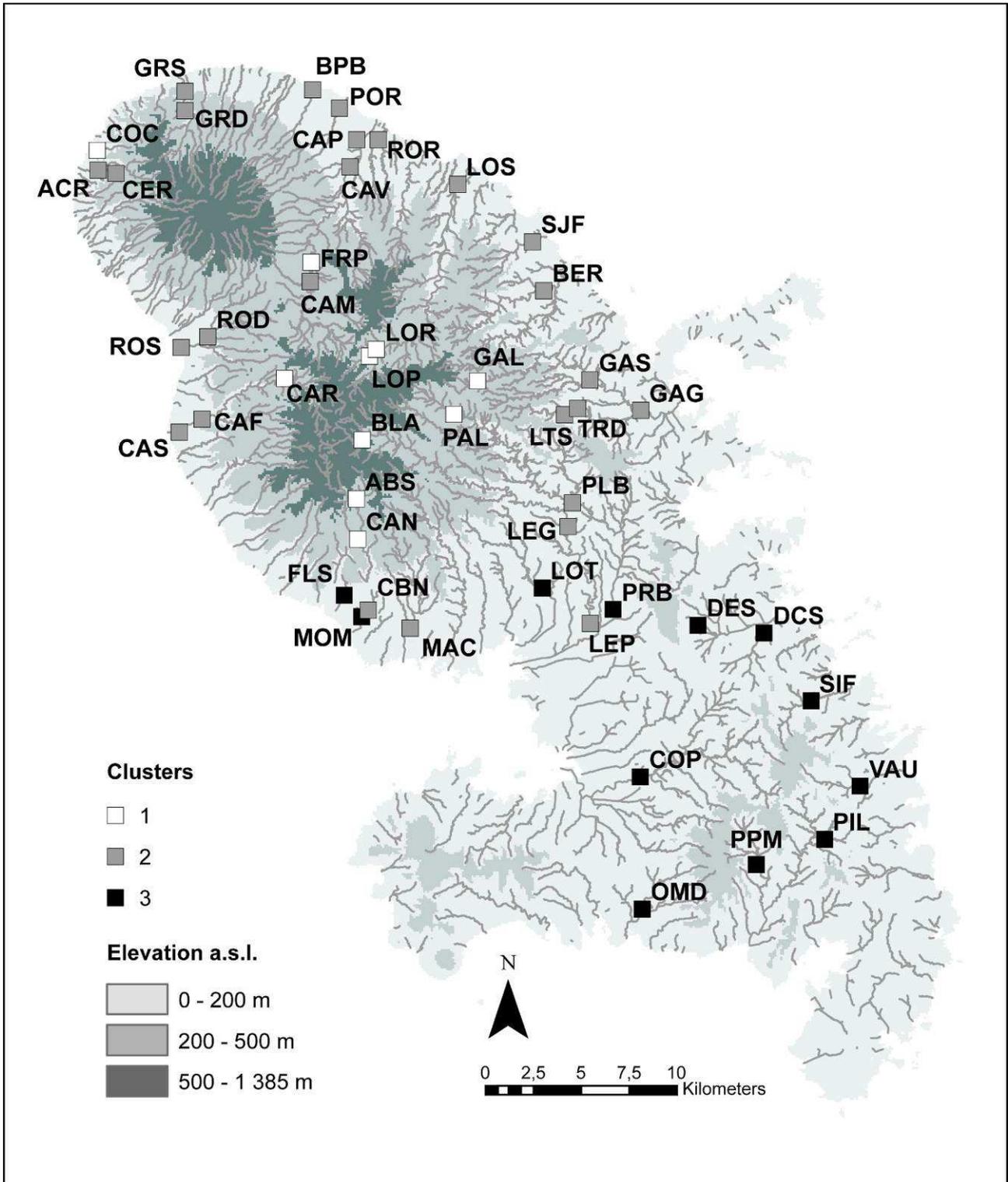


Figure 4. Carte de localisation des stations et appartenance aux clusters (clusters définis par la CCA et l'algorithme de Ward).

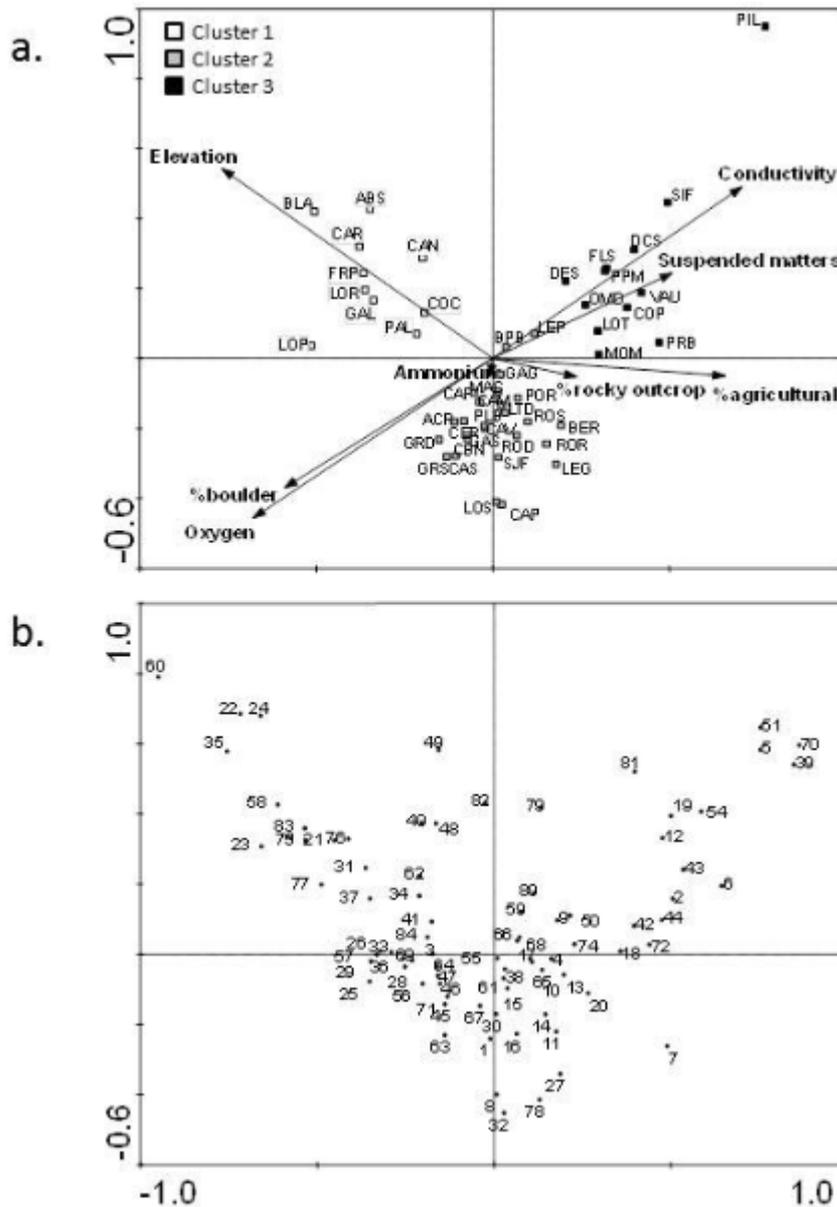


Figure 5. Résultats de l'Analyse canonique des Correspondances (CCA). (a) Les sites d'échantillonnage et les variables environnementales. Les variables environnementales sont représentées comme des vecteurs dont la direction montre les gradients, et la longueur de la flèche représente les forces des variables dans l'espace d'ordination. Afin d'alléger la figure, seules les variables expliquant de manière significative ($p < 0,05$) la proportion de la variance espèces sont représentées. Différents marqueurs sont utilisés pour affecter les sites aux clusters 1-3. (b) la distribution des taxa d'invertébrés dans l'espace d'ordination. Les invertébrés sont identifiés par des numéros, les mêmes que dans le tableau ANNEXE. .

Les sites du **cluster 1** sont entourés de forêts et reculés des zones anthropisées. Le cluster 1 comprend la plus grande partie du réseau de référence, mais aussi des sites non-impactés du réseau de complémentaire : Pont de l'Alma (BLA, rivière Blanche), Absalon (ABS, rivière d'Absalon) et la station Porcherie Sopoda (FRP, rivière du François) qui a été intégrée au réseau complémentaire car placée en aval d'un élevage de porcs mais qui, d'après les résultats physico-chimiques et nos observations de terrain, reste peu/pas impactée en période carême lorsque les prélèvements sont réalisés.

A l'inverse, les sites des **clusters 2 et 3** sont localisés dans des zones agricoles et/ou urbanisées (la majeure partie de la population est concentrée sur les côtes de la partie Nord et dans la partie sud). Tout comme les sites du cluster 1, les sites du **cluster 2** sont caractérisés par des eaux oxygénées et la présence de substrat minéral grossier (blocs). Par contre, leurs eaux sont davantage chargées en ammonium.

Avec leurs fortes concentrations en matières en suspensions, les sites du **cluster 3** sont typiques des rivières traversant les zones cultivées. Ils présentent également des conductivités élevées comparé aux sites de la zone nord. L'impact anthropique peut expliquer ces différences de conductivités, mais aussi et surtout la nature du sol (. En particulier, la conductivité est naturellement très élevée sur les stations Beauregard (PIL, rivière Pilote) et Paquemar (PAQ, rivière Paquemar) (>1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et >2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivement).

Finalement les clusters regroupent globalement des sites géographiquement adjacents. Quelques **discontinuités** sont à noter. Le site Couleuvre (COC, Rivière de l'Anse Couleuvre) qui fait partie du réseau complémentaire est situé à une faible altitude et entouré de sites du cluster 2. Ce site a toutefois été assigné au cluster 1 par l'analyse et peut donc être considéré comme un site de référence. A l'inverse, le site Pont de McIntosh (CAM, rivière Capot) situé en aval de cultures est assigné au cluster 2 malgré sa position géographique en zone nord et en altitude. Aussi, les sites STEP de Fond Lahaye (FLS, rivière Fond Lahaye) et Pont de Montgérald (MOM, rivière Montgérald) qui sont situés respectivement dans les villes de Schoelcher et Fort-de-France sont assignés au cluster 3 (sud), bien qu'entourés de sites du cluster 2. Ces trois sites sont soumis à d'importantes pressions anthropiques qui appauvrissent et/ou modifient fortement la composition des peuplements, ce qui crée ces discontinuités.

Partition de variance

Parmi les 8 variables expliquant significativement la répartition de la faune invertébrée, quatre sont associées à des pressions anthropiques (oxygénation, taux d'ammonium et matières en suspension, %de terres agricoles). Les autres (altitude, % de blocs, % de dalle rocheuse ou argileuse et conductivité) sont associées à la géomorphologie des rivières.

Les résultats des partitions de variance sur l'ensemble du jeu de données et sur chaque cluster pris séparément sont présentés dans le tableau suivant.

Sur l'ensemble du jeu de données, la proportion de variance expliquée par les facteurs anthropiques purs et les facteurs géomorphologiques purs est de 20.0% et 28.7%, respectivement. Ce résultat souligne l'importance des facteurs géomorphologiques dans la définition des communautés macroinvertébrés. Les effets partagés par les deux types de facteurs est de 11.6%, et la part de variance inexpliquée sur l'ensemble du jeu de données est assez élevée (39.7%).

Lorsque la partition de variance est appliquée à chaque cluster séparément, la part de variance inexpliquée des communautés est beaucoup plus faible pour les clusters 1 et 3 (<12.8%). Par contre, elle reste élevée pour le cluster 2, ce qui signifie qu'un ou plusieurs facteurs importants déterminants la composition des communautés des sites du cluster 2 n'ont pas été pris en compte dans l'analyse.

Aussi, la partition de variance appliquée au cluster 1 indique que la variation expliquée par les variables géomorphologiques pure est supérieure à celle expliquée par les variables anthropiques pures : **les facteurs géomorphologiques sont les principaux déterminants de la composition des communautés du cluster 1**. Concernant les clusters 2 et 3 qui se situent dans les zones les plus peuplées, les facteurs anthropiques et géomorphologiques interviennent dans des proportions identiques. Il sera alors difficile de dégager les effets des pressions anthropiques des effets liés à la géomorphologie.

Tableau 6. Analyses de partition de variance sur le jeu de données entier (tous les sites) et pour chacun des clusters pris séparément.

Variance expliquée (%)	Ensemble des sites	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Variation géomorphologique pure	28.7	56.6	18.1	43.2
Variation anthropique pure	20	31.7	17.9	41.1
Effets partagés	11.6	2.2	2.2	3.2
Variance inexpliquée	39.7	9.5	61.8	12.8

Structure et composition des communautés invertébrées

La **Figure 6** présente la proportion relative des principaux groupes de macroinvertébrés benthiques (mollusques, insectes, crustacés, autres) pour les différents clusters.

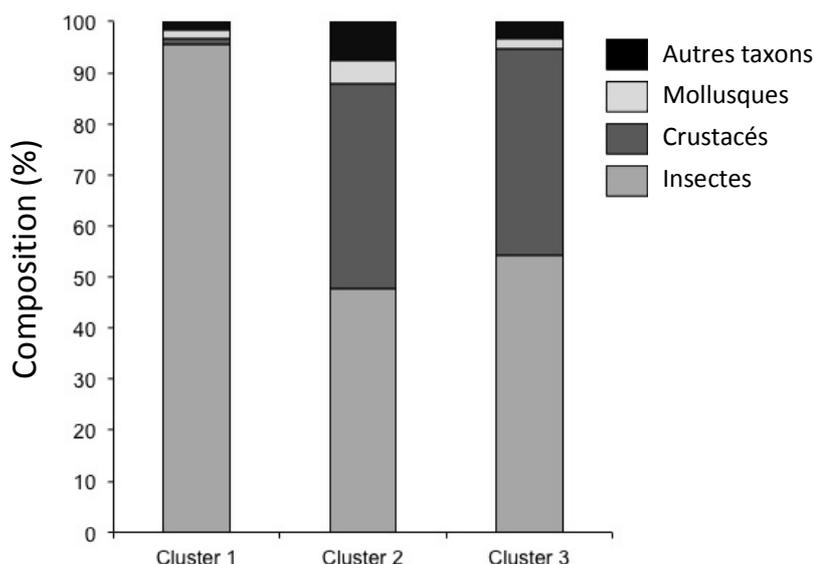


Figure 6. Abondances relative (%) des principaux groupes de macroinvertébrés benthiques dans les clusters.

Les communautés du cluster 1 sont principalement composées d'insectes (au minimum 90% du peuplement), en particulier des Trichoptères (principalement des Hydropsychidae), des Epheméroptères (Baetidae et Leptohyphidae) et des Coléoptères (Elmidae).

Les sites du cluster 2 aussi sont diversifiés en ces groupes d'insectes. Ils présentent également une grande diversité en Oligochètes, Mollusques (Thiaridae, Physidae), Crustacés (Atyidae et Palaemonidae), Trichoptères (Philopotamidae et Hydroptilidae) et Diptères (Chironomidae).

Les sites du cluster 3, qui sont localisés dans la partie sud de l'île, sont caractérisés par de fortes densités de Mollusques (Thiaridae, Planorbidae, Hydrobiidae), crustacés (Atyidae, Palaemonidae), Epheméroptères (Baetidae et Caenidae). Les Trichoptères (Helicopsychidae,

Hydroptilidae, Philopotamidae et Hydroptilidae) et Coléoptères (Psephenidae) sont présents, mais reste rares.

Le tableau en **ANNEXE**. présente les densités moyennes (+/- écart-type) des taxons considérés dans l'analyse pour chacun des clusters 1-3. Certains taxons sont spécifiques d'un cluster donné. Par exemple, les diptères Blephariceridae qui sont typiques des torrents, ne se trouvaient que dans les sites du groupe 1. Le trichoptère Smicridea sp. (Trichoptera Hydropsychidae), un taxon commun dans nos relevés, est présent à des densités hautes à modérées les clusters 1 et 2, mais est quasiment absent dans les rivières du cluster 3. Bien que certains taxons soient spécifiques d'un groupe donné, ces taxons sont présents généralement en abondance très faibles (<1 individu par m²). En réalité, la plupart des taxons sont **ubiquistes** : sur 84 taxons, 24 et 42 taxons sont présents dans deux et trois clusters, respectivement. Malgré cette tendance générale d'ubiquité, la **richesse est faible** sur les stations (9 à 38 taxons) comparé à la métropole.

Comparaison entre clusters des indices de diversité des communautés

Les indices de Shannon, Simpson et la richesse taxonomique sont comparés entre les clusters dans la *Figure 7*.

Le cluster 1 est le cluster qui présente la plus faible variabilité de diversité intra-cluster. Les clusters 2 et 3 ne présentent aucune différence significative pour les indicateurs de diversité considérés. Cependant, la diversité diminue significativement des clusters 1 à 2 et 1 à 3 (test de Kruskal-Wallis, $p < 0.05$).

Dans le nord de l'île, les cours d'eau de montagne, situés le long des pentes du volcan, représentent des environnements dynamiques qui sont physiquement plus hétérogènes que ceux des clusters 2 et 3 (compétence de la rivière supérieure générée par la combinaison de la pente avec d'autres variables telles que la profondeur de l'eau, la vitesse du courant et l'hétérogénéité de substrat supérieures). Cette plus grande hétérogénéité favorise une plus grande diversité des invertébrés benthiques dans le cluster 1.

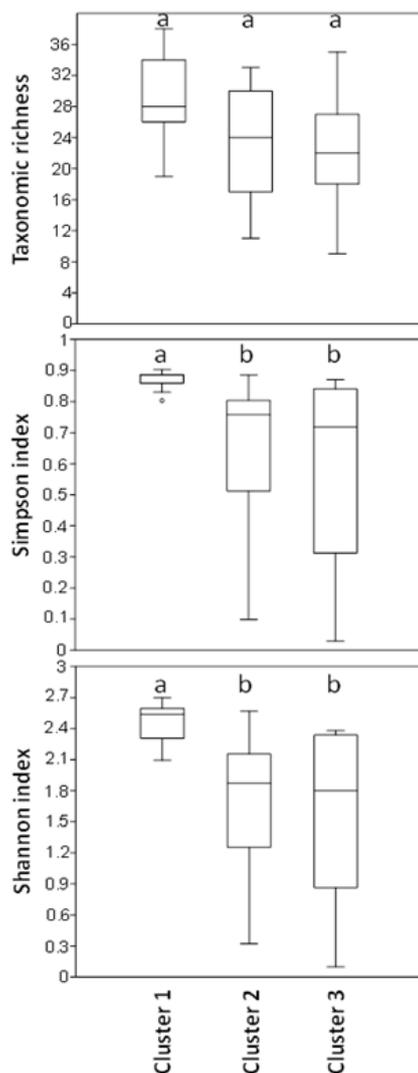


Figure 7. Distributions des métriques de diversité (richesse taxonomique, régularité de Simpson, entropie de Shannon) pour les trois clusters issus de la CCA et de l'algorithme de Ward, avec une comparaison de paires de pôles. Les lettres minuscules au-dessus des boîtes indiquent des différences significatives (tests de Kruskal-Wallis ; $p < 0,05$).

3.2.3. Résumé et conclusions de la typologie

Trois groupes de stations ont été mis en évidence :

- un cluster nord de haute altitude regroupant des stations situées dans des zones boisées (land cover) et aux eaux bien oxygénées (cluster 1) ;
- un cluster nord de moyenne à basse altitude regroupant de stations dont les eaux sont relativement bien oxygénées mais impactées par des taux d'ammonium élevés et/ou la présence de terres cultivées.
- un cluster sud de stations impactées, notamment par la présence de terres cultivées, présentant des taux de matières en suspension et une conductivité élevée.

Aucune discontinuité majeure n'a été trouvée puisque le regroupement des stations est surtout géographique.

La CCA et les partitions de variances ont révélé que les facteurs géomorphologiques sont d'importants déterminants de la composition et de la diversité des communautés de macroinvertébrés benthiques, particulièrement dans le cluster 1. La couverture végétale joue aussi un rôle clé dans la délimitation des sous-régions écologiques pour la faune d'eau douce.

Malgré la petite surface de la Martinique (1080 km²), les communautés d'invertébrés montrent de nets changements de composition et de traits biologiques (par exemple, les insectes, les crustacés et les mollusques) dans l'espace : la richesse taxonomique diminue de l'amont vers l'aval des cours d'eau, et la composition des communautés change du nord au sud de l'île.

En milieu insulaire, les assemblages d'espèces sont distincts de ceux observés en milieu continental. Les communautés sont la résultante des facteurs biogéographiques, historiques et géomorphologiques (Boulton *et al.*, 2008). Dans les îles, notamment caribéennes, les communautés de macroinvertébrés sont naturellement pauvres en espèces (Smith *et al.*, 2003 ; Hughes, 2005 ; Gonçalves *et al.*, 2008), et en Martinique comme en Guadeloupe, la faune est globalement très ubiquiste. Notamment, les taxons les plus abondants sont ubiquistes. Dans ce contexte, il est difficile d'identifier des espèces polluo-sensibles et de baser un indice sur des métriques qualitatives liées à la présence/absence de ces espèces. **Nous construirons alors un indice sur une approche plutôt quantitative des peuplements.**

3.3. Stations LIRRs vs. stations IRRs

Notre typologie a révélé trois sous-ensembles de stations (clusters) homogènes du point de vue de la composition et de la structure de leurs communautés faunistiques. Dans chacun de ces clusters, nous devons identifier des stations pas/peu perturbées, dites de « moindre impact » ou « **LIRR** » (**Least Impaired River Reaches**). Les LIRRs serviront à déterminer les valeurs de référence moyennes pour chacune des métriques calculées. *In fine*, la distribution des scores des stations LIRR servira aussi à déterminer les classes de qualité pour l'indice final. Toutes les stations impactées qui ne sont pas des LIRR sont appelées « **IRRs** » (**Impaired River Reaches**).

3.3.1. Choix des stations LIRRs

Les stations choisies comme LIRRs sont listées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7. Stations LIRRs pour chacun des trois clusters

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Tunnel Didier (CAN)	Propreté (PRO)	Anse Céron (ACR)
Palourde Lézarde (PAL)	Trou Diabliesse (GRD)	Fond Baise (CAF)
Gommier (GAL)	Habitation Céron (CER)	Case Navire Bourg Schoelcher (CBN)
Trace des Jésuites (LOR)	Amont confluence Ferré (ROX)	Stade de Grand' Rivière (GRS)
Source Pierrot (CAR)	Amont Basse Pointe Bourg (BPBam)	
Amont Confluence Pirogue (LOP)		
Pont de l'Alma (BLA)		
Couleuvre (COC)		

Cluster 1

Pour le cluster 1, ont été considérées comme LIRR toutes les stations qui font partie du réseau de référence, mais aussi les stations Couleuvre (COC, rivière de l'Anse Couleuvre) et Pont de l'Alma (BLA, rivière Blanche) qui présentent de très bons résultats pour les paramètres physico-chimiques mesurés et qui, dans une première version de l'indice, présentaient de très bons résultats. Les autres stations du cluster 1 faisant partie du réseau complémentaire ont été considérées comme IRR, à cause d'incertitudes sur la qualité de leur eau :

- la station Absalon (ABS, rivière d'Absalon), parce qu'elle serait *a priori* ferrugineuse, mais nous ne disposons d'aucune mesure de teneur en fer pour cette station. Des sources sont effectivement présentes sur les rives de la rivière, mais la dilution dans le cours d'eau est importante. Aussi, cette station a été classée IRR car énormément de macro-déchets (ferraille) sont présents sur cette station.
- la station Porcherie SOPODA (FRP, rivière du François), parce qu'elle est située en aval d'un élevage de porc. L'impact est assez faible (absence d'algues) mais le taux de nitrates (1,6 à 2 mg/l de nitrates) y est plus élevée que sur les stations du réseau de référence.

Cluster 2

Les stations du cluster 2 faisant partie du réseau de référence ont été considérées comme LIRRs. Il s'agit des stations Trou Diabliesse (GRD, Grande Rivière) et Habitation Céron (CER, rivière de l'Anse Céron). Les stations du réseau complémentaire situées en amont des rivières Capot (station Propreté, PRO, rivière Propreté), Roxelane (ROX, Amont Confluence Ferré) et rivière de Basse Pointe (BPBam, Amont Basse Pointe Bourg) ont aussi été considérées comme LIRRs.

Cluster 3

Notons qu'aucune discontinuité n'a été mise en évidence dans la partie sud de l'île dans notre typologie. En particulier, aucun site de référence ou de moindre impact ne s'est détaché dans l'analyse pour cette partie de l'île. A ce stade, nous avons alors envisagé d'utiliser comme site de référence pour la partie Sud :

- soit les sites du réseau de référence de la DEAL (La Broue, Beauregard) et les sites de moindre impact du cluster 3 (Station Total Longvilliers et Pont Madeleine, au regard des résultats physico-chimiques) ;
- soit des sites peu impactés et de basse altitude du cluster 2.

Une première version de l'indice a été créée à partir de la première proposition. Les sites utilisés en LIRR pour le cluster 3 étant déjà très impactés, les écarts à la référence des stations impactées du cluster 3 étaient parfois faibles, et surtout inférieurs aux écarts observés entre les stations impactées du cluster 2 et les stations de référence du cluster 2. Dans ce cas de figure, les stations impactées du cluster 3 pouvaient présenter de bons (voire très bons) résultats qui n'étaient pas cohérents, ni avec leurs mauvais résultats physico-chimiques, ni avec les scores des autres stations. *Par exemple, la station Pont de Montgérald (MOM, rivière Montgérald) était classée en « bleu, très bon état biologique ».*

Finalement, des sites peu impactés et de faible altitude du cluster 2 ont donc été considérés comme LIRR pour le cluster 3, à savoir les stations Fond Baise (CAF, rivière du Carbet), Stade de Grand'Rivière (GRS, Grande Rivière), Anse Céron (ACR, rivière de l'Anse Céron) et Case Navire Bourg Schoelcher (CBN, rivière de Case Navire).

3.3.2. Qualité de l'eau et qualité de l'habitat des stations LIRRs vs. IRRs

Pour obtenir un indice discriminant et fonctionnel se basant sur des calculs d'écarts à la référence, la qualité de l'eau doit être effectivement meilleure en conditions de référence par rapport aux conditions impactées.

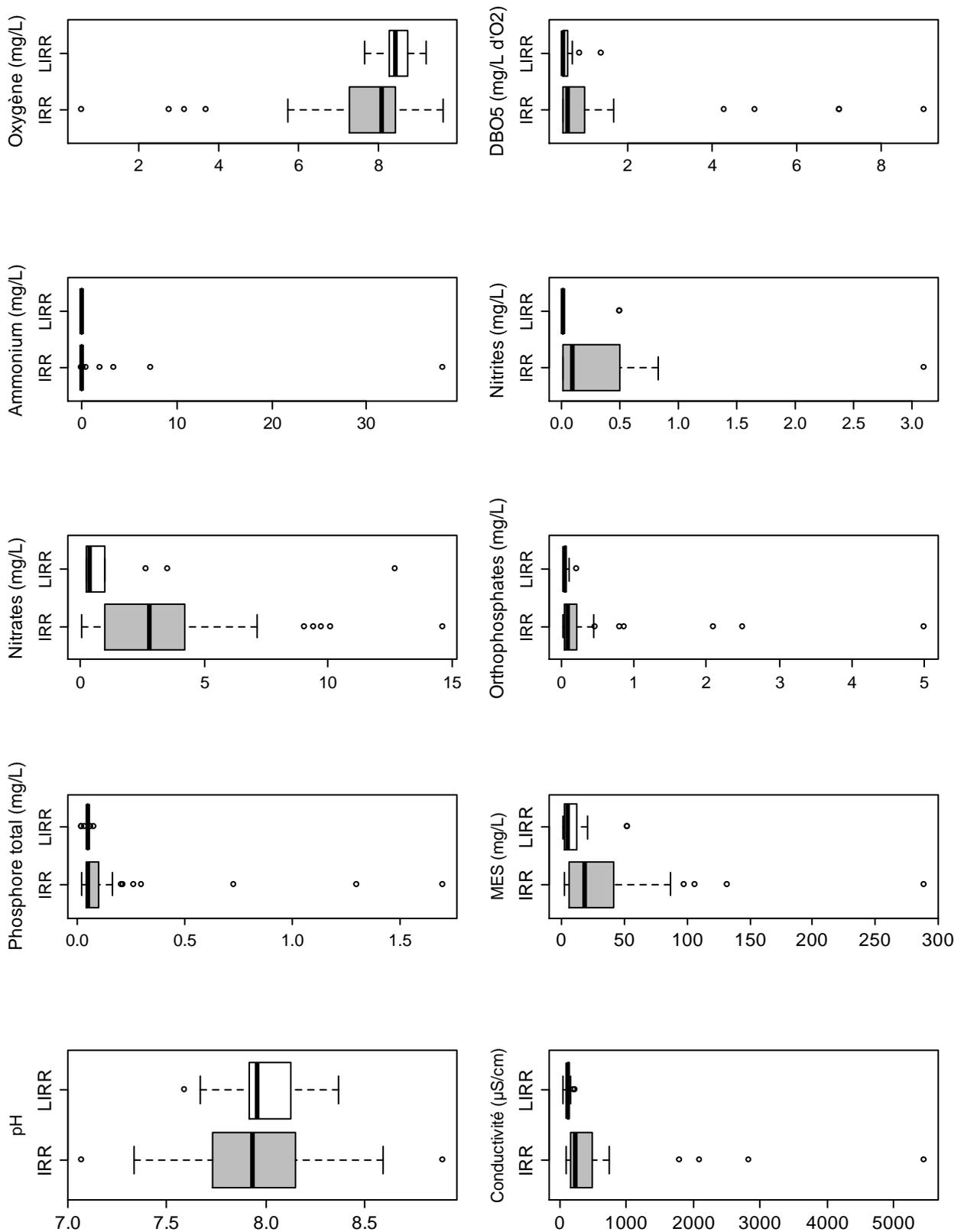
Pour vérifier cette condition, les distributions des valeurs des variables physico-chimiques de l'eau ont donc été comparées entre stations de moindre impact (LIRRs) et stations impactées (IRRs) pour les données à partir desquelles sera créé l'indice, soit carême 2011 (Figure 8).

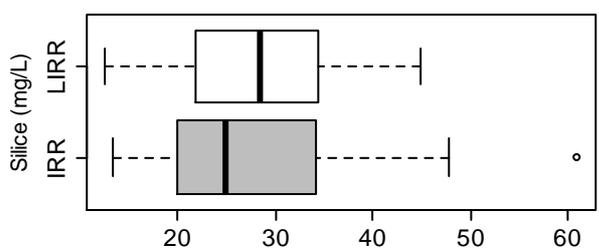
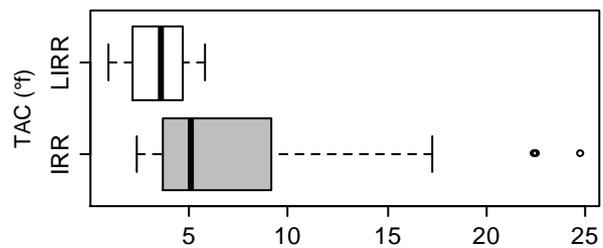
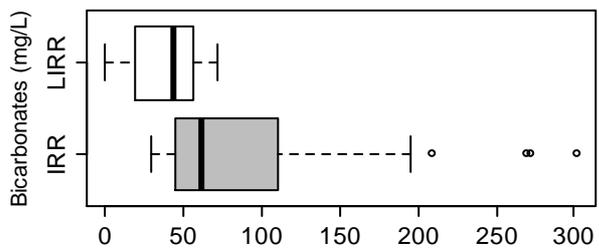
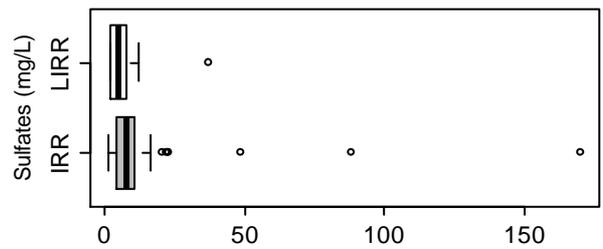
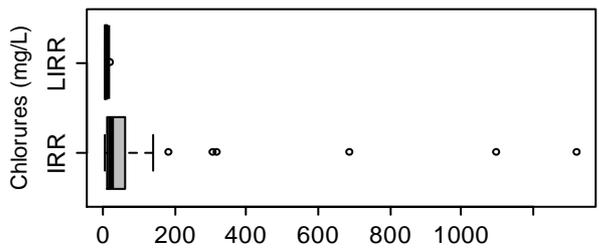
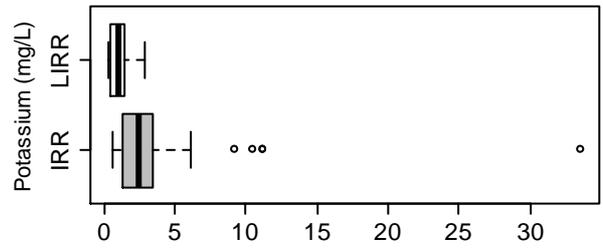
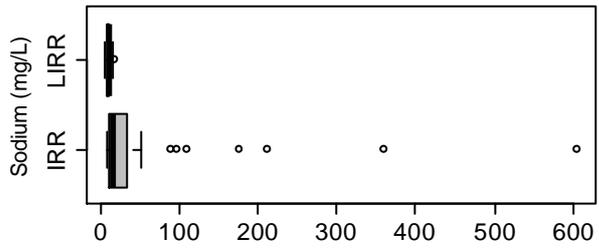
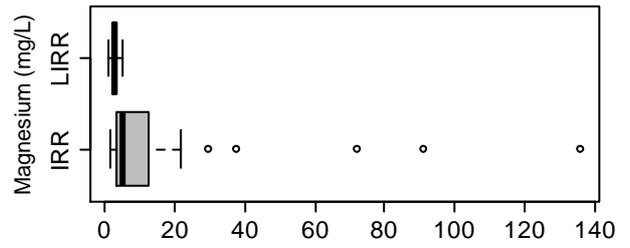
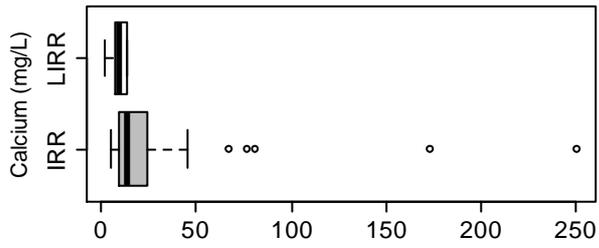
Pour l'ensemble des paramètres excepté pour la silice, il ressort bien que les gammes de valeurs sont beaucoup moins larges pour le groupe de stations de moindre impact que pour le groupe des stations impactées. Les valeurs médianes de stations de moindre impact sont pour la plupart moins dégradantes que celles des stations impactées, sinon égales. Aussi, c'est dans le groupe de stations IRRs que l'on enregistre les valeurs extrêmes dégradantes.

Le paramètre « taux de silice » présente une gamme de valeurs presque aussi large en conditions de référence qu'en conditions impactées, mais ce paramètre dépend aussi énormément de facteurs naturels (pluviométrie), en plus de facteurs anthropiques (érosion des terres agricoles).

La qualité de l'eau des stations LIRRs est donc meilleure à celle des stations IRRs dans leur ensemble.

Figure 8. Distribution des valeurs de chacune des variables physico-chimiques de l'eau pour les stations LIRRs et les stations IRRs, et pour les données de carême 2011.





Aussi, l'environnement aux abords des stations LIRRs est beaucoup moins perturbé par les activités agricoles et l'urbanisation comparé aux stations IRRs : les stations LIRRs sont bordées principalement par des forêts, alors que les stations IRRs sont pour la plupart situées en zones agricoles et/ou urbanisées (Figure 9).

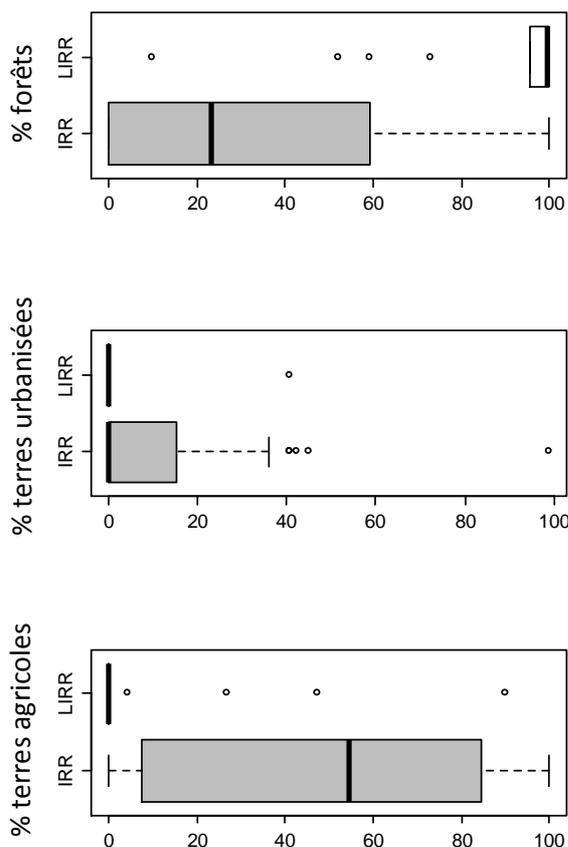
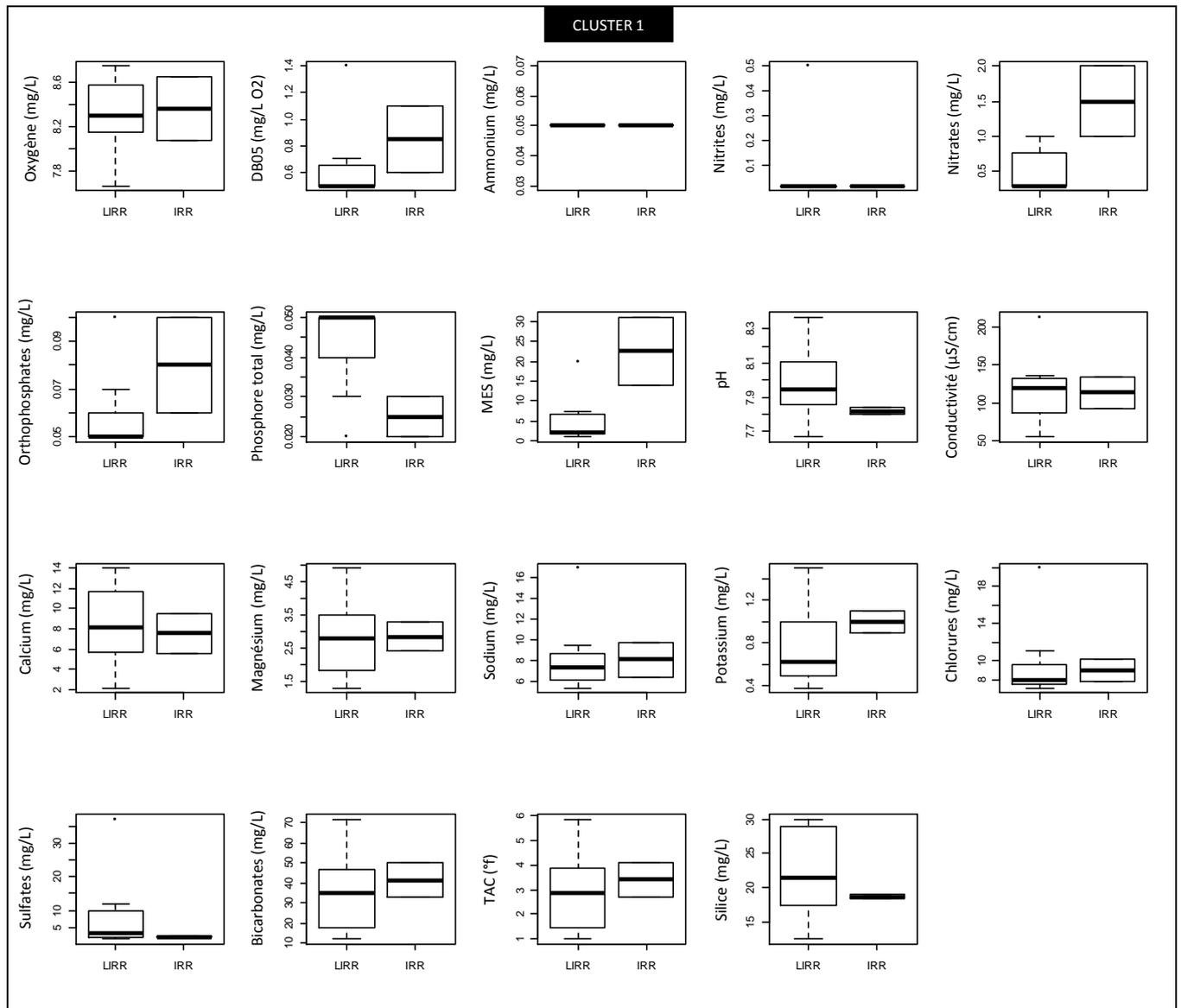


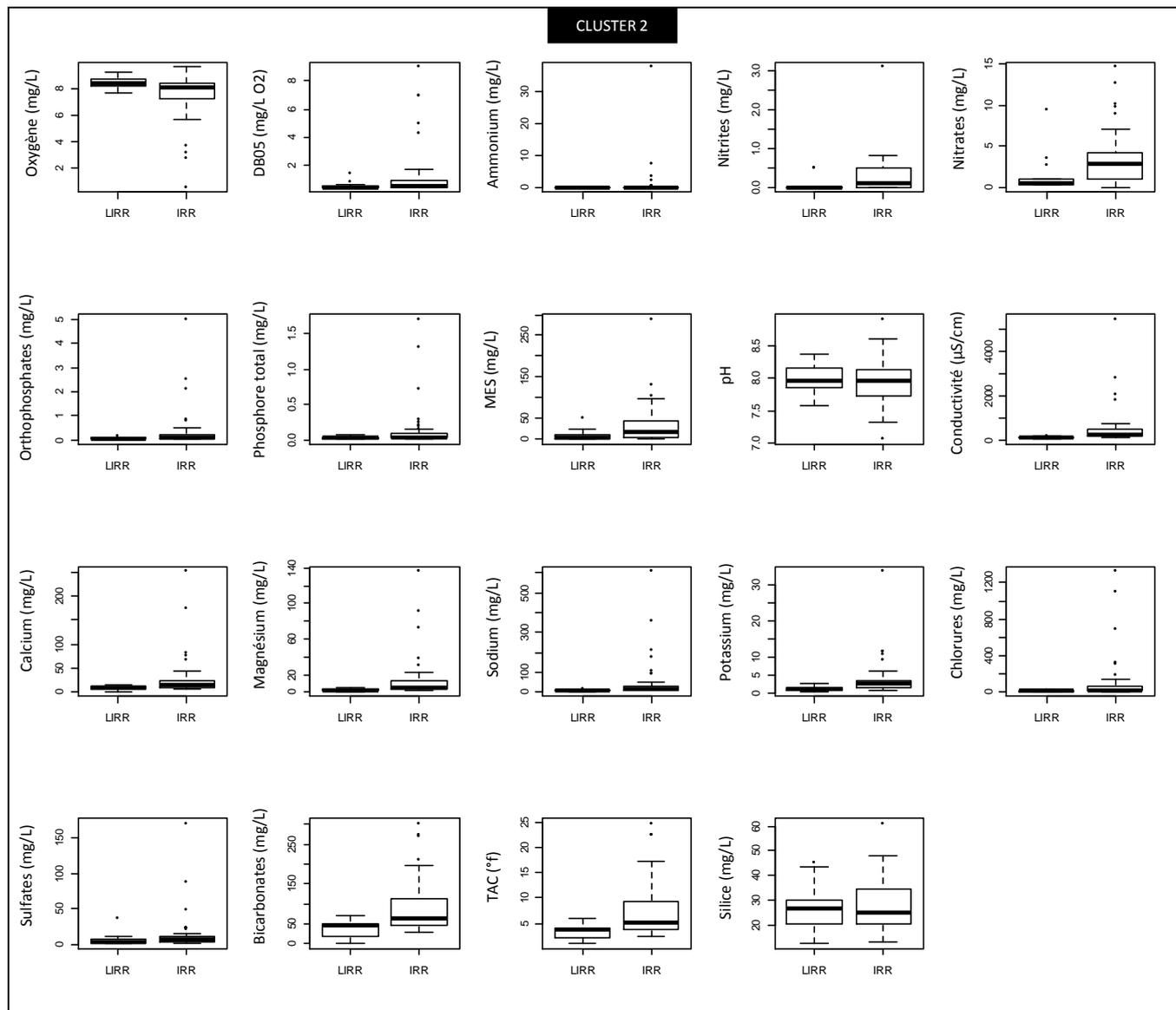
Figure 9. Distribution des valeurs de chacune des variables d'occupation du sol pour les stations LIRRs et les stations IRRs, et pour les données de carême 2011.

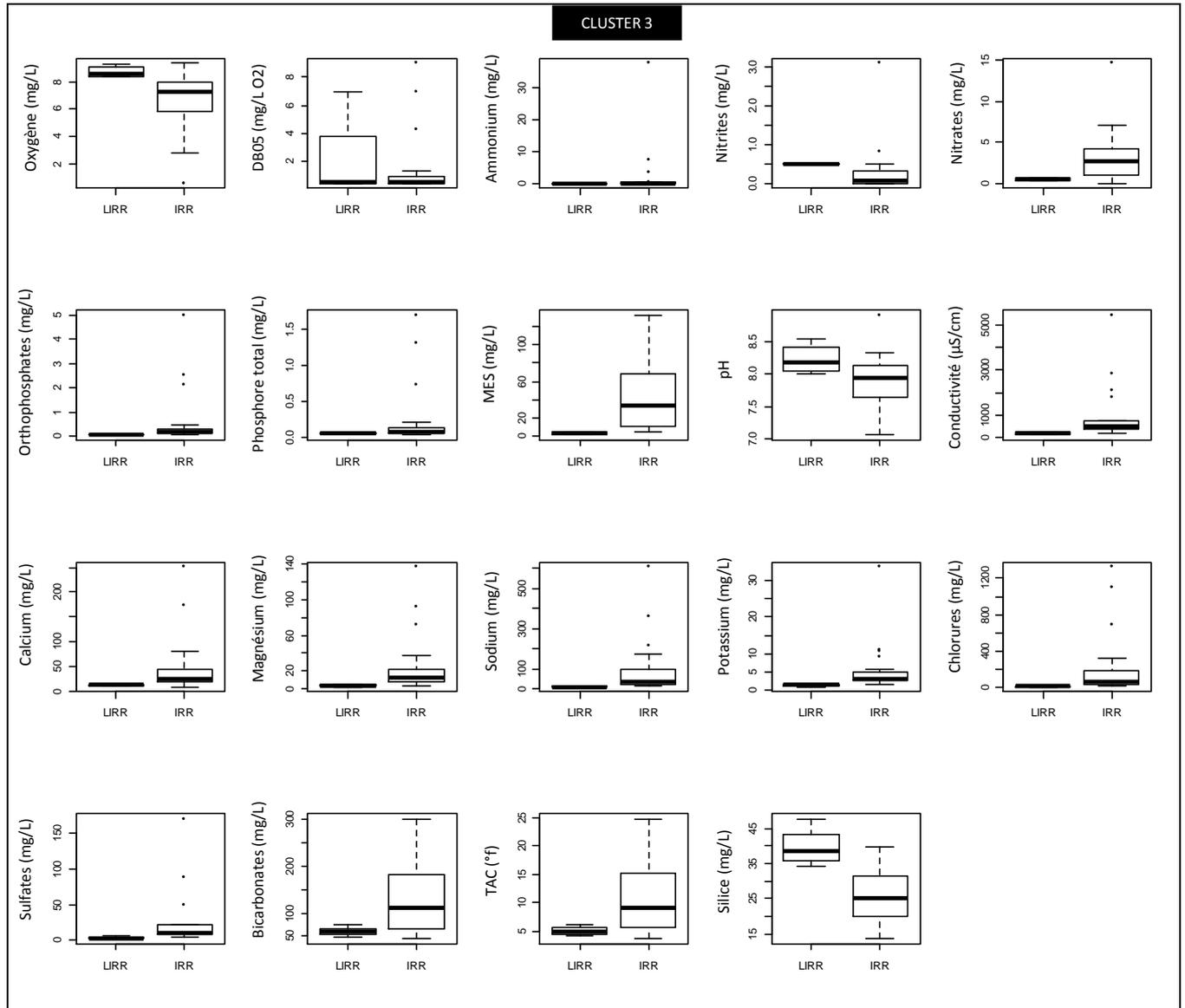
La qualité chimique de l'eau et la qualité de l'habitat ont aussi été comparées entre stations LIRRs et IRRs en tenant compte de la typologie (Figure 10 ; Figure 11). Nous observons les mêmes résultats que précédemment pour les clusters 2 et 3.

Concernant le Cluster 1, les stations IRRs se démarquent peu des stations LIRRs. Elles se démarquent par leurs taux de nitrates légèrement plus élevés. Les stations IRRs de ce cluster d'altitude sont de bonne qualité physico-chimique. Notons que ce cluster compte seulement 2 stations IRRs, il est donc difficile d'en tirer des conclusions robustes.

Figure 10. Distribution des valeurs de chacune des variables physico-chimiques de l'eau pour les stations LIRRs et les stations IRRs pour chacun des clusters, et pour les données de carême 2011.







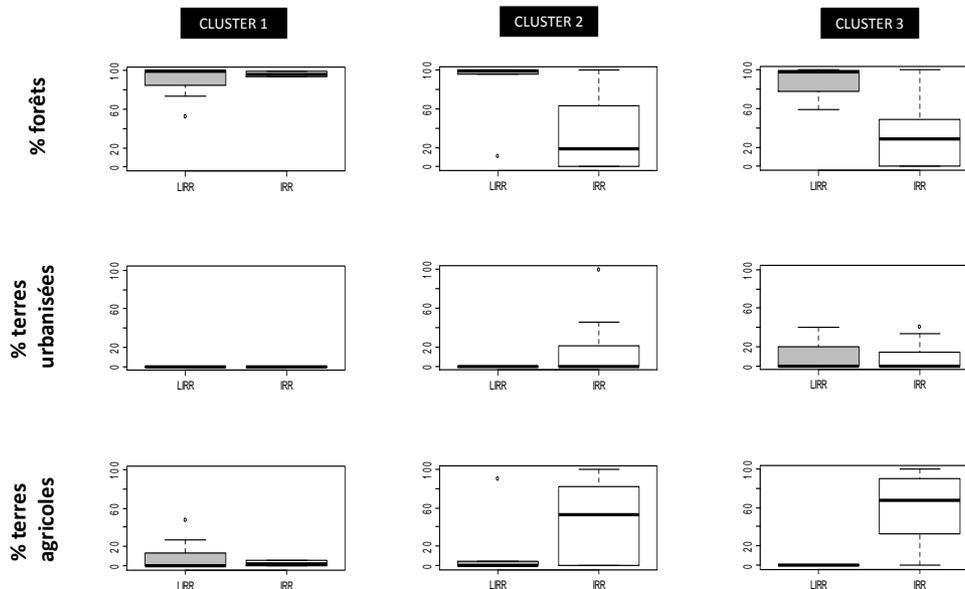


Figure 11. Distribution des valeurs des trois variables d'occupation du sol pour les stations LIRs et les stations IRRs pour chacun des clusters, et pour les données de carême 2011.

3.4. Présentation des métriques

DEFINITIONS (Bonada *et al.*, 2006)

Une **métrique** est une mesure calculée qui décrit certains aspects d'une communauté biologique tels que sa structure, son fonctionnement, ou tout autre caractéristique biologique. Par exemple, la richesse taxonomique et le taux d'espèces détritrices.

Les **indices multimétriques** sont des combinaisons de métriques qui, ensemble, sont présumées représenter une gamme de réponses des communautés biologiques aux perturbations d'origines anthropiques.

305 métriques (ANNEXE. Tableau 15) ont été calculées en prenant en compte les prélèvements unitaires associés :

- à l'ensemble des prélèvements (Phase 'A+B+C' ; 88 métriques) ;
- aux 4 substrats marginaux (i.e. Phase 'A' ; 43 métriques) ;
- aux 4 substrats dominants échantillonnés dans l'ordre décroissant de leur habitabilité (i.e. Phase 'B' ; 40 métriques)
- aux 4 substrats dominants échantillonnés au prorata de leur surface relative, compte tenu des substrats échantillonnés lors de la constitution du bocal B2 (i.e. Phase 'C' ; 42 métriques) ;
- aux 8 substrats dominants (i.e. Phases 'B+C' ; 46 métriques) ;
- aux 8 substrats échantillonnés compte tenu de leur habitabilité (i.e. Phases 'A+B' ; 45 métriques).

On distingue **4 types de métriques** :

- les métriques relatives à la richesse taxonomique (ex. richesse taxonomique totale, richesse relative en coléoptères, richesse relative en prédateurs) ;
- les métriques quantitatives des communautés (ex. abondance totale, abondance relative en coléoptères, abondance relative des Ephéméroptères+Trichoptères) ;
- les métriques composites faisant intervenir richesse taxonomique et densités (ex. indices de diversité de Shannon, Berger-Parker, Simpson, Menhinick) ;
- les métriques relatives aux traits bio-écologiques présents dans les communautés. Par manque de connaissance de la faune des Antilles françaises, la plupart des traits pris en compte dans la création de l'I2M2 métropolitain n'ont pu être considérés dans l'étude. Lorsque cela s'est avéré possible, les valeurs des traits bio-écologiques établies pour la faune métropolitaine (Tachet *et al.*, 2010) ont été étendues à la faune martiniquaises, et complétées pour les taxons « régionaux » grâce à des travaux réalisés en Bolivie (Tomanova *et al.*, 2008 ; Tomanova & Usseglio-Polatera, 2007). Nous avons calculé les métriques relatives au trait biologique « type de respiration » et aux 4 traits écologiques « relation au substrat/locomotion », « source de nourriture », « mode d'alimentation » et « nature du substrats »¹. Au total, 38 métriques relatives aux traits ont été calculées.

¹ **Respiration** : les modes respiratoires sont très variés (quatre modalités en Guadeloupe). Cette respiration peut se faire 1) directement à travers les téguments pour les organismes primitifs 2) grâce à des branchies 3) avec un plastron respiratoire 4) avec un spiracle.

Relation au substrat : Les macro-invertébrés présentent une très grande diversité de modes de locomotion. Les stratégies des organismes sont large allant de la fixation au substrat (temporaire ou permanente) au vol en passant par l'enfouissement, la marche et la nage.

Source de nourriture : Les sources de nourriture disponible pour les macro-invertébrés peuvent être regroupées en plusieurs catégories : les particules organiques de faible taille (microorganismes et fin débris organiques) ; les végétaux (morts ou vivants), les invertébrés (morts ou vivants) et les vertébrés (principalement du fait du parasitisme)

Mode d'alimentation : Le mode d'alimentation correspond à la manière dont les organismes se procurent et ingèrent leurs sources de nourriture. Cette ingestion peut se faire à l'aide de structures biologiques non spécifiques (absorbants), primitives (mangeurs de sédiments fins et broyeurs) ou spécialisées (racleurs, filtreurs, perceurs).

Substrats : Neuf types de substrats sur lesquels les invertébrés peuvent vivre ont été définis en fonction de leur caractère organique ou minéral et de leur granulométrie (pour les minéraux).

3.5. Normalisation des métriques

Les métriques ont été normalisées avant d'être sélectionnées. Selon la DCE, l'évaluation de l'état écologique doit être exprimée en terme d'écart par rapport à un état dit de référence (*EQR=Ecological quality Ratio*) pour un même type de cours d'eau, autrement dit l'écart à la référence d'une station est calculé par rapport aux valeurs des métriques des LIRRs du cluster de la station considérée) (Hering *et al.*, 2006). Cet écart s'exprime de 0 à 1, avec une valeur proche de 1 pour les sites de référence et une valeur proche de 0 pour des sites en mauvais état écologique.

3.5.1. Les valeurs de référence

Une métrique peut répondre de manière différente suivant la nature de la pression/perturbation subie et/ou en fonction de l'intensité de pression/perturbation, et pour une sous-écorégion donnée (cluster). Compte tenu de la variété des réponses possibles, il est indispensable de définir la valeur de référence de chaque métrique pour chaque sous-écorégion. La démarche est la suivante :

1. CLASSIFICATION DES STATIONS EN LIRRs ET EN IRRs (cf. § Typologie)

2. CALCUL DES ECARTS NORMALISES A LA REFERENCE

Les valeurs des métriques ont été transformées en écarts normalisés (SES) à la situation de référence pour le même type de cours d'eau (Gotelli & McCabe, 2002) de la façon suivante :

$$SES = (Obs_{type} - M_{type}) / sd_{type} \quad [1]$$

avec : Obs = valeur observée de la métrique pour une station donnée, et M_{type} et sd_{type} = moyenne et écart-type des valeurs de la métrique en situation de référence pour le même type de cours d'eau.

Grâce à cette normalisation, les valeurs des métriques pourront être comparées entre types de cours d'eau différents (clusters).

3. ATTRIBUTION D'UN TYPE DE REPONSE A CHAQUE METRIQUE.

Les réponses des métriques à une pression pouvant varier, nous avons donc déterminé, pour chaque métrique son **type de réponse** (Figure 12), sachant qu'il existe trois types de réponses possibles :

- TYPE I : pas de réponse significative ;
- TYPE II : la métrique diminue significativement en situation perturbée par rapport à la valeur observée en situation de référence pour le même type de cours d'eau ;
- TYPE III: la métrique augmente significativement en situation perturbée par rapport à la valeur observée en situation de référence pour le même type de cours d'eau).

L'efficacité de discrimination (DE) de chacune des métriques a été calculée.

$DE_{SES(25)}$ correspond à la proportion de stations IRRs dont la valeur SES de la métrique est inférieure au premier quartile de la distribution des LIRRs, et $DE_{SES(75)}$ correspond à la proportion de stations IRRs dont la valeur SES de la métrique est supérieure au troisième quartile de la distribution des LIRRs.

Si $DE_{SES(25)} < 0.25$ et $DE_{SES(75)} < 0.25$, alors la réponse de la métrique est de type I (pas de réponse) ;

Si $DE_{SES(25)} > 0,25$ et $DE_{SES(25)} > DE_{SES(75)}$, alors la réponse de la métrique est de type II (décroissante) ;

Si $DE_{SES(75)} > 0.25$ et $DE_{SES(75)} > DE_{SES(25)}$, alors la réponse de la métrique est de type III (croissante).

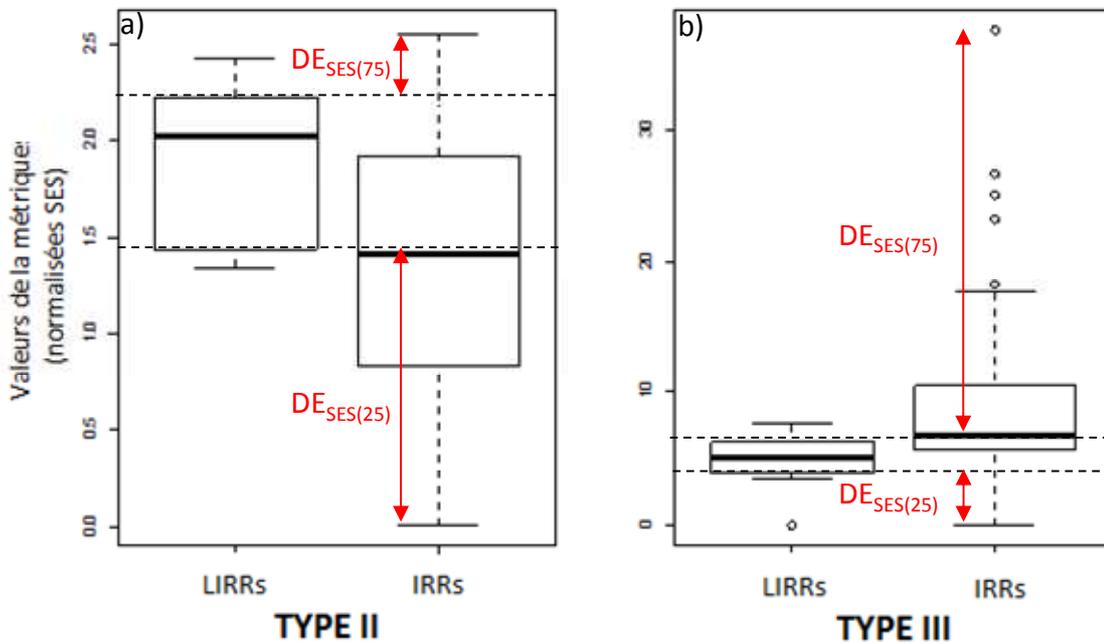


Figure 12. Illustration des types de réponses des métriques aux pressions anthropiques : (a) métriques décroissantes (type II) et (b) métriques croissantes (type III).

Les boîtes à moustache représentent la distribution des valeurs des métriques exprimées en SES pour les stations LIRRs et IRRs. Les boîtes s'étendent du 25^{ème} centile au 75^{ème} centile. La ligne épaisse représente la valeur médiane de la distribution. Les points représentent les valeurs extrêmes. Les lignes en pointillées soulignent le premier et le 3^{ème} quartile de la distribution des valeurs pour les stations LIRRs.

4. DETERMINATION DES MEILLEURES VALEURS ET DE LA PIRE VALEUR POUR CHAQUE METRIQUE

Pour chaque métrique, on obtient les « meilleures » valeurs (une valeur de référence pour chaque cluster) et la « pire » valeur (commune aux trois clusters) pour notre jeu de données de construction en se référant aux 5^{ème} et 95^{ème} centiles de la distribution des valeurs SES des stations LIRRs et IRRs. Les 5^{ème} et 95^{ème} centiles ont été utilisés plutôt que les valeurs les plus basses et les plus élevées de la distribution afin d'écartier les valeurs extrêmes des métriques (Ofenböck *et al.*, 2004).

Si la métrique est de TYPE I ou II, la valeur dite « meilleure » correspond à la valeur maximale que la métrique peut avoir dans les LIRRs pour un type de cours d'eau (cluster). Si la métrique est de TYPE III, la meilleure valeur correspond à la valeur minimale.

La valeur dite « pire » correspond à la valeur minimale (cas des métriques de type I et II) où à la valeur maximale (type 3) que la métrique peut avoir dans les IRRs sur tout le jeu de données.

Pour chaque métrique, nous disposons finalement d'1 « pire » valeur et de 3 « meilleures valeurs » (une pour chaque cluster de stations).

3.5.2. Calcul des écarts à la référence (EQR : Ratio de Qualité Ecologique)

L'expression de l'état écologique des cours d'eau en EQR (Ecological Quality Ratio), ou écart à la référence, est une des principales exigences de compatibilité DCE pour les méthodes d'évaluation. L'EQR est le rapport entre un état observé et l'état que "devrait" avoir le milieu en l'absence de perturbation anthropique. L'EQR est calculé sur la base des valeurs des métriques, et doit être compris entre 0 et 1.

Que les métriques soient croissantes ou décroissantes le long d'un gradient de pression/perturbation, les EQR doivent être exprimés de telle sorte que :

- Si la valeur observée sur un point de prélèvement est égale à la valeur de référence, l'EQR est égal à 1 ;
- Si la valeur observée s'éloigne de la valeur de référence, l'EQR tend vers 0.

Pour satisfaire à cette double condition, les EQR ont été calculés de la façon suivante (Hering *et al.*, 2006) :

- Si la métrique est de TYPE I ou II : **$EQR = (Obs - Mini)/(Maxi - Mini)$** [2]
- Si la métrique est de TYPE III : **$EQR = 1 - (Obs - Mini)/(Maxi - Mini)$** [3]

avec « Obs » = la valeur de la métrique observée pour un point de prélèvement donné après normalisation en SES, sur un cours d'eau appartenant à un type déterminé. Pour l'équation [2], « Maxi » et « Mini » correspondent respectivement à la « meilleure » et la « pire » valeur pour cette métrique sur le même type de cours d'eau. Dans l'équation [3] « Maxi » et « Mini » correspondent respectivement à la « pire » et la « meilleure » valeur de la métrique, respectivement.

Si la valeur d'EQR calculée est supérieure à 1 (cas d'une station de meilleure qualité comparé à la valeur de référence) alors la valeur de l'EQR est fixée à 1. De même, si la valeur de l'EQR

est inférieure à la pire valeur, la valeur de l'EQR est fixée à 0 (la qualité est plus faible que la pire des valeurs).

Grâce à cette normalisation, les métriques répondront toutes dans le même sens aux perturbations anthropiques : toutes les métriques seront dorénavant décroissantes en réponse aux pressions anthropiques. Par contre, les métriques se distingueront les unes des autres par :

- leur spécificité de réponses aux diverses pressions/perturbations anthropiques ;
- leur efficacité de discrimination ;
- leur stabilité en situation de référence (LIRRs).

3.6. Sélection des métriques pertinentes

Deux méthodes différentes ont été appliquées pour sélectionner les métriques qui constitueront l'indice multimétrique :

- Une méthode comparable à celle de la construction de l' I_2M_2 (Mondy et al., 2012), prenant en compte l'efficacité de discrimination LIRRs/IRRs des métriques, la stabilité des métriques en conditions de référence et la non-spécificité de réponse des métriques aux diverses perturbations/pressions (métriques généralistes ») ;
- une seconde méthode détaillée par Barbour et al. (1999), qui ne tient pas compte de la stabilité des métriques en conditions de référence, ni de leur spécificité à répondre à diverses perturbations/pressions, mais qui conduit à sélectionner des métriques parmi 4 catégories apportant des informations écologiques complémentaires.

L'indice créé par la seconde méthode nous a semblé moins pertinent², la méthode de sélection correspondante est donc présentée en annexe de ce rapport. Nous présentons ci-après la méthode comparable à celle de la construction de l' I_2M_2 établi pour la France métropolitaine.

² Bien que très discriminant et stable en conditions de référence (DE=1 et CV=0.14), l'indice créé en suivant la méthode de Barbour et al. (1999) abouti à une indice qui donne énormément de poids à l'ordre des coléoptères (leur abondance et leur richesse sont prises en compte dans deux métriques, et surtout la métrique « Richesse Relative des Coléoptères_AB » à un poids (DE) égal à 1 dans l'indice final. Cet indice est donc très sensible à la présence des Coléoptères, qui est un groupe représentant en moyenne seulement 5% des communautés macroinvertébrés benthiques toutes stations confondues, et au maximum 14% d'un peuplement de référence (données 2011). De plus, la métrique « ETCQ_BC » (Abondance relative en Ephemeroptères, Trichoptères, Coléoptères_BC » répond significativement à seulement 6 variables environnementales de perturbations/pressions (la limite de sélection d'une variable selon la méthode de construction de l' I_2M_2 étant fixée à 9 variables minimum).

3.6.1. Quatre critères de sélection

Les métriques ont été sélectionnées en prenant en compte 4 critères, simultanément :

- *Une forte efficacité de discrimination des métriques :*

Le pouvoir de discrimination (DE, d'après Offenbock *et al*, 2004) d'une métrique pour un type de pression donné a été calculé comme la proportion d'assemblages faunistiques sur sites perturbés (LIRRs) présentant une valeur d'EQR plus faible que le premier quartile de la distribution des valeurs de cette métrique dans les LIRRs.

Le calcul des DE a été répété 100 fois à l'aide d'un « bootstrap » en sélectionnant à chaque fois un sous-échantillon aléatoire représentant 60% du jeu de données de construction de l'indice. Une estimation robuste du DE de chaque métrique est alors obtenue en moyennant les 100 estimations obtenues à partir des sous-échantillons du jeu de données de construction.

Dans un même temps, une première sélection des métriques s'effectue en conservant les métriques discriminant significativement un état perturbé d'un état non perturbé (i.e. DE moyen ≥ 0.6). Ainsi, nous sélectionnons les métriques qui identifient au moins 60% des assemblages soumis à une pression.

- *Une forte stabilité en condition de référence (LIRRs) :*

La stabilité d'une métrique en conditions de référence (i.e. dans les LIRRs) a été évaluée en utilisant le coefficient de variation (CV) de la distribution de ses valeurs d'EQR dans les assemblages benthiques des LIRRs.

Comme pour les DE, une estimation robuste du CV a été calculée en moyennant les 100 estimations obtenues sur des sous-échantillons aléatoires (60% du jeu de données de construction) et à l'aide d'un « bootstrap ».

Les métriques présentant une grande stabilité dans les LIRRs (i.e. $CV \leq 1/3$) ont été sélectionnées.

- *Une faible spécificité :*

Pour l'indice, nous recherchons des métriques présentant une faible spécificité de réponse, c'est-à-dire des métriques répondant à un grand nombre de pressions/perturbations environnementales.

La réponse de chacune des métriques à chacun des paramètres environnementaux considérés a été testée à l'aide de régressions linéaires simples. Le seuil de significativité a été fixé à 0,05.

Nous avons considéré dans l'analyse 16 variables environnementales susceptibles de refléter les niveaux de pressions/perturbations des hydrosystèmes : le taux d'oxygénation de l'eau (mg/l), la DBO₅, le taux d'ammonium, le taux de nitrates, le phosphore total, les matières en suspensions, le pH, la conductivité, les taux de potassium, chlorures, sulfates, bicarbonates et silice, mais aussi les pourcentages de terres urbanisées, agricoles, et de forêt bordant les stations. Nous disposons de deux types de variables environnementales : les variables « qualité de l'eau » (les 13 premières variables citées) et les variables « qualité de l'habitat » (3 variables). Les autres variables chimiques dont nous disposons étant trop fortement corrélées aux variables chimiques citées plus haut, elles ont été écartées du jeu de données (e.g. le taux de phosphates, fortement corrélé au taux de phosphore total).

Les métriques corrélées significativement (p -value < 0.05) à au moins 70 % des variables « qualité de l'eau » (soit à 9 variables) et à au moins 1 variable « qualité de l'habitat » ont été sélectionnées.

- **Non redondance des métriques :**

Pour éviter la redondance entre métriques, les métriques candidates fournissant le même type d'information taxonomique ou bio/écologique ont été rassemblées en groupes homogènes quant à l'information biologique ou écologique restituée. Pour chacun des groupes de métriques « similaires », seule la métrique présentant la plus faible spécificité puis le DE moyen le plus élevé a été sélectionnée pour une intégration éventuelle dans l'indice multimétrique. Des tests de corrélation de Spearman ont été appliqués.

3.6.2. Métriques finales

- **Forte efficacité de discrimination des métriques et forte stabilité dans les conditions de référence :**

La majeure partie des métriques ont un DE moyen $< 0,60$ (Figure 13 a). Sur les 305 métriques initiales, seulement 89 ont un $DE \geq 0.6$.

Aussi, la majorité des métrique est stables dans les LIRRs, puisque plus de la moitié des métriques (163 métriques exactement) ont un $CV \leq 1/3$ (Figure 13 b).

Seulement **69 métriques** remplissent les deux critères de sélection à la fois et seront retenues pour la suite de la sélection. Les résultats de ces 69 métriques candidates sont présentés en ANNEXE. Tableau 16.

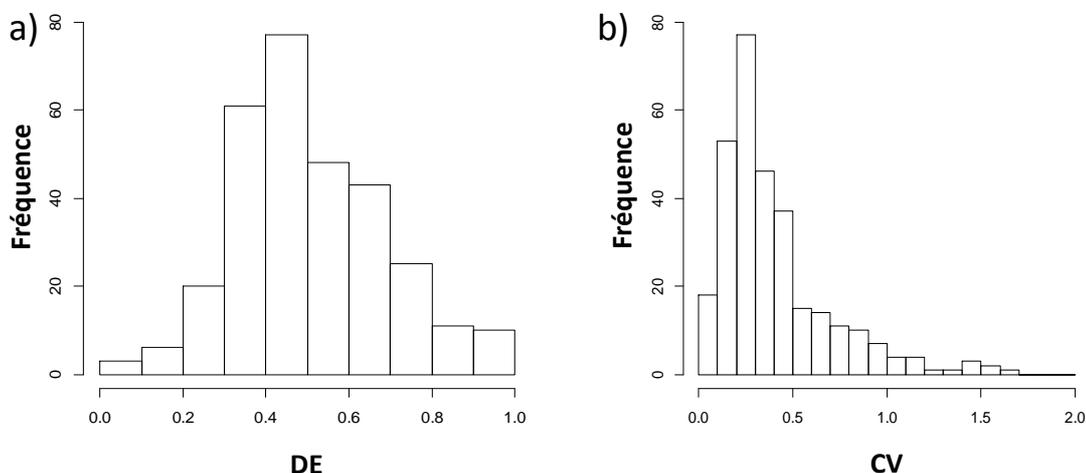


Figure 13. Histogramme des fréquences des valeurs de DE (a) et CV (b) des métriques (n=305 métriques).

- **Faible spécificité :**

Sur les 69 métriques dégagées, 22 sont significativement corrélées ($p\text{-value} < 0,05$) à au moins 9 des 13 variables « qualité de l'eau » et à au moins 1 des variables « qualité de l'habitat ».

- **Non redondance :**

Certaines des 22 métriques généralistes dégagées sont redondantes. Après application du critère de sélection de non redondance, 5 métriques ont été conservées. Elles sont présentées dans le paragraphe suivant.

Bilan

Nous proposons finalement 5 métriques à inclure dans l'indice, qui sont :

- le trait relatif au préférendum d'habitat des substrats minéraux grossiers « Blocs Dalles Pierres Galets » ;
- l'abondance d'Ephéméroptères dans les phases B+C ;
- la richesse relative en Ephéméroptères + Trichoptères + Coléoptères (ETC) dans les phases A+B ;
- la richesse relative en Prédateurs dans les phases B+C ;
- l'indice de Shannon calculé sur les phases B+C.

Toutes ces variables sont initialement (avant normalisation) de TYPE II (décroissantes), excepté la métrique « Richesse relative en prédateurs » qui est une variable de type III (croissante).

Tableau 8. Résultats de DE, CV, et spécificité des métriques finales

Métrique	DE	CV	Réponse aux variables :			Type de variable
			"Qualité de l'eau"	"Dégradation de l'habitat"	Total	
BlocsPierresCaillouxGalets_reach	0.92	0.30	9	2	11	TYPE II
EphemeropteraQ_BC	0.69	0.29	10	1	11	TYPE II
ETCS_AB	0.79	0.19	12	2	14	TYPE II
RichesseRelativePredateurs_BC	0.63	0.14	11	1	12	TYPE III
Shannon_H_BC	0.72	0.24	11	2	13	TYPE II

3.7. Calcul de l'Indice Biologique Macroinvertébré des Antilles pour la Martinique (IBMA-972)

L'indice multimétrique final que nous proposons a été nommé IBMA-972 pour « Indice Biologique Macroinvertébré des Antilles » pour la Martinique.

La formule pour calculer l'IBMA-972 à partir des 5 métriques sélectionnées est donnée dans l'équation suivante :

$$\text{IBMA-972} = \frac{\sum (\text{DE}_m \times \text{EQR}_m)}{\sum \text{DE}_m} \quad [4]$$

avec DE_m l'efficacité de discrimination de la métrique « m » et EQR_m la valeur d'EQR de la métrique « m ».

Le score final de cet indice est compris entre 0 et 1.

Dans ce calcul, les valeurs d'EQR pour une métrique sont multipliées par l'efficacité de discrimination de la métrique, ce qui permet de donner plus de poids aux métriques qui ont un plus fort DE. La division par la somme des DE des 5 métriques permet de borner les valeurs de l'indice entre zéro et 1.

Dans le calcul de l' I_2M_2 , un sous-indice est calculé par type de pressions (17 pressions sont considérées au total) de la même façon que dans l'équation [4], et l'indice final moyenne ces 17 sous-indices. Nous avons décidé de ne pas calculer de sous-indices par type de pressions pour deux raisons : 1) en Martinique, beaucoup de stations sont soumises à plusieurs pressions à la fois (contexte multi-pressions) et 2) le jeu de données de Martinique est moindre comparé à celui ayant servi à la création de l' I_2M_2 , nous disposons de trop peu de répliques par type de pressions, notamment pour le réseau complémentaire. Un indice prenant en compte les types de pressions, comme le fait l' I_2M_2 , aurait été dans le cas de la Martinique peu robuste.

4. Test de l'indice

4.1. Comparaison avec l'Indice de Shannon

En l'absence d'indice de bioévaluation basé sur macroinvertébrés benthiques adapté à la Martinique, l'indice de Shannon était calculé jusqu'alors pour déterminer évaluer la qualité d'un site en Martinique. La distribution des résultats du nouvel indice développé a été comparée à celle de l'indice de Shannon, obtenue sur les mêmes données (carême 2011) (Figure 14).

L'efficacité de discrimination de l'IBMA-972 est bien supérieure à celle de l'Indice de Shannon, qui sont respectivement de 0,96 et 0,63 en 2011. Autrement dit, l'indice Shannon identifie comme impactés seulement 63% des stations soumises à une pression, contre 96% pour l'IBMA-972.

Aussi, l'IBMA-972 s'avère beaucoup plus stable en conditions de référence que l'Indice de Shannon (les coefficients de variations dans les LIRRs sont respectivement de 0,11 et 0,22).

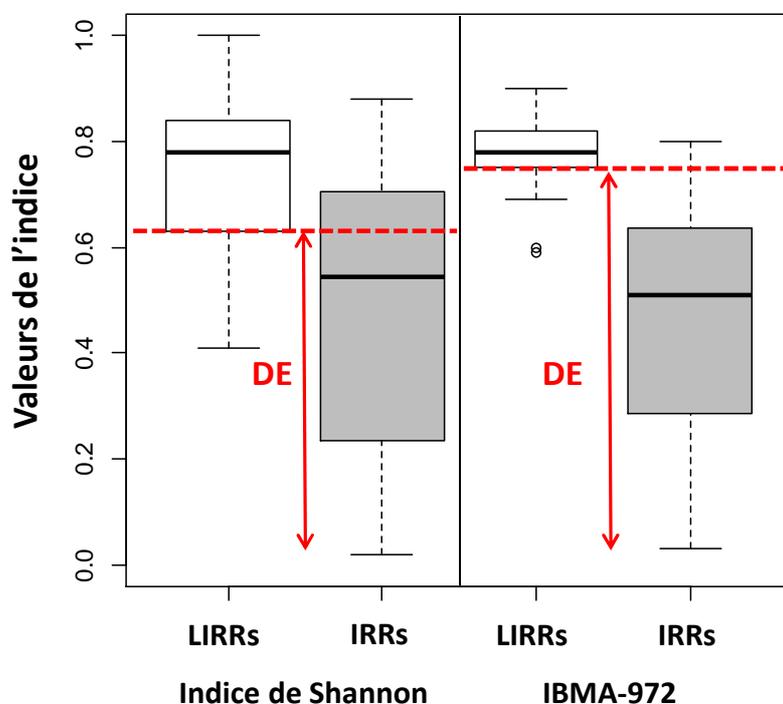


Figure 14. Distribution des résultats et efficacité de discrimination de l'indice de Shannon et de l'IBMA-972 pour un même jeu de données. Les valeurs d'indice de Shannon ont été ramenées entre 0 et 1 en les divisant par la valeur maximale de la distribution.

4.2. Application aux données de carême 2010 et carême 2012

L'IBMA-972 a été calculé sur les données de carême 2010 et carême 2012. La distribution des scores est comparée entre les années (Figure 15).

Il apparaît que la distribution des scores sur le jeu de données de construction (2011) est légèrement plus haute que celle des données 2010 et 2012. Ce décalage est davantage marqué sur les stations LIRR. Il devra être pris en compte lors de la définition des seuils des classes de qualité. Ce décalage peut s'expliquer par : 1) la variabilité naturelle des communautés dans le temps ou 2) une différence d'effectifs de stations entre les campagnes (la campagne de 2011 qui a servi pour la construction de l'indice est celle qui compte le plus de stations).

Malgré ce décalage, l'IBMA-972 est performant puisque 1) la distribution des LIRRs est très stable entre les années 2010 et 2012 et 2) l'efficacité de discrimination de l'indice est élevée pour les deux années tests (Tableau 9) et supérieure à l'efficacité de discrimination de l'indice de Shannon (cf. paragraphe précédent).

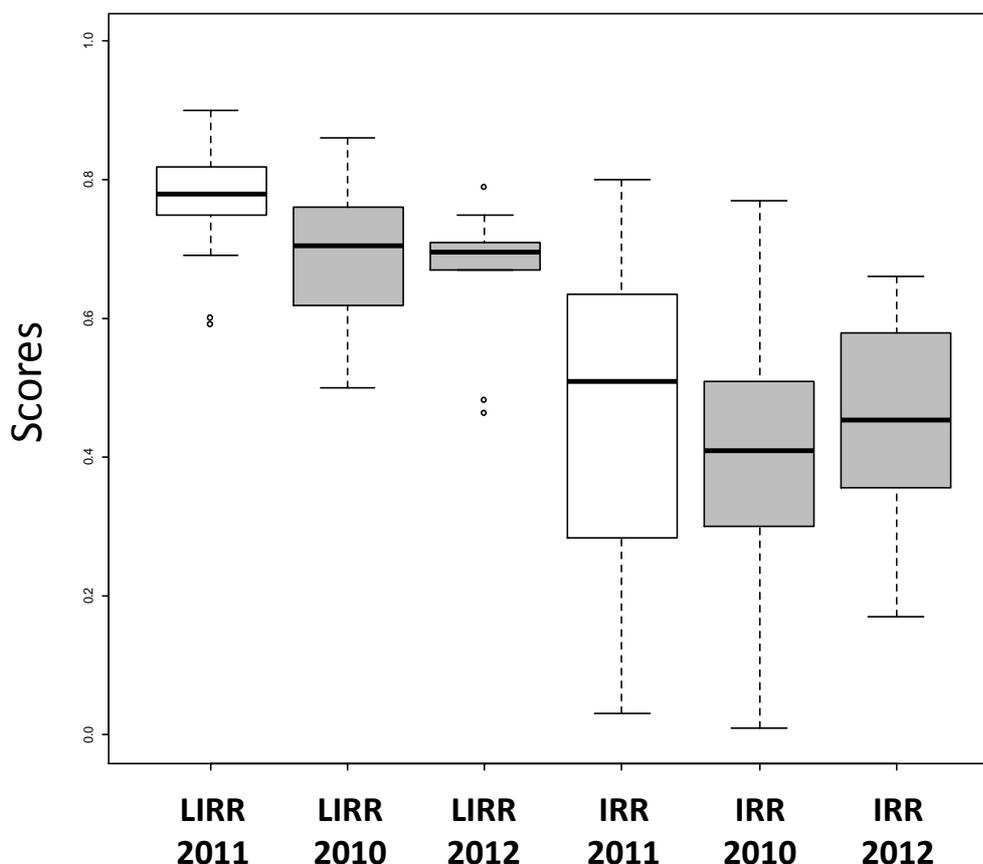


Figure 15. Distribution des scores de l'IBMA-972 : comparaison entre le jeu de construction (boîtes à moustaches blanches) et les jeux de données tests (boîtes à moustaches grises).

Tableau 9. Efficacité de discrimination et coefficient de variation de l'IBMA-972 de 2010 à 2012.

	Jeu de données de construction	Jeux de données tests	
	2011	2010	2012
Efficacité de discrimination (DE)	0.96	0.85	1
Coefficient de variation en conditions de référence (CV)	0.11	0.14	0.17

4.3. Définition des classes de qualité

Comme recommandé par la DCE, l'indice doit pouvoir être interprété en termes de 5 classes de qualité écologique (« Très Bon », « Bon », « Moyen », « Médiocre » et « Mauvais »). Une telle interprétation nécessite la définition de limites inter-classes.

Les valeurs seuils doivent être fixées de manière à ce que « la plupart des sites de référence soit de *bonne* ou *très bonne* qualité biologique » (Barbour *et al.*, 1999).

Classiquement, la définition de ces classes est définie suivant la distribution des scores de l'indice sur le jeu de données de construction. Cependant, nous avons observé un décalage de la distribution des LIRRs entre le jeu de construction et les jeux de données tests. Afin d'en tenir compte, les limites des classes ont été fixées en tenant compte des jeux de données tests :

- Le premier quartile de la distribution des LIRRs de 2011 a été pris pour limite inférieure du « Très bon état » ;
- Le premier quartile de la distribution des LIRRs de 2010 a été pris pour limite « Bon état/Etat médiocre » ;
- La moyennes des médianes des distributions des IRRs a été pris pour limite « Mauvais état/Etat Médiocre » ;
- Le premier quartile des IRRs de 2011 a été pris pour limite « Mauvais Etat/Très mauvais état ».

En appliquant ce découpage (Figure 16), on obtient les classes suivantes :

Tableau 10. Limites des classes d'état.

TME	ME	EM	BE	TBE
[0 ; 0.29 [	[ 0.29 ; 0.46 [	[ 0.46 ; 0.63 [	[ 0.63 ; 0.75 [	[ 0.75 ; 1]

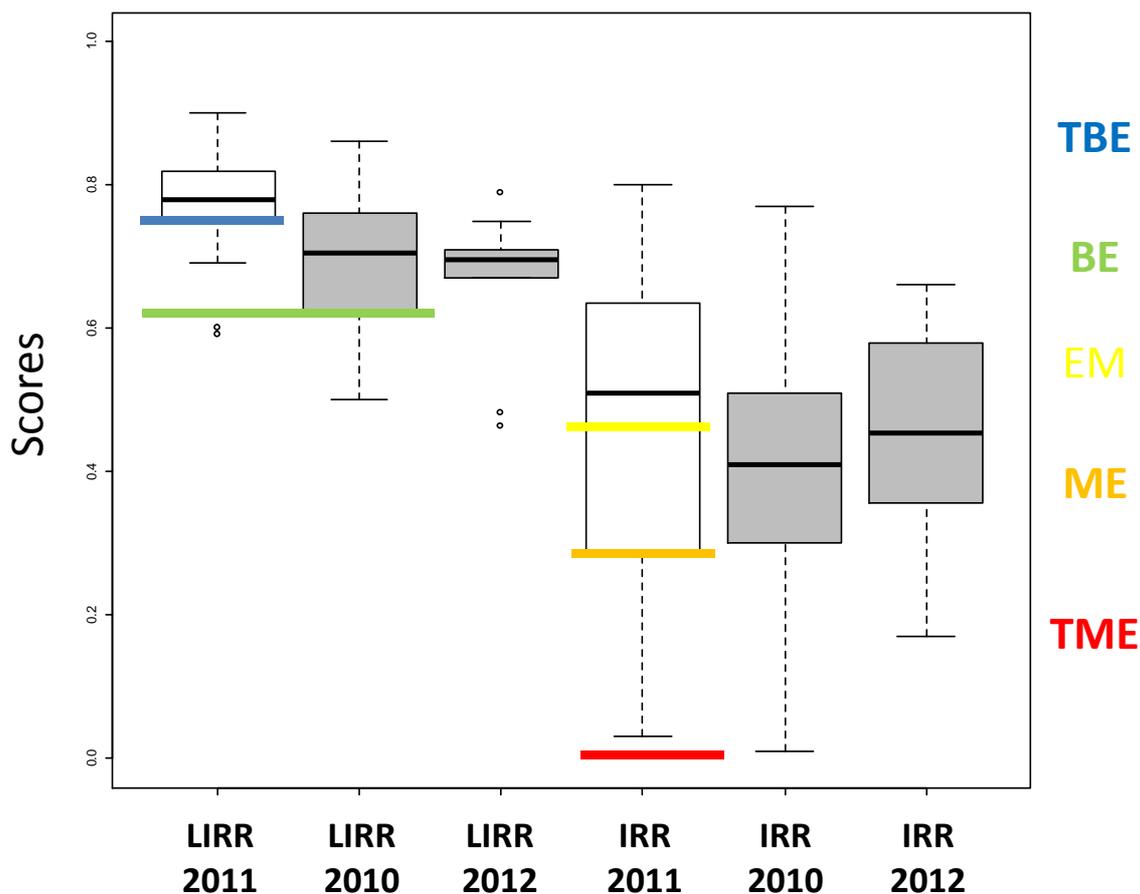


Figure 16. Découpage des classes d'états suivant la distribution des scores de l'IBMA-972. TBE = Très bon état ; BE = Bon état ; EM = Etat médiocre ; ME = Moyen Etat ; TME = Très mauvais état.

4.4. Résultats : cartes d'états des sites de 2010 et 2012

L'IBMA-972 a été calculé pour l'ensemble des données de carême (carême 2010, 2011 et 2012) et une classe d'état a été attribuée à chacun des sites (Figure 17).

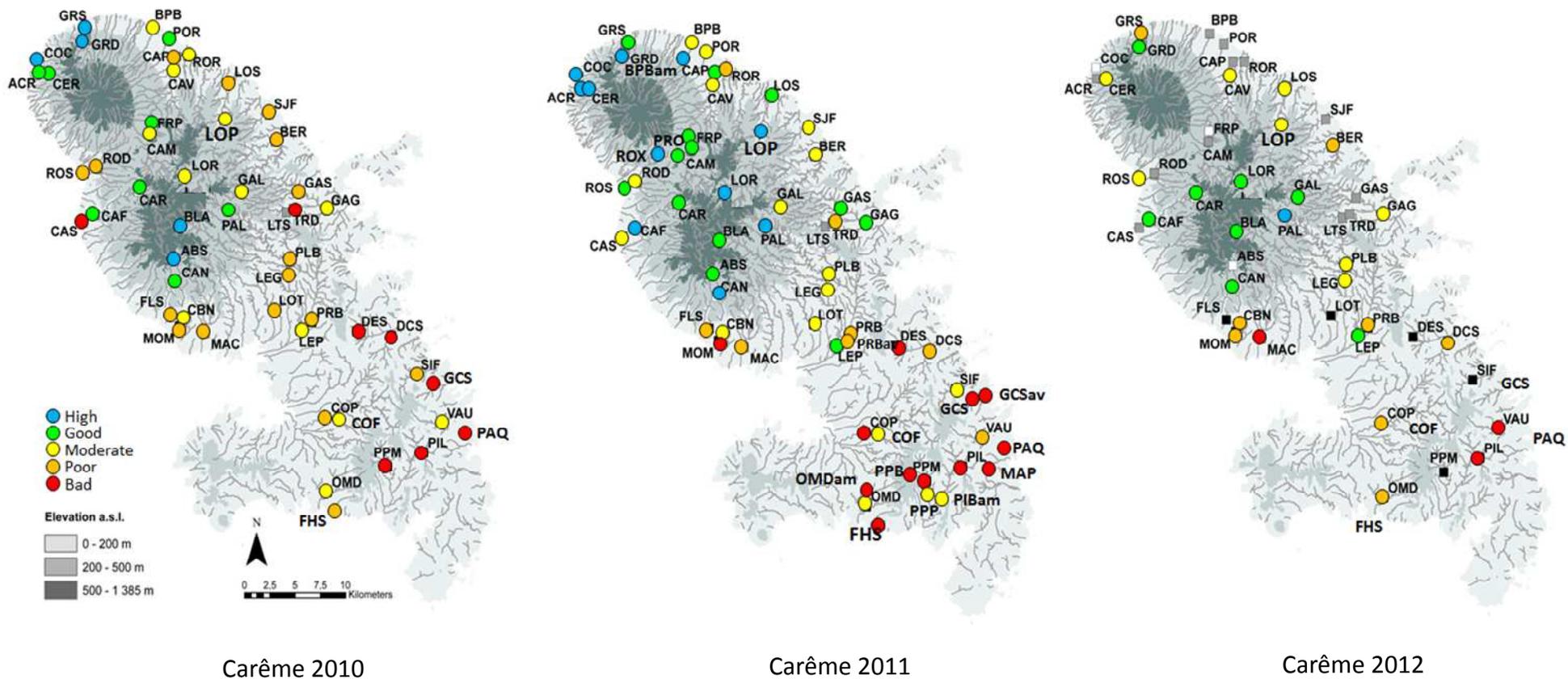


Figure 17. Carte d'état des sites selon les campagnes.

5. Bilan

C'est dans le souci d'appliquer la DCE à la Martinique et en l'absence totale d'outil de bio-évaluation de la qualité des eaux basé sur les macroinvertébrés adapté à ce Département d'Outre-Mer qu'a été mis en place le programme de Recherche et Développement voué au développement d'un indice macroinvertébrés benthiques DCE-compatible et fonctionnel pour la Martinique. Ce programme de 3 ans, démarré en 2010, a été initié par la DEAL et l'Office de l'Eau de la Martinique, qui en sont les principaux financeurs. L'Onema a également contribué au financement de ce programme. Asconit Consultant en est le maître d'œuvre.

C'est grâce à l'effort de surveillance des cours d'eau mis en place au niveau national, mais aussi grâce aux efforts de la DEAL Martinique et Office de l'Eau Martinique pour compléter ces réseaux en vue de couvrir d'autres parties du territoire et intégrer des sites présentant des spécificités de perturbation/pression, que ce programme considérable a pu se dérouler convenablement.

Les nombreuses données faunistiques récoltées au cours de ce programme (159 relevés) ont pu être couplées à l'importante base de données physico-chimique constituée par l'Office de l'eau, pour chacun des 65 sites de l'étude, et pour chacune des trois campagnes de terrain.

Après avoir établi une typologie des stations de Martinique à partir de la faune macroinvertébrée, 305 métriques ont été calculées, et normalisées en écarts à la référence (EQR). Des critères de sélections ont été appliqués afin de construire l'indice final. Deux méthodes légèrement différentes de sélection des métriques ont été appliquées. Comparé à la méthode développée en annexe, un des avantages de la méthode sélectionnée est qu'elle prend en compte le caractère généraliste des métriques à répondre aux perturbations/pressions : **l'indice répond donc à un grand nombre de perturbations/pressions anthropiques.**

L'indice multimétrique retenu et que nous proposons a été appelé **IBMA-972** pour « Indice Biologique Macroinvertébré des Antilles pour la Martinique ».

L'IBMA-972 se compose des **5 métriques** suivantes :

- le trait relatif au preferendum d'habitat des substrats minéraux grossiers « Blocs Dalles Pierres Galets » calculé sur l'ensemble des prélèvements ;
- l'abondance d'Ephéméroptères dans les phases B+C ;
- la richesse relative en Ephéméroptères + Trichoptères + Coléoptères (ETC) dans les phases A+B ;
- la richesse relative en Prédateurs dans les phases B+C ;
- l'indice de Shannon calculé sur les phases B+C.

Cet indice prend ainsi en compte des caractéristiques taxonomiques (e.g. groupes des Ephéméroptères, Trichoptères et Coléoptères) et un trait biologiques des communautés de macroinvertébrés benthiques.

Quatre des cinq exigences de la DCE sont satisfaites, puisque :

- 1) l'évaluation est établie par rapport à un écart aux conditions de références ;
- 2) la typologie des cours d'eau est prise en compte (des valeurs de références ont été établies pour chaque groupes de stations ;
- 3) l'abondance est prise en compte (abondance des Ephéméroptères et abondance des organismes vivant sur les substrats minéraux grossiers) ;
- 4) la diversité est prise en compte (indice de Shannon et richesse relative de taxons ETC).

La DCE exige que la sensibilité des taxons aux pollutions soit aussi prise en compte (5^{ème} critère). Les scores de polluo-sensibilité des taxons des Antilles ne sont pas connus, et des métriques telles que l'ASPT (Average Score Per Taxon) n'ont alors pu être calculées. En compensation, des métriques telles que ET/Diptères, soit le ratio de la richesse ou abondance relative des Ephéméroptères + Trichoptères (taxons réputés polluo-sensibles pour la plupart) sur celle des diptères (polluo-résistants pour la plupart) ont été calculées, mais n'ont pas été retenues dans la procédure de sélection des métriques.

L'IBMA-972 est **plus performant** que l'indice de Shannon utilisé jusqu'alors pour détecter les situations impactées, il est donc proposé pour évaluer l'état biologique des cours d'eau de Martinique.

Par contre, l'IBMA-972 semble peu performant pour les stations du sud à très forte conductivité naturelle et fortement carbonatées (érosion des roches volcaniques) telles que Paquemar et Beaugard, qui sont peu impactées et qui pourtant sont classées en « très mauvais état ». Parce que située dans la même zone géographique, il est difficile de dire pour la station Grande Case STEP si la classe de « très mauvais état » est justifiée par une perturbation très importante ou par cette conductivité naturellement élevée. **L'indice n'est donc pas applicable en l'état à cette zone géographique, située autour du Vauclin.** Une expertise complémentaire serait nécessaire pour couvrir davantage cette zone de mornes, et acquérir davantage de données sur ces cours d'eau à la géochimie particulière. Des sites complémentaires pourraient être prospectés, mais ils ne rempliraient pas forcément les conditions d'application du protocole de prélèvements DCE (les niveaux d'eau sont très bas, les eaux stagnantes et il n'y a pas d'alternance de faciès rapides/mouilles). Les sites de cette zone pourraient constituer un 4^{ème} cluster dans la typologie et des métriques descriptives des caractéristiques de ce cluster pourraient être considérées dans le calcul de l'indice, à condition 1) de bénéficier de suffisamment de sites de référence pour cette zone et 2) que les principales étapes du protocole de prélèvement utilisé puissent être appliquées (en particulier il faut que les 12 prélèvements puissent être convenablement réalisés).

Au final, l'état écologique des stations dépend du découpage des classes de qualités. Les limites proposées ici ne sont pas arrêtées, elles peuvent être discutées, notamment dans le cadre d'une inter-calibration avec les résultats obtenus sur la Guadeloupe voisine. Un indice semblable dans sa construction à celui proposé ici a en effet été développé pour la Guadeloupe. Une intercalibration des indices multimétriques de Martinique et Guadeloupe (IBMA-972 et IBMA-971) peut être envisagée en jouant sur la définition des classes de qualité. De plus, un indice commun aux deux îles est envisageable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 1992, 2004. Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN), Association française de normalisation Norme homologuée T90-350.
- AFNOR, 2009. Qualité de l'eau. Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes. XP T 90-333. Afnor, 1-15.
- Barbour M.T., Gerritsen J., Snyder B., Stribling J.B., 1999. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton Benthic Macroinvertebrates and Fish, 2nd ed. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA.
- Bernadet C., Touron-Poncet H., Desrosiers C., Compin A., Bargier N., Cereghino R., 2013. Invertebrate distribution patterns and river typology for the implementation of the framework Directive in Martinique, French Lesser Antilles. KMAE, sous presse.
- Bonada N., Prat N., Resh V.H., Statzner B., 2006. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches. *Annu. Rev. Entomol.* (51) 495-523.
- CESAC (Centre d'Ecologie des Systèmes Aquatiques Continentaux), 2001: Clé illustrée de la faune de macroinvertébrés des rivières de Martinique. – Université Paul Sabatier, Toulouse, 87 pp.
- CESAC (Centre d'Ecologie des Systèmes Aquatiques Continentaux), 2002 : Le benthos des rivières du Parc National de la Guadeloupe : Clé de détermination illustrée. – Université Paul Sabatier, Toulouse, 97 pp.
- 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
- Compin A., Céréghino R., 2007. Spatial patterns of macroinvertebrate functional feeding groups in streams in relation to physical variables and land-cover in Southwestern France. *Landscape Ecol.* (22) 1215-1225.
- Cruickshank M.M. and Tomlison R.W., 1996. Application of CORINE land cover methodology to the UK. Some issues raised from Northern Ireland. *Global Ecol Biogeogr*, 4/5, 235-248.
- European Council, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. 1-72.
- Gonçalves V., Raposeiro P. and Costa A.C., 2008. Benthic diatoms and macroinvertebrates in the assessment of the ecological status of Azorean stream. *Limnetica* (27) 317-328.
- Gotelli N.J. and McCabe D.J., 2002. Species co-occurrence: a meta-analysis of J.M. Diamond's assembly rules model. *Ecology* (83) 2091-2096.
- Hering D., Feld C.K., Moog O. and Ofenböck T., 2006. Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. *Hydrobiologia* (566) 311-324.
- Hughes S.J., 2005. Application of the Water Framework Directive to Macaronesian freshwater systems. *Biol Environ* (105) 185-193.

Lim P., Meunier F.J., Keith P. and Noël PY., 2002. Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de la Martinique, Collection Patrimoines naturels volume 51, ISSN: 1281-6213, Paris.

Lepš J. and Šmilauer P., 2003. Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO. Cambridge University Press, Cambridge, 1-282.

Lücke J.D. and Johnson J., 2009. Detection of ecological change in stream macroinvertebrate assemblages using single metric, multimetric or multivariate approaches. *Ecol Indic* (9) 659-669.

Merritt RW, Cummins KW, Berg MB (2008) An introduction to the aquatic insects of North America, 4th edn, revised printing. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque.

Mondy C.P., Villeneuve B., Archaimbault V. and Usseglio-Polatera P., 2012. A new macroinvertebrate-based multimetric index (I2M2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: A taxonomical and trait approach. *Ecol Indic.* (18) 452-467.

Ofenböck T., Moog O., Gerritsen J., Barbour M., 2004. A stressor specific multimetric approach for monitoring running waters in Austria using benthic macro-invertebrates. *Hydrobiologia* (516) 251-268.

POINTIER J.P., 2008. Guide to the freshwater molluscs of the Lesser Antilles. – Conchbooks, Hackenheim, 128 pp.

Smith G.C., Covich A.P. and Brasher A.M.D., 2003. An ecological perspective on the biodiversity of tropical island streams. *BioScience* (53) 1048-1051.

Tachet H, Richoux P., Bournaud M. and Usseglio-Polatera P., 2010. Invertébrés d'eau douce _ Systématique, biologie, écologie. CNRS éditions, Paris.

Ter Braak C.J. and Smilauer F.P., 1998. Reference manual and user's guide to Canoco for Windows: software for canonical community ordination (version 4), Ithaca, NY, USA.

Tomanova S., MOYA N. and Oberdorff T. 2008. Using macroinvertebrate biological traits for assessing biotic integrity of neotropical streams. *River. Res. Applic.* (24) 1230-1239.

Tomanova S. and Usseglio-Polatera P., 2007. Patterns of benthic community traits in neotropical streams: relationship to mesoscale spatial variability. *Fundamental and Applied Limnology / Archiv für Hydrobiologie* (70) 243-255.

ANNEXES

ANNEXE. Tableau 11. Distribution des différents macroinvertébrés pris en compte dans la typologie pour les différents clusters (données carême 2010).

Les nombres indiquent des densités moyennes (individus par m²) ± écart-type. Les numéros ID des taxons sont les mêmes que ceux figurants dans les résultats de la CCA (§ typologie).

Phylum	Classe / Ordre	Famille / Sous-famille	Espèce	ID	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Nemertea				1	-	1.15±0.49	0.15±0.15
Hydracarina				2	-	0.26±0.12	0.61±0.34
Annelida	Achaeta	DugesIIDae		3	2.67±1.39	7.76±4.93	0.91±0.52
	Oligochaeta			4	9.00±3.99	273.01±161.32	29.09±5.02
	Polychaeta			5	-	-	0.45±0.45
Molluscs	Gastropods	Ancylidae		6	-	0.32±0.32	3.64±1.92
		Ampullariidae	Pomacea glauca	7	-	0.19±0.19	0.15±0.15
		Bulinidae	Pleiophysal granulata	8	-	2.44±1.63	-
		Hydrobiidae		9	0.33±0.22	-	19.39±18.56
		Neritidae	Neritina sp.	10	0.17±0.17	81.86±70.91	13.94±13.28
		Physidae	Physa sp.	11	-	48.97±28.95	1.52±0.76
		Planorbidae		12	0.17±0.17	0.06±0.06	438.03±437.86
		Thiaridae		13	4.50±2.46	962.24±397.07	305.00±136.39
			Pisidium sp.	14	0.17±0.17	1.79±1.41	0.15±0.15
Crustacea	Ostracoda			15	0.17±0.17	2.18±0.92	1.06±0.75
	Decapoda	Atyidae	Atya sp.	16	0.17±0.17	6.73±1.98	0.30±0.20
			Micratya poeyi	17	10.83±4.72	32.44±11.56	5.76±2.23
			Jonga serrei	18	-	1.22±1.15	0.61±0.41
			Xiphocaris elongata	19	-	0.26±0.20	0.91±0.35
		Palaemonidae	Macrobrachium sp.	20	-	8.40±2.56	3.64±0.97
		Grapsidae	Sesarma sp.	21	0.33±0.33	0.06±0.06	-
		Pseudothelphusidae	Guinotia sp.	22	1.00±0.67	-	-
Insecta	Trichoptera	Calamoceratidae	Phylloicus sp.	23	0.50±0.25	-	-
		Ecnomidae	Austrotinodes sp.	24	1.00±0.83	-	-
		Helicopsychidae	Helicopsyche sp.	25	5.50±2.61	2.18±0.99	-

		Hydropsychidae	Smicridea sp.	26	162.50±60.74	34.17±13.45	1.52±1.52
		Hydroptilidae	Alisorichia sp.	27	-	0.23±0.19	-
			Hydroptila sp.	28	2.50±1.80	2.95±1.89	-
			Metrichia sp.	29	0.33±0.33	0.13±0.09	-
			Neotrichia sp.	30	6.00±4.58	4.81±1.54	4.24±2.19
			Oxyethira sp.	31	-	0.32±0.32	-
			Zumatrichia sp.	32	-	2.05±0.78	-
		Philopotamidae	Chimarra sp.	33	39.67±12.40	11.35±5.13	0.15±0.15
		Polycentropodidae	Cernotina sp.	34	0.50±0.50	0.26±0.26	0.15±0.15
			Polyplectropus sp.	35	8.33±4.98	-	-
		Xiphocentronidae	Xiphocentron fuscum	36	9.33±2.46	5.90±2.92	-
	Ephemeroptera	Baetidae	Unidentified	37	2.67±2.49	0.51±0.30	0.30±0.30
			Americabaetis spinosus	38	143.83±82.34	135.19±22.54	148.18±85.42
			Callibaetis sp.	39	-	-	0.45±0.32
			Cloedes caraibensis	40	5.17±2.97	0.13±0.09	1.36±0.92
			Fallceon ater	41	42.33±17.47	5.64±1.83	4.70±2.78
		Caenidae	Caenis sp.	42	0.17±0.17	1.09±0.46	6.67±2.64
			Caenis femina	43	0.17±0.17	2.56±0.83	78.94±46.80
			Caenis catherinae	44	-	1.79±0.62	15.91±6.13
		Leptohiphidae	Undetermined	45	19.67±10.80	18.08±6.42	0.91±0.91
			Leptohiphes sp.	46	139.17±54.21	135.51±37.07	3.64±2.50
			Tricorythodes griseus	47	98.17±29.33	60.64±14.77	5.45±3.86
		Leptophlebiidae	Undetermined	48	2.50±1.81	0.13±0.13	1.52±1.22
			Hagenulopsis guadeloupensis	49	10.50±4.57	0.13±0.09	1.06±0.91
			Terpides sp.	50	1.00±0.83	1.67±0.68	23.03±19.03
	Heteroptera	Gerridae	Undetermined	51	-	0.06±0.06	1.36±0.54
			Limnogonus sp.	52	-	-	-
			Trepobates sp.	53	-	-	-
		Mesoveliidae	Mesovelia sp.	54	-	0.32±0.19	0.61±0.46
		Veliidae	Rhagovelia sp.	55	14.00±8.69	12.44±3.23	4.24±2.53

	Coleoptera	Elmidae	Elsianus sp.	56	4.50±1.83	2.88±1.02	-
			Hexanchorus sp.	57	26.17±14.89	5.32±1.34	-
		Psephenidae	Psephenops sp.	58	9.67±3.16	0.06±0.06	0.15±0.15
		Staphylinidae		59	0.50±0.25	0.58±0.58	0.30±0.30
	Diptera	Blephariceridae		60	2.30±1.99	-	-
		sF/ Ceratopogoninae		61	0.67±0.37	3.33±1.84	0.76±0.47
		sF/ Forcypomyiinae	Atrigopogon sp.	62	4.67±1.95	0.58±0.23	0.30±0.20
		Chironomidae	Undetermined	63	0.33±0.22	0.96±0.55	-
		sF/ Chironominae	Undetermined	64	0.83±0.57	0.19±0.19	-
			Chironomini	65	20.67±9.73	110.38±70.33	53.64±12.24
			Tanytarsini	66	21.00±14.07	23.08±10.17	210.00±170.32
		sF/ Orthocladinae		67	41.83±30.20	166.92±69.11	9.70±5.15
		sF/ Tanypodinae		68	18.50±8.15	16.99±4.49	21.67±4.09
			Harrisius spp.	69	6.00±3.14	1.54±0.47	0.15±0.15
		Culicidae		70	-	-	1.21±0.81
		Empididae	Hemerodromia sp.	71	2.33±1.09	4.94±1.58	0.15±0.15
		Ephydriidae		72	0.17±0.17	0.45±0.25	1.52±1.52
		Limoniidae		73	0.33±0.33	0.06±0.06	-
		Psychodidae	Undetermined	74	1.00±0.37	0.90±0.58	13.48±13.32
			Maruina sp.	75	0.33±0.33	0.06±0.06	-
		Rhagionidae	Chrysopilus sp.	76	0.33±0.22	0.06±0.06	-
		Simuliidae		77	2.83±1.24	0.45±0.20	-
		Syrphidae		78	-	0.32±0.32	-
	Odonata	Coenagrionidae	Undetermined	79	1.00±0.71	0.38±0.23	1.97±1.07
			Enallagma coecum	80	2.50±2.50	5.58±2.82	3.33±1.25
			Ischnura ramburii	81	0.17±0.17	0.06±0.06	0.91±0.76
		Libellulidae	Undetermined	82	1.67±1.31	0.19±0.11	1.97±1.36
			Macrothemys celleno	83	1.17±0.50	-	-
	Lepidoptera	Pyralidae		84	4.17±2.58	1.15±0.54	0.61±0.46

ANNEXE : Sélection des métriques selon la méthode de Barbour et al., 1999.

En prenant en compte la liste des 69 métriques ayant un fort pouvoir discriminant et une forte stabilité dans les conditions de référence (cf. § « sélection des métriques »), il est possible de sélectionner les métriques suivant la méthode dictée par Barbour et al., 1999.

Selon cet auteur, l'indice final doit être composé de métriques issues de 4 catégories primaires de métriques : (1) les mesures de la richesse de l'assemblage, (2) les mesures de la composition, (3) les mesures de la tolérance des taxons par rapport aux perturbations, et (4) les mesures des stratégies trophiques/habitat des taxons.

Tableau 12. Sélection des métriques selon Barbour et al., 1999 : Exemples de métriques potentielles pour chacune des 4 catégories de métriques (extrait du tableau original).

	Richness Measures	Composition Measures	Tolerance Measures	Trophic/Habit Measures
Benthic Macroinvertebrate	<ul style="list-style-type: none"> • No. Total taxa • No. EPT taxa • No. Ephemeroptera taxa • No. Plecoptera taxa • No. Trichoptera taxa 	<ul style="list-style-type: none"> • % EPT • % Ephemeroptera • % Chironomidae 	<ul style="list-style-type: none"> • No. Intolerant Taxa • % Tolerant Organisms • Hilsenhoff Biotic Index (HBI) • % Dominant Taxon 	<ul style="list-style-type: none"> • No. Clinger taxa • % Clingers • % Filterers • % Scrapers

Dans notre cas, une légère adaptation est nécessaire puisque nous ne disposons pas d'informations sur les tolérances des taxons. Nous avons remplacé ce critère par les indices composites (ex : Shannon). Nous considérons donc les 4 catégories suivantes :

- Les métriques relatives à la mesure de la richesse taxonomiques des communautés ;
- Les métriques relatives à la composition des communautés ;
- Les métriques composites ;
- Les métriques « Trait d'histoire de vie ».

Une fois les 69 métriques classées selon ces 4 catégories primaires, nous sélectionnons dans chaque catégorie la métrique qui a la plus forte efficacité de discrimination (DE) (Tableau 13).

Au final, nous avons un indice multi-métrique composé de 4 métriques :

- « ColeopteraS_AB » : richesse relative en coléoptères dans les phases A+B ;
- « ETCQ_BC » : abondance relative en Ephéméroptères, Trichoptères et coléoptères dans les phases B+C ;
- « BergerParker_BC » : l'indice de diversité de Berger-Parker calculé sur les phases B+C ;
- « BlocsPierresCaillouxGalets » : trait de préférence d'habitat pour les substrats minéraux grossiers, calculé sur la totalité des prélèvements.

Il se calcule suivant la même équation que l'indice à 5 métriques construit dans le corps du rapport, à savoir :

$$\text{Indice} = \frac{\sum (DE_m \times EQR_m)}{\sum DE_m} \quad [4]$$

avec DE_m l'efficacité de discrimination de la métrique « m » et EQR_m la valeur d'EQR de la métrique « m ».

Tableau 13. Les 69 métriques candidates et les 4 métriques finales pour chacune des 4 catégories de métriques

Métriques relatives à la richesse taxonomique	Métriques relatives à la composition	Métriques composites	Métriques "traits"	
ColeopteraS_reach	GastropodaQ_reach	Menhinick_reach	branche	
RichesseRelativePredateurs_reach	ETQ_reach	Margalef_reach	NageurSurface	
Predateursautres_S_reach	ETCQ_reach	Dominance_B	NageurPleineeau	
CrustaceaS_A	GOLD_B	Simpson_1.D_B	fouisseur	
Taxa_S_B	GastropodaQ_B	Shannon_H_B	fixeTemporaire	
GastropodaS_B	ETQ_B	Menhinick_B	detritusinf1mm	
ColeopteraS_C	ETCQ_B	Equitability_J_B	debrisVegetaux	
GastropodaS_C	GOLD_C	BergerParker_B	macrophytes	
ColeopteraS_AB	GastropodaQ_C	IB971_B	debrisAnimauxSup1mm	
TrichopteraS_AB	ETQ_C	ShannonFamily_B	predateur	
ETCS_AB	ETCQ_C	Dominance_C	BlocsPierresCaillouxGalets	
RichesseRelativePredateurs_AB	GastropodaQ_AB	Simpson_1.D_C	macrophytes.1	
Predateursautres_S_AB	GOLD_BC	Shannon_H_C	vase	
Taxa_S_BC	EphemeropteraQ_BC	Brillouin_C		
ColeopteraS_BC	GastropodaQ_BC	Dominance_BC		
TrichopteraS_BC	ETQ_BC	Simpson_1.D_BC		
ETCS_BC	ETCQ_BC	Shannon_H_BC		
RichesseRelativePredateurs_BC		Brillouin_BC		
Predateursautres_S_BC		Equitability_J_BC		
		BergerParker_BC		
Métriques avec le plus fort DE :	ColeopteraS_AB	ETCQ_BC	BergerParker_BC	BlocsPierresCaillouxGalets

Cet indice a une efficacité de discrimination (DE) égale à 1 en 2011, et un coefficient de variation dans les LIRRs égal à 0.14 (Figure 18). Les limites des classes de qualité sont présentées dans le Tableau 14.

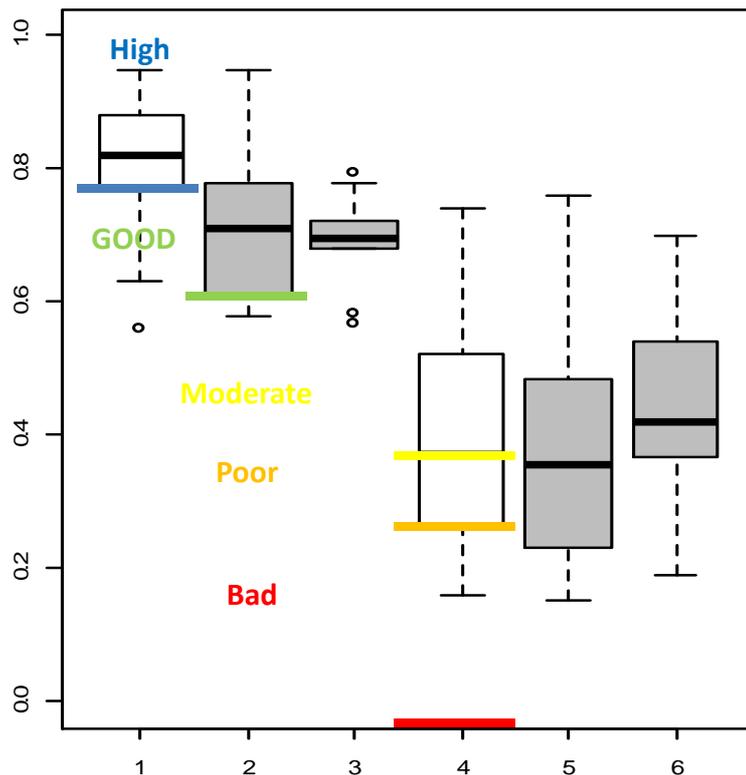


Figure 18. Distribution des valeurs de l'indice créé suivant la méthode de Barbour en conditions de références (IRRs) et impactées (IRRs) et limites des classes de qualité. Boîtes à moustaches blanches : jeu de données de carême 2011 qui a servi à la construction de l'indice ; boîtes à moustaches grises : jeu de données test (carême 2010 et 2012).

Tableau 14. Limites des classes de qualité pour l'indice créé suivant la méthode de Barbour.

TME	ME	EM	BE	TBE
[0 ; 0.27 [	[ 0.27 ; 0.37 [	[ 0.37 ; 0.62 [	[ 0.62 ; 0.77 [	[ 0.77 ; 1]

ANNEXE. Tableau 15. Liste des métriques à tester

Métrique	Description	PHASE					
		A+B+C	A	B	C	A+B	B+C
Taxa_S	Richesse taxonomique (nombre de taxons)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Individuals_D	Abondance (nombre d'individus)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dominance	Indice de dominance	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Simpson_1-D	Indice de dominance de Simpson	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shannon_H	Indice de diversité de Shannon	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Evenness_eHS	Indice d'équitabilité	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Brillouin	Indice de diversité de Brillouin	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Menhinick	Indice de diversité de Menhinick	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Margalef	Indice de diversité de Margalef	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Equitability_J	Indice d'Equitabilité de Pielou	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fisher_alpha	Indice de diversité de Fisher α	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BergerParker	Indice de diversité de Berger-Parker	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1-GOLD	1-Abondance relative des Gastéropodes +Oligochètes +Diptères	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ColeopteraS	Richesse relative en Coléoptères (%S)	✓	✓		✓	✓	✓
CrustaceaS	Richesse relative en Crustacés (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DipteraS	Richesse relative en Diptères (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EphemeropteraS	Richesse relative en Ephéméroptères (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GastropodaS	Richesse relative en mollusques Gastéropodes (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HemipteraS	Richesse relative en Hémiptères (%S)	✓				✓	
Nemertias	Richesse relative en Némertiens (%S)	✓	✓	✓		✓	✓
OdonataS	Richesse relative en Odonates (%S)	✓					
OligochaetaS	Richesse relative en Oligochètes (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TrichopteraS	Richesse relative en Trichoptères (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TurbellariaS	Richesse relative en Turbellariés (%S)	✓					✓
ColeopteraQ	Abondance relative en Coléoptères (%Q)	✓	✓		✓	✓	✓
CrustaceaQ	Abondance relative en Crustacés (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DipteraQ	Abondance relative en Diptères (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EphemeropteraQ	Abondance relative en Ephéméroptères (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GastropodaQ	Abondance relative en mollusques Gastéropodes (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HemipteraQ	Abondance relative en Hémiptères (%Q)	✓	✓			✓	
NemertiasQ	Abondance relative en Némertiens (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
OdonataQ	Abondance relative en Odonates (%Q)	✓					
OligochaetaQ	Abondance relative en Oligochètes (%Q)	✓	✓	✓		✓	✓
TrichopteraQ	Abondance relative en Trichoptères (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TurbellariaQ	Abondance relative en Turbellariés (%Q)	✓			✓		✓
ETS	Richesse relative en Ephéméroptères+Trichoptères (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ETQ	Abondance relative en Ephéméroptères+Trichoptères (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ETCS	Richesse relative en Ephéméroptères+Trichoptères+ Coléoptères (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ETCQ	Abondance relative en Ephéméroptères+Trichoptères+Coléoptères (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ETDipteraS	Rapport entre la richesse relative des Ephéméroptères+Trichoptères et celle des diptères	✓				✓	✓
ETDipteraQ	Rapport entre l'abondance relative des Ephéméroptères+Trichoptères et celle des diptères	✓				✓	✓
ET(Oligo+Diptera)Q	Rapport entre l'abondance relative des Ephéméroptères+Trichoptères et celles des oligochètes+diptères	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IB971	Indice Biotique de la Guadeloupe	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nfamilles	Nombre de familles	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nfamily_ET	Nombre de familles d'Ephéméroptères+Trichoptères	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ShannonFamily	Indice de Shannon calculé au niveau des familles	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AbondanceRelativePredateurs	Abondance relative des taxons prédateurs (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PredateursautresQ	Rapport entre l'abondance relative des prédateurs et celle des autres taxons (%Q)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RichesseRelativePredateurs	Richesse relative des prédateurs (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Predateursautres_S	Rapport entre l'abondance relative des prédateurs et celle des autres taxons (%S)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
tegument	Abondance relative des taxons ayant cette technique de respiration	✓					
branchie	Abondance relative des taxons ayant cette technique de respiration	✓					
plastron	Abondance relative des taxons ayant cette technique de respiration	✓					
spiracle	Abondance relative des taxons ayant cette technique de respiration	✓					
vol	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
NageurSurface	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
NageurPleineeau	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
Marcheur	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
fouisseur	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
interstitiel	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
fixeTemporaire	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
fixePermanent	Abondance relative des taxons ayant ce moyen de locomotion	✓					
microorganismes	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
detritusinf1mm	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
debrisVegetaux	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
microphytes	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
macrophytes	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
debrisAnimauxSup1mm	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
microinvertebres	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
macroinvertebres	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
vertebres	Abondance relative des taxons ayant ce régime alimentaire	✓					
absorbeur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
mangeurDeSedimentsFins	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
broyeur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
racleur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					

filtreur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
perceur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
predateur	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
parasite	Abondance relative des taxons ayant ce comportement alimentaire	✓					
BlocsPierresCaillouxGalets	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
Graviers	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
sable	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
limon	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
macrophytes	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
microphytes	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
BranchesRacines	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
DebrisOrganiquesLitiere	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					
vase	Abondance relative des taxons vivant sur ce substrat	✓					

ANNEXE. Tableau 16. Valeurs de DE et CV des 69 métriques candidates, et résultats des régressions linéaires simples (critère de faible sélectivité des variables) pour la sélection des métriques.

NS : Non significatif ; * : singificatif ; ** : très significatif ; *** : hautement significatif ($\alpha=0.05$).

Métriques	DE	CV	Réponse aux variables :			Variables "qualité de l'eau"													Variables "dégradation de l'habitat"		
			"Qualité de l'eau"	"Dégradation de l'habitat"	Total	Oxygenation	DBO ₅	Ammonium	Nitrates	Phosphore total	Matière en suspension	pH	Conductivité	Potassium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	Silice	% Terres urbanisées	% Terres agricoles	% Forêts
Menhinick_reach	0.65	0.21	5	1	6	NS	*	NS	*	*	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS
BergerParker_B	0.64	0.20	3	2	5	NS		NS	*	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	*	NS	**
BergerParker_BC	0.75	0.23	11	3	14	**	**	*	*	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	*	*	*
BlocsPierresCaillouxGalets	0.92	0.30	9	2	11	**	*	NS	NS	*	**	NS	***	***	***	**	***	NS	NS	**	*
branchie	0.64	0.14	0	1	1	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
Brillouin_BC	0.69	0.22	11	2	13	***	*	*	**	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	*	NS	*
Brillouin_C	0.66	0.21	9	2	11	**		NS	**	*	***	NS	***	***	***	***	**	NS	NS	*	*
ColeopteraS_AB	0.98	0.27	11	2	13	**		*	**	*	***	*	***	***	***	***	***	NS	NS	***	*
ColeopteraS_BC	0.82	0.20	8	2	10	*		NS	NS	NS	*	**	**	NS	**	*	*	*	NS	***	***
ColeopteraS_C	0.76	0.20	0	2	2	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	**
ColeopteraS_reach	0.81	0.30	11	2	13	**		NS	*	*	***	**	***	***	***	**	***	*	NS	***	**
CrustaceaS_A	0.75	0.19	2	2	4	NS		NS	***	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	*
debrisAnimauxSup1mm	0.79	0.11	1	3	4	NS		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	***	***
debrisVegetaux	0.65	0.20	0	2	2	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	**
detritusinf1mm	0.62	0.21	1	2	3	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	**	***	
Dominance_B	0.66	0.15	2	2	4	NS		NS	*	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	**
Dominance_BC	0.69	0.12	11	2	13	**	**	*	*	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	*	*	NS
Dominance_C	0.65	0.21	8	2	10	*		NS	**	NS	***	NS	***	**	***	**	**	NS	NS	*	*
EphemeropteraQ_BC	0.69	0.29	10	1	11	***		**	*	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	NS	**	NS
Equitability_J_B	0.61	0.19	1	1	2	NS		NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
Equitability_J_BC	0.66	0.20	10	0	10	*	**	NS	*	*	***	NS	***	**	***	**	**	NS	NS	NS	NS
ETCQ_B	0.96	0.11	1	2	3	NS		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	***	

ETCQ_BC	0.98	0.12	3	3	6	NS		NS	***	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	***	*	***
ETCQ_C	0.72	0.17	1	3	4	NS		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	*	***
ETCQ_reach	0.67	0.30	0	2	2	NS		NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	**
ETCS_AB	0.79	0.19	12	2	14	***	*	**	**	***	***	***	***	***	***	***	**	NS	*	*	NS	NS
ETCS_BC	0.77	0.05	3	1	4	NS		NS	***	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
ETQ_B	0.87	0.09	1	2	3	NS		NS	**	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	***
ETQ_BC	0.96	0.10	1	3	4	NS		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	*	***
ETQ_C	0.74	0.15	1	2	3	NS		NS	*	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	NS	***
ETQ_reach	0.65	0.29	0	2	2	NS		NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	**
fixeTemporaire	0.83	0.29	3	1	4	NS		NS	NS	NS	*	NS	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	**	NS
fouisseur	0.75	0.05	0	1	1	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
GastropodaQ_AB	0.66	0.07	0	1	1	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**
GastropodaQ_B	0.80	0.01	0	2	2	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	***
GastropodaQ_BC	0.83	0.01	0	2	2	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	***
GastropodaQ_C	0.77	0.01	0	2	2	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	***
GastropodaQ_reach	0.71	0.05	0	1	1	NS		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
GastropodaS_B	0.62	0.18	9	0	9	*	***	NS	NS	**	*	NS	***	*	***	**	***	NS	NS	NS	NS	NS
GastropodaS_C	0.62	0.07	1	2	3	NS		NS	*	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	***
GOLD_B	0.94	0.11	1	2	3	NS		NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS		NS	**	NS	NS	NS	**	NS	**
GOLD_BC	0.96	0.14	3	3	6	NS		NS	**	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	***	*	***
GOLD_C	0.69	0.17	2	3	5	NS		NS	*	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	*	***
IB971_B	0.61	0.25	8	0	8	***		**	NS	**	***	NS	**	***	***	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
macrophytes	0.75	0.22	4	2	6	NS		NS	NS	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*	NS	NS	NS	**	**
macrophytes.1	0.69	0.28	4	3	7	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	***	NS	***	NS	**	NS	*	***	***	***
Margalef_reach	0.61	0.27	10	0	10	***		***	**	***	***	NS	***	***	***	***	**	NS	NS	NS	NS	NS
Menhinick_B	0.60	0.25	10	0	10	***	*	*	NS	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	NS	NS	NS	NS
NageurPleineEau	0.61	0.22	9	1	10	**		NS	NS	*	***	NS	***	**	***	***	**	*	NS	**	NS	NS
NageurSurface	0.79	0.32	8	2	10	**		NS	NS	*	***	NS	***	***	***	**	**	NS	NS	***	**	**
predateur	0.61	0.32	2	2	4	NS		NS	*	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
Predateursautres_S_AB	0.71	0.08	10	1	11	***		***	NS	***	**	**	***	***	***	***	***	NS	NS	***	NS	NS

Predateursautres_S_BC	0.62	0.11	11	1	12	***	*	***	NS	***	**	**	***	***	***	***	***	NS	NS	*	NS
Predateursautres_S_reach	0.64	0.19	10	1	11	***		***	NS	***	***	**	***	***	***	***	**	NS	NS	*	NS
RichesseRelativePredateurs_AB	0.74	0.10	10	1	11	***		**	NS	***	**	*	***	***	***	***	***	NS	NS	***	NS
RichesseRelativePredateurs_BC	0.63	0.14	11	1	12	***	*	**	NS	***	**	**	***	***	***	***	***	NS	NS	*	NS
RichesseRelativePredateurs_reach	0.65	0.21	10	1	11	***		**	NS	**	***	**	***	***	***	***	**	NS	NS	**	NS
Shannon_H_B	0.68	0.27	9	2	11	*	*	NS	*	*	***	NS	**	**	**	*	NS	NS	*	NS	*
Shannon_H_BC	0.72	0.24	11	2	13	**	**	*	**	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	*	NS	*
Shannon_H_C	0.65	0.22	9	2	11	**		NS	**	*	***	NS	***	***	***	***	**	NS	NS	*	*
ShannonFamily_B	0.61	0.22	10	0	10	***	*	***	NS	***	***	NS	***	***	***	***	***	NS	NS	NS	NS
Simpson_1.D_B	0.67	0.15	2	2	4	NS		NS	*	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	**
Simpson_1.D_BC	0.69	0.12	11	2	13	**	**	*	*	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	*	*	NS
Simpson_1.D_C	0.66	0.21	8	2	10	*		NS	**	NS	***	NS	***	**	***	**	**	NS	NS	*	*
Taxa_S_B	0.61	0.27	11	1	12	***		*	*	**	***	*	***	***	***	***	***	NS	NS	*	NS
Taxa_S_BC	0.60	0.28	10	1	11	***		**	**	**	***	NS	***	***	***	***	***	NS	NS	*	NS
TrichopteraS_AB	0.83	0.16	8	3	11	NS	*	NS	***	NS	*	NS	**	**	*	*	**	NS	***	*	***
TrichopteraS_BC	0.74	0.25	8	3	11	NS		NS	*	*	**	NS	***	***	***	***	***	NS	**	*	**
vase	0.78	0.23	8	2	10	*		NS	NS	*	***	NS	***	***	***	**	**	NS	NS	**	**



ASCONIT Consultants
Agence Caraïbes
ZI Champigny
97224 DUCOS

♦
Tél. : 05.96.63.55.78 / Fax : 05.96.63.55.78
Mobile : 06.96.25.54.10
E-mail : nicolas.bargier@asconit.com (Agence de Lyon)