

Académie de Montpellier

# Université Montpellier II

(Sciences et Techniques du Languedoc)

Statistique des Sciences de la Vie et de la Santé

Master 2

Parcours professionnel

Méthodes Statistiques des Industries Agronomiques  
Agroalimentaires et Pharmaceutiques

Memoire sur le stage

*Etude de l'impact des résurgences d'eau douce sur la  
biocénose des récifs coralliens de l'île de La Réunion :  
analyses multifactorielles et définition de bioindicateurs*

Effectué du 18 février au 16 aout 2013

au sein de

l'Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines

sous la direction du

Dr. Mayalen Zubia et du Dr. Olivier Flores

par

M. Mathieu Depetris

soutenu le

10 septembre 2013

devant la comission d'examen composée du

Dr. Christelle Reynes, Pr Jean-Noël Bacro et du Pr Robert Sabatier



# Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier mes maîtres de stage, les Docteurs Mayalen ZUBIA et Olivier FLORES pour m'avoir confié ce travail de recherches. Leurs précieux conseils ont été les moteurs qui ont permis l'élaboration de ce rapport. Merci enfin aux Docteurs Jean-Pascale QUOD et Jean TURQUET qui m'ont ouvert les portes de l'Agence pour le Recherche et la Valorisation Marines.

Je remercie tout particulièrement le Docteur Pascale CHABANET, le Docteur Pascale CUET, Monsieur Nicolas LOISEAU et Monsieur Jean-Benoît NICET pour leur aide qui m'a permis de mieux connaître et appréhender la richesse des écosystèmes récifaux de l'île de La Réunion.

J'adresse un grand merci au Professeur Robert SABATIER pour ces conseils et sa disponibilité sans faille qui m'ont permis de pouvoir arriver à définir des bioindicateurs potentiels.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Marc GALINDO et le Docteur David GROSSER pour leurs aides dans la conception de la base de données EUTROLAG.

Je remercie aussi sans exception tous les membres de l'Agence pour le Recherche et la Valorisation Marines avec qui j'ai eu la joie et le plaisir de travailler pendant ces quelques mois.

Je tiens aussi à remercier Madame Catherine CLAUSELS ainsi que la patience de mes nombreux correcteurs.

Pour finir, je remercie tous les organismes et personnes qui m'ont donné un peu de leur temps et de leurs connaissances pour permettre la réalisation de ce rapport.



# Sommaire

Lexique

Table des figures

A. Introduction : le projet EUTROLAG .....	1
1. Contexte global .....	1
2. Matériels et méthodes du projet EUTROLAG .....	4
B. Construction de la base de données EUTROLAG.....	7
1. Création du modèle.....	7
2. Création de la base de données sous Access et utilisation sous R .....	8
C. Statistiques descriptives .....	9
1. Compartiment hydrologique.....	9
2. Compartiment ichtyologique.....	11
3. Compartiment algal.....	14
4. Compartiment benthique.....	22
D. Recherche des biodindicateurs.....	25
1. Etablissement des groupes de stations.....	26
2. Analyse Factorielle Discriminante linéaire par compartiments.....	27
3. Analyse Factorielle Discriminante linéaire sur les 3 compartiments.....	32
4. Analyse des variables sélectionnées.....	33
5. Analyse discriminante multitableaux : STATIS-LDA.....	34
6. Interprétation des résultats et discussion.....	35
7. Critiques.....	39
E. Conclusions et perspectives.....	40
Références bibliographiques	



# Lexique

**Anthropique** : relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

**Anthropisation** : transformation d'espaces, de paysages, d'écosystèmes ou de milieux semi-naturels sous l'action de l'homme.

**ARVAM** : Agence pour la Recherche et la Valorisation Marine.

**Attribut** : dans une base de données, les attributs sont les noms des colonnes qui représentent les constituants de l'entité.

**Bassin versant** : territoire qui draine l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun (cours d'eau ou mer).

**Belts transects** : méthode d'échantillonnage (voir [Hill & Wilkinson 2004](#)).

**Benthos (benthique)** : ensemble des organismes aquatiques vivant à proximité du fond des mers et océans, des lacs et cours d'eau.

**Bio-indicateur** : un bio-indicateur est une espèce vivante (animale ou végétale) qui, par sa présence ou son absence, son abondance ou sa rareté, permet d'apprécier le degré de pollution de l'eau ou de l'air.

**Biote** : ensemble des organismes vivants présent dans un habitat.

**Bloom** : un bloom ou une efflorescence est une augmentation relativement rapide de la concentration d'une ou plusieurs espèces dans un système aquatique.

**BRGM** : Bureau des Recherches Géologiques et Minières.

**Clé étrangère** : dans une base de données, une clé étrangère est une contrainte qui garantit l'intégrité référentielle entre deux tables. Une clé étrangère identifie une colonne ou un ensemble de colonnes d'une table comme référençant dans une colonne ou un ensemble de colonnes d'une autre table.

**Clé primaire** : dans une base de données, une clé primaire est une contrainte d'unicité qui permet d'identifier de manière unique un enregistrement dans une table (une clé primaire peut être composée d'un ou plusieurs champs de la table).

**CPCE** : Coral Point Count with Excel extensions est un logiciel qui permet le détournage du benthos et le calcul de la superficie à partir de photographie orthogonale.

**DCE** : Directive Cadre sur l'Eau.

**Dépendances fonctionnelles** : un groupe d'attributs Y dépend fonctionnellement d'un groupe d'attributs X, si et seulement si la connaissance d'une valeur de X permet de connaître sans ambiguïté la valeur correspondante de Y.

**DOM** : Département d'Outre-Mer.

**ECOMAR** : Laboratoire d'Ecologie Marine de l'Université de La Réunion.





**Entité** : dans une base de données, une entité est un objet, un sujet ou une notion en rapport avec le domaine d'activité pour lequel la base de données est utilisée.

**Espèce cryptique** : en biologie, un complexe d'espèces cryptiques est un groupe d'organismes qui satisfait certaines définitions d'une espèce (isolement reproductif, lignée génétiques avec une importante différenciation génétique par rapport à d'autres espèces,...), indiquant une divergence ancienne, mais qui ne sont pas distinguable d'un point de vue morphologique.

**Espèce nitrophile** : espèce qui va se développer dans des milieux ou se trouve de forts apports en azote.

**Espèce phosphorophile** : espèce qui va se développer dans des milieux ou se trouve de forts apports en phosphate.

**Espèce sténocé** : cela désigne une espèce qui présente une niche écologique étroite et une faible capacité d'adaptation lors des variations de facteurs écologiques propre à son habitat.

**Facteur abiotique** : en opposition aux facteurs biotiques, les facteurs abiotiques représentent les facteurs physico-chimiques d'un écosystème influençant un ensemble d'êtres vivants donné.

**Facteur biotique** : en écologie, les facteurs biotiques représentent l'ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème.

**GCRMN** : Global Coral Reef Monitoring Network = réseau mondial de suivi des récifs coralliens.

**GLOBICE** : Groupe Local d'Observation et d'Identification des Cétacés.

**Ichtyofaune** : Partie de la faune qui rassemble les poissons.

**IFREMER** : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.

**ILO** : Irrigation du Littoral Ouest

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement.

**Kélonia** : Observatoire des tortues marines.

**LIT** : Linear Intercept Transect

**MES** : Matière En Suspension.

**NQE** : Normes de Qualité Environnementale.

**ODBC** : Open DataBase Connectivity, c'est un logiciel qui permet à une application information (un SGBD) de manipuler une ou plusieurs bases de données.

**OLE** : Office de L'Eau.

**Oligotrophe** : milieu pauvre en nutriments ou substances nutritives.

**Platier (récifal)** : surface plane légèrement inclinée vers la mer située avant la barrière récifale



**Platier récifal** : surface plane légèrement inclinée vers la mer située entre la plage et la barrière récifale.

**Radiale** : ligne fictive perpendiculaire à la plage, partant d'un point fixe de la plage vers le large.

**Ravine** : une ravine est une incision linéaire. Cette forme d'érosion est créée par le ruissellement concentré des eaux sur un versant. Les ravines peuvent constituer des réseaux et rejoindre le réseau hydrographique.

**Réseau Reef Check** : méthode de suivi simplifié des récifs coralliens, adaptée à des non spécialistes et donc plus facile à mettre en œuvre en vue d'associer la société civile ou les usagers de la mer à la surveillance de leurs récifs coralliens.

**SGBD** : Système de Gestion de Base de Données.

**SGD** : résurgences d'eau douce (Submarine Groundwater Discharge en anglais).

**Transect** : ligne fictive parallèle à la plage dont le point de départ se trouve sur une radiale.

**Travée détritique/sableuse** : une travée détritique/sableuse est un terme désignant, dans un écosystème corallien, un « couloir » sans développement corallien qui est composé de débris coralliens et/ou de sable. Par opposition, une travée corallienne est un « couloir » où l'on observe un développement corallien. La succession des travées détritiques/sableuses et coralliennes constituent ce qu'on appelle un éperon sillon.

**TURF** : assemblages algaux d'une hauteur inférieure à 2 cm



# Tables des figures

<b>Figure 1 :</b> Représentation schématique de la définition de la qualité d'une masse d'eau au titre de la DCE .....	Page 1
<b>Figure 2 :</b> Image satellite des différents secteurs étudiés durant l'étude .....	Page 4
<b>Tableau 1 :</b> Localisation des différentes stations sélectionnées pour le suivi du programme EUTROLAG .....	Page 5
<b>Tableau 2 :</b> Représentation des différentes campagnes d'échantillonnages .....	Page 5
<b>Figure 3 :</b> Protocole d'échantillonnage de la méthode LIT (Linear Intercept Transect) .....	Page 6
<b>Figure 4 :</b> Schéma du protocole d'échantillonnage BELT .....	Page 6
<b>Tableau 3 :</b> Indice d'abondance relatif utilisé lors du programme EUTROLAG .....	Page 7
<b>Figure 5 :</b> Schéma illustrant la méthode des photoquadrats .....	Page 7
<b>Figure 6 :</b> Modèle entité/association de la base de données du programme EUTROLAG .....	Page 8
<b>Figure 7 :</b> Modèle relationnel de la base de données du programme EUTROLAG .....	Page 8
<b>Figure 8 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée (données compartiment hydrologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 10
<b>Figure 9 :</b> Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite réalisée (données compartiment hydrologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 10
<b>Figure 10 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 10
<b>Tableau 4 :</b> Bilan des résultats de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 11
<b>Figure 11 :</b> Abondance des petits poissons herbivores (2-3 cm) en fonction du mois .....	Page 11
<b>Figure 12 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée (données compartiment ichtyologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 12
<b>Figure 13 :</b> Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée (données compartiment hydrologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 12
<b>Figure 14 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 12
<b>Tableau 5 :</b> Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 13
<b>Figure 15 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'ANSC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 13
<b>Tableau 6 :</b> Bilan des résultats de l'ANSC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment	



ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 13

**Figure 16 :** Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin (après fusion des espèces de Stegastes) .....Page 13

**Tableau 7 :** Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin (après fusion des espèces de Stegastes) .....Page 14

**Figure 17 :** Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs de « présence/absence » des (données composition spécifique algale) mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 14

**Figure 18 :** Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée sur les données de « présence/absence » (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 14

**Figure 19 :** Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur somme de l'indice de « présence/absence » (données composition spécifique algale) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 15

**Tableau 8 :** Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur somme de l'indice de « présence/absence » (données composition spécifique algale) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 15

**Figure 20 :** Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 15

**Figure 21 :** Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée sur l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 16

**Figure 22 :** Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 16

**Tableau 9 :** Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 16

**Figure 23 :** Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée les variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin ...Page 17

**Figure 24 :** Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite réalisée les variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 17

**Figure 25 :** Représentation des axes 1-2 de l'ACP réalisée sur les moyennes des variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin ....Page 18

**Figure 26 :** Représentation des axes 1-2 de l'ACP réalisée sur les moyennes des variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale sans la station RI40) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....Page 18





<b>Tableau 10</b> : Bilan des résultats de l'ACP réalisée sur les moyennes des variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale sans la station RI40) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 18
<b>Figure 27</b> : Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite (données du recouvrement algal) réalisée les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 20
<b>Figure 28</b> : Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite (données du recouvrement algal) réalisée les mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 20
<b>Figure 29</b> : Représentation des stations et variables des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 20
<b>Tableau 11</b> : Bilan des résultats de l'ACP centrée/ réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 21
<b>Figure 30</b> : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée (données des invertébrés benthique) sur les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 21
<b>Figure 31</b> : Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC (données des invertébrés benthiques) .....	Page 22
<b>Figure 32</b> : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 22
<b>Tableau 12</b> : Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 22
<b>Figure 33</b> : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques, après fusion des holothuries) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 23
<b>Figure 34</b> : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin .....	Page 23
<b>Figure 35</b> : Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée (données des communautés sessiles) réalisée sur les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 23
<b>Figure 36</b> : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données des communautés sessiles) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 24
<b>Tableau 13</b> : Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données des communautés sessiles) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 24
<b>Figure 37</b> : Représentation des axes 1-2 de l'ACP réalisée sur les variables additionnelles (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin .....	Page 24
<b>Figure 38</b> : Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP réalisée sur les variables additionnelles des données des communautés sessiles .....	Page 25
<b>Figure 39</b> : Représentation des axes 1-2 de l'ACP réalisée sur les valeurs moyennes des variables additionnelles (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin .....	Page 25
<b>Tableau 14</b> : Bilan des résultats de l'ACP réalisée sur les valeurs moyennes des variables additionnelles	



(données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin .....	Page 25
<b>Figure 40 :</b> Dendogrammes de la CAH réalisée sur les moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 26
<b>Figure 41 :</b> Histogramme de l'évolution de l'inertie intra-classe de la CAH réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 26
<b>Figure 42 :</b> Représentation des groupes hydrologiques sur l'axe 1-2 l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 26
<b>Figure 43 :</b> Représentation des groupes hydrologiques (sans station TE40) sur l'axe 1-2 l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 27
<b>Figure 44 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment ichtyologique .....	Page 28
<b>Figure 45 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment algal ....	Page 31
<b>Figure 46 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment benthique .....	Page 32
<b>Figure 47 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables des 3 compartiments ....	Page 33
<b>Tableau 15 :</b> Résultats des validations croisées des modèles avec les ajouts de variables complémentaires.....	Page 33
<b>Figure 48 :</b> Bioindicateur optimal par rapport au gradient d'apport terrigène .....	Page 33
<b>Figure 49 :</b> Bioindicateur optimal par rapport au « gradient d'hydrodynamisme » .....	Page 33
<b>Figure 50 :</b> AFD réalisée sur les variables sélectionnées en fonction du gradient d'apport terrigène ....	Page 34
<b>Figure 51 :</b> AFD réalisée sur les variables sélectionnées en fonction du « gradient de turbidité » .....	Page 34
<b>Figure 52 :</b> Représentation des axes 1-2 de l'interstructure de STATIS-LDA ( <b>Sabatier 2013</b> ) .....	Page 35
<b>Figure 53 :</b> Représentation du compromis (variables discriminantes 1-2, <b>Sabatier 2013</b> ) .....	Page 35
<b>Figure 54 :</b> Représentation des variables des 3 compartiments avec les deux premiers axes discriminants .....	Page 35

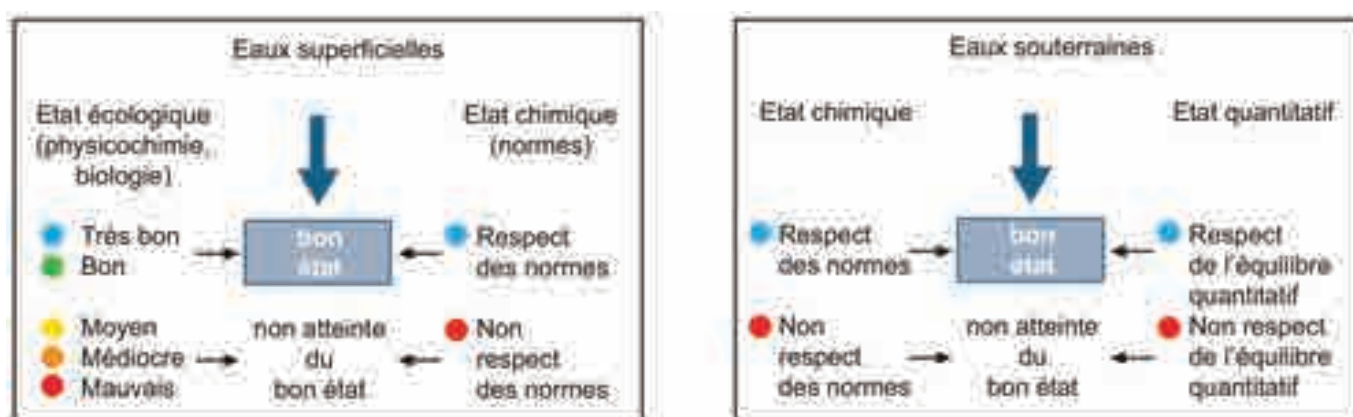


Figure 1 : Représentation schématique de la définition de la qualité d'une masse d'eau au titre de la DCE (Comité de bassin Rhône-Méditerranée 2009)

# A. Introduction: le projet EUTROLAG

## 1. Contexte global

### a. La nécessité d'arriver à un « bon état » des masses d'eau superficielles: le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau

Cette partie a été rédigée à l'aide du rapport final : définition d'un bio-indicateur d'eutrophisation (coraux, algues, invertébrés) pour les récifs coralliens de La Réunion ([Zubia et al. 2012](#)).

Aujourd'hui, l'environnement et le développement durable occupent une place importante au sein des politiques et des objectifs de nos gouvernements. Cependant, cette « vision des choses » a une origine très récente, qui commence au début des années 70 avec une prise de conscience mondiale de la nécessité de mettre en œuvre une gestion durable de l'environnement. Le changement des mentalités a fini par faire prendre conscience à l'humanité que le seul moyen de pouvoir prélever et utiliser les biens et services de l'écosystème doit passer par une gestion durable et contrôlée de celui-ci.

En Europe, la Directive Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000 (DCE, [Directive 2000/60/CE](#)), transposée en droit français en 2004 (loi n°2004-338 du 21/04/2004), établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, et renforce la prise en compte des milieux aquatiques par le Droit. L'application de la DCE nécessite la mise en place de contrôles/suivis de la qualité des eaux et des biocénoses qui les peuplent ou en dépendent, ainsi que la définition de l'état écologique et chimique de chaque masse d'eau suivie afin de pouvoir statuer sur sa qualité ([Figure 1](#)).

L'évaluation de l'état chimique des eaux superficielles repose sur la mesure des concentrations (dans l'eau, le biote ou les sédiments) de contaminants (65 à La Réunion, dont 41 font partie de la liste des « substances ou familles prioritaires », et 15 sont des substances spécifiques soumises à candidatures dans les prochaines directives). L'état chimique comprend deux classes de qualité, « respect des normes » ou « non-respect des normes », selon que les concentrations mesurées dépassent ou non les Normes de Qualité Environnementale (NQE) qui sont définies, dans l'eau, au niveau international pour chacune des substances.

L'évaluation de l'état écologique des eaux superficielles repose quant à lui sur 5 classes de qualité : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais. Cet état écologique doit être évalué à partir de paramètres du milieu, qu'il s'agisse des paramètres physiques (salinité, température, ...), chimiques (oxygène dissous, teneurs en nutriments, ...) ou biologiques (chlorophylle-a, couvertures algales ou coralliennes, présence/absence d'espèces indicatrices, ...).

Chaque pays reste libre de définir la stratégie de surveillance la plus adaptée, avec toutefois un impératif d'intercalibration sur le classement relatif à l'état écologique des masses d'eau (article 1.2 de l'annexe V de la DCE). Les échanges entre pays résultent principalement des groupes informels d'intercalibration, de contacts personnels entre experts, et plus rarement d'initiatives au sein des réseaux d'échanges ou de projets européens (notamment en Méditerranée sur les posidonies) et des communications scientifiques (notamment sur les macroinvertébrés).

S'il apparaît progressivement une certaine convergence dans les grands principes de surveillance retenus, tant dans le choix des habitats sélectionnés pour les suivis, des paramètres à mesurer au sein de chaque habitat que des paramètres de classification, les disparités de situation font qu'il n'est pas



forcément possible, ni parfois même souhaitable, que les protocoles de recueil d'information ou les procédures de classement soient strictement identiques entre tous les pays, voire au sein d'un même pays. Dans ce cas, les intercalibrations pourront se limiter à quelques paramètres (sous réserve que les méthodes soient similaires), ou s'effectuer sur le classement final.

## b. Le contexte réunionnais : une île volcanique avec un littoral très anthropisé

Cette partie a été rédigée à l'aide du document : Etat des lieux des travaux DCE relatifs aux masses d'eau littorales dans les départements d'Outre-Mer (**Buchet 2009**).

L'île de La Réunion est un département d'outre-mer français du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Elle est située dans l'archipel des Mascareignes, à environ 700 km à l'est de Madagascar et à 170 km au Sud-Ouest de l'île Maurice. C'est une île volcanique, montagneuse et tropicale, qui constitue la partie émergée d'un strato-volcan de 7000 m de hauteur. Le milieu littoral réunionnais présente plusieurs particularités remarquables (**BCEOM et al. 2005**), comme par exemple un climat tropical humide marqué par un cycle annuel (associé à une saison chaude propice à la formation de perturbations tropicales comme les cyclones) ou encore une configuration massive de l'île qui ne laisse aux côtes peu découpées qu'un développement de 207 km. Les principales sources de perturbation influençant la qualité du milieu littoral à La Réunion, identifiées lors de l'état des lieux de 2005 (**BCEOM et al. 2005**) sont :

- la densité de population, essentiellement localisée sur la frange littoral de l'île très anthropisée et urbanisée (imperméabilisation des surfaces et ruissellement direct des polluants),
- les rejets d'eaux usées domestiques à partir des stations de traitement des eaux résiduaires (apports de Matière En Suspension (MES), de matière organique, nutriments et bactéries),
- les rejets d'origine agricole (apports de nutriments, phytosanitaires et MES),
- l'activité industrielle, notamment à Saint-Denis, Saint-Louis, Saint-Pierre ou encore le site industriel et portuaire de la Possession,
- le tourisme et les divers loisirs sur les récifs coralliens (piétinement, érosion, ...),
- la pêche en secteurs récifaux (surexploitation) et non-récifaux.

La DCE impose aux états membres d'effectuer dans chacun de leurs grands bassins, un découpage en « masses d'eau » qui deviennent des unités de gestion. A La Réunion, la délimitation des masses d'eau littorales a été réalisée en juin 2004 à dire d'expert, et revue en juin 2012. Ce nouveau découpage a abouti à l'identification de huit masses d'eau côtières et de quatre masses d'eau tout à fait particulières, correspondant aux quatre secteurs récifaux majeurs de l'île (Saint-Gilles, Saint-Leu, Etang-Salé et Saint-Pierre). Aucune masse d'eau de transition n'a été identifiée à ce jour à La Réunion.

Au niveau national, la circulaire 2007/201 constitue le cadre réglementaire de la constitution et la mise en œuvre du programme de surveillance, pour les bassins hydrographiques métropolitains ainsi que ceux de la Martinique et de La Réunion. Toutefois, dans le cas des départements d'Outre-Mer (DOM), des questions se posent quant à la mise en œuvre de la DCE en raison de leur morphologie, de leur climat, de leurs écosystèmes mais aussi de leur histoire et des usages et pratiques développés sur ces territoires loin de la métropole.





## c. Le projet EUTROLAG : définition d'indicateurs d'enrichissement en nutriments adaptés aux platiers récifaux de La Réunion

Les suivis des biocénoses marines effectués depuis les années 80 sur les espaces récifaux de la côte Ouest de l'île de La Réunion montrent que les structures coralliennes sont affectées par un enrichissement « chronique » en sels nutritifs. Cette dégradation des écosystèmes récifaux semble en partie due aux apports issus des bassins versant jouxtant les plateformes récifales. Les phénomènes fréquemment décrits à la suite de pollutions chroniques de l'écosystème récifal (proliférations algales par exemple) ont été décrits et en partie quantifiés à La Réunion ([Guillaume et al. 1983](#), [Cuet 1989](#), [Cuet & Naïm 1992](#), [Naïm 1993a, b](#)). Ces enrichissements sont liés principalement aux infiltrations d'eaux souterraines qui apportent des quantités significatives d'azote et dans la moindre mesure de phosphate ([Cuet et al. 1988](#), [Naïm et al. 2000](#)).

Cet enrichissement des eaux récifales réunionnaises, lié aux activités anthropiques, provoque une augmentation de l'abondance des peuplements algaux ([Cuet et al. 1988](#), [Naïm 1993b](#), [Semple 1997](#), [Naïm et al. 2012](#)). L'analyse du suivi du réseau mondial de suivi des récifs coralliens (GCRMN : Global Coral Reef Monitoring Network) depuis 10 ans montre une augmentation significative du recouvrement algal sur la majorité des sites échantillonnés entre 1998 et 2009 ([Bigot 2008](#)). La couverture algale a doublé voir triplé sur certains sites et la majorité des sites présente une couverture algale supérieure à 50% caractéristique d'un mauvais état écologique ([Bruno et al. 2009](#)).

Constatant cette dégradation de l'état de santé des récifs coralliens de La Réunion, il s'avère urgent d'identifier les pressions responsables de cette eutrophisation et de caractériser ces apports nutritifs. L'identification d'indicateurs d'eutrophisation pertinents (paramètres physico-chimiques, algues/coraux, herbivores) serait par ailleurs indispensable à la gestion de ce phénomène par l'ensemble des acteurs locaux.

L'étude «Caractérisation de l'état de référence biologique des masses d'eau côtières au regard de la Directive Cadre de l'Eau» ([Andral et al. 2010](#)) a permis une première approche sur la masse d'eau récifale de Saint-Gilles. Trois indicateurs pertinents avaient été identifiés : les teneurs en nitrate dans l'eau, le rapport isotopique  $\delta^{15}\text{N}$  et le rapport C:N chez deux algues vertes (*Boergesenia forbesii* et *Dictyopshaeria verluysii*). Cette étude préliminaire a été réalisée uniquement sur le platier récifal de La Saline et ces premiers résultats devront être complétés et étendus à l'ensemble des récifs coralliens de La Réunion.

Le programme EUTROLAG est donc proposé aujourd'hui pour poursuivre et compléter cette première approche. Ce projet se veut multidisciplinaire et présente une approche multi-indicateur, intégrant à la fois les paramètres physico-chimiques (nitrate, phosphate, matière organique, contaminants chimiques) et des paramètres biologiques (coraux, algues, rapport isotopique et rapport C:N chez certaines algues, herbivores, filtreurs) pour appréhender le phénomène d'enrichissement en nutriments dans son ensemble et ainsi évaluer la pertinence des indicateurs au regard des pressions anthropiques les plus impactantes pour le milieu récifal.

Ce projet comprend 6 objectifs :

### 1. Caractériser les pressions provenant du bassin versant



**Figure 2 :** Image satellite des différents secteurs étudiés durant l'étude

2. Réaliser la **cartographie des SGD** (« Submarine Groundwater Discharge » ou résurgences d'eau douce) des platiers récifaux de La Réunion en utilisant des mesures physico-chimiques in situ et par thermographie aérienne.
3. **Déterminer des grilles pour caractériser l'enrichissement en nutriments des milieux récifaux oligotrophes.**
4. **Evaluer l'impact de l'enrichissement en nutriments sur l'ensemble des peuplements benthiques.**
5. **Définir des indicateurs d'enrichissement en nutriments pertinents** indispensables à la gestion de ce phénomène par l'ensemble des acteurs locaux et les intégrer au réseau GCRMN / DCE « benthos de substrat dur ».
6. **Assurer un suivi de la qualité des eaux des platiers récifaux dans le cadre du projet ILO** (Irrigation du Littoral Ouest, Saint Gilles et Saint Leu).

Le projet EUTROLAG a été réalisé dans le cadre de deux programmes complémentaires :

- le **projet INDIC-EUTRO**, financé par le Conseil Général et l'office de l'eau et cofinancé par l'Union Européenne (objectifs 1, 2, 3, 4 (poissons herbivores uniquement), 5 et 6),
- le **projet BIOINDICATION**, financé par l'IFREMER et l'ONEMA (objectifs 4 et 5).

Mon travail durant ce stage s'intègre dans le point 5. Mon rôle est d'analyser les données déjà recueillies au sein de ce programme afin de définir :

- des paramètres, des métriques et des indices biologiques (algues/coraux) permettant d'évaluer l'état de santé des récifs coralliens,
- des paramètres et des métriques physico-chimiques pouvant être mis en relation avec les éléments biologiques.

## 2. Matériels et méthodes du projet EUTROLAG

### a. Sites échantillonnés

Quatre secteurs ont été choisis afin de couvrir l'ensemble des platiers de l'île. Ces secteurs sont, du Nord au Sud, Saint-Gilles Les Bains, Saint-Leu, l'Etang Salé et Saint-Pierre (**Figure 2**).

Sur chaque secteur, des radiales et des transects ont été définies pour caractériser différentes situations d'eutrophisation en fonction de points de référence (points présentant pas ou très peu d'altérations anthropogéniques).

Le positionnement des radiales du secteur de Saint Gilles est celui défini lors de l'étude pilote (**Andral et al. 2010**). Les radiales de Saint Leu, Etang Salé et Saint Pierre ont été déterminées après la campagne exploratoire de novembre 2010 (**ARVAM 2011**) selon des critères physico-chimiques caractéristiques d'une eutrophisation ou d'une non eutrophisation tels que la température, la salinité et les sels nutritifs ( $\text{NO}_3$  et  $\text{NO}_2$ ).

A chaque site, trois transects de 60 m ont été effectués à différentes distances de la plage. Ces stations ont été disposées dans la mesure du possible à des distances équivalentes de la côte (environ 40, 80 et 120 mètres) pour chaque secteur (à noter cependant que le secteur de l'Etang Salé présente

**Tableau 1 :** Localisation des différentes stations sélectionnées pour le suivi du programme EUTROLAG

SECTEURS	SITES	STATIONS	CODES	LONGITUDE SUD	LATITUDE EST	Distance à la côte (m)
Saint-Gilles (SG)	TOB	40	TOB40	21.08100	55.22258	40
		80	TOB80	21.08120	55.22230	80
		120	TOB120	21.08142	55.22197	120
		REF	TOBREF	21.08175	55.22155	170
	TE	40	TE40	21.09734	55.23753	40
		80	TE80	21.09763	55.22724	80
		120	TE120	21.09800	55.23703	120
Saint-Leu (SL)	RNI	40	RNI40	21.18089	55.28652	40
		70	RNI70	21.18101	55.28624	70
		90	RNI90	21.18099	55.28606	90
		REF	RNIREF	21.18101	55.28561	140
	RI	40	RI40	21.18256	55.28691	45
		80	RI80	21.18265	55.28650	80
		120	RI120	21.18265	55.28616	120
Etang-Salé	ES	ES2	ES2	21.27063	55.33219	X
		ES3-1 ES3-2	ES3	21.27033 21.27039	55.33296 55.33317	X
		ES5	ES5	21.26952	55.33295	X
		REF	ESREF	21.27129	55.33160	X
Saint-Pierre	SP	30	SP30	21.34484	55.47223	25
		60	SP60	21.34509	55.47216	55
		80	SP80	21.34526	55.47204	80
		REF	SPREF	21.34570	55.47289	120

**Tableau 2 :** Représentation des différentes campagnes d'échantillonnages

Saisons	Sites	Contaminants (hydrologie)	Hydrologie	Benthique (sessile)	Algues	Ichtyofaune	Benthique (vagile)
Décembre	SG	14/12/10	14/12/10	X	14/12/10	14/12/10	X
	SL	16/12/10	16/12/10	X	16/12/10	16/12/10	X
	ES	21/12/10	15/12/10	X	21/12/10	21/12/10	X
	SP	15/12/10	15/12/10	X	15/12/10	15/12/10	X
Janvier	SG	17/01/11	17/01/11	17/01/11	17/01/11	X	17/01/11
Février	SG	16/02/11	16/02/11	16/02/11	16/02/11	16/02/11	16/02/11
	SL	17/02/11	17/02/11	17/02/11	17/02/11	17/02/11	17/02/11
	ES	19/02/11	19/02/11	18/02/11	19/02/11	19/02/11	18/02/11
	SP	18/02/11	18/02/11	19/02/11	18/02/11	18/02/11	19/02/11
Mars	SG	14/03/11	14/03/11	14/03/11	14/03/11	14/03/11	14/03/11
Avril	SG	29/04/11	29/04/11	29/04/11	26/04/11	26/04/11	29/04/11
	SL	27/04/11	27/04/11	07/04/11	28/04/11	28/04/11	07/04/11
	ES	26/04/11	26/04/11	27/04/11	27/04/11	27/04/11	27/04/11
	SP	28/04/11	28/04/11	27/04/11	27/04/11	27/04/11	27/04/11
Mai	SG	26/05/11	26/05/11	31/05/11	26/05/11	26/05/11	31/05/11
Juin	SG	22/06/11	22/06/11	15/06/11	22/06/11	26/06/11	15/06/11
	SL	27/06/11	27/06/11	30/06/11	27/06/11	27/06/11	30/06/11
	ES	28/06/11	28/06/11	30/06/11	30/06/11	30/06/11	30/06/11
	SP	30/06/11	30/06/11	14/06/11	30/06/11	30/06/11	14/06/11
Juillet	SG	27/07/11	27/07/11	07/07/11	27/07/11	27/07/11	07/07/11

une configuration particulière qui n'a pas permis d'aligner les transects en fonction de la distance à la côte). Le positionnement des transects représentatifs des différents niveaux d'eutrophisation a été donc réalisé en se référant aux valeurs obtenues lors de la campagne exploratoire de novembre 2010. Un transect sur le front récifal (REF) a été également effectué pour chaque secteur. Il sera considéré comme le témoin qui reflète une zone récifale non impactée, strictement sous influence océanique. Cette station de référence « très » éloignée de la côte est théoriquement non impactée par les apports des bassins versants et les résurgences marines. Ces différents transects permettent donc de caractériser des zones différemment impactées par l'eutrophisation depuis la plage jusqu'au front récifal.

Au total 4 secteurs, 6 sites et 22 stations ont été étudiées (**Tableau 1**).

Les images satellites des différents secteurs, sites et stations sont disponibles en annexes (**Annexe 1, 2, 3, 4 et 5**).

## b. Paramètres mesurés et méthodes d'échantillonnages

Les paramètres mesurés lors du programme EUTROLAG peuvent se diviser en 4 compartiments : hydrologique, ichtyologique, benthiques et algale.

Les fréquences d'échantillonnages sont représentées dans le (**Tableau 2**). Pour des soucis techniques de comparaison, seuls les mois seront gardés pour identifier une campagne.

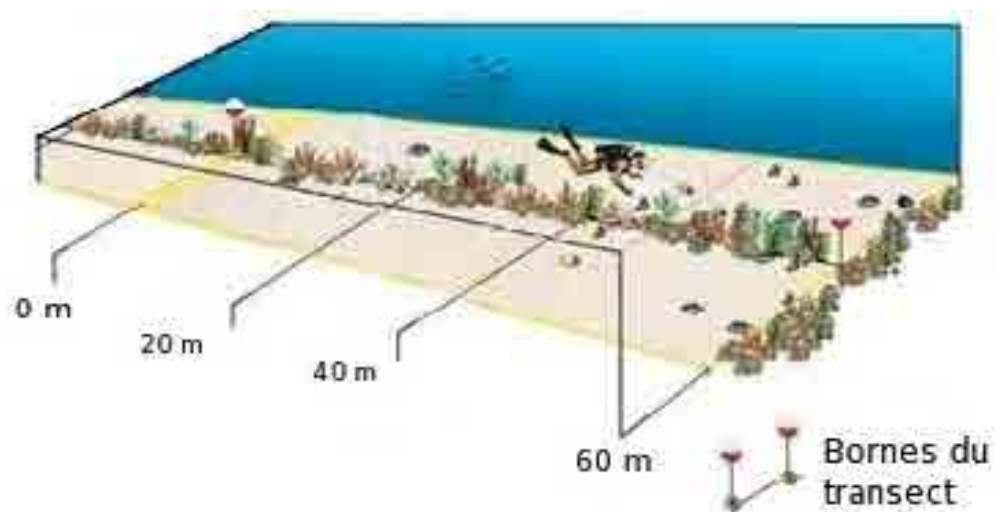
### • Compartiment hydrologique

Les variables hydrologiques sont de types quantitatives continues :

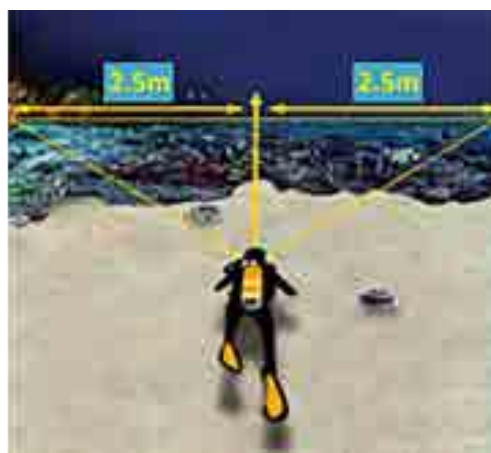
- 6 paramètres mesurant la quantité de Chlorophylle-a et de Pheophytine-a (exprimées en mg/L et en mg/m<sup>2</sup>), quantifiés à partir de la méthode Aminot et Taddeis (**Aminot & Kérouel 2004, 2007**),
- 4 paramètres évaluant les teneurs isotopiques du carbone 13 et de l'azote 15 (exprimé en ‰ et en pourcentage de Carbone et d'Azote) mesurées dans l'eau ainsi que sur deux espèces d'algues (BOE FORB et DICT VERL),
- 2 paramètres évaluant les teneurs isotopiques de l'azote 15 et de l'oxygène 18 mesurées au sein des sites en bas de plage (variables additionnelles),
- les mesures des contaminants (55 au totale) des nappes phréatiques (variables additionnelles) et des sites,
- 9 mesures de paramètres physico-chimiques : la pression, la température, la salinité, la conductance spécifique, la conductivité, l'oxygène (exprimé en % et en mg/L), le pH, la turbidité et les matières en suspension (MES),
- 16 mesures de la teneur en nutriments : l'ammonium, les nitrates, les phosphates, l'urée, la silice, les nitrites, azote organique dissous, le phosphore organique dissous, le carbone organique particulaire (POC), le carbone organique dissous, le carbone organique total, l'azote particulaire (PN), le rapport carbone sur azote, le phosphore particulaire (PP), le rapport carbone sur phosphate et le rapport azote sur phosphore.

Un tableau disponible en annexes (**Annexe 6**) détail de façon précise chacune de ces variables, ainsi que les variables complémentaires (sites, dates d'échantillonnages, observations,...).

L'échantillonnage de ce compartiment a été réalisé à marée basse (plus ou moins 1 heure) sur tous les stations.



**Figure 3 :** Protocole d'échantillonnage de la méthode LIT (Linear Intercept Transect, [Hill & Wilkinson 2004](#))



**Figure 4 :** Schéma du protocole d'échantillonnage BELT ([Hill & Wilkinson 2004](#))

## • Compartiment ichthyologique

Les variables ichthyologiques mesurées sont au nombre de 26 :

- l'abondance (quantifiée en nombre d'individus) pour les 17 espèces de poissons recensés lors des campagnes (variables quantitatives discrètes),
- la taille moyenne (exprimée en cm, sauf pour les individus du genre *Stegastes* qui sont mesurés en classe : petit, moyen et gros, **Galzin 1985**) des espèces citées précédemment (variables quantitatives continues).

Un tableau disponible en annexes (**Annexe 7**) regroupe les différentes espèces de poissons recensés ainsi que leur taxonomie.

L'échantillonnage a été effectué sur un transect de type belt (**Figure 3 et 4**). Lors du premier passage seul les herbivores mobiles (fuyants) sont comptés et mesurés en centimètre. Le second passage est consacré au comptage des herbivores sédentaires (essentiellement du genre *Stegastes*). L'ensemble permet d'obtenir la diversité/abondance/taille caractéristique du transect (**Loiseau 2011**).

## • Compartiment benthique

Les variables du compartiment benthique se subdivisent en deux catégories : le suivi des communautés coralliennes et des invertébrés benthiques.

Concernant le suivi des communautés coralliennes, des transects linéaires de 60m ont été réalisés selon la méthode utilisée dans le cadre des « suivis des récifs du Sud-Ouest de La Réunion » (méthode LIT, 3 transects de 20m par station) impliqué dans le GCRMN (**Figure 3, Conand et al. 1997**). Sont pris en compte principalement la couverture corallienne (variable quantitative discrète) et les formes des colonies, les substrats et les différents groupes fonctionnels des algues. De plus, afin de répondre de manière plus pertinente à l'étude, certaines variables GCRMN ont été précisées et des variables additionnelles ont été prises en compte. Un tableau disponible en annexes (**Annexe 8**) décrit avec précisions les paramètres suivis pour l'étude de la faune benthique sessile.

Le suivi des invertébrés benthiques repose sur des comptages (variable quantitative discrète) de certains groupes et espèces d'échinodermes (herbivores) et de filtreurs, comme des éponges, les bivalves ainsi que certains macroporifères. La méthode utilisée est celle décrite précédemment « belts transects » (**Figure 4**). Ces transects sont positionnés sur les transects utilisés pour le suivi GCRMN des communautés coralliennes. Pour chaque station, une bande de 1m de large (contrairement à 2.5m pour le compartiment ichthyologique) sur 60m de long est donc échantillonnée (120m<sup>2</sup>). Un tableau en annexes (**Annexe 9**) décrit les différentes variables utilisées dans le cadre du suivi des invertébrés benthiques.

Les différentes espèces coralliennes et les invertébrés benthiques sont disponibles en annexes (**Annexe 10 et 11**).

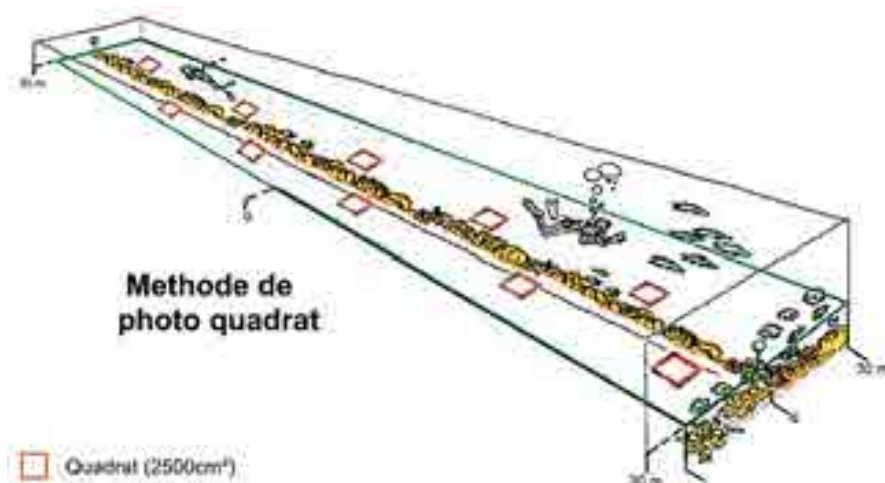
## • Compartiment algal

Concernant l'étude de la composition spécifique, les espèces algales ont été recensées pour chaque transect selon la méthode du « belt transect » décrite précédemment (**Figure 4**). La présence/absence de chaque espèce a été notée (variable qualitative nominale), ainsi qu'un indice de fréquence d'abondance relatif (variable qualitative ordinale, **Leliaert & Coppejans 2004**). Ce dernier indice comporte 5 modalités (**Tableau 3**). Chaque spécimen a été photographié in situ et leurs caractéristiques écologiques ont été notées.



**Tableau 3 :** Indice d'abondance relatif utilisé lors du programme EUTROLAG

Coefficient de fréquence d'abondance	Description
5	Espèce dominante/abondante : observée plus de 10 fois sur le transect
4	Espèce dominante : observée plus de 5 fois sur le transect
3	Espèce fréquente : observée plus de 3 fois sur le transect
2	Espèce occasionnelle : observée moins de 3 fois sur le transect
1	Espèce rare : observée une seule fois sur le transect



**Figure 5 :** Schéma illustrant la méthode des photoquadrats



Par ailleurs, les pourcentages de recouvrement des espèces algales ont été estimés au sein de 7 à 10 quadrats de 0.25m<sup>2</sup> pour chaque station (**Figure 5**).

Pour chacun des quadrats, une estimation du pourcentage de recouvrement est réalisée (variable quantitative continue) à partir de photographies qui, de retour au laboratoire, sont « détournées » à l'aide du logiciel CPCe (Coral Point Count with Excel extensions, **CPCe 2006**) afin d'évaluer la proportion des espèces algales dominantes.

Les différentes algales rencontrées sont listées en annexe (**Annexe 12**).

## B. Construction de la base de données EUTROLAG

### 1. Création du modèle

#### a. Construction d'une structure logique

La première étape pour l'analyse des données EUTROLAG a été la conception d'une base de données. Cette base de données a été un élément fondamental qui m'a permis de comprendre la complexité, mais surtout les relations entre les données (celles-ci étant différentes d'un point de vue écologique, mais aussi d'un point de vue des méthodes d'échantillonnages). Grâce à cette étape, j'ai pu associer une structure logique à mes données, c'est-à-dire trouver les relations entre les variables ainsi que leurs attributs.

Pour cela, j'ai commencé par étudier les dépendances fonctionnelles entre mes différentes variables. Une dépendance fonctionnelle permet de mettre en évidence si certains attributs permettent de déterminer de façon unique d'autres attributs : la connaissance d'une valeur d'un attribut X permet de déterminer la connaissance d'une et une seule valeur d'un ou plusieurs attributs Y<sub>i</sub>. La décomposition de cette notion de dépendance fonctionnelle permet d'ouvrir le champ des formes normales. Dans une base de données relationnelle, une forme normale désigne un type de relation particulier entre les entités. L'objectif essentiel de la normalisation est d'éviter les anomalies transactionnelles pouvant découler d'une mauvaise modélisation des données, et ainsi éviter bon nombre de problèmes potentiels comme des anomalies de lecture ou d'écriture, ou encore des redondances de données. La normalisation des modèles de données permet de vérifier la robustesse de leur conception pour améliorer la modélisation, et donc au final obtenir une meilleure représentation.

Il existe plusieurs formes normales, cependant en pratique les trois premières formes normales sont nécessaires pour avoir un modèle juste (les autres ne seront pas développées ici, il faut juste savoir que chacune impose des règles supplémentaires à la base de données, en présentant des avantages et des inconvénients).

La première forme normale est validée si tous les attributs présents dans la base ont des valeurs atomiques. Cela veut dire que chaque champ ne doit contenir qu'une seule observation, et qu'il est nécessaire de décomposer les attributs de façon à obtenir la plus « petite hiérarchisation ». La seconde

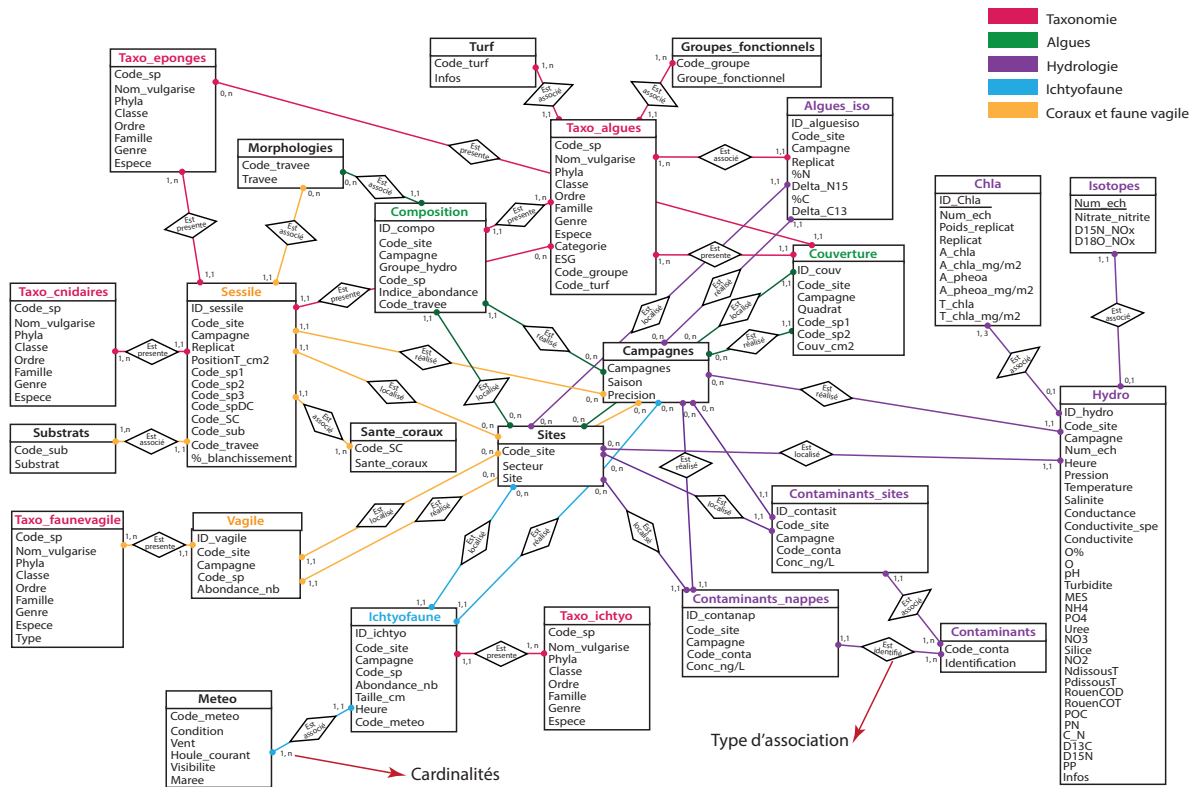


Figure 6 : Modèle entité/association de la base de données du programme EUTROLAG

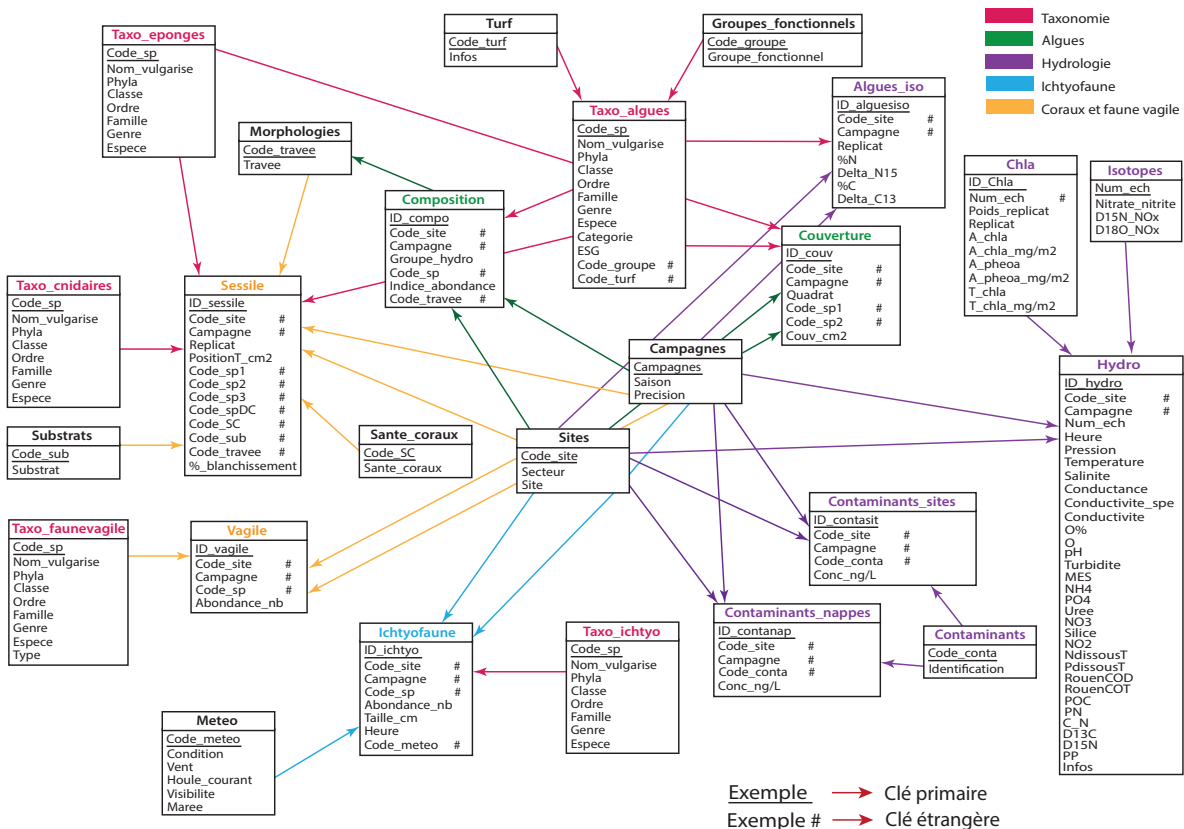


Figure 7 : Modèle relationnel de la base de données du programme EUTROLAG

forme normale est validée, si la première forme est respectée, et si tout attribut non clé (sa valeur ne renseigne pas sur les valeurs d'autres attributs) ne dépend pas d'une partie d'un attribut clé. La troisième forme normale est validée, si la seconde forme est respectée, et si tout attribut n'appartenant pas à la clé, ne dépend pas d'un attribut non clé.

## b. Construction du modèle entité/association

Une fois les dépendances fonctionnelles mise en évidence et les trois premières formes normales appliquées aux données, un premier modèle entité/association a été construit selon les travaux de Chen (1976). Ce type de modèle fournit une description graphique des données sous la forme de diagramme contenant des entités et des associations (Figure 6). Il est très important de construire ce modèle en évitant les caractères qui pourrait poser des problèmes lors des traitements ultérieurs : éviter les accents, la ponctuation et les espaces (il est préférable d'utiliser des underscores).

Les informations taxonomiques des différents compartiments sont représentées par les entités de couleur magenta. La plus grande difficulté a été de supprimer les redondances au sein et entre les différents compartiments, mais surtout de trouver un moyen de représenter de façon homogène toutes ces données en tenant compte des différences de méthodologie et d'échantillonnage entre les compartiments. De nombreuses entités (surtout celle en relation avec le compartiment benthique) présentaient de fort problème d'association avec les autres compartiments, et il a parfois été nécessaire de « retravailler » les données brutes afin qu'elles soient exploitables. Une fois ce travail d'homogénéisation effectué, les différentes associations entre les entités ont été exprimées. Une association est une relation qui lie plusieurs entités. Dans ce cas, toutes les relations sont dites binaires (elle ne relie que deux entités à la fois). Les cardinalités indiquent le nombre maximal et minimal d'occurrence d'une association pour une occurrence d'un participant (par exemple pour une association « est présente » 1,n entre l'entité Ichtyofaune et Taxo\_ichtyo, cela veut dire qu'un enregistrement Taxo\_ichtyo est présent 1 fois minimum et n fois maximum dans l'entité Ichtyofaune).

## c. Construction du modèle relationnel

Le modèle relationnel est la dernière étape avant l'intégration des données dans la structure de la base (Figure 7). Il représente la matérialisation finale de la base de données.

Chaque type d'entité devient une relation, et son identificateur devient la clé (on parle alors de clé primaire) et les propriétés deviennent des attributs. Chaque type d'associations se traduit par un ajout d'une clé étrangère. Chaque association ou les cardinalités sont de type 1,1 - 1,1 entraîne une fusion des deux relations correspondantes ou alors l'ajout de clé étrangère dans l'une ou les deux relations. Dans notre cas, aucune association de type 1,1 – 1,1 n'a été mise en évidence.

# 2. Création de la base de données sous Access et utilisation sous R

Une fois le modèle relationnel de la base établi, les données ont été intégrées dans un système de gestion de bases de données (SGBD) de type Microsoft Access (Microsoft corporation 2012). Ce type de base de données a été retenu à cause de son utilisation polyvalente : de nombreuses entreprises



disposent de la suite Microsoft Office incluant Access, et de plus ce type de fichier est compatible avec des utilitaires de base de données libre comme LibreOffice ([The Document Foundation 2013](#)). Une fois cette base de données finalisée, une source de données ODBC (Open DataBase Connectivity) a été créée. Une source de données ODBC est un logiciel permettant à une application information (dans notre cas cette application est R, [R Development Core Team 2011](#)) de manipuler une ou plusieurs bases de données (mise à disposition par des SGBD).

Cette source de données ODBC a permis de manipuler directement les tables de la base de données afin de les importer directement sous R. Grâce au package RODBC ([Ripley & Lapsley 2012](#)) les requêtes SQL d'importation des données ont pu être tapées directement dans R (par l'intermédiaire de la fonction `sqlFetch` et `sqlQuery`).

## C. Statistiques descriptives

La création de la base de données a permis de construire une base de travail solide permettant de pouvoir commencer efficacement l'exploitation des données. L'étape suivante a été de réaliser une analyse descriptive complète des 4 compartiments (hydrologique, ichtyologique, algal et benthique) afin d'explorer les caractéristiques des données. Les analyses multivariées ont été réalisées sous R grâce au package `ade4` ([Chessel et al. 2004](#), [Dray et al. 2007](#)). Afin de simplifier la compréhension des différentes représentations dans les analyses suivantes, une représentation type est disponible en [Annexe 13](#).

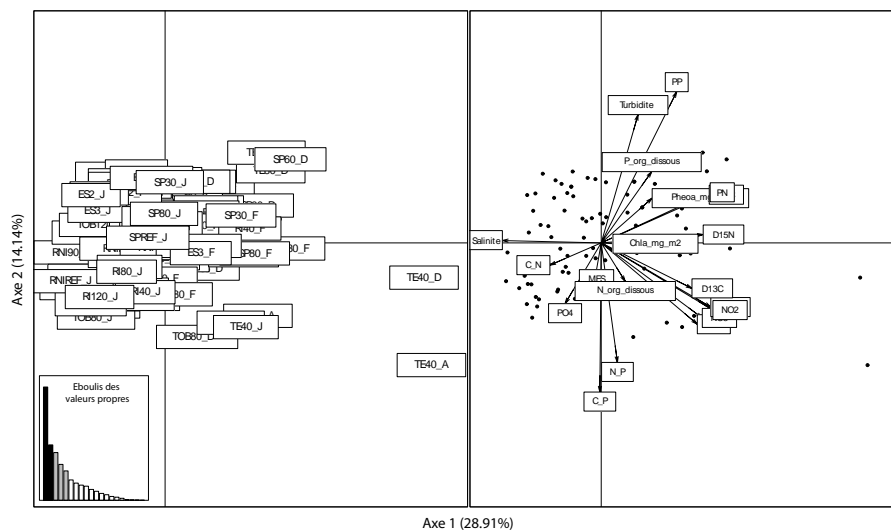
Seul les mois de Décembre, Février, Avril et Juin (2010 et 2011) ont pu être utilisés dans les analyses suivantes étant donné que les mois de Janvier, Mars, Mai et Juillet ne présentaient que des données pour le secteur de Saint-Gilles (sites de Toboggan et Trou d'Eau).

### 1. Compartiment hydrologique

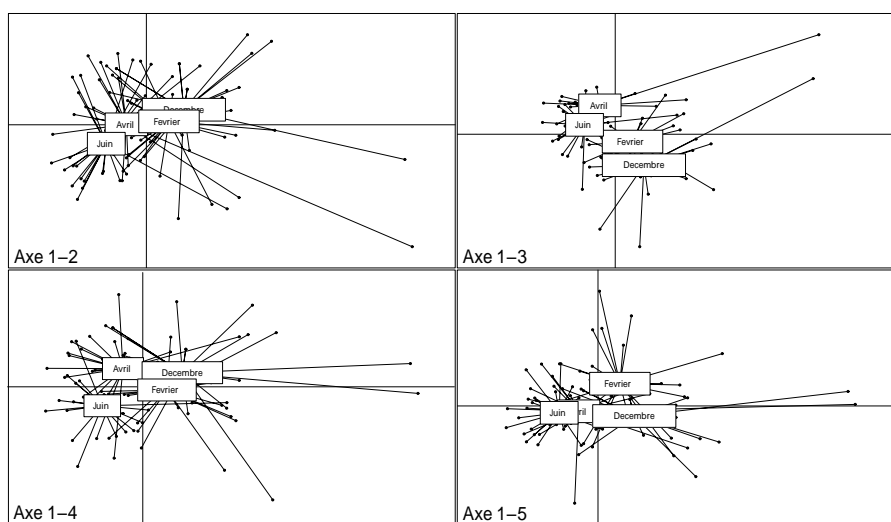
Un premier nettoyage des données hydrologiques (sous la direction du Docteur Cuét) a permis de supprimer plusieurs variables non comparables entre les stations et les mois, ou qui présentaient des valeurs aberrantes :

- tous les prélèvements hydrologiques ont été effectués à marée basse. Cependant, les heures d'échantillonnages ne sont pas identiques. Cela implique que les variables mesurant les teneurs en oxygène ainsi que la température ne sont pas comparables entre les différentes stations et mois. La température aurait pu être moyennée sur le mois, toutes stations confondues, mais étant donné la pertinence de cette « nouvelle variable » cela n'aurait pas été judicieux pour séparer les stations,
- les variables mesurant la pression, la conductivité, l'urée et le pH n'ont pas été prises en compte car elles présentaient des valeurs manquantes ou aberrantes, qui rendaient leur intégration très discutable dans la recherche de bio-indicateurs,
- les trois valeurs manquantes pour les stations de RI40, RI80 et RI120 du mois de décembre ont été remplacées par les valeurs des stations RNI40, RNI70 et RNI90 du même mois.

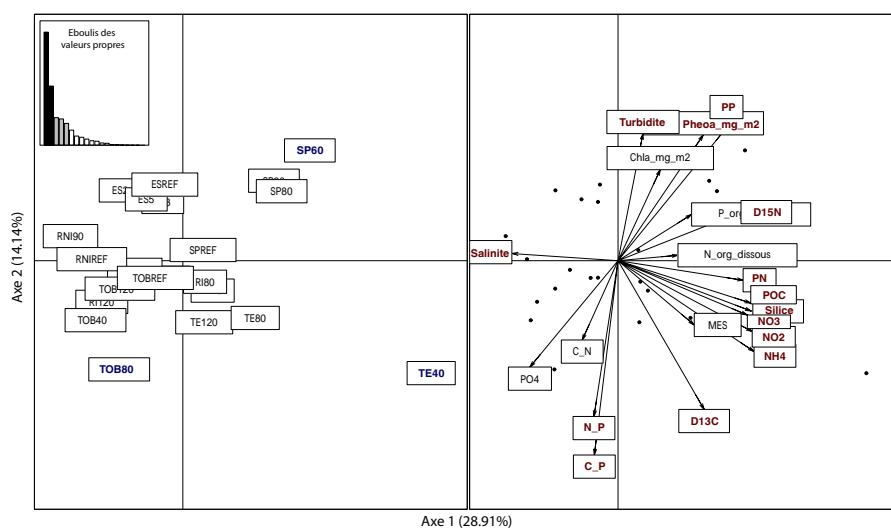
Au final, 20 variables quantitatives continues ont été conservées (la liste des variables est disponible en [Annexe 14](#)).



**Figure 8 :** Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée (données compartiment hydrologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 9:** Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite réalisée (données compartiment hydrologique) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 10:** Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

Une ACP centrée/réduite (afin de prendre en compte l'hétérogénéité des différentes variables) a été réalisée sur ces variables par station et par mois. L'éboullis des valeurs propres nous indique qu'il serait intéressant de regarder les 5 premiers axes (selon le critère de Kaiser on ne retient que les axes dont l'inertie est supérieure à l'inertie moyenne, et lors d'une ACP centrée/réduite cela équivaut à retenir les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1). Cependant, la lisibilité des graphiques est réduite (**Figure 8**), et il peut être judicieux de faire des moyennes afin d'améliorer les interprétations.

De plus, Les représentations des « individus » (stations-mois) en fonction du mois sur les différents axes permettent de mettre en évidence que les mois sont globalement regroupés (**Figure 9**). Il semble donc que la variabilité temporelle soit relativement faible.

Une ACP intra-groupe a donc été réalisée dans le but de quantifier la part de cette variabilité temporelle. Dans une telle analyse, tous les centres des classes sont placés à l'origine des cartes factorielles et les individus sont représentés avec une variance maximale autour de l'origine. On étudie donc la variabilité des moyennes par classes. En enlevant l'effet temporel (facteur mois), on constate que l'inertie intra-groupe est égale à 0.8264. Cela veut dire que 82.64% de l'inertie totale est expliquée par l'ACP intra-groupe (la variabilité temporelle représente 17.35% de la variabilité totale de l'ACP centrée/réduite précédente). Si on effectue une seconde ACP intra-groupe mais cette fois en enlevant l'effet spatial (facteur stations), il s'avère que l'inertie intra-groupe est de 0.6197 : 61.97% de l'inertie totale est expliquée par l'ACP intra-groupe, et la variabilité spatiale représente 38.02% de la variabilité totale de l'ACP centrée réduite). On constate ici qu'une part plus importante de la variabilité est perdue lorsqu'on enlève l'effet spatial que lorsqu'on enlève la variabilité temporelle : les 61.97% d'inertie expliquée par l'ACP intra-groupe (facteur spatial) sont dus à d'autres effets, y compris l'effet temporel, mais qui reste très limité d'après l'analyse précédente (17.35%). Cette décomposition de la variance, et surtout la dominance de l'effet spatial sur l'effet temporel nous permet de réaliser des moyennes des différentes variables en fonction des mois.

Cela nous amène à la réalisation d'une nouvelle ACP centrée/réduite avec cette fois-ci les valeurs moyennes des différentes variables. L'éboullis des valeurs nous suggère de regarder les 5 premiers axes. Les deux premiers axes expliquent 57.37% de l'inertie totale : le premier axe explique 37.66% et le second 19.7% (**Figure 10**). Les autres axes ne présentent pas d'informations supplémentaires par rapport à la signification des deux premiers axes et ne seront pas présentés ici.

Les résultats de cette analyse sont regroupés dans le tableau suivant (**Tableau 4**).

L'axe 1 montre très clairement une opposition entre les apports terrigènes (côté positif de l'axe) et les apports océaniques (côté négatif). La silice et les nitrates sont directement liés aux apports terrigènes : les nitrates présentent des valeurs élevées dans la nappe phréatique et des valeurs importantes pour cette variable couplées à la silice permettent de mettre en évidence un relargage de la nappe phréatique. Des valeurs élevées pour la variable mesurant la composition isotopique de l'azote dans la matière particulaire permettent de mettre en évidence une synthèse de matière organique particulaire, en relation avec des apports terrigènes. Les variables mesurant l'azote particulaire et le carbone organique particulaire indiquent une formation de matière organique. Les variables mesurant les nitrites et l'ammonium ne sont pas les plus pertinentes pour montrer un apport terrigène car elles peuvent tout aussi bien venir d'apports océaniques, dont l'origine reste quand même terrigène, mais pas forcément au niveau du secteur échantillonné. Tous les paramètres contribuent positivement à la formation de l'axe 1 entraînant une diminution de la salinité (conséquence du relargage de la nappe phréatique). Des valeurs élevées pour la variable salinité peuvent donc être expliquées par des stations peu soumises aux influences terrigènes. Il est intéressant de constater que même si la variable mesurant



Tableau 4 : Bilan des résultats de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

	Salinite (64% axe 1-2)	D15N Composition isotopique azote (65% axe 1-2)	PN Azote particulaire (63% axe 1-2)	POC Carbone organique particulaire (73% axe 1-2)	NO2 Nitrites (82% axe 1-2)	NH4 Ammonium (90% axe 1-2)	Silice (75% axe 1-2)
SP60 (81% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte
TS40 (90% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte
TOB80 (67% axe 1-2)							

	NO3 Nitrates (72% axe 1-2)	Pheoa_mg_m2 Pheophytine-a (61% axe 1-2)	Turbidité (36% axe 1-2)	PP Phosphore particulaire (75% axe 1-2)	D13C Composition isotopique carbone (75% axe 1-2)	C_P Rapport carbone sur phosphate (80 axe 1-2)	N_P Rapport azote sur phosphate (52% axe 1-2)
SP60	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible
TS40	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte
TOB80		Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte

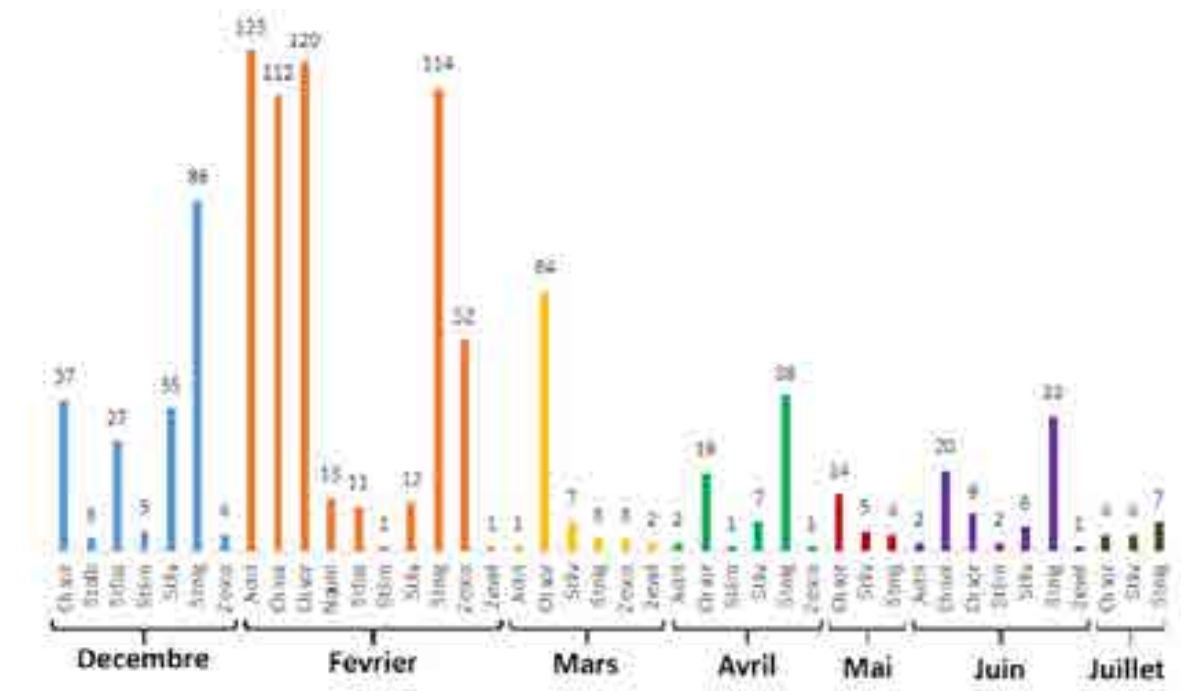


Figure 11 : Abondance des petits poissons herbivores (2-3 cm) en fonction du mois



le phosphate ne contribue que faiblement à la formation de l'axe 1 (il contribue positivement à la formation de l'axe 3), il se trouve relativement proche de la variable salinité. Ce paramètre présente de faibles teneurs dans les nappes phréatiques, et il est mis à disposition dans le récif par des apports océaniques, eux même mis en évidence par des valeurs fortes de salinité. Le signal de cette variable est sûrement brouillé car, même si les teneurs sont très faibles dans les nappes phréatiques, les valeurs peuvent être légèrement plus importantes près de la plage.

L'axe 2 est quant à lui plus difficile à interpréter. Il semble que cet axe oppose des stations abritant des peuplements phytoplanctoniques (côté positif) à des stations hébergeant des peuplements macrophytiques (côté négatif) : des quantités de phéophytine élevées peuvent indiquer une production de phytoplancton et le développement d'un réseau trophique qui consomme ce phytoplancton, pouvant être en relation avec une augmentation de la turbidité et une remise en suspension de la matière présente dans les sédiments. Il est intéressant de constater que les variables mesurant les teneurs en phosphate et phosphore particulaire s'opposent sur l'axe 2 (même si la contribution à la formation de l'axe du phosphore reste faible). Cela pourrait illustrer une utilisation du phosphore dans le système. Concernant la signification exacte de cet axe, il serait judicieux de mettre en relation ces interprétations avec les autres compartiments car il est possible que la répartition des stations sur cet axe oppose des stations avec des substrats différents, ou encore présentent un fort hydrodynamisme.

## 2. Compartiment ichthyologique

L'exploitation des deux variables du compartiment ichthyologique dans leur état actuel pose deux problèmes :

- l'analyse de la variable taille nécessite une transformation préalable de celle-ci, car l'étude de la taille des espèces de poissons sans l'associer à l'abondance n'est pas un très pertinent,
- l'abondance des jeunes ou plus précisément le recrutement des juvéniles risque d'influencer le nombre d'individus, sans que cela est un rapport directe avec la qualité du milieu et avec notre problématique (**Figure 11**, une solution serait de supprimer de l'étude les individus d'une taille inférieur à 3 cm).

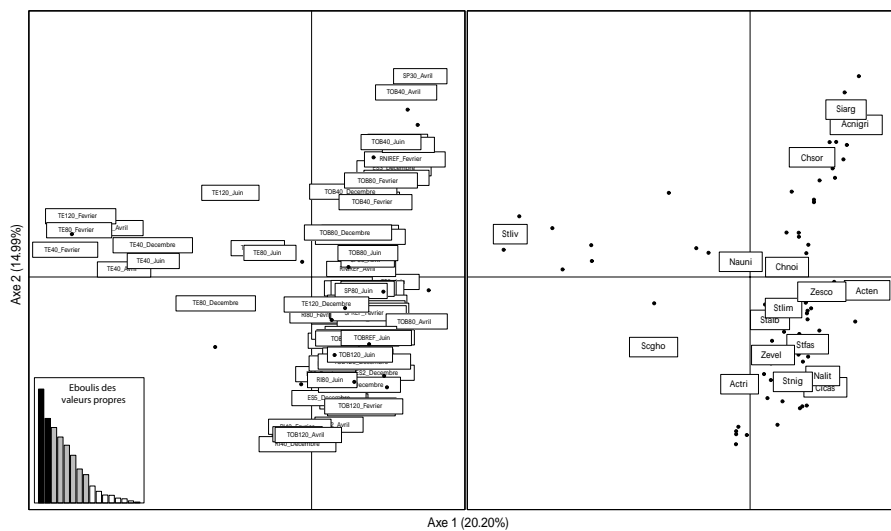
Pour répondre à ces deux problèmes, ces deux variables ont été « converties » afin d'exprimer la biomasse. En écologie, la biomasse représente (ici en gramme) la masse totale des organismes vivants mesurée dans une population. Une formule permet à partir de l'abondance et la taille d'un individu de calculer la biomasse :

Biomasse (en g)

$$= \text{Abondance (nombre d'individus)} \times \text{Coefficient A} \times \text{Taille (en cm)}^{\text{Coefficient B}}$$

Cette biomasse a été exprimée par m<sup>2</sup> afin de se rapporter à une surface. Les biomasses des différentes espèces de poissons peuvent être considérées comme des données de peuplement : chaque ligne de nos données représente le peuplement d'une station à un mois donné. Les données transformées peuvent donc être considéré comme un tableau de contingence, croisant en ligne une variable indiquant les stations (pour un mois donné) et en colonne une variable indiquant la biomasse des différentes espèces. Chaque ligne est donc un profil dont les colonnes associées doivent être considéré dans leur ensemble car elles représentent le peuplement de la station associée. Une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a donc été réalisée sur les données de biomasse du compartiment ichthyologique (**Figure 12**).

D'après l'ébouillement des valeurs propres, il serait intéressant de regarder au moins les 7 premiers axes. Cependant, étant donné le nombre très important « d'individus » (stations-mois) la lisibilité des



représentations n'est pas optimale. Les graphiques des représentations des stations en fonction des mois montrent que les mois se trouvent globalement regroupés (**Figure 13**).

Il semble donc que la variabilité temporelle soit relativement réduite. Afin de quantifier la part de cette variabilité temporelle dans l'inertie totale, une AFC intra-classe a été réalisée. En enlevant l'effet temporel (facteur mois) on constate que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9471, cela veut dire que 94.71% de l'inertie totale est expliquée par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente 5.28% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité est relativement réduite (surtout par rapport à la variabilité spatiale qui représente 57.56%), cela nous permet de réaliser des moyennes des différentes variables en fonction du mois.

Une deuxième AFC a donc été réalisée avec les moyennes par mois des différentes variables (**Figure 14**, **Annexe 15** et **Annexe 16**). L'éboullis des valeurs propres nous suggère de regarder les 4 premiers axes.

Les résultats de cette analyse sont regroupés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 5**).

Ces analyses mettent en avant la stabilité du peuplement herbivore face aux variations temporelles. L'AFC montre ensuite la différenciation des stations de Trou d'Eau caractérisées par une biomasse importante de *Stegastes lividus*. L'AFC souligne l'efficacité des herbivores du genre *Stegastes* et chirurgiens pour différencier les stations.

Suite à cette première analyse, une Analyse Non-symétrique des Correspondances (ANSC) a été réalisée. Ce type de méthode mesure l'augmentation (ou la diminution) de la prédictibilité des lignes, en relation avec l'information apportée par les colonnes (contrairement à une AFC classique où chaque colonne et chaque ligne est analysée symétriquement, **Kroonenberg & Lombardo 1999**). De plus cette analyse permet de ne pas sur-représenter les espèces «rares». Le graphique de cette analyse ne s'interprète pas comme une AFC classique. Ce graphique représente le centre des profils des colonnes, et permet d'identifier les relations entre les colonnes et les lignes (en termes de prédiction). Si toutes les projections des lignes sont disposées près de l'origine du graphique, cela veut dire que la distribution des profils des colonnes est proche de la distribution marginale et qu'il y a peu de prédictibilité pour des colonnes en particulier. Si certaines lignes ont une projection proche d'une colonne et loin de l'origine, la colonne présente une forte prédictibilité avec cette ligne. D'après l'éboullis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder les 4 premiers axes (ici seul la représentation de l'axe 1-2 sera présentée, l'autre représentation n'apporte pas d'information complémentaire, **Figure 15**).

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 6**).

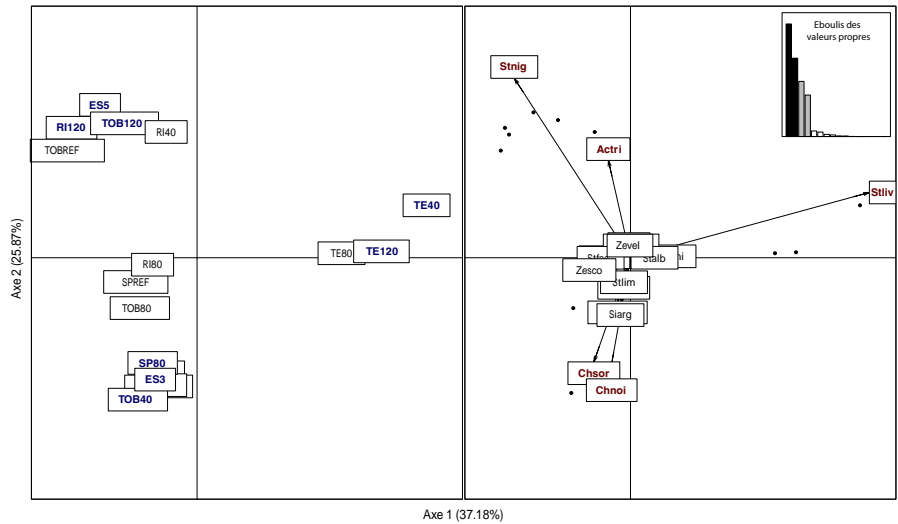
Etant donné que les espèces du genre *Stegastes* semble contribue de façon importante aux profils des stations, une dernière AFC a été réalisée en fusionnant toutes les espèces de *Stegastes* en une seule. D'après l'éboullis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder les 3 premiers axes. Seule la représentation des axes 1-2 (**Figure 16**) sera représentée ici (les représentations des autres axes n'apportent pas d'information supplémentaire).

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 7**).

Ces deux analyses mettent en valeur l'importance du genre *Stegastes* dans la différenciation des stations. Les stations de Trou d'Eau sont une nouvelle fois caractérisées par ce genre. L'analyse factorielle finale met en valeur des espèces moins abondantes. *Acanthurus tennentii*, *Chlorurus sordidus* caractérisent la station ES3. *Acanthurus nigricauda* est caractéristique des stations de Saint-Pierre.

**Tableau 5 :** Bilan des résultats de l’AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

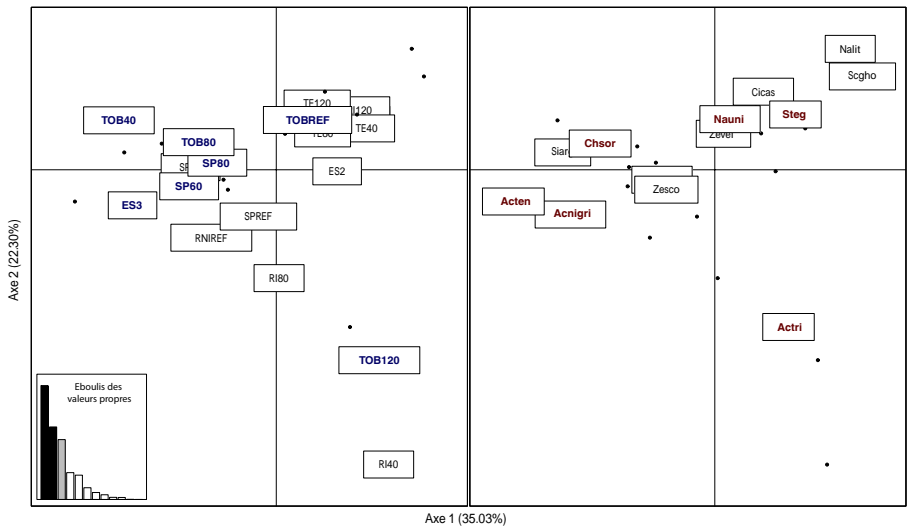
	Stegastes leucost. (97% axe 1-2)	Stegastes nigrocost. (89% axe 1-2)	Poissons chirurgiens noirs (86% axe 1-2)	Chlorurus taeniatus (89% axe 1-2)	Acrothurus triostegus (81% axe 1-2)	Stegastes dimidiatus (81% axe 1-2)
TE40 (67% axe 1-2)	Valeur forte					
TE40 (67% axe 1-2)	Valeur forte					
TE120 (79% axe 1-2)	Valeur forte					
ES5 (60% axe 1-2)		Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible		
RI120 (81% axe 1-2)		Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible		
TE120 (89% axe 1-2)		Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur faible
ES3 (54% axe 1-2)		Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	
TE80 (57% axe 1-2)		Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible
TE80 (57% axe 1-2)		Valeur forte	Valeur faible	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible
SP80 (44% axe 1-2)			Valeur forte		Valeur faible	Valeur forte



**Figure 15 :** Représentation des axes 1-2 de l’ANSC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

**Tableau 6 :** Bilan des résultats de l’ANSC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

	Stegastes leucost. (98% axe 1-2)	Stegastes nigrocost. (81% axe 1-2)	Acrothurus triostegus (21% axe 1-2)	Stegastes nigrocost. (74% axe 1-2)	Chlorurus taeniatus (98% axe 1-2)	Poissons chirurgiens noirs (45% axe 1-2)
TE120 (67% axe 1-2)	Valeur importante	Valeur peu importante				
TE40 (67% axe 1-2)	Valeur importante	Valeur peu importante				
ES3 (77% axe 1-2)			Valeur peu importante	Valeur peu importante	Valeur importante	Valeur importante
SP80 (85% axe 1-2)			Valeur peu importante	Valeur peu importante	Valeur importante	Valeur importante
TOB40 (30% axe 1-2)			Valeur peu importante	Valeur peu importante	Valeur importante	Valeur importante
ES5 (74% axe 1-2)			Valeur importante	Valeur importante	Valeur peu importante	Valeur peu importante
RI120 (77% axe 1-2)			Valeur importante	Valeur importante	Valeur peu importante	Valeur peu importante
TOB120 (32% axe 1-2)			Valeur importante	Valeur importante	Valeur peu importante	Valeur peu importante



**Figure 16 :** Représentation des axes 1-2 de l’AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin (après fusion des espèces de Stegastes)

Ces différentes analyses ont permis de mettre en avant la variabilité temporelle réduite du peuplement herbivore. Ceci souligne la robustesse de la communauté herbivore comme bioindicateur de l'état de santé du récif. Les communautés sont peu influencées par la période à laquelle est effectué l'échantillonnage, permettant de mieux identifier les variations essentiellement dû aux facteurs de perturbation.

Exception faite sur quelques espèces cryptiques (*Cirripectes castaneus*) ou fuyantes (*Naso littoratus*) visibles sur seulement quelques stations, la diversité des poissons herbivores du littoral ouest est relativement homogène. Les chirurgiens noirs (*Ctenochaetus striatus* et *Acanthurus nigrofuscus*) et le genre *Stegastes* (en particulier *Stegastes nigricans* et *Stegastes lividus*) représentent sur la plupart des stations plus de 60% de l'abondance totale. La biomasse de ces genres est cependant la plus à même de différencier les sites impactés. En effet, malgré l'homogénéité du peuplement, certains sites considérés sont reconnaissables par une dominance excessive de ces espèces (exemple : Trou d'Eau). Un peuplement déséquilibré est le premier signal à prendre en compte pour l'étude de l'eutrophisation et par la suite la recherche de bioindicateur. TE40 et plus généralement les sites de Trou d'eau, caractérisés par plus de 60% de *Stegastes lividus*, en sont les meilleurs exemples. Cela permet de souligner l'importance des *Stegastes* (en particulier *Stegastes nigricans* et *Stegastes lividus*), friands des algues qui se développent en milieu enrichies en nutriments, comme une source fiable d'information. Même si notre étude ne le démontre pas clairement, au niveau espèce, il a été démontré que *Stegastes nigricans* a une taille et une abondance plus importantes dans les zones impactées (**Lison de loma et al 2000**).

Les chirurgiens noirs, *Ctenochaetus striatus* et *Acanthurus nigrofuscus* sont des racleurs de feutrage algal. Les algues gazonnantes étant de plus en plus présentes sur les récifs réunionnais, il est probable que ces deux espèces aient trouvé un environnement favorable pour leur développement. Les suivis effectués par la réserve marine de La Réunion ont montré une augmentation de ces populations quasi effective sur toutes les stations se caractérisant par un développement d'algues gazonnantes. (**Chabanet & Bissery 2010**).

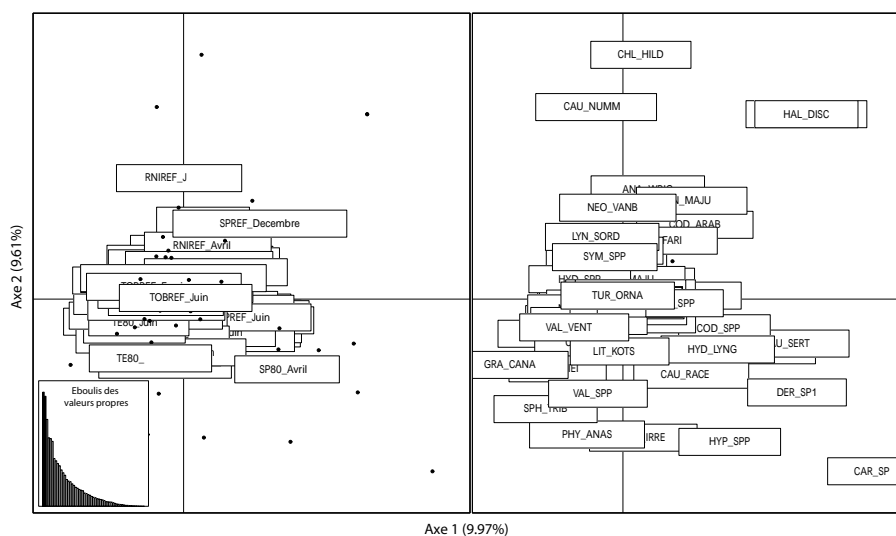
La taille et/ou la biomasse des espèces mobiles, souvent liées à l'effort de pêche ne permettent pas une différenciation claire des stations et ne semblent pas présenter un intérêt dans la recherche de bioindicateurs liés à l'eutrophisation. La taille des poissons est régulièrement utilisée comme métrique de la pression de pêche (**Bianchi et al 2000**).

Cependant, au vue des analyses la biomasse des *Stegastes* non ciblés par la pêche, pourrait se comporter comme un bioindicateur fiable. En effet, la proportion de *Stegastes* de grande taille est plus importante à Trou d'eau, zone supposée enrichie en nutriments (**Bein & Nicet 2011**). Il devient donc essentiel de réserver une place importante à ce genre dans la recherche de bioindicateurs. De plus, *Ctenochaetus striatus* et *Acanthurus nigrofuscus* regroupées sous le nom de chirurgiens noirs, par leur rôle de racleurs de feutrage algal, ne sont pas à délaissier.

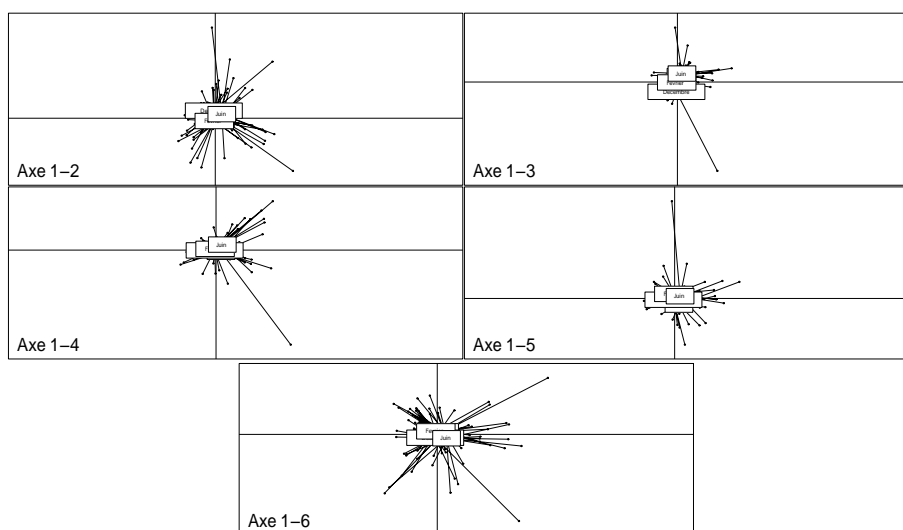
Malgré le fait que *Chlorus sordidus* semble mettre en valeur les stations non impactés, les poissons perroquets, et les poissons chirurgiens du genre *Naso*, ne peuvent être dans le cadre réunionnais utilisés comme bioindicateur d'eutrophisation. Leur forte dépendance à la pression de pêche, et le faible nombre d'individus ne pourrait que biaiser les résultats les concernant.

**Tableau 7** : Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichthyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin (après fusion des espèces de Stegastes)

	Acten <i>Acanthurus fennenti</i> (41% axe 1-2)	Chsor <i>Chlorurus sordidus</i> (51% axe 1-2)	Actri <i>Acanthurus triostegus</i> (76% axe 1-2)	Steg Fusion Stegastes (63% axe 1-2)	Nauni <i>Naso unicornis</i> (46% axe 1-2)	Acnign <i>Acanthurus nigricauda</i> (63% axe 1-2)
ES3 (53% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible		
TOB120 (73% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte		Valeur faible	
SP60 (50% axe 1-2)				Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte
SP60 (52% axe 1-2)				Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte
TOB40 (37% axe 1-2)			Valeur faible		Valeur forte	Valeur faible
TOB80 (54% axe 1-2)			Valeur faible		Valeur forte	Valeur faible
TOBREF (62% axe 1-2)			Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible



**Figure 17** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs de « présence/absence » des (données composition spécifique algale) mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 18** : Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée sur les données de « présence/absence » (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



### 3. Compartiment algal

Pour les analyses suivantes, les stations RNI40, RNI70 et RNI90 ont été supprimées du jeu de données car elles ne présentaient pas de valeurs pour le mois de Décembre.

#### a. Analyse de la composition spécifique

##### • Analyse des données de « présence/absence »

Une première AFC a été réalisée sur le tableau de « présence/absence » (codé en 0 et 1) des espèces algales recensées par stations et mois. L'éboullis des valeurs propres suggère de regarder au moins les 6 premiers axes. Cependant les représentations (par exemple la représentation de l'axe 1-2, **Figure 17**) ne sont pas exploitables du fait du trop grand nombre de variables et « d'individus » (stations-mois) qui ne permettent pas d'avoir des graphiques lisibles.

Cependant la représentation des stations en fonction des mois permette de voir que les mois sont globalement regroupés (**Figure 18**). Il semble donc que la variabilité temporelle soit faible et qu'il semble possible de réaliser la somme des cellules du tableau de « présence/absence » par stations.

Afin de quantifier la part de la variabilité temporelle, une AFC intra-groupe a été réalisée. Si on enlève l'effet temporel (facteur mois) on remarque que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9333. Cela veut donc dire que 93.33% de l'inertie totale est expliqué par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente environ 6% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité est relativement réduite (surtout par rapport à la variabilité spatiale qui représente 44.92%), cela nous permet de réaliser la somme des valeurs des différents mois pour chacune des espèces.

Une seconde AFC a été réalisée sur ces nouvelles valeurs. D'après l'éboullis des valeurs propres il semble intéressant de voir les deux premiers axes (**Figure 19**).

Les résultats de cette analyse sont regroupés le tableau ci-dessous (**Tableau 8**).

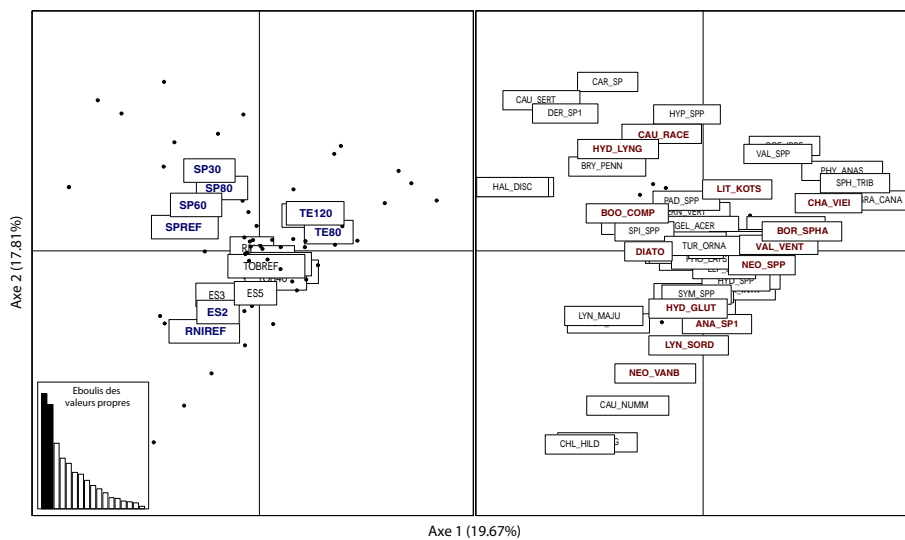
D'après cette première analyse de la composition spécifique, les espèces algales semblent se différencier davantage en fonction des sites et des secteurs qu'en fonction des gradients d'enrichissements en nutriments. L'utilisation du paramètre « présence / absence » des espèces donne trop d'importance aux espèces rares ou occasionnelles.

Cependant, cette première analyse a fait apparaître des espèces potentiellement « sentinelles » caractéristiques des stations impactées par les résurgences d'eau douce (Trou d'Eau et Saint-Pierre) :

- les algues vertes *Boodlea composita*, *Bornetella sphaerica*, *Chaetomorpha vieillardii*, *Valonia ventricosa* et *Caulerpa racemosa* var. *lamourouxii*,
- les diatomées,
- les algues rouges calcaires *Neogoniolithon* spp et *Lithophyllum kotschyannum*,
- la cyanobactérie *Hydrocoleum lyngbyaceum*.

A l'inverse, certaines espèces semblent caractéristiques de certaines stations « non impactées » ES2 et RNIREF :

- les cyanobactéries *Anabaena* sp1, *Hydrocoleum glutinosum*, *Lyngbya sordida*,
- l'algue verte *Neomeris vanbosseae*.



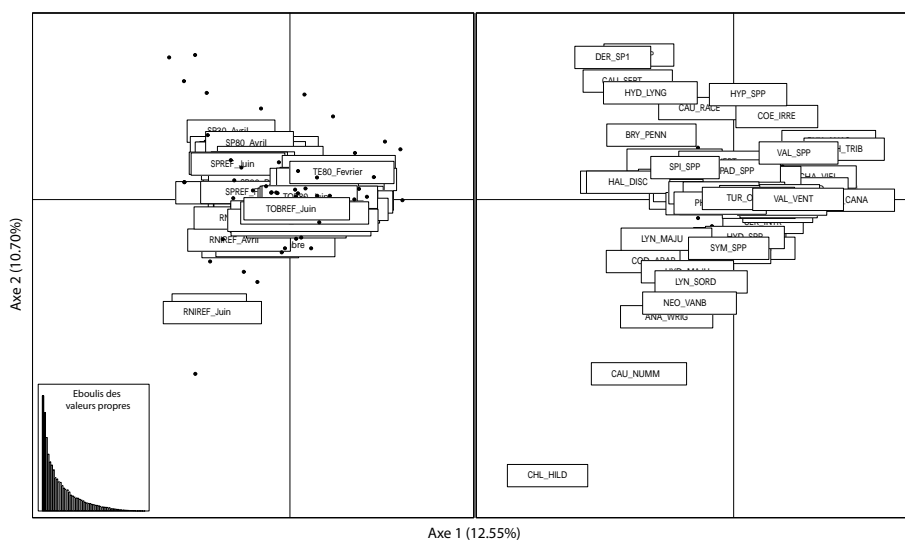
**Figure 19** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur somme de l'indice de « présence/absence » (données composition spécifique algale) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin

**Tableau 8** : Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur somme de l'indice de « présence/absence » (données composition spécifique algale) sur les mois de Décembre, Février, Avril et Juin

	BOO_COMP <i>Boothia complanata</i> (85% axe 1-2)	DIATO <i>Diatomella</i> (85% axe 1-2)	BOR_SPHA <i>Boothia sphaerica</i> (85% axe 1-2)	CHA_VIEI <i>Chaetomorpha verticillata</i> (85% axe 1-2)	HYD_SPP <i>Hydrocoleum glutinosum</i> (58% axe 1-2)	VAL_VENT <i>Valoniopsis ventricosa</i> (57% axe 1-2)	ANA_SPS <i>Anabaena sp.</i> (48% axe 1-2)
SP90 (52% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	
SP907 (35% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	
TE120 (64% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	
TE80 (55% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	
ES2 (46% axe 1-2)							Valeur forte
ES3 (47% axe 1-2)							Valeur faible
SP90 (41% axe 1-2)							Valeur faible

	HYD_GLUT <i>Hydrocoleum glutinosum</i> (47% axe 1-2)	LYN_SORD <i>Lyngbya sordida</i> (46% axe 1-2)	NEO_VANB <i>Neodactylopusia vanbenedictii</i> (38% axe 1-2)	CAU_RACE <i>Caulerpa racemosa</i> (37% axe 1-2)	HYD_LYNG <i>Hydrocoleum lyngbyaceum</i> (36% axe 1-2)	LIT_KOTS <i>Lithothamnion kotschyanae</i> (35% axe 1-2)
SP90						
SP907						
TE120						
TE80						
ES2	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible
RNREF	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible
SP30	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte
SP90	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte



**Figure 20** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



La forte présence de *Neomeris vanbosseae* à la station ES2 pourrait être expliquée par le fort hydrodynamisme. En effet, cette espèce a été répertoriée majoritairement sur les stations du front récifal où les vagues créent un hydrodynamisme très important. La forte présence des cyanobactéries sur ces 2 stations peut s'expliquer par les fortes teneurs en phosphates observées sur ces stations car ces espèces fixatrices d'azote atmosphérique (N<sub>2</sub>) ne sont pas limitées par les teneurs en azote mais plutôt par les teneurs en phosphates (Kuffner & Paul 2001).

### • Analyse de l'indice d'abondance relative

Une AFC a été réalisée sur le tableau des indices d'abondance relative. Au regard de l'éboullis des valeurs propres, il semble intéressant de regarder au moins les 7 premiers axes. Cependant comme précédemment, les représentations ne sont pas exploitables du fait du trop grand nombre de variables et « d'individus » (stations-mois) qui ne permettent pas d'avoir des graphiques lisibles (Figure 20).

Les représentations des « individus » en fonction du mois nous montre que les différents mois sont globalement regroupés (Figure 21). Il semble donc que la variabilité temporelle soit faible.

Afin de quantifier la part de la variabilité temporelle, une AFC intra-groupe a été réalisée (non présentée dans ce rapport). Si on retire l'effet temporel (facteur mois) on remarque que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9281. Cela veut donc dire que 92.81% de l'inertie totale est expliqué par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente à près 7% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité temporelle est relativement réduite, il est possible de synthétiser les données en utilisant la médiane des valeurs des 4 mois pour chaque espèce (faire une moyenne ici sur un indice quantitatif n'était pas forcément pertinent).

Une seconde AFC a donc été réalisé sur ces nouvelles données. D'après l'éboullis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder les 3 premiers axes (Figures 22 et Annexe 17).

Les résultats de cette analyse sont regroupés le tableau ci-dessous (Tableau 9).

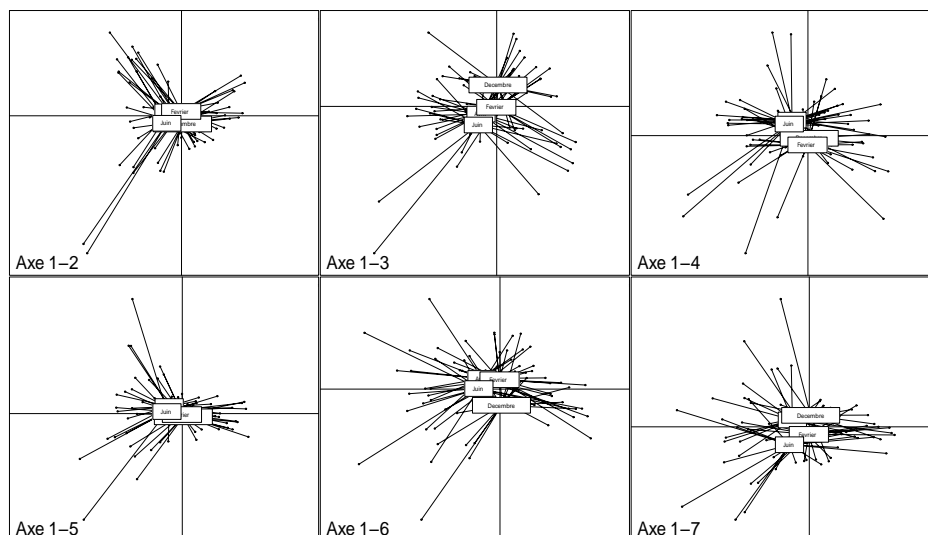
L'attribution d'un indice d'abondance relatif aux espèces algales observées permet de mettre en évidence les proliférations algales, qui seraient une des conséquences de l'enrichissement en nutriments des platiers réunionnais. L'abondance élevée de *Boodlea composita*, d'*Hydrocoleum lyngbyaceum* et des diatomées est caractéristique du site de Saint-Pierre. De plus, les stations ES2 et RNIREF, sous influence océanique, sont caractérisées par une forte abondance de certaines espèces de cyanobactéries : *Hydrocoleum glutinosum*, *Symploca spp* et *Lyngbya sordida*. En effet, certaines espèces n'étant pas limitées en azote (diazotrophie), leur développement ne serait pas lié aux résurgences d'eaux douces. Enfin, l'abondance élevée de *Neomeris vanbosseae* et *Codium arabicum* aux stations ES2 et RNIREF pourrait être expliquée par le fort hydrodynamisme. En effet, ces deux espèces ont été répertoriées majoritairement sur les stations du front récifal où les vagues créent un hydrodynamisme très important.

Cette analyse a fait apparaître une abondance élevée de l'algue rouge calcaire *Lythophyllum kotschyianum* sur la station TE40 fortement impactée par les résurgences d'eau douce.

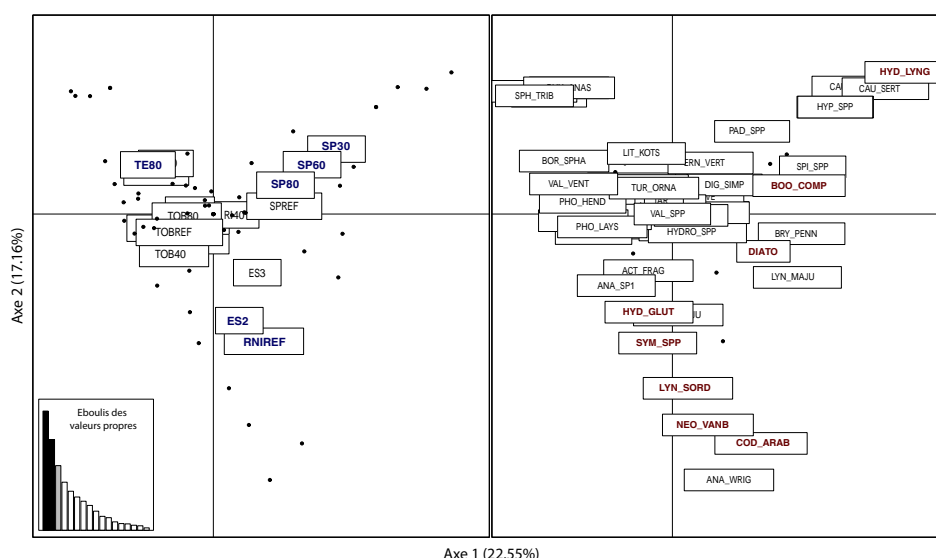
Cette analyse fait également apparaître une abondance élevée de l'algue rouge *Actinotrichia fragilis* sur les stations non impactées de Toboggan (TOB80 et TOBREF).

### • Analyse selon des critères taxonomiques et le statut écologique des espèces

A partir du tableau de présence-absence illustrant la composition spécifique des algues, plusieurs variables ont été construites.



**Figure 21** : Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée sur l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 22** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

**Tableau 9** : Bilan des résultats de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

	BOO_COMP Boudouia composita (88% axe 1-2)	GAARD Diatomees (73% axe 1-2)	HYD_LYNG Hydrocoleum lyngbyaceum (33% axe 1-2)	COD_ARAB Codium arabianum (75% axe 1-2)	HYD_GLUT Hydrocoleum glutinatum (50% axe 1-2)	LYN_SORD Lyngbya sordida (54% axe 1-2)	NEO_VANB Nannochloris vancouveriensis (88% axe 1-2)	SYM_SPP Symplecta spp (85% axe 1-2)	ACT_FRAG Actinotrichia fragilis (62% axe 1-2)	HYD_MAJU Hydrocoleum majus (54% axe 2-3)	LIT_KOTS Lithothamnion kottnichianum (48% axe 2-3)
SP80 (68% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte								
SP40 (75% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte								
SP80 (33% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte								
TE80 (38% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur faible	Valeur faible								
ES2 (43% axe 1-2)				Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte
RNREF (63% axe 1-2)				Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte	Valeur forte			
TE40 (38% axe 1-2)									Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte
TOB80 (41% axe 2-3)									Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible
TOBREF (47% axe 2-3)									Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible

La richesse spécifique par groupes taxonomiques semble être un paramètre pertinent dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau. Différentes variables « taxonomiques » ont donc été testées (pourcentages et ratios) :

- le pourcentage d'algues rouges (PC\_AR),
- le pourcentage d'algues brunes (PC\_AB),
- le pourcentage d'algues vertes (PC\_AV),
- le pourcentage de cyanobactéries (PC\_C),
- le pourcentage de diatomées (PC\_D),
- le rapport % algues rouges / % algues vertes (C\_AR\_AV),
- le rapport % algues vertes / % (cyanobactéries + diatomées, C\_AV\_CYANO\_DIATO),
- le rapport % algues brunes / % (cyanobactéries + diatomées, C\_AB\_CYANO\_DIATO),
- le rapport % algues rouges / % (cyanobactéries + diatomées, C\_AR\_CYANO\_DIATO).

La richesse spécifique par groupes fonctionnels pourrait être également un paramètre pertinent dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau. Les différents groupes fonctionnels ont été décrits ci-dessous :

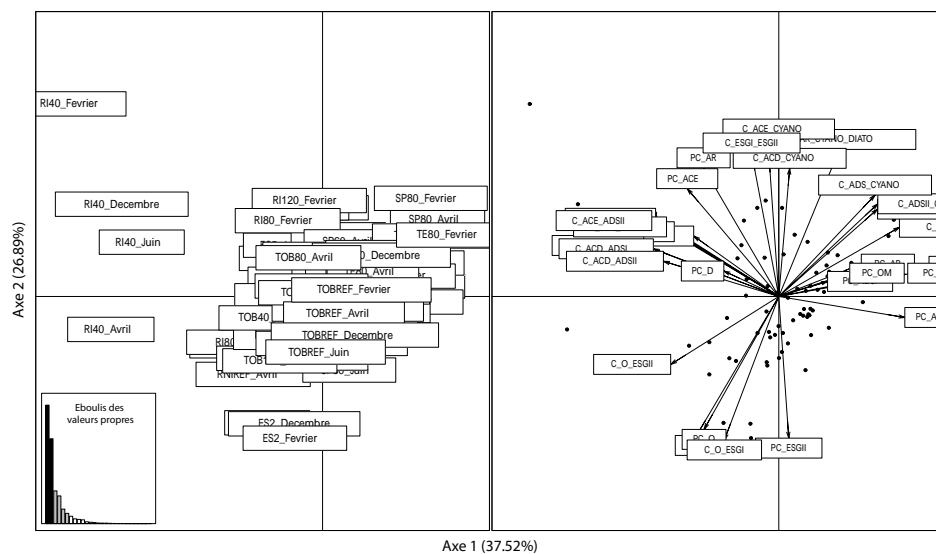
- ADS : Algues Dressées Souples de type I (ADSI, adhérentes/rampantes) et de type II (ADSII, les autres espèces d'Algues Dressées Souples),
- ACD : Algues Calcaires Dressées,
- ACE : Algues Calcaires Encroûtantes.

A ces groupes prédéfinis, nous avons ajoutés deux autres groupes fonctionnels fréquemment rencontrés sur les récifs réunionnais :

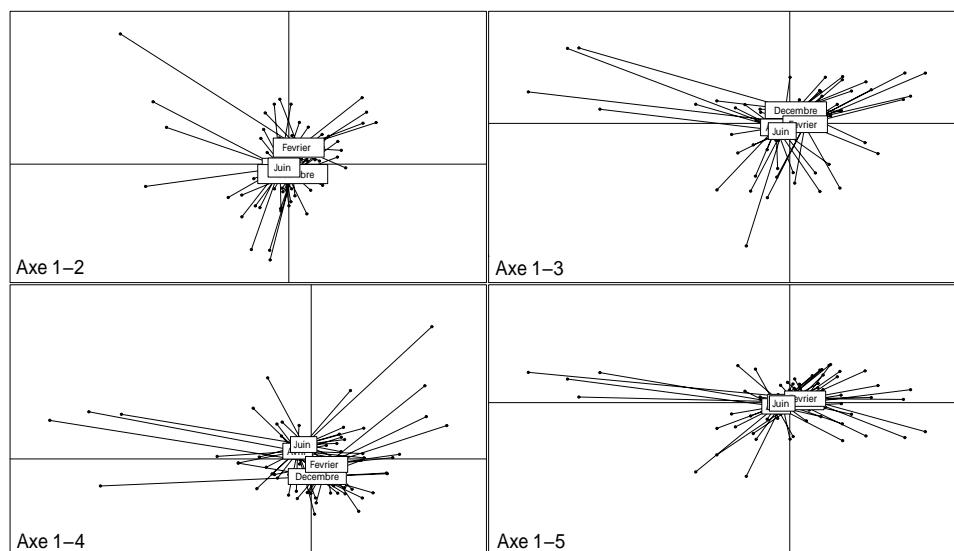
- le TAC (Turf d'Algues Calcaires) forme des tapis denses composés de Corallinaceae avec une espèce dominante : *Amphiroa fragilissima*. Certaines travées détritiques sont entièrement recouvertes par ce TAC.
- le TAR (Turf d'Algues Rouges) qui forme des petites touffes rouges/brunes de quelques cm de hauteur constituées par un ensemble d'algues rouges composé de deux espèces majoritaires : *Pterocladia caerulea* et *Ceratodictyon intricatum*.

De plus, différentes variables « fonctionnelles » ont donc été testées (pourcentages et ratios) :

- le pourcentage d'algues dressées souples (PC\_ADS),
- le pourcentage d'algues dressées souples adhérentes (PC\_ADSI),
- le pourcentage d'algues dressées souples non adhérentes (PC\_ADSII),
- le pourcentage d'algues calcaires dressées (PC\_ACD),
- le pourcentage d'algues calcaires encroûtantes (PC\_ACE),
- le pourcentage de turf d'algues calcaires (PC\_TAC),
- le pourcentage de turf d'algues rouges (PC\_TAR),
- le rapport % ACE / % CYANO (C\_ACE\_CYANO),
- le rapport % ADSII / % CYANO (C\_ADSII\_CYANO),
- le rapport % ADS / % CYANO (C\_ADS\_CYANO),
- le rapport % ACD / % ADS (C\_ACD\_ADS),
- le rapport % ACD / % ADSI (C\_ACD\_ADSI),



**Figure 23 :** Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée les variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 24 :** Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite réalisée les variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

- le rapport % ACD / % ADSII (C\_ACD\_ADSII),
- le rapport % ACD / % CYANO (C\_ACD\_CYANO),
- le rapport % ACE / % ADS (C\_ACE\_ADS),
- le rapport % ACE / % ADSI (C\_ACE\_ADSI),
- le rapport % ACE / ADSII (C\_ACE\_ADSII).

La stratégie écologie utilisée par les algues est cruciale lors des phénomènes d'enrichissement. La manière dont les espèces font face aux fluctuations des teneurs en nutriments dépend de leur capacité à les absorber, les assimiler, les stocker et la capacité à maintenir une croissance maximale avec de faibles teneurs en nutriments (**Martinez et al. 2012**). La présence d'algues opportunistes représenterait en effet un des premiers symptômes d'une dégradation du milieu. Les espèces opportunistes sont définies comme des espèces peu spécialisées, ne dépendant pas d'un habitat particulier et qui peuvent coloniser une palette de milieux très large. Cette polyvalence permet à ces espèces de mieux résister aux modifications anthropiques de l'environnement. Elles présentent en général de fortes aptitudes de dissémination et de colonisation du fait de leur croissance rapide et d'une forte capacité d'absorption leur permettant de profiter des brusques augmentations en nutriments (formation de blooms). Ces espèces forment généralement des populations importantes mais transitoires dans les milieux perturbés ou extrêmes (par exemple les blooms algues vertes en Bretagne). Dans notre étude, les espèces dites opportunistes sont les cyanobactéries et les diatomées mais aussi certaines macroalgues (*Asparagopsis taxiformis*, *Bryopsis pennata*, *Chaetomorpha vieillardii*, *Cladophora sundanensis*, *Derbesia sp1*, *Gracilaria canaliculata*, *Hypnea spp*, *Sphacelaria tribuloides*, *Ulva sp* et *Valonia spp*). Cette liste a été définie selon les références bibliographiques existantes et sur expertise (**McCook 1999, McCook et al. 2001, Guinda et al. 2008, Gaspar et al. 2012, Lapointe 1997, Lapointe & Bedford 2011, Naim et al. 2012**).

A partir d'une classification adaptée de Littler & Littler (**1980, 1984**) et de Wells et al. (**2007**), différents variables « écologiques » ont été testées (pourcentages et ratios) :

- le pourcentage d'opportunistes (macroalgues + cyanobactéries + diatomées, PC\_O),
- le pourcentage d'opportunistes macroalgues (PC\_OM),
- le pourcentage de macroalgues de statut ESGI (classification selon **Orfanidis et al. 2001**, PC\_ESGI),
- le pourcentage de macroalgues de statut ESGII (classification selon **Orfanidis et al. 2001**, PC\_ESGII),
- le rapport % ESGI / % ESGII (C\_ESGI\_ESGII),
- le rapport % opportunistes / % ESGI (C\_O\_ESGI),
- le rapport % opportunistes / % ESGII (C\_O\_ESGII).

Une ACP centrée/réduite a été effectuée sur ces nouvelles variables. D'après l'ébouilissement des valeurs propres, il semble intéressant de regarder les 5 premiers axes. Cependant comme précédemment, la lisibilité des représentations ne permet pas d'établir des interprétations (**Figure 23**).

Les représentations des « individus » en fonction du mois semblent nous montrer que la variabilité temporelle soit relativement faible (**Figure 24**).

Pour vérifier cela, une ACP intra-groupe a été réalisée. Si on enlève l'effet temporel (facteur mois) on remarque que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9490. Cela veut donc dire que 94.90% de l'inertie totale est expliquée par l'ACP intra-groupe. La variabilité temporelle représente à peu près 5.09% de





la variabilité totale de l'ACP précédente). Etant donné que cette variabilité temporelle est relativement réduite, il est possible d'utiliser des moyennes calculées sur les 4 mois pour chaque variable.

Une seconde ACP centrée/réduite a donc été réalisée sur ces nouvelles données. Etant donné qu'il n'y a plus de redondance entre les différents sites répétés chaque mois, des indices de diversité taxonomique ont pu être calculés et ajoutés aux variables analysées:

- Richesse\_spe : l'indice de richesse spécifique (qui n'est pas à proprement parlé un indice taxonomique),
- Lambda\_plus : l'index de variation de distinction taxonomique,
- Delta\_plus : indice calculé à partir de la distance moyenne au travers de l'arbre taxonomique entre chaque paire d'espèce de l'échantillon.

Ces indices de diversité taxonomique ont été calculés à partir du package vegan de R ([Oksanen et al. 2013](#)). Initialement l'indice de diversité taxonomique (noté  $\Delta$ ) est calculé à partir des distances moyennes au travers de l'arbre taxonomique entre chaque paire d'individus dans l'échantillon, y compris les individus issus d'une même espèce. Un second indice, noté  $\Delta^*$  est identique au précédent sauf qu'il considère uniquement les distances entre les individus d'espèces différentes ([Warwick & Clarke 1995, 1998 et 1999](#)). Il existe un indice noté  $\Delta^+$  qui est utilisé dans le cas de données absence-présence (ce qui est notre cas ici) et qui remplace les deux précédents ([Warwick & Clarke 2001](#)). Le dernier indice  $\Delta^+$ , ou indice de variation de distinction taxonomique est basé sur l'équitabilité de la distribution des espèces et en rapport avec le niveau de distribution dans l'arbre taxonomique.

D'après l'éboulis des valeurs propres, il est intéressant de regarder au moins les 6 premiers axes. Cependant, au regard des contributions des stations sur les différents axes, on constate que la station RI40 « tire » les analyses ([Figure 25](#)). Il s'avère que cette station présente un habitat particulier (zone de débris et de galets très instables) qui peut expliquer sa démarcation très nette des autres stations.

Si on enlève cette station et que l'on réitère l'ACP centrée/réduite, on constate une amélioration de la lisibilité des autres stations. D'après l'éboulis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder les 6 premiers axes. Cependant, les 3 premiers expliquent 74% de l'inertie totale. Les représentations des axes 1-2 et 2-3 permettent de mettre en évidence plusieurs observations (les autres représentations ne montrent pas d'informations supplémentaires, [Figures 26 et Annexe 18](#)).

Les résultats de cette analyse sont regroupés le tableau ci-dessous ([Tableau 10](#)).

D'après ces analyses, plusieurs tendances apparaissent :

- une richesse spécifique des algues vertes élevée sur la station impactée SP60 mais cette tendance ne se généralise pas à toutes les stations impactées,
- une richesse spécifique des cyanobactéries élevée pour les stations proches du front récifal ES2 et RNIREF. Ce résultat confirme notre première conclusion. La forte présence des cyanobactéries sur ces deux stations peut s'expliquer par l'apport océanique des phosphates. Ces espèces diazotrophes ne sont pas limitées par les teneurs en azote mais plutôt par les teneurs en phosphates ([Kuffner & Paul 2001](#)),
- une richesse spécifique des algues rouges élevée pour la radiale impactée de Saint Leu (RI80 et RI120). Le rapport AR/AV est donc également élevé pour cette même radiale,
- 4 variables qui caractérisent 3 stations impactées (SP80, TE40 et TE80) en opposition à deux stations non impactées ES2 et RNIREF : le rapport % algues vertes / (%cyanobactéries +





%diatomées), le rapport % algues brunes / (%cyanobactéries + %diatomées) et le rapport % algues rouges / (%cyanobactéries + %diatomées),

- la richesse spécifique.

Cette mise en évidence de ces 3 rapports est plutôt le fait de la richesse spécifique des cyanobactéries, qui est plus élevée sur les stations du front récifal (apport en phosphates), et non d'une conséquence directe d'un enrichissement par les résurgences d'eau douce.

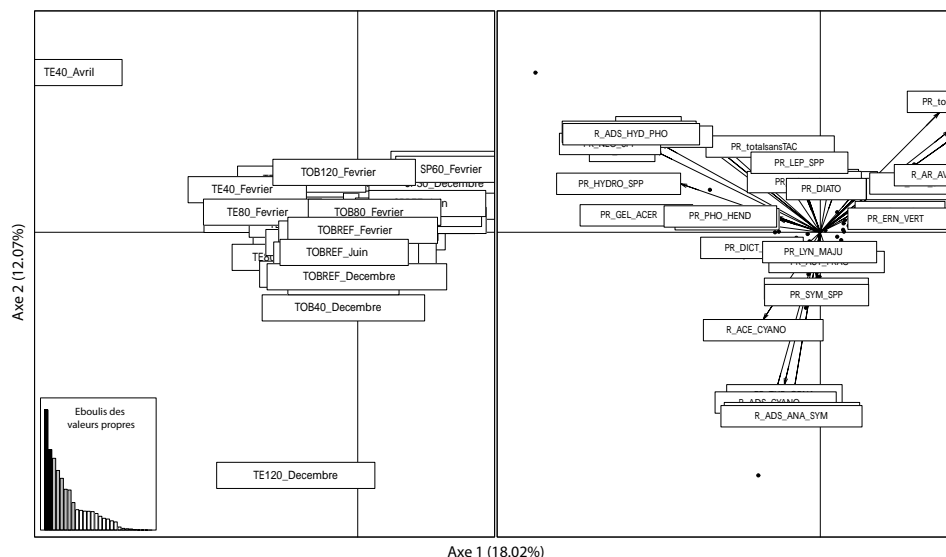
Par contre, la richesse spécifique est significativement plus importante sur les sites impactés SP80, TE40 et TE80 et ceci est en accord avec l'étude de Fabricius et al. (2005) qui a montré que la richesse spécifique des macroalgues augmentait le long du gradient de qualité de l'eau (augmentation nutriments et sédiments). Concernant l'analyse selon les groupes fonctionnels et le statut écologique, cette analyse n'apporte pas de résultats très intéressants par rapport à la problématique. Un suivi à plus long terme serait nécessaire pour faire ressortir certaines tendances. Cependant, il semble que la variable % ADS (richesse spécifique des algues dressées) soit intéressante pour caractériser l'enrichissement en nutriments car elle est plus élevée sur les stations impactées SP80, TE40 et TE80. Cette variable est déjà utilisée dans les suivis Reef Check et GCRMN. Les rapports (ACE/CYANO), (ADSII/CYANO) et (ADS/CYANO) mettent en opposition les stations impactées SP80, TE40 et TE80 (valeurs élevées) avec les deux stations du front récifal ES2 et RNIREF (valeurs faibles). Mais comme vu précédemment, ces tendances sont plus le fait de la richesse spécifique des cyanobactéries qui est plus élevée sur le front récifal. Les facteurs « hydrodynamisme » et « enrichissement » ne sont pas discriminés par l'utilisation de ces rapports.

Pour conclure sur ces analyses, il a été mis en évidence la pertinence de l'utilisation de deux variables : la richesse spécifique et le % d'algues dressées. La variable % ADS est d'ores et déjà utilisée dans certains suivis en milieu corallien (Reef Check et GCRMN). Cependant, la définition de ce groupe fonctionnel (et de tous les autres groupes fonctionnels) reste « floue » et mériterait une harmonisation. La variable richesse spécifique pourrait être ajoutée aux suivis déjà existants mais un suivi à plus long terme serait nécessaire pour définir des métriques. En effet, s'il est vrai que la richesse spécifique augmente, dans un premier temps, avec une augmentation en nutriments, elle s'effondre lors d'événements « aigus » (cyclone, pollution) avec une prédominance de quelques espèces opportunistes. Cette analyse a par ailleurs montré la pertinence du suivi des algues rouges, des algues vertes et des cyanobactéries pour la définition de bioindicateurs. Le suivi de la composition spécifique du peuplement algal devra donc être poursuivi pour affiner les premières tendances observées.

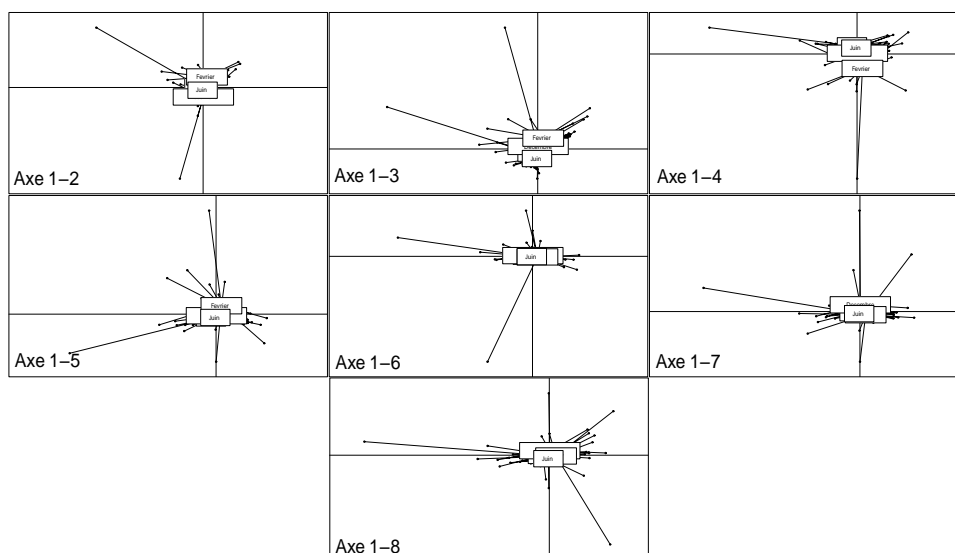
## b. Analyse de la couverture algal

La variable recouvrement a tout d'abord été moyennée par station et par mois afin d'exprimer le recouvrement moyen (en cm<sup>2</sup>) d'un quadrat pour une espèce donnée (en fonction du mois et de la station). Cette dernière a été exprimée en pourcentage pour les 21 espèces recensées. Plusieurs autres variables ont été ajoutées :

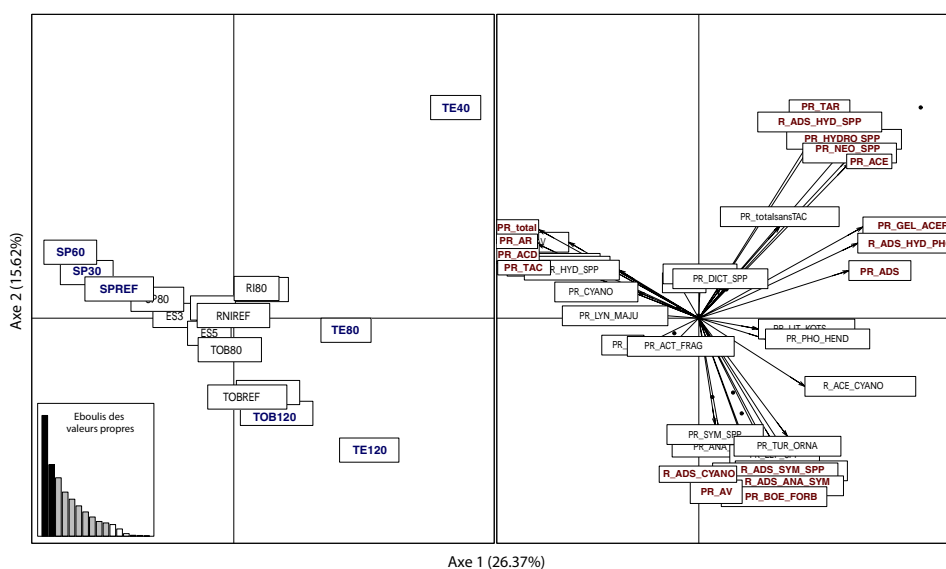
- le pourcentage total de recouvrement algal (PR\_total),
- le pourcentage total de recouvrement algal sans TAC (PR\_totalsansTAC),
- le pourcentage d'algues rouges (PR\_AR),
- le pourcentage d'algues vertes (PR\_AV),
- le pourcentage de cyanobactéries (PR\_C),



**Figure 27** : Représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite (données du recouvrement algal) réalisée les mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 28** : Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP centrée/réduite (données du recouvrement algal) réalisée les mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 29** : Représentation des stations et variables des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

- le pourcentage d'algues dressées souples (PR\_ADS),
- le pourcentage d'algues calcaires encroûtantes (PR\_ACE),
- le pourcentage d'algues calcaires dressées (PR\_ACD),
- le pourcentage d'espèces opportunistes (macroalgues, diatomées et cyanobactéries, PR\_0),
- le rapport % ADS / % CYANO (R\_ADS\_CYANO),
- le rapport % ACE / % CYANO (R\_ACE\_CYANO),
- le rapport % AR / % AV (R\_AR\_AV),
- le rapport % ADS / % SYM\_SPP (R\_ADS\_SYM\_SPP),
- le rapport % ADS / % HYD\_SPP (R\_ADS\_HYD\_SPP),
- le rapport % ADS / (% ANA\_SP1 + % SYMP\_SPP, R\_ADS\_ANA\_SYM).

Une ACP centrée/réduite a donc été réalisée (en moyennant par transects afin d'avoir des valeurs moyenne pour un quadrat par stations et mois). Selon l'éboulis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder les 8 premiers axes. La lisibilité des représentations ne permet pas d'établir des interprétations (dû en partie au grand nombre de stations-mois et de variables comme précédemment, **Figure 27**).

Les représentations des stations en fonction du mois (**Figure 28**), nous montrent que les différents mois sont globalement regroupés. Il semble donc que la variabilité temporelle soit faible.

Pour quantifier la part de la variabilité temporelle, une AFC intra-groupe a été réalisée (non présentée dans ce rapport). Si on enlève l'effet temporel (facteur mois) on remarque que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9220. Cela veut donc dire que 92.47% de l'inertie totale est expliqué par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente à près 7.52% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité est relativement réduite, cela nous permet de réaliser des moyennes des valeurs des différents mois.

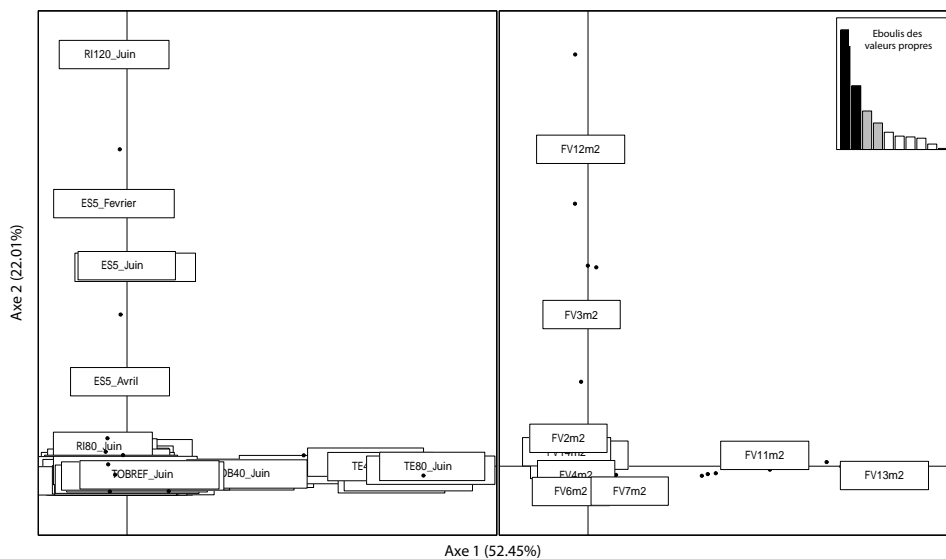
Une deuxième ACP centrée/réduite a donc été réalisée avec ces nouvelles valeurs. D'après l'éboulis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder au moins les 10 premiers axes. Après la lecture des différents axes, les représentations des axes 1-2 (**Figure 29**), 2-3 (**Annexe 19**) et 3-4 (**Annexe 20**) permettent de mettre en évidence plusieurs éléments (les autres axes ne mettent pas en évidence de nouvelles informations).

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-contre (**Tableau 11**).

D'après ces résultats, plusieurs tendances apparaissent :

- un pourcentage de recouvrement algal élevé sur les stations de Saint Pierre SP30, SP60 et SPREF (dû à un fort recouvrement par le TAC) et sur la station RI80 (dû à un bloom de diatomées). La grande variabilité de ce paramètre ne permet pas de mettre en évidence des différences de faible amplitude entre stations (**Zubia et al. 2012**),
- un pourcentage de recouvrement en algues rouges élevé sur les stations de Saint Pierre SP30, SP60 et SPREF qui est dû au fort recouvrement en TAC (composé à 100% par les algues rouges),
- par contre, si on s'intéresse à la composition spécifique de ce recouvrement en algues rouges, deux espèces semblent caractériser les stations impactées fortement par les résurgences TE40, TE80 et TE120 : *Gelidiella acerosa* et *Hydrolithon spp* (ces deux espèces présentent des recouvrements importants sur ces 3 stations),
- concernant les algues vertes, des recouvrements élevés ont été observés aussi bien sur les stations impactées (TE120) que sur les stations non impactées (TOB120 et TOBREF). La physiologie

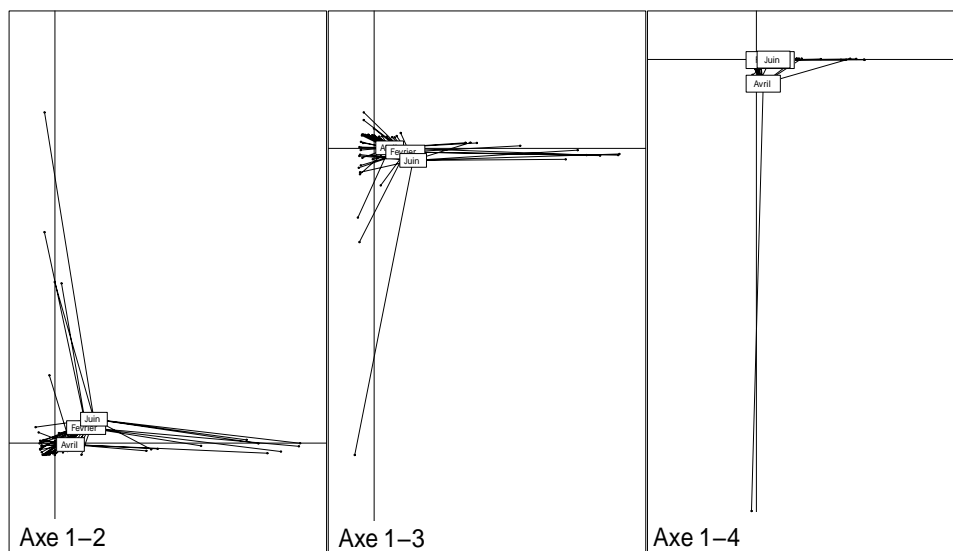
**Tableau 11** : Bilan des résultats de l'ACP centrée/ réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

[illegible]

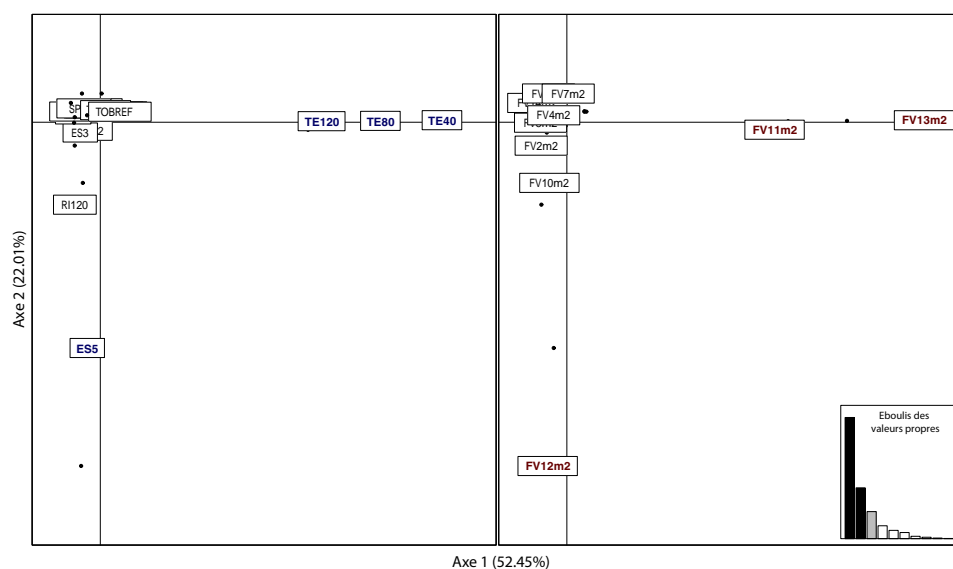
**Figure 30** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée (données des invertébrés benthique) sur les mois de Février, Avril et Juin

des algues vertes est en effet différente selon les espèces : certaines sont phosphorophiles et d'autres nitrophiles.

- un pourcentage de recouvrement élevé pour l'algue brune *Turbinaria ornata* a été observé pour la station TE120 mais cette tendance ne peut être généralisée à toutes les stations impactées selon cette analyse (des suivis complémentaires seraient nécessaires pour confirmer cette tendance),
- concernant les diatomées, le pourcentage de recouvrement est élevé aussi bien sur les stations impactées (RI80) et les stations non impactées (TOB120, TOBREF),
- concernant les cyanobactéries, les espèces *Anabaena sp1* et *Symploca spp* présentent des taux de recouvrement élevés pour les stations TOB120 et TOBREF. Ces résultats confirment de nouveau le caractère diazotrophe de ces espèces. Pour l'espèce *Phormidium hendersonii*, son recouvrement est élevé aussi bien sur ces stations de Toboggan (TOB120 et TOBREF) que sur la station impactée TE80,
- les stations SP30, SP60 et SPREF sont caractérisées par un fort recouvrement en TAC et donc par les ACD (algues calcaires dressées),
- le pourcentage de recouvrement des algues dressées est élevé pour des stations impactées (TE120, TE40, TE80) et non impactées (TOB120 et TOBREF). Comme on l'a vu précédemment, les algues dressées ont des physiologies différentes pour l'absorption de l'azote et du phosphore. Une différenciation de ces algues en fonction de leur physiologie (ADS-N et ADS-P) pourrait être plus adaptée mais, pour cela, des études complémentaires devront être réalisées pour les espèces dominantes des platiers réunionnais,
- le pourcentage de recouvrement en ACE (algues calcaires encroûtantes) est élevé pour les stations impactées de Trou d'eau (TE40, TE80 et TE120). Cette observation confirme nos premiers résultats sur la composition spécifique : les espèces *Neogoniolithon spp* et *Lithophyllum kotschyannum* sont caractéristiques du site TE. Le développement de ces espèces semble donc favoriser par l'apport en nutriments des résurgences d'eau douce mais aucune étude antérieure n'a été réalisée sur ces espèces,
- le pourcentage de recouvrement en TAR (Turf d'Algues Rouges) est significativement élevé à la station la plus impactée TE40. L'apport en azote est en effet connu pour favoriser la croissance des algues rouges. Ces algues rouges filamenteuses sont d'une couleur rouge vive caractéristique d'un fort apport en azote. Ce TAR pourrait donc être un bioindicateur pertinent des résurgences d'eau douce mais seulement à partir d'une certaine teneur en azote (NO<sub>3</sub>) car seule TE40 favorise le développement de ces algues,
- le pourcentage de recouvrement des opportunistes reflète ici le recouvrement élevé des cyanobactéries sur TOB120 et TOBREF et le fort recouvrement des diatomées sur RI80 (bloom de février 2011, cette variable ne présente donc pas d'intérêt pour notre étude),
- de même les rapports (ACE/CYANO) et (ADS/CYANO) sont le reflet des recouvrements en cyanobactéries et ne différencient donc pas les stations impactées des stations non impactées,
- ensuite différents rapports ont été testés en différenciant les cyanobactéries nitrophiles (*Hydrocoleum spp*) des espèces phosphorophiles (*Anabaena sp1* et *Symploca spp*). Un rapport semble intéressant et permet de caractériser la station la plus impactée TE40 c'est le rapport (ADS/*Hydrocoleum spp*). Ce résultat confirme l'importance de distinguer les espèces selon leur physiologie d'absorption des nutriments (NO<sub>3</sub> et PO<sub>3</sub>). Cependant cette tendance semble s'observer uniquement pour des teneurs en nitrates relativement élevées caractéristiques de TE40.



**Figure 31** : Représentation des stations en fonction des mois de l’AFC (données des invertébrés benthiques)



**Figure 32** : Représentation des axes 1-2 de l’AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques) pour les mois de Février, Avril et Juin

**Tableau 12** : Bilan des résultats de l’AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques) pour les mois de Février, Avril et Juin

	FV11m2 <i>Holothuria leucospilota</i> (83% axe 1-2)	FV12m2 <i>Stichopus chloronotus</i> (96% axe 1-2)	FV13m2 <i>Synapta maculata</i> (99% axe 1-2)	FV14m2 <i>Tripteneustes gratilla</i> (89% axe 2-3)	FV2m2 <i>Echinothrix sp.</i> (82% axe 2-3)
ES5 (99% axe 1-2)		Valeur forte			
RI80 (92% axe 2-3)				Valeur forte	Valeur forte
TE120 (87% axe 1-2)	Valeur forte		Valeur forte		
TE40 (93% axe 1-2)	Valeur forte		Valeur forte		
TE80 (99% axe 1-2)	Valeur forte		Valeur forte		



## 4. Compartiment benthique

Concernant les analyses du compartiment benthique, seuls les mois de Février, Avril et Juin ont été analysés. Ce sont les seuls mois qui comportaient des valeurs pour toutes les stations, le mois de Décembre n'ayant pas été échantillonné (mise au point du protocole).

### a. Suivi des invertébrés benthiques

Sur les 15 espèces recensées, seules 11 espèces ont été retenues. Les bédouilles (FV15), les étoiles de mer (FV5), les ophiures (FV8) ainsi que les spirographes n'ont pas été retenus car leur recensement n'a pas été réalisé de façon exhaustive.

La première étape pour le suivi des invertébrés benthiques à consister à exprimer les données d'abondance en fonction du substrat : travées coralliennes ou travées détritiques/sableuses. La variable abondance considérée toute seule n'est pas pertinente car elle est en relation directe avec l'espace disponible pour l'espèce considérée (par exemple, l'abondance d'une espèce qui vit uniquement sur les travées coralliennes sera fortement influencée si la travée échantillonnée est majoritairement détritiques/sableuses).

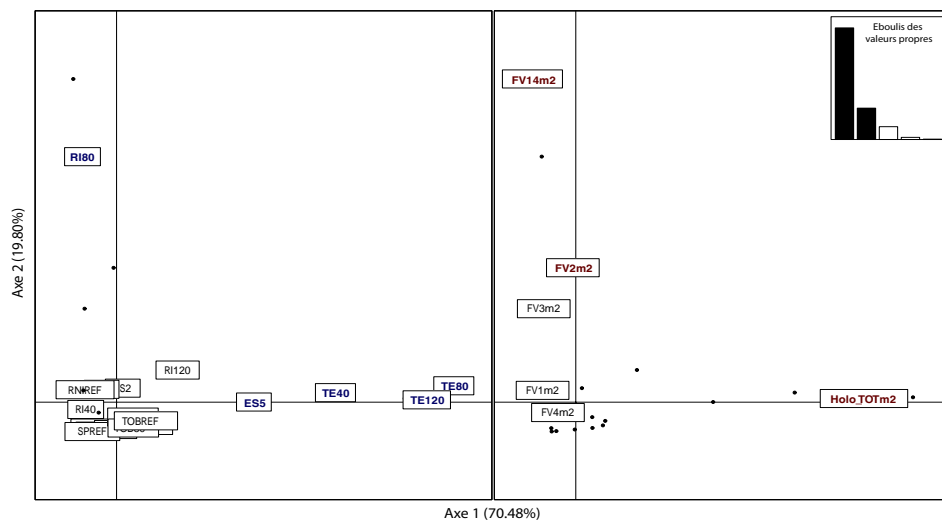
Une AFC a donc été réalisée sur ces nouvelles variables. D'après l'éboulis des valeurs propres, il semble intéressant de regarder au moins les 4 premiers axes (**Figure 30**).

Afin d'améliorer la lisibilité des graphiques et faciliter des interprétations, il peut être judicieux de réaliser des moyennes des valeurs. Les représentations des stations (« individus ») en fonction du mois, permettent de mettre en évidence que les mois sont plutôt regroupés (**Figure 31**). Cela nous laisse donc penser que la variabilité temporelle est relativement réduite.

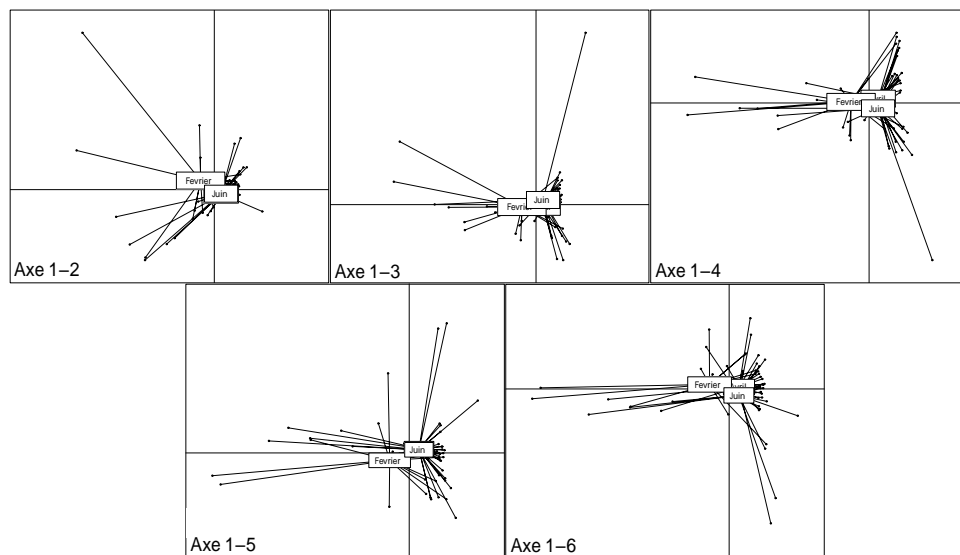
Afin de quantifier la part de la variabilité temporelle, une AFC intra-groupe a été réalisée. Si on retire l'effet temporel (facteur mois), on constate que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9670. Cela veut dire que 96.70% de l'inertie totale est expliquée par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente à peu près 3.29% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité est relativement réduite (surtout par rapport à la variabilité spatiale qui représente à peu près 66.41% de la variabilité totale de l'AFC), il est possible de réaliser des moyennes des valeurs des différents mois.

Une seconde AFC a donc été réalisée avec ces nouvelles valeurs. Le graphique de l'éboulis des valeurs propres nous suggère de regarder au moins les 3 premiers axes. Les représentations des axes 1-2 (**Figure 32**) et 2-3 (non présentée dans ce rapport) nous permettent d'émettre plusieurs observations qui sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (**Tableau 12**).

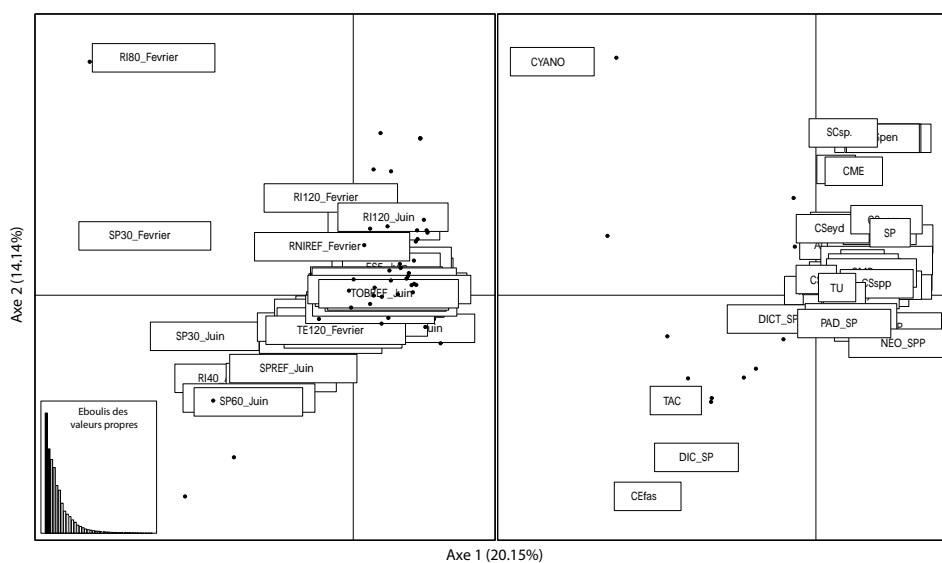
Cette première analyse nous montre que *Holothuria leucospilota* et *Synapta maculata* présentent des abondances plus importantes sur les stations impactées TE120, TE40 et TE80. Les holothuries sont des détritivores consommant la matière organique dans le sédiment. Plus le milieu est dégradé, plus les conditions sont propices au développement des holothuries (du fait du sédiment chargé en matières organiques, **Conand & Mangion 2003**). La station RI80 présente des abondances importantes pour 2 oursins : *Tripneustes gratilla* et *Echinothrix sp.* ES5 est quant à elle caractérisée par de fortes abondances en *Stichopus chloronotus*, espèce qui semble préférée les sites « enrichis en nutriments » (**Naïm, Obs. pers.**). La forte abondance de cette espèce sur cette station peut être due à la plus forte turbidité (matières en suspension) provoquée par l'hydrodynamisme important.



**Figure 33** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données invertébrés benthiques, après fusion des holothuries) pour les mois de Février, Avril et Juin



**Figure 34** : Représentation des axes 1-2 de l'AFC réalisée (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin



**Figure 35** : Représentation des stations en fonction des mois de l'AFC réalisée (données des communautés sessiles) réalisée sur les mois de Février, Avril et Juin



Ecologiquement, il est intéressant de fusionner les différentes espèces d'holothuries. Une troisième AFC a donc été réalisée en fusionnant toutes les espèces d'holothuries. D'après l'éboulis des valeurs propres, il semble intéressant de regarder les 2 premiers axes (**Figure 33**).

Cette nouvelle analyse confirme les résultats obtenus précédemment et n'apporte pas d'information supplémentaire.

## b. Suivi des communautés sessiles

Une première AFC a été effectuée sur le pourcentage de recouvrement par transect des espèces sessiles rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage. D'après l'éboulis des valeurs propres, il serait intéressant de regarder au moins les 6 premiers axes (**Figure 34**).

Cependant afin d'améliorer la lisibilité des graphiques il peut être judicieux de réaliser des moyennes des valeurs. Les représentations des stations en fonction du mois nous permettent de voir que les 4 mois semble regroupés (**Figure 35**).

Comme précédemment une AFC intra-groupe a été réalisée afin de quantifier la part de la variabilité temporelle (non présentée dans ce rapport). Si on retire l'effet temporel (facteur mois), on constate que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9689. Cela veut dire que 96.89% de l'inertie totale est expliquée par l'AFC intra-groupe (la variabilité temporelle représente à peu près 3.10% de la variabilité totale de l'AFC précédente). Etant donné que cette variabilité est très réduite (surtout par rapport à la variabilité temporelle qui représente à peu près 61.18% de la variabilité totale de l'AFC), il est possible de réaliser des moyennes des valeurs des différents mois.

Une seconde AFC a donc été réalisé avec ces nouvelles valeurs. L'éboulis des valeurs propres nous suggère de regarder au moins les 7 premiers axes. La lecture des représentations des axes 1-2 (**Figure 36**), 2-3 (**Annexe 21**) et 3-4 (**Annexe 22**) nous permet d'émettre plusieurs observations (les autres axes ne mettent pas en évidence de nouvelles informations).

Les résultats de la lecture de ces différents axes sont regroupés dans le tableau ci-contre (**Tableau 13**).

Cette première analyse ne permet pas de différencier les stations impactées des stations non impactées.

On observe par ailleurs que le % d'Acropore branchue est très élevée à la fois sur la station impactée TE40 et sur la station non impactée RNIREF. En effet, cette variable ne prend pas en compte l'état de santé de ces Acropores (enalguement au pied, nécroses,...) ce qui induit des incohérences importantes dans nos résultats.

Au vu des résultats ci-dessus, il est clair qu'il est nécessaire, pour s'affranchir des différences d'habitats, au moins en ce qui concerne le substrat (liées à la géomorphologie et l'hydrodynamisme, c'est à dire essentiellement: dépressions d'arrière récif versus platiers), d'utiliser des métriques qui soient relatives et indépendantes, notamment de la part de substrat sableux et de débris de chaque station. Ainsi, des paramètres et métriques additionnels par rapport au suivi GCRMN ont été sélectionnés en fonction de leur relative indépendance par rapport au substrat et de leur reflet potentiel d'un milieu dégradé.

De nombreuses associations de ces paramètres ont été testées, la plupart ne permettant pas de différencier convenablement les stations. Au final, 5 paramètres/métriques ont été retenus en fonction



des résultats des ACP mais également de leur signification écologique :

- la biodiversité corallienne, c'est-à-dire le nombre d'espèces coralliennes par transect (on a une perte de la richesse en espèce lorsque la qualité de l'eau se dégrade, [Cooper et al. 2009](#)),
- le nombre d'holothuries par m<sup>2</sup> (déjà utilisé précédemment),
- le pourcentage de *Porites rus* dans le peuplement corallien (cette espèce est définie comme opportuniste et caractérisant un milieu perturbé, [Chabanet 2002](#)),
- le pourcentage d'Acropores branchus sains (sans algues) parmi les Acropores branchus vivants (le développement algal est associé au déclin de la qualité des eaux, [Cooper et al. 2009](#)),
- le pourcentage d'Acropores branchus morts parmi tous les Acropores branchus (vivants : sains ou enalgués, la mortalité des Acropores permet de témoigner des évolutions récentes du milieu).

Une ACP centrée/réduite a donc été réalisée sur ces 5 variables. D'après l'éboulis des valeurs propres, il semble intéressant de regarder les 2 premiers axes ([Figure 37](#)).

La représentation des stations en fonction du mois permet de mettre en évidence que les mois sont plutôt regroupés ([Figure 38](#)). Cela nous laisse donc penser que la variabilité temporelle est relativement réduite et pourrait permettre de réaliser des moyennes des variables afin d'améliorer la lisibilité des représentations.

Afin de quantifier la part de la variabilité temporelle, une ACP intra-groupe a été réalisée (non présentée dans ce rapport). Si on retire l'effet temporel (facteur mois), on constate que l'inertie intra-groupe est égale à 0.9809. Cela veut dire que 98.09% de l'inertie totale est expliqué par l'ACP intra-groupe (la variabilité temporelle représente à peu près 1.90% de la variabilité totale de l'ACP précédente). Etant donné que cette variabilité est très réduite, il est possible de réaliser des moyennes des valeurs des différents mois.

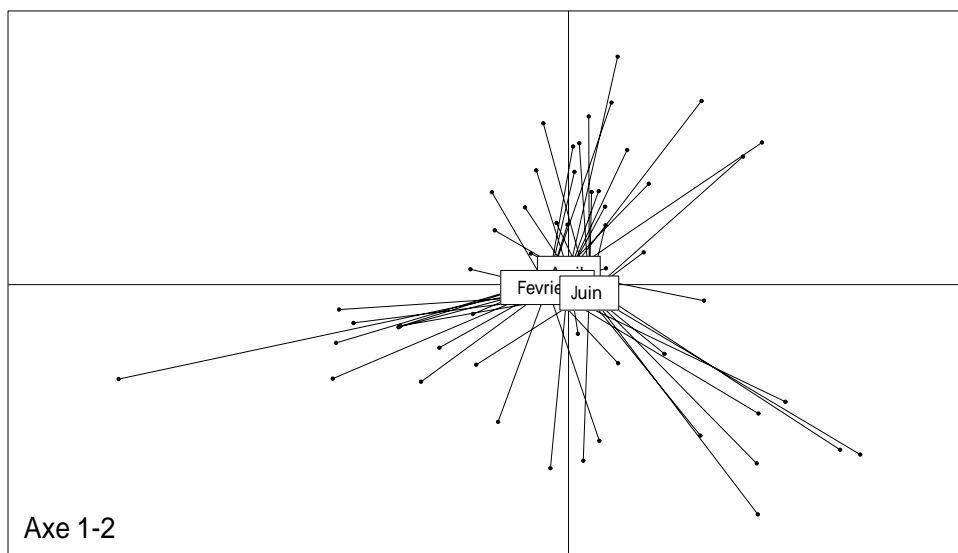
Une seconde ACP a donc été réalisée avec ces nouvelles valeurs. Les deux premiers axes représentent presque 60% de l'inertie totale permettent de mettre en évidence plusieurs éléments ([Figure 39](#), axe 1-2 seulement, les autres axes ne mettent pas en évidence de nouvelles informations).

Les résultats de cette ACP ont été synthétisés dans le tableau ci-contre ([Tableau 14](#)).

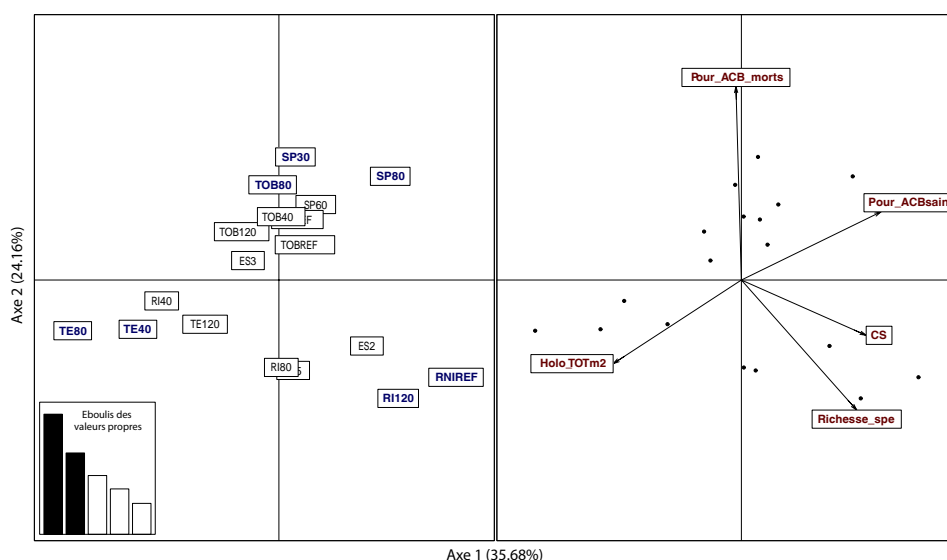
Cette analyse permet de mettre en évidence la pertinence de l'utilisation de différentes variables pour caractériser l'état de santé de nos stations :

- la biodiversité corallienne : couverture élevée sur les stations non impactées RI120 et RNIREF et inversement pour les stations impactées (TE40, TE80, SP30, SP80),
- la densité des holothuries qui est plus élevée sur les sites les plus impactés TE40 et TE80,
- le pourcentage d'Acropores branchus sains : couverture élevée sur la station référence RNIREF et faible pour les stations impactées TE40 TE80,
- le pourcentage d'Acropores branchus morts : couverture élevée sur les stations impactées SP30 et SP80.

D'après cette analyse il semble donc important de prendre en compte ces 4 variables additionnelles pour le suivi de l'état de santé des communautés coralliennes.



**Figure 38** : Représentation des stations en fonction des mois de l'ACP réalisée sur les variables additionnelles des données des communautés sessiles



**Figure 39** : Représentation des axes 1-2 de l'ACP réalisée sur les valeurs moyennes des variables additionnelles (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin

**Tableau 14** : Bilan des résultats de l'ACP réalisée sur les valeurs moyennes des variables additionnelles (données des communautés sessiles) des mois de Février, Avril et Juin

	Richesse_spe Biodiversité corallienne (62% axe 1-2)	Holo_TOTm2 Nombre d'holothuries par m² (53% axe 1-2)	CS Porites rus (44% axe 1-2)	Pour_ACBsains Santé des Acropores branchus (73% axe 1-2)	Pour_ACB_morts Mortalité des Acropores (64% axe 1-2)
RI120 (82% axe 1-2)	Valeur forte				Valeur faible
RNIREF (86% axe 1-2)	Valeur forte	Valeur faible	Valeur forte	Valeur forte	Valeur faible
SP30 (96% axe 1-2)	Valeur faible				Valeur forte
SP90 (50% axe 1-2)	Valeur faible				Valeur forte
TE40 (94% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	
TE80 (70% axe 1-2)	Valeur faible	Valeur forte	Valeur faible	Valeur faible	
TOB80 (88% axe 1-2)	Valeur faible				Valeur forte

# D. Recherche des bioindicateurs

Le descriptif de chaque compartiment a permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques intéressantes au niveau stations, ainsi que des peuplements biologiques. Cette première étape a permis de poser des bases solides permettant de pouvoir s'intéresser à la recherche des bioindicateurs. La question est de savoir s'il existe des variables au sein des compartiments biologiques (ichtyologique, algal et benthique) permettant de mettre en évidence un gradient d'enrichissement en nutriments ? Ce gradient permet-il de faire apparaître une « hiérarchisation » des stations en fonction de leur « l'état de santé » ?

Si ce « gradient » peut être mis en évidence, les variables biologiques en relation peuvent être considérées comme des bioindicateurs potentiels de l'état du milieu.

La définition et le positionnement des transects du programme EUTROLAG a été réalisée via des études antérieures, en fonction des résurgences d'eau douces (**ARVAM 2007 et 2010, Ifremer 2010**). Cet axe de réflexion a permis de construire un protocole en 3 parties visant à identifier les bioindicateurs potentiels :

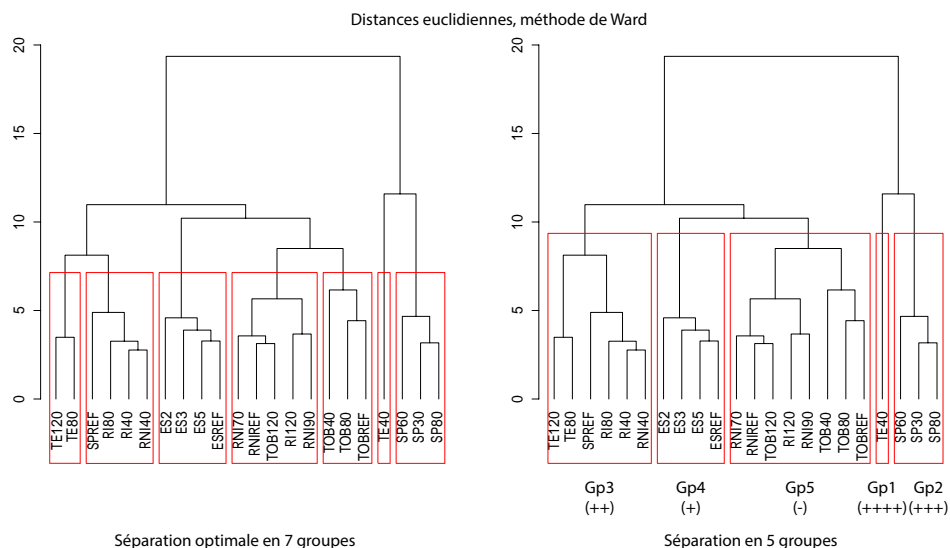
- Première partie : étant donné que le positionnement des transects a été réalisé en fonction des résurgences d'eau douces, il est intéressant de voir s'il est possible de construire des « groupes » entre les stations par rapport aux variables du compartiment hydrologique, et de voir si ces groupes peuvent être « hiérarchisés » en fonction d'un gradient d'enrichissement en nutriments,
- Seconde partie : une fois les groupes établis, il est nécessaire d'identifier s'il existe des variables au sein des compartiments biologiques permettant de discriminer au mieux ces groupes au sein de chaque compartiments pris séparément,
- Troisième partie : une fois ces variables identifiées, il convient de vérifier si ces bioindicateurs potentiels permettent de discriminer les groupes des 3 compartiments pris ensemble, ce qui permettra de mettre en évidence les éventuelles relations entre les compartiments afin de maximiser la discrimination des groupes.

Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée afin de construire les différents groupes (à partir des variables hydrologiques). Ce type de méthode a été utilisé car nous n'avions aucun a priori sur les groupes. De plus, le descriptif du compartiment hydrologique a permis de mettre en évidence plusieurs observations intéressantes, notamment au niveau l'axe 1 de l'ACP centrée/réduite (réalisée sur les valeurs moyennes des 4 mois) qui illustre un gradient d'apport terrigène.

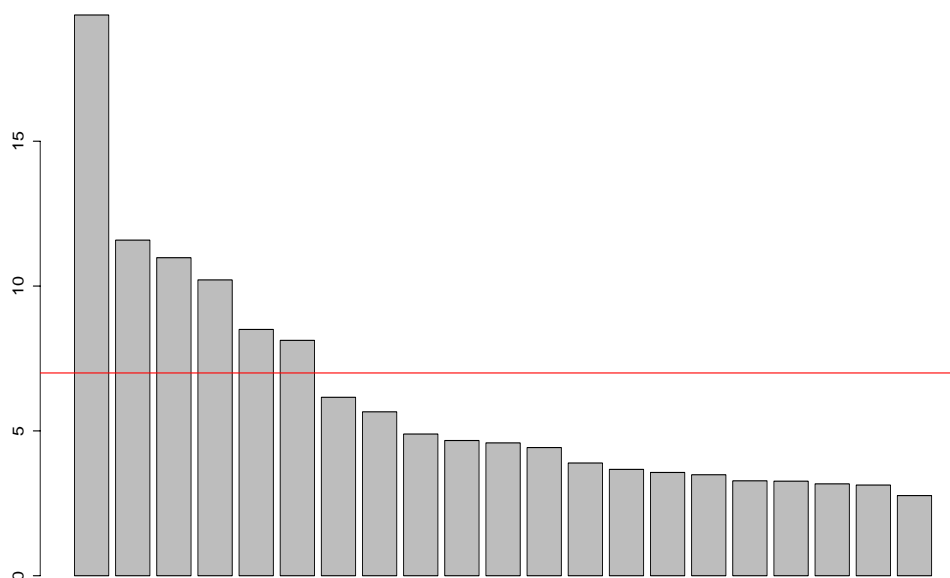
En ce qui concerne la discrimination des groupes, des Analyses Factorielles Discriminantes linéaires ont été réalisées. De façon générale une AFD linéaire est une technique descriptive dont l'objectif est de construire un système de représentation, des variables latentes formées à partir de combinaisons linéaires des variables prédictives, qui permettent de séparer le plus possible des groupes d'individus. La différence avec des AFD prédictives est que l'on cherche à savoir qu'elles sont les variables qui discriminent nos groupes : qu'est ce qui sépare au mieux nos groupes ?

Les AFD ont été réalisées sous R à l'aide de deux fonctions :

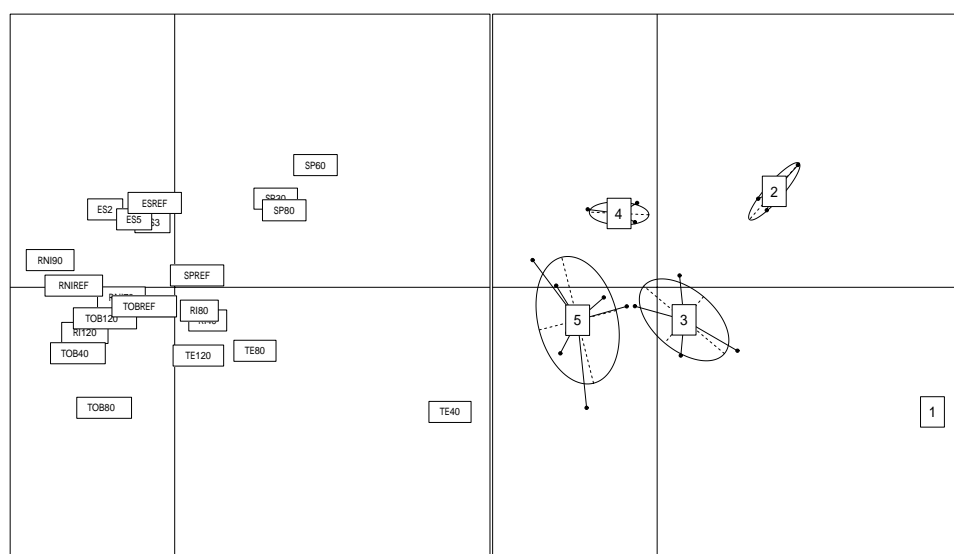
- la fonction lda du package MASS (**Venables & Ripley 2002**),



**Figure 40** : Dendrogrammes de la CAH réalisée sur les moyennes (données compartiment hydrologiques) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 41** : Histogramme de l'évolution de l'inertie intra-classe de la CAH réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologiques) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Figure 42** : Représentation des groupes hydrologiques sur l'axe 1-2 l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment hydrologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

- la fonction discrimin du package ade4 ([Chessel et al. 2004](#), [Dray et al. 2007](#)).

Ces deux fonctions sont analogues, et leurs représentations graphiques sont similaires, même si les calculs effectués sont différents pour chacune ([Dufour et al. 2010](#)). La fonction lda donne une combinaison linéaire des variables de départ associée à des coefficients (« Proportion of trace » de la fonction lda). La fonction discrimin donne une combinaison des variables normalisées (dans le cas d'une ACP en 1/n) avec des coefficients calculés par la fonction (localisée dans la composante fa).

## 1. Etablissement des groupes de stations

Le descriptif du compartiment hydrologique, et plus précisément l'axe 1 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes des 20 variables quantitatives des mois de Décembre, Février, Avril et Juin, a permis de mettre en évidence un gradient d'apport terrigène qui peut être assimilé à un gradient d'enrichissement en nutriments.

A la suite de cette analyse, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été réalisée (sous R grâce à la fonction « dist.dudi » du package ade4) afin de voir s'il était possible de mettre en évidence plusieurs groupes de stations. Ce type d'analyse permet de créer des groupes les plus homogènes possibles (compacité) tout en étant les plus différents possibles (séparabilité). Plusieurs types de dissimilarités ont été testées (comme les distances de Manhattan ou de Minkowski), mais des distances euclidiennes ont été utilisées, ainsi que des distances euclidiennes au carré afin de « surpondérer » les objets atypiques. De même que pour les dissimilarités, plusieurs types de méthode d'agrégation ont été testés et la méthode de Ward a été utilisée. Cette méthode était la seule qui donnait des graphiques lisibles et exploitables et de plus elle a été définie dans plusieurs livres comme « la méthode la plus complémentaire de l'analyse en composantes principales qui repose un critère assez naturel » ([Saporta 2011](#)).

La classification utilisant les distances euclidiennes au carré ne met pas en évidence d'objets atypiques. Les graphiques ci-contre ([Figure 40](#)) montrent deux classifications réalisées en utilisant des distances euclidiennes et la méthode d'agrégation de Ward.

La classification optimale, d'après le critère du « dernier grand saut » et en visualisant l'histogramme de l'évolution de l'inertie intra-classe ([Figure 41](#)) serait celle de gauche, avec 7 groupes.

Cependant, la description et l'interprétation des différents groupes est difficile et présente des problèmes (comme la séparation de la station TOB120 avec TOB40, TOB80 et TOBREF). Cela peut s'expliquer en partie par certaines valeurs qui peuvent être aberrantes dans les variables (résultants d'erreurs de mesures ou encore de problèmes liés au climat). Étant donné qu'il n'est pas possible d'identifier précisément les valeurs « aberrantes », il semble plus judicieux de diminuer la « précision » de la classification et de se limiter à 5 groupes (graphique de droite). D'un point de vue écologique, il a même été possible de quantifier pour chaque groupe l'importance des apports terrigènes, en allant du groupe le moins impacté (-) vers le plus (++++). Cette hiérarchisation se confirme en visualisant la position des différents groupes sur la représentation des axes 1-2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes des 20 variables quantitatives des mois de Décembre, Février, Avril et Juin ([Figure 42](#)).

Cependant, la répartition des stations en 5 groupes pose un problème pour la suite des analyses : le groupe 1 ne contient que la station TE40. Il n'est pas pertinent ni judicieux de réaliser une AFD si les





effectifs des groupes ne sont pas équilibrés. Deux solutions sont possibles pour remédier à ce problème :

- regrouper la station TE40 avec le groupe de station les plus proches par rapport au gradient d'apport terrigène,
- ne pas la considérer dans les analyses postérieures.

Même si la première solution est la plus judicieuse car elle permet de perdre le moins d'informations, on se retrouve confronter à un autre problème. Les stations les plus proches (par rapport au gradient d'apport terrigène) sont les stations de Saint-Pierre (Groupe 2). Cependant si l'on regroupe TE40 avec ces stations on s'aperçoit en réalisant les analyses décrites dans les parties suivantes, que certaines variables très intéressantes d'un point de vue écologique (comme les espèces de *Stegastes* pour le compartiment ichthyologique) sont « masquées » et ne ressortent pas dans les résultats. Si l'on regarde les données brutes de ces stations on constate que même si ce sont les stations les plus « proches » du point de vue du gradient d'apport terrigène, leurs valeurs pour les variables sont très différentes. De plus, les stations de Saint-Pierre et TE40 s'opposent sur l'axe 2 l'ACP centrée/réduite (qui est probablement un gradient d'hydrodynamisme). A la vue de ces constatations, et d'un point de vue aussi bien écologique que statistique, il n'est pas judicieux de regrouper TE40 avec les stations de Saint-Pierre car même si elles sont les plus proches sur l'axe d'apport terrigène elles restent très différentes. Cela se retrouve sur le dendrogramme de la **Figure 40** car on peut voir que le nœud qui sépare les stations de Saint-Pierre et TE40 se trouve très en amont des nœuds séparant les autres groupes entre eux (TE40 et les stations de Saint-Pierre sont donc plus différentes entre elles que les stations du groupe 4 et 5). Considérant ces résultats, la décision la plus judicieuse est de ne pas considérer la station TE40 dans les analyses ultérieures. Au final, on obtient 4 groupes hydrologiques (**Figure 43**).

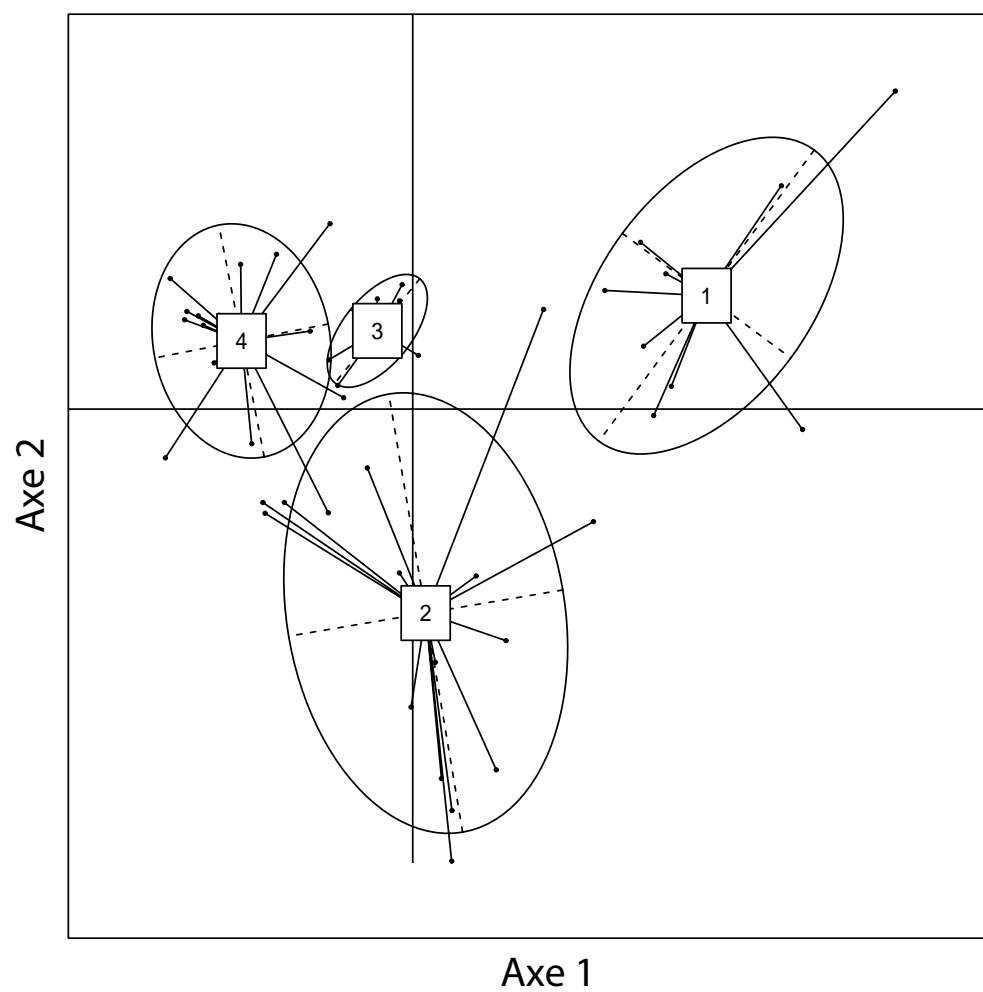
## 2. Analyse Factorielle Discriminante linéaire par compartiments

La seconde étape consiste à effectuer des AFD sur les compartiments biologiques afin de voir si les variables relatives à chacun des compartiments discriminent les différents groupes établis grâce à la classification précédente.

Etant donné que cette étape constitue une analyse préliminaire en vue d'analyses tout compartiments confondus, plusieurs impératifs doivent être pris en compte :

- les stations doivent être identiques entre les 3 compartiments, ce qui équivaut à 15 sites (la station TE40 n'étant pas prise en compte) : ES3, ES5, RI120, RI40, RI80, SP30, SP60, SP80, SPREF, TE120, TE80, TOB120, TOB40, TOB80, TOBREF,
- de la même manière que les stations, les mois utilisés doivent être les mêmes entre les compartiments, ce qui correspond à 3 mois : Février, Avril et Juin (le mois de Décembre n'a pas pu être utilisé car il n'était pas disponible pour le compartiment benthique),
- les variables utilisées ne peuvent être que quantitatives,
- il faut éviter les redondances entre les données des compartiments (par exemple les algues observées dans le compartiment benthique ne pourront pas être prises en compte du fait de la redondance des observations avec le compartiment algal).

Il est important de noter que la discrimination n'est pertinente et judicieuse, si et seulement si les groupes sont équilibrés du point de vue des observations. Dans notre cas ici, nous avons 4 groupes qui,



**Figure 44** : Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment ichtyologique

après sélection des 15 stations communes aux 3 compartiments, se compose comme ceci :

- groupe 1 : SP30, SP60 et SP80,
- groupe 2 : TE120, TE80, SPREF, RI80, RI40 et RNI40,
- groupe 3 : ES3 et ES5,
- groupe 4 : TOB120, TOB40, TOB80 et TOBREF.

L'équilibre des groupes à la vue des stations qui les composent est mauvais. Cependant, les répétitions des 3 mois nous permettent de « rattraper » ce déséquilibre et de réaliser des AFD. Cependant, la notion d'équilibre entre les groupes ne devra pas être négligée lors des interprétations ultérieures des analyses.

## a. AFD sur le compartiment ichthyologique

Le compartiment ichthyologique est composé de 16 variables quantitatives correspondant à la biomasse par m<sup>2</sup> des 16 espèces de poissons (la liste est disponible en [Annexe 7](#)) observées les mois de Février, Avril et Juin. L'espèce *Stegastes albifasciatus* n'ayant été observée qu'en Décembre, elle ne figure donc pas dans les analyses.

Une première AFD a donc été réalisée sur les 16 variables et les 45 observations du compartiment ichthyologique ([Figure 44](#)).

Même si la discrimination n'est pas parfaite, on observe cependant une certaine séparation entre les 4 groupes. De plus, on obtient un pourcentage de bien classé de l'ordre de 84%. Cela veut dire que 84% des « individus » se trouve dans leur groupe d'appartenance. Cependant, ce pourcentage de bien classé initial est à considérer avec précaution car il est possible que notre analyse crée du sur-ajustement. Ce problème est provoqué en général par un mauvais dimensionnement de la structure utilisée pour classer, et plus précisément de la trop grande capacité à stocker des informations. Dans une telle situation, « notre AFD » aura beaucoup de mal à généraliser les caractéristiques des données, et surtout affecter une nouvelle observation au bon groupe.

Une formule manipulant les objets de la fonction lda ([Sabatier 2013](#)) permet d'exprimer le pouvoir discriminant de chacun des axes. Plus ce chiffre est proche de 1 et plus la discrimination de cet axe est performante. Ici les pouvoirs discriminants des 3 premiers axes sont réciproquement 0.43, 0.20 et 0.19. On peut déjà voir ici que le pouvoir discriminant de nos axes est loin d'être optimal.

Deux méthodes ont été appliquées ici afin de déceler (ce qui est plus que probable) si notre modèle engendre du sur-ajustement et donc s'éloigne de la réalité. Ces deux méthodes appartiennent à ce qu'on appelle la validation croisée (ou « cross-validation » en anglais). De façon général, la validation croisée est une méthode statistique permettant une évaluation la fiabilité d'un modèle ou d'un algorithme ([Payam et al. 2009](#)). Il existe au moins 5 méthodes différentes de validation croisée, mais seulement deux d'entre elles seront testées ici :

- la « Leave-One-Out cross-validation » (LOO) : dans un cas avec n observations, cette méthode consiste à prendre n-1 observations avec lesquelles l'on bâti le modèle, et à tester celui-ci sur la nième observation, puis l'on répète cette opération n fois,
- la « Holdout method » : on divise notre échantillon de départ de taille n en échantillon d'apprentissage et en échantillon de test. Le modèle est construit sur l'échantillon d'apprentissage et testé sur l'échantillon de test. Cette dernière méthode a été réalisée grâce à une fonction,



délivrée par M. Sabatier (**Sabatier 2013**), qui permet de répartir un échantillon en sous-groupes ayant la même répartition en groupe que l'échantillon de départ.

L'efficacité de ces validations croisées dépend dans notre cas de la taille de l'échantillon. Etant donné que nous disposons de peu de répétition (45 « individus » en tout), la pertinence de la seconde méthode est discutable.

La méthode LOO nous donne un pourcentage de bien classé de 29.33%. La seconde méthode n'est pas réalisable dans notre cas car nos données étant des informations de peuplement, et comportant donc beaucoup de 0 pour certaines variables, la séparation en plusieurs groupes entraîne des messages d'erreurs relatifs à certaines variables devenu constante dans nos sous-groupes. A la vue ces résultats, il semble donc que plusieurs variables créent du « bruit », et il est possible que toutes les variables ne soient pas forcément utiles dans la discrimination de nos groupes. Il serait donc judicieux d'identifier si nos groupes sont significativement différents et surtout quelles sont les variables statistiquement différentes entre nos 4 groupes.

La première étape est donc de tester l'existence d'une réelle différence entre les 4 groupes. Idéalement, il aurait été judicieux de réaliser une MANOVA (qui est une ANOVA mais généralisée au cas multivarié), cependant la nature de nos données ne nous permet de valider les nombreuses conditions d'application (notamment au niveau de la normalité multivariée des variables). Une version non paramétrique du test de Pillai (qui est un des nombreux tests paramétriques d'analyse de variance multivariée) a été appliquée. Ce test est basé sur la méthode de Monte-Carlo qui utilise des simulations probabilistes permettant de tester la somme des valeurs propres d'une analyse discriminante (utilisée grâce à la fonction « `randtest.discrimin` » du package `ade4`). Ce test nous renvoie une p.valeur significative (p.valeur=0.001 pour 999 simulations) qui nous permet de montrer statistiquement qu'il existe une différence, au moins, entre deux groupes.

La seconde étape est d'identifier qu'elles sont les variables significatives différentes entre les 4 groupes. Pour cela, des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés sur les 16 variables en fonction des groupes (les conditions d'application d'une ANOVA n'étant pas remplies seul un test non paramétrique était réalisable). Une correction des différentes p.valeurs a été appliquée afin de prendre en compte l'effet des tests multiples. Après des recherches bibliographiques (**Wlash 2004**), une correction de Benjamini & Hochberg a été appliquée (même si la correction de Bonferroni est le test le plus rigoureux, son application demande une indépendance parfaite des données ce qui n'est pas notre cas, **Hochberg 1988**). La correction de Benjamini & Hochberg (aussi appelé False Discovery Rates ou fdr) est le test par défaut le moins stricte de toutes les corrections et fournit un bon équilibre entre les vrais positifs et les faux positifs (**Benjamini & Hochberg 1995, Benjamini & Yekutieli 2001**). Ces corrections ont été appliquées grâce à la fonction « `p.adjust` » issu du package `stats` (**R Development Core Team 2013**). Après réalisation des tests et application des corrections sur les différentes p.valeurs, 7 espèces de poissons herbivores (sur les 16 initiales) sont significativement différentes, au moins entre 2 groupes :

- les poissons chirurgiens noirs (Chnoi),
- *Scarus ghobban* (Scgho),
- *Siganus argenteus* (Siarg),
- *Stegastes fasciatus* (Stfas),
- *Stegastes limbatus* (Stlim),
- *Stegastes lividus* (Stliv),
- *Stegastes nigricans* (Stnig).



Si l'on réitère l'AFD avec ces 7 variables et que l'on réalise une validation de type LOO (répétée 20 fois comme précédemment), on obtient un pourcentage de bien classé de l'ordre de 66.66%. On observe une amélioration de près de 37% par rapport à la validation croisée de l'AFD réalisée sur toutes les variables ichtyologiques. Il semble donc plus judicieux de conserver uniquement ces 7 espèces si l'on veut discriminer les 4 groupes en fonction des variables ichtyologiques.

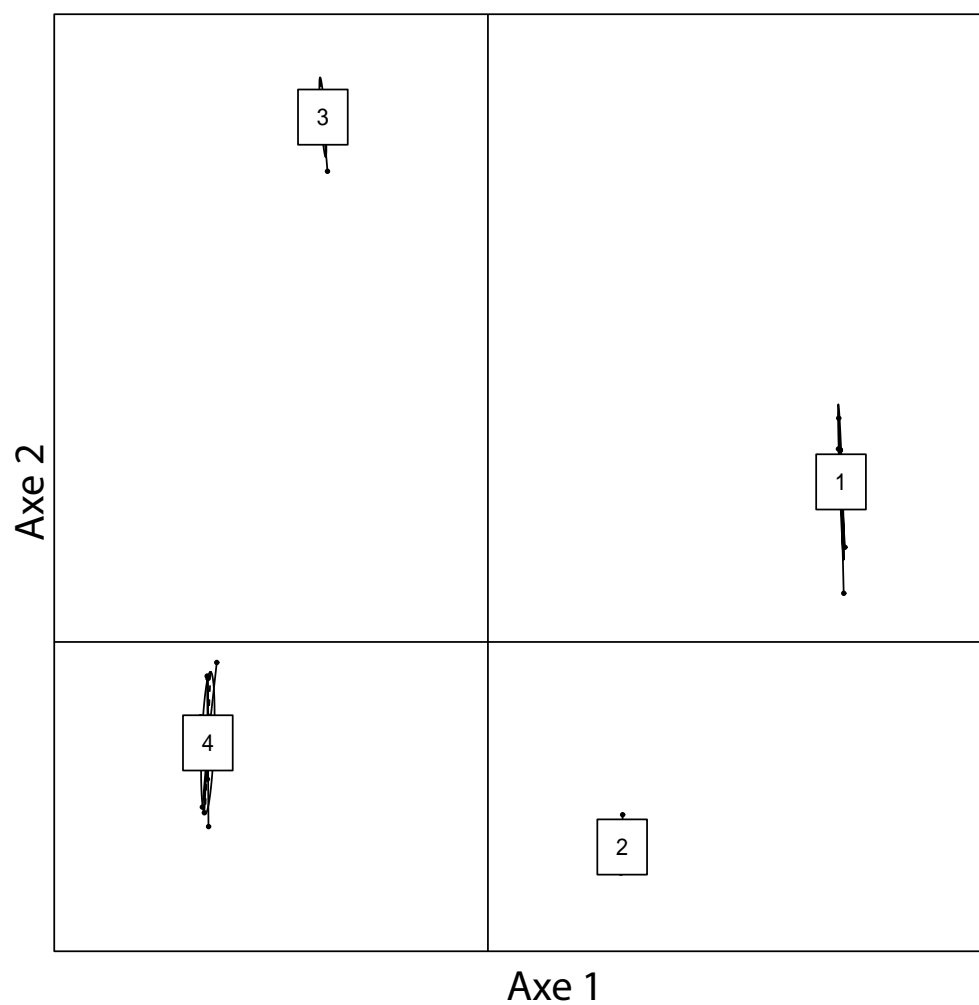
## b. AFD sur le compartiment algal

Initialement 70 variables ont été sélectionnées au sein du compartiment algal. Les données de présence/absence et relative à l'indice de fréquence d'observation de la composition spécifique n'ont pas pu être utilisées car la nature quantitative des variables ne permettait pas de les utiliser avec une AFD. Cependant les 32 variables quantitatifs additionnels construites lors du descriptif de la composition spécifique algal ont pu être utilisées, ce qui a permis de prendre en compte la composition spécifique dans les analyses. Concernant les données relatives au recouvrement algal, 38 variables quantitatives ont été utilisées :

- 22 expriment le pourcentage de recouvrement des espèces algales (ainsi que de deux éponges) recensées lors des campagnes,
- ainsi que 16 variables additionnelles construites lors du descriptif du recouvrement algal.

Une première AFD a donc été réalisée sur les 70 variables et les 45 observations du compartiment algal. Cependant, on constate une erreur nous indiquant une forte colinéarité entre nos variables (ce qui n'est pas surprenant car la plupart des ratios et variables additionnels ont été construites par association de variables). Cette forte colinéarité entre certaines variables n'est pas une bonne chose car cela traduit une redondance entre certaines variables qui finalement n'apportent que peu d'informations au modèle et diminue sa performance. Afin de remédier à ce problème, la fonction `elimcor_classif` (Sabatier 2013) a été utilisée. Initialement, cette fonction permet de regrouper les variables en fonction d'un seuil de corrélations prédéfinis et de retenir celles qui minimisent la p.value d'un test ANOVA (et qui donc est la plus différente des autres). Etant donné la nature de nos données (le non-respect de la normalité par exemple), le test ANOVA a été remplacé par un test de Kruskal-Wallis. L'utilisation de cette fonction a permis de sélectionner 41 variables (rejet des variables, avec un seuil de colinéarité de  $|0.84|$ , PR\_total, PR\_totalsansTAC, PR\_AV, PR\_C, PR\_ADS, PR\_ACE, PR\_ACD, PR\_O, PR\_LIT\_KOTS, PR\_TAC, PR\_TUR\_ORNA, R\_ADS\_SYM\_SPP, R\_ADS\_HYD\_SPP, R\_ADS\_HYD\_PHO, PC\_AR, PC\_ACD, PC\_ADS, PC\_ADSII PC\_O, PC\_ESGI, PC\_ESGII, C\_AR\_AV, C\_ADSII\_CYANO, C\_ADS\_CYANO, C\_ACD\_ADS, C\_ACD\_ADSI, C\_ACD\_ADSII C\_ACE\_ADS, C\_O\_ESGI). Cependant, il est à noter que la variable PR\_BOE\_FORB (pourcentage de recouvrement de *Boergesenia forbesii*) a été gardée au profit des variables PR\_AV et PR\_ADS car elle présentait un intérêt écologique. Une AFD a donc été réalisée sur ces 41 variables (Figure 45).

La discrimination des groupes est « parfaite » (sans validation croisée 100% de bien classé). Le pouvoir discriminant des 3 axes est égal à 0.99, 0.89 et 0.76. Cependant, quand on lance une AFD avec la validation croisée (moyenne de LOO réalisée 20 fois, la méthode « Holdout method » n'est toujours pas réalisable du fait du nombre important de 0) on obtient un pourcentage de bien classé de l'ordre de 29.33%. La discrimination qui semblait donc optimale ne reflète pas la réalité et crée du sur-ajustement. Comme précédemment, les variables différentes entre nos groupes ont été identifiées afin de diminuer le « bruit » global. Le test non paramétrique de Pillai est significatif (p.value=0.045 pour 999 simulations) ce qui nous montre statistiquement qu'il existe une différence au moins entre



**Figure 45** : Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment algal



deux groupes. Des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés sur les 41 variables (avec application de corrections de Benjamini & Hochberg). Il s'avère que 18 variables sont significativement différentes entre au moins 2 groupes :

- PR\_CLI\_SPP : le pourcentage de recouvrement de *Cliona sp.*,
- PR\_DYS\_SPP : le pourcentage de recouvrement de *Dysidea sp.*,
- PR\_ACT\_FRAG : le pourcentage de recouvrement d'*Actinotrichia fragilis*,
- PR\_HYDRO\_SPP : le pourcentage de recouvrement d'*Hydrolithon spp*,
- PR\_SYM\_SPP : le pourcentage de recouvrement de *Symploca spp*,
- R\_ADS\_CYANO : le rapport Algues Dressées Souples sur cyanobactéries (données recouvrement),
- PC\_TAC : le pourcentage de richesse spécifique du Turf d'Algues Calcaires,
- PC\_ADSI : le pourcentage de richesse spécifique des Algues adhérente/rampantes en forte interaction avec le corail,
- PC\_OM : le pourcentage de richesse spécifique des espèces opportunistes macroalgues,
- PR\_AR : le pourcentage de recouvrement d'algues rouges,
- PR\_DIATO : le pourcentage de recouvrement des diatomées,
- PR\_HYD\_SPP : le pourcentage de recouvrement d'*Hydrocoleum spp*,
- PR\_NEO\_SPP : le pourcentage de recouvrement de *Neogoniolithon spp*,
- R\_ADS\_ANA\_SYM : le rapport ADS sur *Anabaena sp1* et *Symploca spp* (données recouvrement),
- C\_ACE\_ADSI : le rapport Algues Calcaires Encroûtantes sur ADSI (données composition spécifique),
- PC\_AV : le pourcentage de richesse spécifique des algues vertes,
- C\_ACD\_ADSII : le rapport Algues Dressées Souples sur Algues adhérente/rampantes sans forte interaction avec corail (données composition spécifique),
- C\_AV\_CYANO\_DIATO : rapport algues vertes sur cyanobactéries et diatomées.

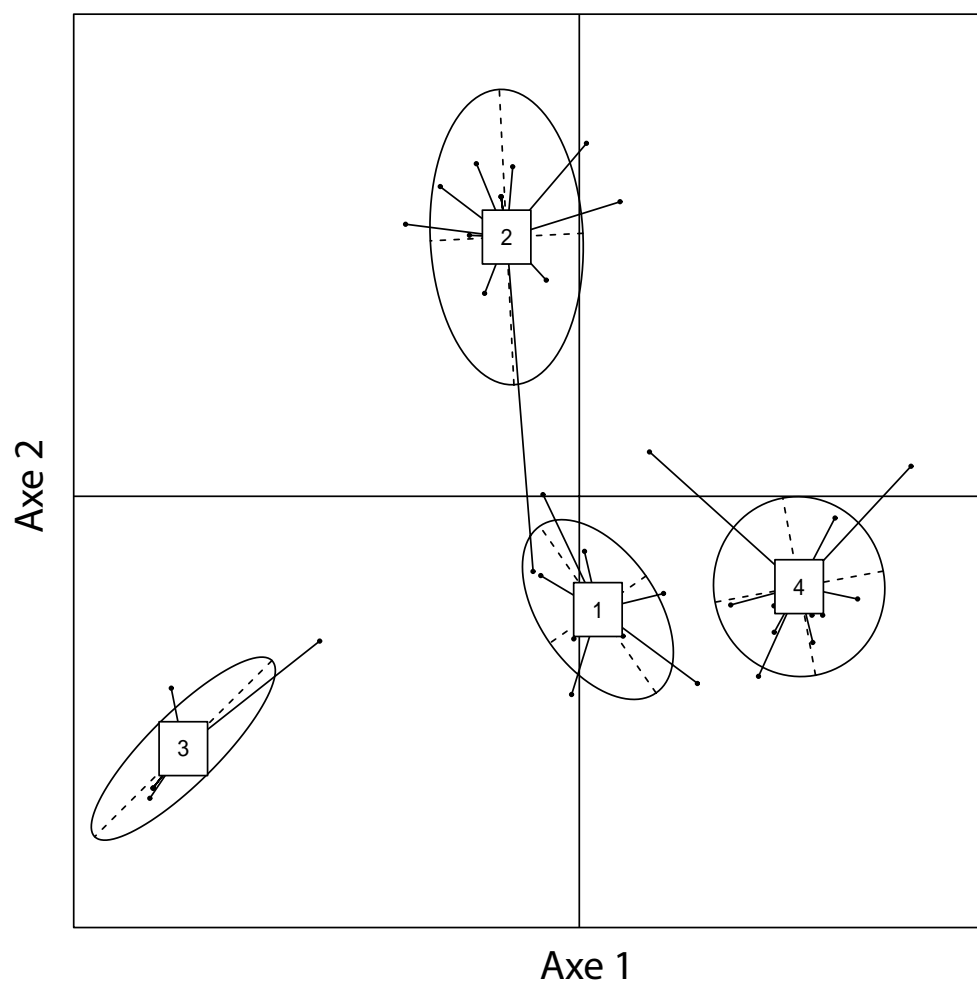
Si l'on réitère l'AFD avec ces nouvelles variables et que l'on réalise une validation de type LOO (répétée 20 fois comme précédemment), on obtient un pourcentage de bien classé de l'ordre de 65.55%. On observe une nette amélioration (36.22%) par rapport à la validation croisée de l'AFD réalisée précédemment. Il semble donc plus sage de conserver ces 18 variables si l'on veut discriminer les 4 groupes en fonction des variables du compartiment algal.

## c. AFD sur le compartiment benthique

36 variables quantitatives ont été sélectionnées pour le compartiment benthique :

- les 6 variables quantitatives relatives à la faune vagile mise en évidence dans le descriptif de ce compartiment,
- les 27 variables quantitatives expriment le pourcentage de recouvrement par transect des espèces coralliennes recensées lors des campagnes,
- 3 variables quantitatives additionnelles (Richesse spécifique, santé et mortalité des Acropores).

L'AFD réalisée sur ces variables nous indique le même message d'erreur, dû à la colinéarité des variables, que pour le compartiment algal. L'utilisation de la fonction elimcor\_classif modifiée a permis



**Figure 46** : Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables du compartiment benthique

comme précédemment de sélectionner les variables (toujours avec un seuil de colinéarité de  $|0.84|$ ). Au final 30 variables quantitatives ont été sélectionnées (rejet des variables CF, CSdam, CScon, CSverr). Une AFD a donc été réalisée sur ces variables (**Figure 46**).

On constate une nette discrimination des groupes (sans validation croisée 97.77% de bien classé). Le pouvoir discriminant des 3 axes est égal à 0.73, 0.57 et 0.46. La validation croisée de l'AFD (moyenne de LOO réalisée 20 fois, la méthode « Holdout method » n'est toujours pas réalisable du fait du nombre important de 0) donne 22.66% de bien classé. Comme précédemment, on a beaucoup trop de sur-ajustement et cela le reflète par la réalité. Afin de diminuer le « bruit » global, les variables différentes entre nos groupes ont été identifiées. Le test non paramétrique de Pillai est significatif ( $p.value=0.001$  pour 999 simulations) ce qui nous montre statistiquement qu'il existe une différence au moins entre deux groupes. Comme pour les autres compartiments, des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés sur les 30 variables (avec application de corrections de Benjamini & Hochberg). Il s'avère que 12 variables sont significativement différentes entre au moins 2 groupes :

- ACB : pourcentage par transect d'*Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.* par transect,
- ACD : pourcentage par transect d'*Acropora digitifera/gemmifera/humilis/tenuis/spp.*,
- ACS : pourcentage par transect d'*Acropora abrotanoides/robusta/spp.*,
- CB : pourcentage par transect *Porites nigrescens*,
- CEmonspp : pourcentage par transect *Montipora spp.*,
- Pour\_ACBsains : pourcentage par transect d'Acropores branchus sains (sans algues) parmi les Acropores vivants,
- Pour\_ACB\_morts : pourcentage par transect d'Acropores branchus morts parmi tous les Acropores branchus (vivants : sains ou enalgues),
- FV14m2 : nombre moyen de *Tripneustes gratilla* par m<sup>2</sup> de substrat,
- FV2m2 : nombre moyen d'*Echinothrix sp.* par m<sup>2</sup> de substrat,
- Holo\_TOTm2 : nombre moyen d'holothuries totales par m<sup>2</sup> de substrat,
- CME : pourcentage par transect de *Millepora spp.*,
- FV1m2 : nombre moyen de *Diadema sp.* par m<sup>2</sup> de substrat.

Si l'on réitère l'AFD avec ces nouvelles variables et que l'on réalise une validation de type LOO (répétée 20 fois comme précédemment), on obtient un pourcentage de bien classé de l'ordre de 77.77%. On observe une forte amélioration de 51.11% par rapport à la validation croisée de l'AFD réalisée précédemment. Il semble donc plus judicieux de conserver ces 12 variables si l'on veut discriminer les 4 groupes en fonction des valeurs du compartiment algal.

### 3. Analyse Factorielle Discriminante linéaire sur les 3 compartiments

Les analyses précédentes nous ont permis de sélectionner les variables significativement différentes entre les 4 groupes pour les compartiments ichtyologique, algal et benthique. La seconde étape consiste à réaliser une AFD sur ces différents variables tous compartiments confondus (37 variables au total) afin de mettre en évidence les possibles interactions entre les 3 compartiments (**Figure 47**).

Sans validation croisée, le pourcentage de bien classé est égale à 100%. Le pouvoir discriminant

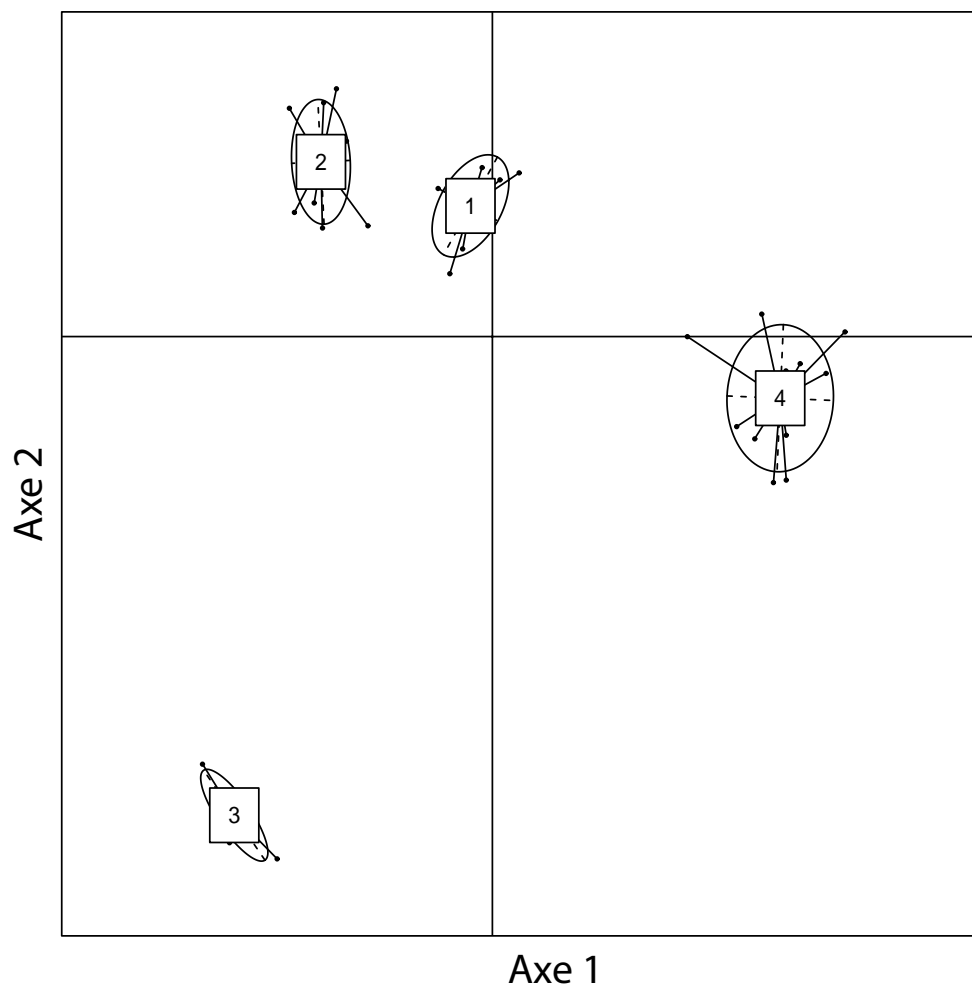


Figure 47 : Représentation des axes 1-2 de l'AFD réalisée sur les variables des 3 compartiments

Tableau 15 : Résultats des validations croisées des modèles avec les ajouts de variables complémentaires

Bien classé	Modèles								
	Modèle initial	Ajout ratio Stim/ACB	Ajout ratio Stim/ACB	Fusion Stégastes	Ajout ratio Steg/ACB	Ajout ratio Steg/Pour ACB morts	Ajout ratio Steg/DR AR	Ajout ratio ACB/Pour ACB morts	Ajout ratio ACB/PE AR
"Leave-One-Out"	46,66%	50,78%	51,13%	60,22%	60,44%	50,11%	54,88%	55,86%	63,55%
"Holdout method"	66,66%	64,67%	65,67%	66,39%	72,11%	68,86%	66,66%	71%	57%
Résultats	/	Garde	Garde	Garde et rejet des espèces Stégastes	Garde	Rejet	Rejet	Rejet	Garde

1 2 3 4 ou 4 3 2 1

Figure 48 : Bioindicateur optimal par rapport au gradient d'apport terrigène

1 3 4 2 ou 1 3 2 4 ou 3 1 4 2 ou 3 1 2 4

Figure 49 : Bioindicateur optimal par rapport au « gradient d'hydrodynamisme »

des 3 axes est égal à 0.93, 0.84 et 0.68. La validation croisée (réalisée 20 fois) donne des pourcentages de bien classé de l'ordre 46,66% pour le LOO, et 69.66% pour la méthode « Holdout method » (la sélection des variables au sein des 3 compartiments a permis de réduire le « bruit » inutile). Avec cette sélection de variables l'objectif est de maximiser le pourcentage de bien classé de l'AFD, en testant des nouvelles variables écologiquement intéressantes et en essayant de trouver des relations liant les variables entre les compartiments. Après discussions avec les différents experts des compartiments, plusieurs nouvelles variables ont été construites et testées. Une synthèse des résultats de ces tests est disponible dans le tableau-ci-dessous (**Tableau 15**). Il est à noter que le pourcentage de bien classé calculé grâce à la méthode LOO a été le critère de choix principal lorsque son résultat était différent de celui de la méthode « Holdout method » (du fait du nombre réduit d'observations, sa pertinence et sa précision est donc forcément inférieure à la méthode LOO).

Le modèle final ainsi sélectionné comporte 38 variables quantitatives (la liste des variables finale est disponible en **Annexe 23**). Le pouvoir discriminant des 3 axes est égal à 0.99, 0.94 et 0.78. Les validations croisées donnent des pourcentages de bien classé, avec la méthode LOO et « Holdout method », de l'ordre de 63% et 57%.

## 4. Analyse des variables sélectionnées

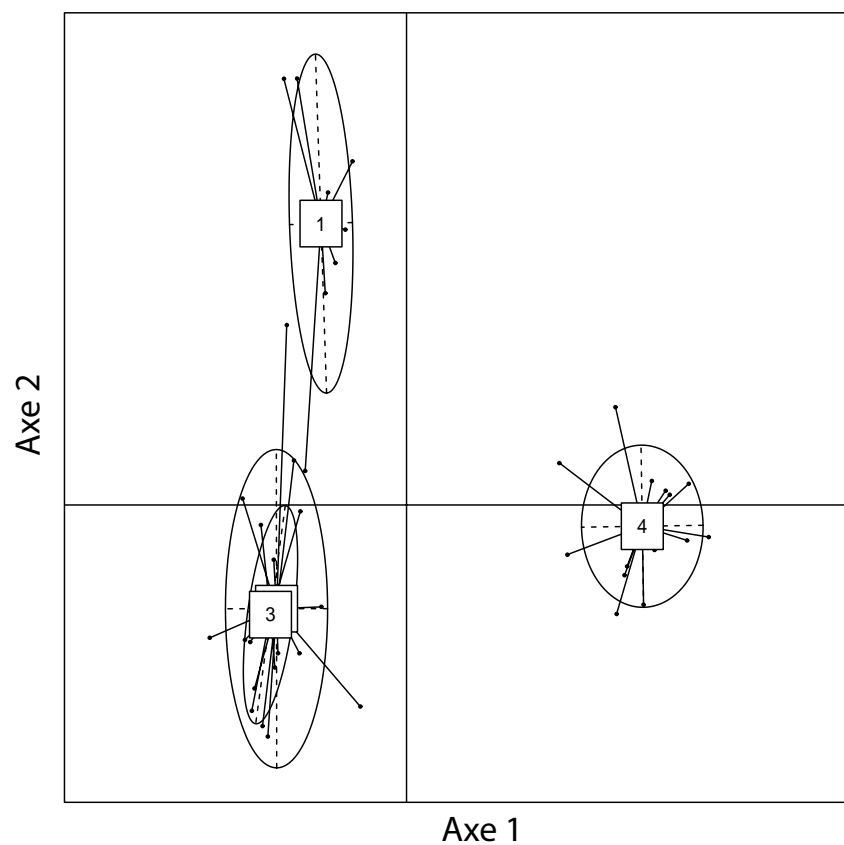
Les 38 variables sélectionnées permettent de discriminer les 4 groupes, avec une amélioration du pourcentage de bien classé lors de l'utilisation de la validation croisée avec la méthode « Leave-One-Out ». Il convient de regarder de plus près chacune des variables afin d'identifier celles différenciant au mieux les groupes par rapport au gradient d'apports terrigènes mise en évidence précédemment. Les variables ainsi identifiées constituent des bioindicateurs potentiels.

Si l'on regarde le gradient d'apport terrigène mis en évidence lors des analyses sur le compartiment hydrologique, un bioindicateur optimal permettrait une différenciation des 4 groupes avec une répartition suivant le gradient (les valeurs les plus fortes pour le groupe 1 et les plus faibles pour le groupe 4, ou le contraire, **Figure 48**).

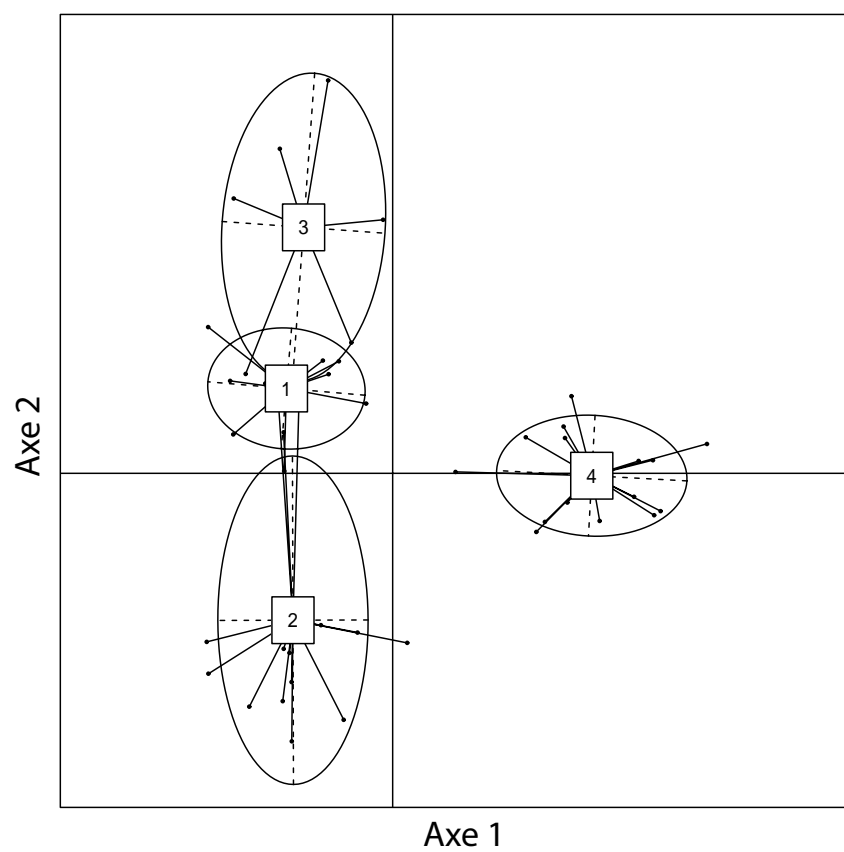
Cependant, il est aussi intéressant de regarder ces bioindicateurs potentiels du point de vue du deuxième gradient mise en évidence lors des analyses sur le compartiment hydrologique. L'axe 2 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes des 4 mois du compartiment hydrologique permettait d'opposer des peuplements macrophytiques (côté négatif) à des peuplements phytoplanctoniques (côté positif), pouvant être en relation avec une augmentation de la turbidité (peut être un « gradient de turbidité ») et une remise en suspension de la matière présente dans les sédiments. Il est difficile de donner un bioindicateur optimal pour ce gradient car la représentation des stations sur cet axe ne permet pas de hiérarchiser les groupes 1 et 3 ainsi que les groupes 2 et 4 (**Figure XX**). Cependant, on peut émettre plusieurs combinaisons « équivalentes » (**Figure 49**).

L'analyse de chacune des variables a été réalisée grâce à des tests post hoc de Kruskal Wallis (avec application de corrections de Benjamini & Hochberg). Ces tests ont été réalisés grâce à la fonction « kruskal », issu du package agricolae (**Felipe de Mendiburu 2013**). Les résultats sont regroupés dans le tableau disponible en Annexes (**Annexe 24**). Les variables les plus indicatrices (en fonction des gradients) ont été sélectionnées.

Une AFD réalisée sur les 18 variables sélectionnées en fonction du gradient d'apport terrigène est présentée ci-dessous (**Figure 50**).



**Figure 50** : AFD réalisée sur les variables sélectionnées en fonction du gradient d'apport terrigène



**Figure 51** : AFD réalisée sur les variables sélectionnées en fonction du « gradient de turbidité »

Sans validation croisée, on obtient 91.11% de pourcentage de bien classé, et des pouvoirs discriminants des axes égaux à 0.85, 0.36 et 0.11. La validation croisée donne 66.33% avec la méthode LOO, et 63% avec la méthode « Holdout method ». On constate que les groupes 1 et 4 sont très bien discriminés, tandis que les groupes 2 et 3 sont presque confondus. Cela est normal car au sein des 18 variables sélectionnées (les plus indicatrices du gradient d'eutrophisation) les groupes 2 et 3 ne présentent pas de différence significative (contrairement au groupe 1 et 4 qui sont les mieux différenciés).

Une seconde AFD a été réalisée sur les 17 variables sélectionnées en fonction du « gradient de turbidité » (**Figure 51**).

On obtient près de 91% de pourcentage de bien classé sans validation croisée, et des pouvoirs discriminants des axes égaux à 0.57, 0.36 et 0.19. La validation croisée donne 76.44% avec la méthode LOO, et 66.66% avec la méthode « Holdout method ».

## 5. Analyse discriminante multitableaux : STATIS-LDA

Le principal inconvénient de la réalisation d'une AFD sur les variables des 3 compartiments confondus est la perte de la structure de chaque compartiment. Une méthode d'Analyse Discriminante Multitableaux, STATIS-LDA, a été appliquée ici afin de tenir compte de la structure des données de chaque compartiment, et surtout comparer les résultats obtenus précédemment avec l'AFD du super-tableau. Son application a été réalisée par le Pr. Robert Sabatier (du laboratoire de Physique Industrielle et Traitement de l'Information de l'Université de Montpellier) sous R.

STATIS-LDA utilise conjointement la méthode STATIS et l'AFD pour chaque tableau de données (**Sabatier et al. 2013**) et permet notamment de quantifier l'importance de chaque tableau pour la discrimination. De plus, les résultats sont indépendants des unités de mesures des variables, les données de grandes dimensions peuvent être traitées (avec un grand nombre d'observations) et surtout sa structure permet de réaliser des procédures de validations croisées. Il est important de noter que cette méthode est robuste en présence de « bruit » dans les tableaux (masquant la discrimination) ainsi qu'en présence de tableaux exhibant une structure différente : STATIS-LDA va alors exploiter les complémentarités des différents tableaux. Cette méthode ne permet pas uniquement de mettre en évidence une structure consensuelle entre les tableaux mais va aller chercher dans chaque tableau la part d'information utile au problème de discrimination posé.

STATIS-LDA a été appliqué sur les variables des 3 compartiments après élimination des variables colinéaires (avec un seuil de  $|0.84|$ ). De plus, afin de pouvoir utiliser la validation croisée de cette méthode, les variables ayant au moins 10 valeurs nulles ont été éliminées. Au final cela représente 30 variables pour le compartiment algal, 16 variables pour le compartiment benthique et 11 variables pour le compartiment ichtyologique (la liste des variables est disponible en **Annexe 25**).

La représentation graphique du premier plan de l'interstructure (c'est-à-dire l'analyse globale, l'objectif de cette étape est de comparer les tableaux de données) de STATIS-LDA nous permet de constater que les 3 compartiments ne contribuent pas de la même façon dans l'analyse (**Figure 52**). En effet, les compartiments algal et benthique ont pratiquement les mêmes valeurs sur l'axe 1 (réciproquement 0.67 et 0.60), contrairement au compartiment ichtyologique qui est inférieur aux autres. Ce dernier contribue donc le moins à la discrimination des groupes. La représentation globale du compromis (un résumé de l'ensemble des objets) permet de constater que 100% des individus sont bien classés (**Figure 53**).

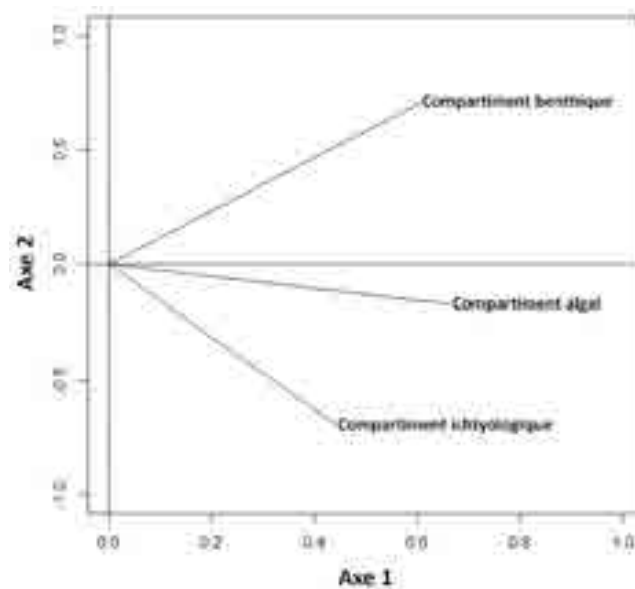


Figure 52 : Représentation des axes 1-2 de l'interstructure de STATIS-LDA (Sabatier 2013)

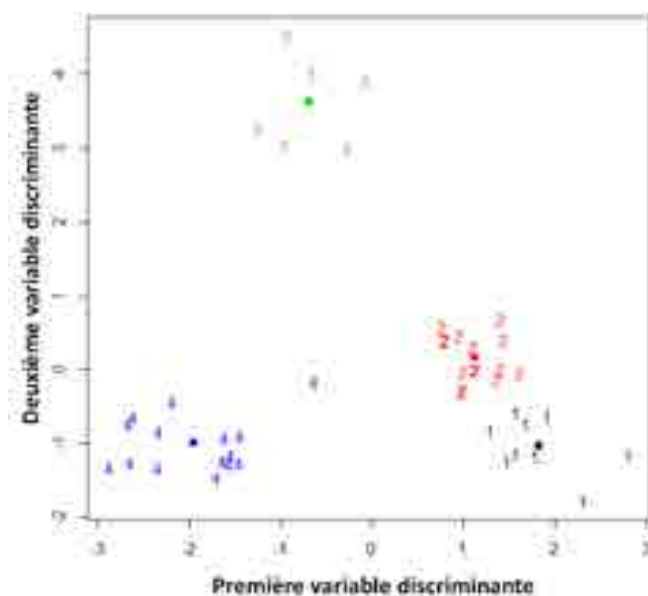


Figure 53 : Représentation du compromis (variables discriminantes 1-2, Sabatier 2013)

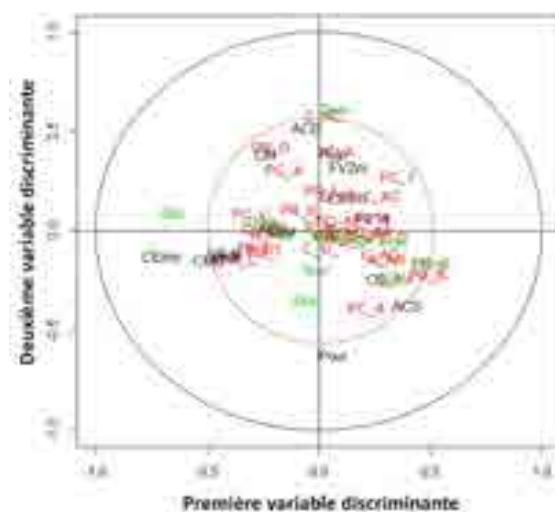


Figure 54 : Représentation des variables des 3 compartiments avec les deux premiers axes discriminants



Une méthode de validation croisée de type « k-fold cross-validation » a ensuite été appliquée afin de quantifier la robustesse de l'analyse. Dans ce type de méthode, on divise l'échantillon en k paquets, puis on sélectionne un des k paquets comme ensemble de validation et les (k-1) autres constitueront l'ensemble d'apprentissage. L'opération est ensuite répétée k fois, afin qu'au final chaque sous-échantillon ait été utilisé une fois comme ensemble de validation. Cette validation a été réalisée sur 5 paquets et répétée 30 fois. Le pourcentage moyen de bien classés est de l'ordre de 65.1% avec un écart-type de 5.8%. Les pourcentages de bien classés par groupe sont de 79.3% pour le groupe 1, 50.4% pour le groupe 2, 72.8% pour le groupe 3 et 68.2% pour le groupe 4. La robustesse du modèle est donc tout à fait correcte. On peut même dire en regardant les pourcentages de bien classés par groupe que le groupe 2 est le moins bien discriminé (il est relativement proche du groupe 1).

Le graphique des corrélations des variables des 3 compartiments avec les deux premiers axes discriminants permet de quantifier l'intérêt de chaque variable dans la discrimination (**Figure 54**).

Les variables du compartiment benthique sont en noir, du compartiment algal en rouge et celle du compartiment ichthyologique en vert. Afin d'aider l'interprétation, seulement les 4 premières lettres de chaque variable est retenues. Le cercle rouge correspond à une corrélation de l'ordre de 0.5. Nous nous intéresserons ici qu'aux variables présentent une corrélation supérieur à 0.5 avec l'un des deux axes discriminants.

On peut constater que les variables Chnoi, Stliv, PC\_TAC, PC\_OM ainsi que PR\_AR sont fortement corrélées positivement à l'axe 1. Les variables Stnig, CEmonspp, CME, CS et PR\_CLI\_SPP sont fortement corrélées négativement à l'axe 1. Concernant l'axe 2, les variables Zevel, ACB, CM, C\_ACD ADSII et PR\_DYS\_SPP sont fortement corrélées positivement à l'axe 2, en opposition aux variables Pour\_ACB\_mort, ACS et PC\_AV fortement corrélée négativement à l'axe 2.

## 6. Interprétation des résultats et discussion

### a. Variables ichthyologiques

Concernant les variables ichthyologiques, la mise en évidence de bioindicateurs potentiels est difficile. Les résultats que l'on observe ne permettent pas de séparer efficacement les 4 groupes en fonction du gradient d'apports terrigènes. De plus, il semble que la séparation des groupes soit fortement influencée par le gradient d'hydrodynamisme de l'axe 2 de l'ACP centrée/réduite des données du compartiment hydrologique. Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, comme le comportement territorial de certaines espèces herbivores (par exemple les espèces de *Stegastes*), la compétition interspécifique (**Sano et al. 1984, Robertson 1982**), le recrutement limité (**Doherty & Williams 1988**) ou la préférence d'un régime alimentaire. Le facteur de compétition interspécifique est sûrement un élément important entre les espèces de *Stegastes*, ce qui expliquerait la répartition non homogène de ces espèces et les résultats observés (**Chabanet, com. pers.**). De plus, de nombreuses études ont montré une corrélation entre les variables du compartiment algal et l'abondance des herbivores (**Galzin 1985, Letourneur 1992**) ce qui n'est pas le cas dans notre étude. Cependant, il est parfois difficile de montrer une telle corrélation, notamment du fait de la complexité des relations qui lie ces deux compartiments (**Chabanet 1994, Chabanet et al. 1997**). Cette complexité est due en partie à la diversité de nourriture consommée par des herbivores. Leur régime inclut des algues, mais aussi le dépôt, le détritus et les excréments de poissons (**Robertson 1982, Jones 1991, Choat 1991**). De plus, la forte pression de pêche que subit l'ensemble du lagon réunionnais est un biais non négligeable dans



l'étude. La variabilité des herbivores en fonction des apports de nutriments peut se montrer négligeable au regard de la variabilité due aux efforts de pêche. Au-delà de ces facteurs de variations, les herbivores ne peuvent pas toujours exercer de contrôle sur les niveaux trophiques inférieurs, et plus précisément sur les peuplements algaux, à cause du bloom de certaines algues qu'ils ne peuvent consommer. En effet, la plupart des blooms de cyanobactéries productrices de substances répulsives ou de toxines, ne peuvent pas être contrôlés par l'herbivore (**Thacker 2001**). De plus, alors que les peuplements benthiques sessiles peuvent se montrer très sensibles à des modifications faibles des facteurs biotiques et abiotiques, les variations à l'intérieur des populations ichtyologiques ne sont souvent perceptibles qu'avec des modifications drastiques de ces mêmes facteurs. Les variables sélectionnées sont donc à considérer avec prudence, et des études complémentaires à plus long terme sont nécessaires afin de pouvoir émettre des interprétations plus robustes.

Néanmoins, même si les résultats des poissons chirurgiens noirs (*Ctenochaetus striatus* et *Acanthurus nigrofusus*) ne permettent pas d'observer une séparation nette des groupes, on constate que la répartition des groupes suit le gradient d'apports terrigènes et que le groupe 1 est différent du groupe 4. Ces deux espèces sont à considérer avec intérêt dans les études ultérieures. Concernant les espèces de *Stegastes*, qui ont plusieurs fois été définies comme de bons indicateurs de l'enrichissement en nutriment des platiers récifaux de La Réunion (**Lison de loma et al. 2000, Bein & Nicet 2011**), les analyses ne permettent pas de mettre en évidence une séparation nette. Cela peut être dû en grande partie à une compétition interspécifique importante, ainsi qu'à l'influence du gradient d'hydrodynamisme. Ce facteur est relativement important car il a été démontré que la répartition des peuplements de poissons est conditionnée en partie par l'hydrodynamisme (**Letourneur 1996**). Cependant, les espèces de *Stegastes* ne sont pas à négliger car l'on peut constater que les rapports Stlm/ACB et Stfas/ACB permettent de différencier (même si cela est très loin d'être optimal) le groupe 1 et le groupe 4. Des études ultérieures devraient permettre de répondre quant à la pertinence de ces espèces en tant que bioindicateurs.

## b. Variables algales

Les bioindicateurs potentiels du compartiment algal ont pour la plupart été mis en évidence lors de l'analyse descriptive du compartiment algal :

- l'abondance (qui est équivalent au recouvrement algal) de la cyanobactérie phosphophile *Symploca* spp. Cette espèce se développe préférentiellement au niveau du front récifal où les apports en phosphates sont les plus importants. Cette cyanobactérie se développe donc à l'inverse du gradient d'apports terrigènes (du groupe 4 vers 1). Un recouvrement élevé en *Symploca* spp. refléterait donc une influence océanique. Il est à noter que même si l'abondance de l'espèce *Anabaena* sp1 (cyanobactérie) n'apparaît pas pertinente pour discriminer les groupes, cette espèce est écologiquement intéressante (au même titre que *Symploca* spp.) et il serait préférable de la suivre. De plus, ces deux genres sont facilement identifiables sur le terrain,
- l'abondance de la cyanobactérie nitrophile *Hydrocoleum* spp. L'abondance de cette espèce est significativement plus importante pour le groupe 1. Elle semble donc répondre au gradient d'apports terrigènes. La difficulté d'utiliser ce bioindicateur réside au niveau de l'identification de ce genre. Une étude prospective sur l'identification in situ des cyanobactéries serait un préalable pour valider l'utilisation de ce bioindicateur,
- l'abondance des diatomées répond très bien au gradient d'apports terrigènes. En effet, les résurgences d'eau douce représentent un apport en silice non négligeable qui peut « booster »



le développement des diatomées. Les blooms de diatomées constituent donc un bon indicateur facilement identifiable sur le terrain,

- l'abondance en algue rouge semble en effet répondre au gradient d'apports terrigènes. Des études antérieures (**Lapointe & Bedford 2011**) ont en effet montré que l'abondance de certaines algues rouges (*Acanthophora spicifera* et *Hypnea musciformis*) étaient plus importante près des résurgences d'eau douce. Les algues rouges à croissance rapide sont en effet plus compétitives du fait de leur capacité d'absorption et de stockage de l'azote très performante (**Lapointe & Bedford 2011**). Le recouvrement en algue rouge a déjà été recommandé par De'ath & Fabricius (**2010**) comme indicateur de la qualité de l'eau pour la grande barrière de Corail en Australie. Cependant, dans cette étude, le recouvrement des algues rouges est dominé par un seul groupe fonctionnel qui est le TAC (Turf d'Algues Calcaires). Le TAC est dominant sur les travées détritiques de Saint-Pierre (toutes les saisons) mais aussi sur Saint-Leu (RI40) et de l'Etang Salé (ES3). Selon Naim et al. (**2012**), cet assemblage d'algues calcaires articulées semble se développer préférentiellement au niveau des résurgences d'eau douce sur les platiers de Saint-Leu, Etang Salé et Saint-Pierre où il forme un habitat à part entière (**Cuet 1989, Naim 1993a**). Dans notre étude, le pourcentage de recouvrement en algue rouge est en effet fortement corrélé au pourcentage de recouvrement des ACD (Algues Calcaires Dressées), au pourcentage de recouvrement total et au pourcentage de recouvrement du TAC. Il semble donc que le meilleur bioindicateur des apports terrigènes pour les algues rouges soit le TAC qui est en effet très abondant, voir dominant, sur les sites dits impactés par les résurgences d'eau douce,
- la richesse spécifique des algues vertes semble être un bioindicateur pertinent pour diagnostiquer des sites impactés. De nombreuses études ont en effet montré que la richesse spécifique des algues vertes augmente sur les sites « impactés » par des enrichissements en nutriments (**Fabricius et al. 2005**). Les algues vertes sont pour la plupart des espèces opportunistes à croissance rapide qui se développent de façon importante avec un apport en nutriments. Cette variable représente un bioindicateur très important pour étudier l'impact des résurgences d'eau douce. Cependant, il sera difficile pour un « non-expert » d'identifier l'ensemble de ces algues vertes. Une formation sera donc indispensable pour la mise en place de ce suivi. Ce bioindicateur est déjà utilisé en Méditerranée pour évaluer la qualité de l'eau (**Facca & Sfriso 2011**),
- la richesse spécifique des macroalgues opportunistes. Cette variable est liée à la précédente car la majorité des macroalgues opportunistes de notre étude sont des algues vertes. Selon cette analyse, il semble que le statut écologique des macroalgues soit pertinent dans la définition des bioindicateurs. Le suivi DCE devra donc porter une attention particulière à ces différentes espèces.

Les autres variables algales mises en évidence dans ces analyses ne sont pas pertinentes pour être utilisées comme bioindicateur :

- les rapports ADS/CYANO et AV/(CYANO+DIATO) ne sont pas pertinents dans le cadre de notre étude car ils ne différencient pas les cyanobactéries nitrophiles des espèces phosphorophiles,
- le rapport ADS/ANA\_SYM reflète le fort recouvrement de l'espèce *Boergesenia forbesii* sur les stations proches du front récifal (corrélation entre PR\_ADS, PR\_AV et PR\_BOE). Pour ADS il est donc important, comme pour les cyanobactéries, de différencier les espèces nitrophiles et phosphorophiles si l'on veut définir un bioindicateur de recouvrement fiable,
- le recouvrement de *Hydrolithon* spp. dépend davantage de l'habitat que de l'influence des résurgences d'eau douce. En effet, le développement de cette algue calcaire encroûtante sera favorisé par un habitat dominé par des débris (RI40, Trou d'Eau) et défavorisé par un substrat de type TAC (SP30, SP60 et SP80).



## c. Variables benthiques

Les résultats de l'analyse des variables du compartiment benthique ne permettent pas de définir avec pertinence des bioindicateurs. Cependant ces résultats permettent de mettre en évidence plusieurs observations. Comme pour le compartiment ichthyologique, il semble que le gradient d'hydrodynamisme joue un rôle important dans la répartition des peuplements sessiles. Il a déjà été montré l'importance de ce gradient, qui peut être suffisamment important pour masquer tout enrichissement direct en sels nutritifs (**Mioche & Cuét 1999**). De plus, la forte variabilité des habitats des différentes stations, qui se traduit notamment par la couverture en débris coralliens, est le principal moteur la répartition corallienne (**Zubia et al. 2012**). A la vue de la répartition des groupes au sein des différentes variables du compartiment benthique et en fonction du gradient d'apport terrigène, on constate bien que la séparation est loin d'être optimale et ne suis pas forcément le gradient. Cela peut s'expliquer par une synergie entre les différents facteurs agissant sur la structure des communautés des récifs frangeants de La Réunion : la qualité de l'eau, la fréquentation touristique et la pêche, l'impact des événements aigus (tel que le blanchissement ou les cyclones) ainis que l'hydrodynamisme et la nature du substrat.

La variabilité des peuplements coralliens liée aux événements aigus est bien mise en avant dans plusieurs études (**Scopelitis et al. 2009, Mioche & Cuét 1999**). Cependant, même si les résultats sur ce compartiment ne semble pas suivre le gradient d'apports terrigènes, son influence peut ne pas être quantifiable ou mise en évidence sur un suivi de 3 mois (car comme expliqué précédemment seuls les mois de Février, Avril et Juin ont pu être utilisés). De plus, il est tout à fait possible que les secteurs impactés ne répondent pas de la même manière au phénomène d'enrichissement en nutriments. Plusieurs études s'accordent à dire que la pollution chronique des récifs coralliens par les sels nutriments entraine sur le long terme des modifications de la structure des communautés benthiques (**Smith et al. 1981, Lapointe 1997**), qui peuvent affecter les flux de matière et métabolique au niveau de l'écosystème (**Johnson et al. 1995, Naim 1993b**). De plus, Pastorok & Bilyard's (**1985**) ont montré que les eaux usées d'origine humaine est une contrainte de plus en plus commun sur ces récifs coralliens, et les enquêtes de Maragos et al. (**1985**) confirme que l'excès de nutriments est une contrainte majeure pour les coraux et un stimulant pour la croissance des algues. La croissance lente et la longue longévité des coraux présentent des risques importants pour la survie des communautés quand celle-ci sont soumises à des perturbations chroniques (**Knowlton 2001, Loya et al. 2001**).

De plus, il faut prendre en compte qu'un bioindicateur doit, dans la mesure du possible, pouvoir être identifié in situ sans nécessiter de formation trop spécifique, afin de faciliter la mise en œuvre des suivis. Cet impératif est difficile à prendre en compte vis-à-vis des communautés coralliennes car l'identification de l'espèce est parfois difficile pour des « non-experts ». Il est tout à fait probable que le regroupement de certaines espèces par genre (comme nous l'avons fait ici) masque la variabilité de certains individus et puisse contribuer aux résultats que nous observons.

Concernant les paramètres mis en évidence on peut émettre plusieurs recommandations pour les études ultérieures :

- même si la biodiversité corallienne ne permet pas de discriminer les groupes hydrologiques, cette variable n'est pas à délaissier. Il a été montré (**Bein & Nicet 2011, Cooper et al. 2009**) une corrélation forte entre la dégradation de la qualité des eaux et la diminution de la richesse en espèce. Sur le long terme ce paramètre semble donc très pertinent,
- la répartition des holothuries dépend de nombreux facteurs et il est donc difficile de relier leur





densité (surtout qu'elle doit être mise en relation avec le substrat) de manière directe avec la qualité de l'eau (**Zubia et al. 2012**). Cette variable n'est donc pas forcément un bon bioindicateur,

- les variables traitant de la santé, la mortalité ou du recouvrement des Acropores ne sont pas à négliger. Même si elles ne permettent pas de différencier les groupes en fonction du gradient d'apport terrigène, les Acropores constituent une espèce corallienne sténocé très sensible aux enrichissements et plus généralement aux changements du milieu (**Tourrand et al. 2012, Edinger & Risk 2000**). De plus, de nombreuses études montrent que les espèces d'Acropores sont généralement dominantes sur les récifs coralliens de l'île de La Réunion (**Faure & Montaggioni 1970, Montaggioni 1978, Faure 1982, Naim 1989, Naim et al. 2002, Bruggemann et al. 2007, Tessier et al. 2008**). Ces variables peuvent donc constituer des outils pertinents pour évaluer l'état de santé des communautés coralliennes et il est important de les considérer sur le long terme dans les études ultérieures.

Deux autres variables, non prise en compte dans le programme EUTROLAG, pourrait être étudié en complément car elles présentent un intérêt particulier : la bioérosion et les maladies coralliennes.

Le terme de bioérosion des récifs coralliens a été employé pour la première fois par Neumann (1966) pour désigner l'action des organismes attaquant les substrats calcaires. La bioérosion est donc un processus de dégradation induite par l'activité d'organismes végétaux et animaux qui perforent le substrat ou en érodent la surface. Ce phénomène est un processus majeur dans la destruction des récifs corallins. De plus, il a été prouvé que dans des milieux très enrichis en nutriments les processus de bioérosion induit par la microflore est plus importante que dans les milieux où les teneurs en nutriments sont faibles (**Zubia & Peyrot-Clausade 2001**). Ce paramètre semble donc pertinent pour identifier les milieux dégradés par des apports en nutriments très importants.

Les maladies coralliennes se manifestent par des lésions caractéristiques, issues de causes infectieuses (parasites, virus ou bactéries) ou non-infectieuses (blanchissement dû à l'élévation de la température ou à cause de prédateurs). Ces maladies peuvent parfois avoir des conséquences importantes sur l'état de santé des communautés coralliennes car elles peuvent entraîner une large dégradation. Les recherches sur ces maladies sont relativement récentes et les premiers rapports décrivant la dégradation des tissus coralliens datent des années 70 (**Richardson 1998**). Il a été démontré qu'une augmentation, même modérée, des concentrations en nutriments peut augmenter considérablement la gravité des maladies des coraux (**Bruno et al. 2003**). Cela peut s'expliquer par le fait que les proliférations des champignons marins et des bactéries sont généralement limitées par l'azote (**Olutiola & Cole 1977, Smith 1988**) et qu'un enrichissement favorise donc leur prolifération. De plus l'enrichissement en nutriments (par des processus aussi bien naturels qu'anthropiques) peut se produire sur les récifs à des échelles allant de plusieurs mètres à plusieurs kilomètres, ce qui peut entraîner des dégradations très importantes (**Shinn et al. 1994, Nixon 1995, Szmant 2002, Leichter et al. 2003**). La quantification de la part des coraux touchés par des maladies coralliennes semble donc pertinente pour quantifier les enrichissements en nutriments et il serait judicieux de prendre en compte ces paramètres dans les études ultérieures.

## 7. Critiques

Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de l'élaboration de ce rapport. Cette partie a comme objectif d'avoir un point de vue critique sur les analyses effectuées afin de pouvoir prendre du recul quant aux différentes interprétations.

La plus grande difficulté du programme EUTROLAG réside dans l'hétérogénéité des différentes



méthodes d'échantillonnage. Cette diversité entraîne plusieurs problèmes, notamment concernant la redondance d'informations lors des analyses portant sur la recherche de bioindicateurs. L'exemple le plus concret concerne les compartiments algal et benthique. Beaucoup d'informations du compartiment benthique n'ont pas pu être utilisées à cause d'une redondance partielle avec les données du compartiment algal. De même, de nombreuses variables traitant de la composition spécifique du peuplement algal n'ont pu être intégrées en raison de la nature qualitative des dernières. La solution aurait été d'avoir recours à un avis « statistique » dès le début du projet afin de pouvoir avoir une vue globale des « prérequis statistiques ».

Un autre problème réside dans le peu de données disponibles pour les analyses, une fois les stations et les mois qui ne sont pas communs à tous les compartiments supprimés. La robustesse des résultats et des interprétations en est forcément altérée. Cependant, il faut considérer l'aspect financier dans l'acquisition des données : les fonds mis à disposition par les financeurs ne subventionnent pas toutes les analyses et certains choix doivent être faits, parfois au détriment d'un échantillonnage réduit.

La création des groupes hydrologiques est aussi discutable. Ces groupes ont été construits sur la base de paramètres hydrologiques qui, comme nous l'a montré le descriptif de ce compartiment, présentent des valeurs irrégulières entre chaque mois. De plus, la variabilité temporelle de la première ACP réalisée, même si elle reste réduite, représente près de 17% de la variabilité totale. Il aurait donc été nécessaire d'avoir plus de mois d'échantillonnages afin d'améliorer la robustesse de la définition des groupes. De plus, il apparaît dans les analyses que le facteur hydrodynamique joue un rôle très important qui n'est pas quantifié dans les paramètres hydrologiques. Il aurait donc été judicieux d'intégrer cette information dans la caractérisation des stations.

## E. Conclusions et perspectives

Au travers des analyses réalisées sur les données du programme EUTROLAG, 38 paramètres issus des 3 compartiments biologiques ont pu être mis en évidence en tant que bioindicateurs potentiels de l'état des écosystèmes récifaux réunionnais. Néanmoins, il est important de prendre en compte lors de l'analyse de ces variables, le facteur hydrodynamique qui joue un rôle très important et qui peut même masquer une partie des apports terrigènes. Ce facteur n'est pas quantifié directement au sein du programme EUTROLAG et il serait judicieux d'étudier ce paramètre et surtout son impact sur les variables sélectionnées. De plus, il faut tenir compte dans ces analyses du nombre relativement réduit d'observations communes à tous les compartiments, et surtout son influence sur la robustesse de nos interprétations. En effet, un bioindicateur pertinent n'est pas forcément une espèce ou un paramètre très recensé et il est d'autant plus difficile à mettre en évidence que ces valeurs sont en nombre limitées. De plus, il semble que la formation des groupes hydrologiques a permis de mettre en évidence un certain regroupement des stations, non pas en fonction de la distance à la côte comme escompté initialement, mais en fonction des secteurs. Cela démontre encore une fois la grande hétérogénéité des écosystèmes réunionnais et surtout la difficulté dans la définition d'un bioindicateur général. La pertinence de ces bioindicateurs potentiels sera étudiée au travers du prochain plan de gestion de la Directive Cadre sur l'Eau, prévu pour la période 2014-2019. Ces études permettront d'affirmer, ou au contraire d'infirmer, certaines de ces variables. L'objectif final étant d'élaborer un indicateur surfacique permettant de quantifier « l'état de santé » des écosystèmes coralliens, afin de pouvoir entreprendre des actions de gestion et de protection visant à la non dégradation de ces milieux fragiles et menacés, qui constituent pourtant un maillon essentiel des écosystèmes réunionnais.



# Références bibliographiques

Aminot, A. & Kérouel, R. (2004). Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Edition Ifremer, 336 pages.

Aminot, A. & Kérouel, R. (2007). Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines : méthodes en flux continu. Edition Ifremer, Méthodes d'analyse en milieu marin. 188 pages.

Andral, B., Cuët, P., Bigot, L., Gonzalez, J.L., Nicet, J.B., Turquet, J., Cambert H. & Galgani, F. (2010). Caractérisation de l'état de référence biologique des masses d'eau à La Réunion au regard de la DCE. Convention IFREMER/DIREN n° 07/1216865/TF. 40 pages.

ARVAM (2007). Etat des connaissances sur les causes de dégradation des milieux récifaux, Synthèse et propositions d'actions. 94 pages.

ARVAM (2010). Définition d'un bio-indicateur d'eutrophisation (coraux, algues) pour les récifs coralliens de La Réunion. Rapport intermédiaire. 13 pages.

ARVAM (2011). Définition d'un bio-indicateur d'eutrophisation (coraux, algues) pour les récifs coralliens de La Réunion. Rapport intermédiaire. 22 pages.

BCEOM, ARVAM & PARTEO ECOCONSULT (2005). Etat des lieux du district hydrographique de La Réunion. Rapport pour DIREN Réunion, 189 pages.

Bein, A. & Nicet, J.B. (2011). Rapport benthos Eutrolag. Rapport de Master, Uniserstà di Corsica Pasquale Paoli. 33 pages.

Benjamini, Y. & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. Journal of the Royal Statistical Society Series B.. Vol. 57. Pages 289-300.

Benjamini, Y. & Yekutieli, D. (2001). The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency. Annals of Statistics. Vol. 29. Pages 1165-1188.

Bianchi, G., Gislason, H., Graham, K., Hill, L., Jin, X., Koranteng, K., Manickchand-Heilement, S. Payà, I., Sainsbury, K., Sanchez, F. & Zwanenburg, K. (2000). Impact on size composition and diversity of demersal fish communities ICES. Journal of Marine Science. Vol. 57. Pages 558-571.

Bigot, L. (2008). Evolution spatio-temporelle de la biodiversité et de la structure des communautés benthiques entre 1998 et 2008 sur les stations sentinelles GCRMN de La Réunion. Rapport ECOMAR pour le compte de APMR. 32 pages.

Bruggemann, H., Guillaume, M.M.M., Denis, V., Bigot, L., Naim, O., Tessier, E., Durville, P. & Mulochau, T. (2007). The recent marine reserve at Reunion Island: initial state of the benthic communities of the coral reefs of Saint-Leu and la Saline. 5th Western Indian Ocean Marine Science Association (WIOMSA) Conference, Durban, South Africa.

Bruno, J.F., Petes, L.E., Harvell, C.D. & Hettinger, A. (2003). Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. Ecology Letters. Vol. 6. Pages 1056-1061.

Bruno, J.F., Sweatman, H., Preech, W.F., Selig, E.R & Schutte, V.G.W. (2009). Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reef. Ecology. Vol. 90, pages 1478-1484.



Buchet, R. (2009). Directive Cadre sur l'Eau : état des lieux des travaux DCE relatifs aux masses d'eau littorales dans les départements d'outre-mer. Ifremer rapport final, centre de Nantes DYNECO/VIGIES. 98 pages.

Chabanet, P. & Bissery, C. (2010). Les peuplements de poissons associés aux récifs coralliens de la réserve naturelle marine de La Réunion. Bilan des 10 ans de suivi des peuplements de poissons sur les stations de suivi de l'état de santé des récifs coralliens de La Réunion (1998 et 2008). 45 pages.

Chabanet, P. (1994). Etude des relations entre les peuplements benthiques et les peuplements ichtyologiques sur le complexe récifal de Saint-Gilles/La Saline. Île de La Réunion. Thèse de Doctorat, Université de La Réunion. 235 pages.

Chabanet, P. (2002). Recherche de bioindicateur sur les récifs frangeants de La Réunion. Dans Programme National Environnement Côtier (PNEC). Ateliers – Indicateurs de ressources vivantes en milieu corallien, Nouméa 22-26 juillet 2002. 50 pages.

Chabanet, P., Ralambondrainy, H., Amanieu, M., Faure, G. & Galzin, R. (1997). Relationships between coral reef substrata and fish. Coral reef. Vol. 16 (2). Pages 93-102.

Chen, P.P.S. (1976). The entity-relationship model, toward a unified view of data. ACM Transactions on Database Systems (TODS). Special issue: papers from the international conference on very large data bases. Vol. 1, issue 1. Pages 9-36. DOI: 10.1145/320434.320440.

Chessel, D., Dufour, A.B. & Thioulouse, J. (2004). The ade4 package-I- One-table methods. R News. Vol. 4. Pages 5-10.

Choat, J.H. (1991). The biology of herbivorous fishes on coral reefs. Dans : The ecology of fishes on coral reef. Academic Press, San Diego. Pages 120-155.

Comité de bassin Rhône-Méditerranée (2009). Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2010-2015. [En ligne] [Consulté le 20/03/2013]. Disponible sur le Web : [http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/sdage/docs-officiels/HD/sdage-2010-2015\\_VF.pdf](http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/sdage/docs-officiels/HD/sdage-2010-2015_VF.pdf)

Conand, C. & Mangion, P. (2003). Les holothuries des récifs frangeants de La Réunion : diversité, distribution, abondance et structure des populations. Dans La bêche-de-mer – Bulletin de la CPS n°17. 44 pages.

Conand, C., Chabanet, P., Quod, J.P. & Bigot, L. (1997). Manuel méthodologique pour le suivi de l'état de santé des récifs coralliens du sud-ouest de l'Océan Indien. Commission de l'Océan Indien.

Cooper, T.F., Gilmour, J.P. & Fabricius, K.E. (2009). Bioindicators of changes in water quality of coral reefs: review and recommendations for monitoring programmes. Coral Reefs. Vol. 28. Pages 589-606.

CPCe: Kohler, K.E & Gill, S.M. (2006). Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A visual basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. Computers and Geosciences. Vol. 32 (9). Pages 1259-1269. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.11.009.

Cuet, P. & Naïm O. (1992). Analysis of a blatant reef flat degradation in La Reunion Island (l'Etang-Sale fringing reef). Proc. 7th Int. Coral Reef Symp., Guam, June 22-26. Pages 313-322.

Cuet, P. (1989). Influence des résurgences d'eau douce sur les caractéristiques physico-chimiques et métaboliques de l'écosystème récifal à La Réunion. Doctorat en Chimie de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille III, Marseille. 295 pages.





Cuet, P., Naïm, O. Faure, G. & Conan, J.Y. (1988). Nutrient-rich groundwater impact on benthic communities of a Saline fringing reef (Reunion Island, Indian Ocean) : preliminary results. Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., Townsville, 12 aout. Pages 207-212.

De'ath, G. & Fabricius K.E. (2010). Water quality as a regional driver of coral biodiversity and macroalgae on the Great Barrier Reef. Ecology Applied. Vol. 20. Pages 840-850.

Directive 2000/60/CE. Journal officiel n°L 327. 22 décembre 2000, Bruxelles.

Doherty, P.J. & Williams, D. (1988). The replenishment of coral reef fish populations. Oceanogr. Mar. Bio. Annu. Rev. Vol. 26. Pages 487-555.

Dray, S., Dufour, A.B. & Chessel, D. (2007). The ade4 package-II : Two-table and K-table methods. R News. Vol. 7 (2). Pages 47-52.

Dufour, A.B., Chessel, D. & Lobry, J.R. (2010). Analyse discriminante linéaire. [consulté le 01/07/2013] [Disponible en ligne]. URL : <http://pbil.univ-lyon1.fr/R/pdf/tdr63.pdf>.

Edinger, E.N. & Risk, M.J. (2000). Reef classification by coral morphology predicts coral reef conservation value. Biological conservation. Vol. 92. Pages 1-13.

Fabricius, K.E., Cooper, T.F., Humphrey, C., Uthicke, S., De'ath, G., Davidson, J., LeGrand, H., Thompson, A. & Schaffelke, B. (2011). A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. Marine Pollution Bulletin, doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.004.

Fabricius, K.E., De'ath, G., McCook, L., Turak, E. & Williams D.M. (2005). Changes in algal, coral and fish assemblages along water quality gradients on the inshore Great Barrier Reef. Marine Pollution Bulletin. Vol. 51. Pages 384-398.

Facca, C., Sfriso, A. (2011). Confronto tra comunità microalgali di bassofondo e di canale nella laguna di Venezia. Società Veneziana di Scienze Naturali. Vol. 36. Pages 72-78.

Faure, G.F. & Montaggioni, L.F. (1970). Le récif corallien de Saint-Pierre de la Réunion (Océan Indien): géomorphologie et répartition des peuplements. Recueil des Travaux de la Station Marine Endoume, fascicule hors-série. Suppl. 10. Pages 271-284.

Faure, G.F. (1982). Recherche sur les peuplements de Scléractiniaires des récifs coralliens de l'Archipel des Mascareignes (Océan Indien Occidental). Doct. des Sciences. Université Aix-Marseille II. Vol. 2.

Felipe de Mendiburu (2013). Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.1-4. <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.

Fisher, W.S., Fore, L.S., Hutchins, A., Quarles, R.L., Campbell, J.G., LoBue, C. & Davis, W.S. (2008). Evaluation of stony coral indicators for coral reef management. Marine Pollution Bulletin. Vol. 56, pages 1737-1745.

Galzin, R. (1985). Ecologie des poisons récifaux de Polynésie Française. Thèse Sciences, Univ Montpellier. 170 pages.

Gaspar, R., Pereira, L. & Neto, J.M. (2012). Ecological reference conditions and quality states of marine macroalgae sensu Water Framework Directive : An example from the intertidal rocky shores of the Portuguese coastal waters. Ecological Indicators. Vol. 19. Pages 24-38.

Guillaume, M., Payri, C. & Faure, G. (1983). Blatant degradation of coral reefs at La Reunion Island (West Indian Ocean). Int. Soc. Reef Stud. Ann. Meet. Nice, 8-9/12/1983: 28.



Guinda, X., Juanes, J.A., Puente, A. & Revilla, J.A. (2008). Comparison of two methods for quality assessment of macroalgae assemblages, under different pollution types. *Ecological Indicators*. Vol. 8. Pages 743-753.

Hill, J. & Wilkinson, C. (2004). *Methods for ecological monitoring of coral reefs: a resource for managers*. Version 1, Australian Institute of Marine Science (AIMS), Townsville Australia.

Hochberg, Y. (1988). A sharper Bonferroni procedure for multiple tests of significance. *Biometrika*. Vol. 75. Pages 800-803.

Ifremer (2010). *Caractérisation de l'état de référence biologique des masses d'eau côtières au regard de la Directive Cadre sur l'Eau. Etude pilote*. 40 pages.

Johnson, C., Klumpp, D., Field, J. & Bradbury, R. (1995). Carbon flux on coral reefs, effects of large shifts in community structure. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 126. Pages 123-143.

Jones, G.P. (1991). Postrecruitment processes in the ecology of coral reef fish populations: a multifactorial perspective. Dans: *The ecology of fishes on coral reef*. Academic Press, San Diego. Pages 294-328.

Knowlton, N. (2001). Who are the players on coral reefs and does it matter? The importance of coral taxonomy for coral reef management. *Bulletin of Marine Science*. Vol. 69. Pages 305-308.

Kroonenberg, P.M. & Lombardo, R. (1999). Nonsymmetric Correspondence Analysis: a tool for analyzing contingency tables with a dependence structure. *Multivariate Behavioral Research*. Vol. 34 (3). Pages 367-396.

Kuffner, I.B. & Paul, V.J. (2001). Effects of nitrate, phosphate and iron on the growth of macroalgae and benthic Cyanobacteria from Cocos Lagoon, Guma. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 222. Pages 63-72.

Lapointe, B.E. & Bedford, B.J. (2011). Stormwater nutrient inputs favor growth of non-native macroalgae (Rhodophyta) on O'ahu, Hawaiian Islands. *Harmful Algae*. Vol. 10 (3). Pages 310-318.

Lapointe, B.E. (1997). Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgae blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 42 (5, part2). Pages 1119-1131.

Leichter, J.J., Stewart, H.L. & Miller, S.L. (2003). Episodic nutrient transport to Florida coral reefs. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 48. Pages 1394-1407.

Leliaert, F. & Coppejans, E. (2004). *Standard Survey Methods for Key Habitats and Key Species in the Red Sea and Gulf of Aden*. PERSGA Technical Series No. 10. PERSGA, Jeddah. Pages 101-124.

Letourneur, Y. (1992). *Dynamique des peuplements ichtyologiques des platiers récifaux de l'île de La Réunion*. Thèse, université d'Aix-Marseille II. 244 pages.

Letourneur, Y. (1996). Dynamics of fish communities on Reunion fringing reefs, Indian Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. Vol. 195. Pages 1-30.

Lison De Loma, T., Harmelin-Vivien, M., Naim, O. & Fontaine, M.F. (2000). Algal food processing by *Stegastes nigricans*, an herbivorous damselfish : differences between an undisturbed and a disturbed coral reef site (La Réunion, Indian Ocean). *Oceanologica Acta*. Vol. 23, Issus 7. Pages 793-804.

Littler, M.M. & Littler D.S. (1984). Relationships between macroalgal functional formgroups and substrata stability in a subtropical rocky intertidal system. *Journal of Experimental*



Marine Biology and Ecology. Vol. 74. Pages 13-34.

Littler, M.M. & Littler, D.S. (1980). The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *American Naturalist*. Vol. 116. Pages 25-44.

Loiseau, N. (2011). Poissons herbivores Euto-Indic. 27 pages.

Loya, Y., Sakai, K., Yamazato, K., Nakano, Y., Sambali, H. & van Woesik, R. (2001). Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecology Letters*. Vol. 4. Pages 122-131.

Maragos, J.E., Evans, C. & Holthus, P. (1985). Reef corals in Kaneohe Bay 6 years before and after termination of sewage discharges (Oahu, Hawaiian archipelago). *Proc. 5th int. coral Reef Congr.* Vol. 4. Pages 189-194.

Martinez, B., Pato, L.S. & Rico, J.S. (2012). Nutrient uptake and growth responses of three intertidal macroalgae with perennial, opportunistic and summer-annual strategies. *Aquatic Botany*. Vol. 93 (1). Pages 14-22.

McCook, L.J. (1999). Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*. Vol. 4. Pages 357-367.

McCook, L.J., Jompa, J. & Diaz-Pullido, G. (2001). Competition between corals and algae on coral reefs. A review of evidence and mechanisms. *Coral Reefs*. Vol. 19. Pages 19-425.

Microsoft corporation (2012). Microsoft office 2013. All right reserved.

Mioche, D. & Cuet, P. (1999). Métabolisme du carbone, des carbonates et des sels nutritifs en saison chaude, sur un récif frangeant soumis à une pression anthropique (île de La Réunion, Océan Indien). *Earth & Planetary Sciences*. Vol. 329. Pages 53-59.

Montaggioni, L.F. (1978). Recherche géologiques sur les complexes récifaux de l'archipel des Mascareignes (Océan Indien occidental). Doctorat des Sciences. Université Aix-Marseille II. Vol.2.

Naïm, O. (1989). Les platiers récifaux de l'île de La Réunion, géomorphologie et état de santé des peuplements benthiques. Rapport Université Réunion (Laboratoire d'Ecologie Marine). Agence Urbanisme Réunion. 151 pages.

Naïm, O. (1993a). Critical period for an eutrophication-trending fringing reef (Reunion Island, Western Indian Ocean). *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 99, pages 137-151.

Naïm, O. (1993b). Seasonal responses of a fringing reef community to eutrophication (Reunion island, Western Indian Ocean). *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 99, pages 307-315.

Naïm, O., Chabanet, P., Done, T., Tourrand, C. & Letourneur, Y. (2002). Regeneration of a reef flat ten years after the impact of the cyclone Firinga (reunion, SW Indian Ocean). *Proceedings of the 9th International Coral reef Symposium, Bali, Indonesia* 1. Pages 547-552.

Naïm, O., Cuet, P. & Mangar, V. (2000). The Mascarene Islands. Dans : *Corals reefs of the Indian Ocean : their ecology and conversation*. McClanahan, Sheppard & Obura (eds), Oxford Univeristy Press. Pages 353-381.

Naïm, O., Tourrand, C., Ballesteros, E., Semple, S., Bigot, L., Cauvin, B. & Montaggioni, L.F. (2012).



Fringing reefs of Reunion Island. Part 2: Long-term monitoring of primary producers. Atoll Research Bulletin (in press).

Neumann, A.C. (1966). Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rate of the sponge, *Cliona lampa*. Limnology and Oceanography. Vol. 11. Pages 92-108.

Nixon, S.W. (1995). Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*. Vol. 41. Pages 199-219.

Oksanen, J., Blanchet, G.F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H. & Wagner H. (2013). Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-7. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.

Olutiola, P.O. & Cole, O. O. (1977). Some environmental and nutritional factors affectins growth and sporulation of *Aspergillus sydowi*. *Physiol. Plant*. Vol. 39. Pages 239-242.

Orfanidis, S., Panayotidis, P. & Stamatis, N. (2001). Ecological evaluation of transitional and coastal waters: a marine benthic macrophytes-based model. *Mediterranean Marine Science*. Vol. 2(2). Pages 45-65.

Pastorok, R.A., & Bilyard, G.R (1985). Effects of sewage pollution on coral reef communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 21. Pages 175-189.

Payam R., Lei T. & Huan L. (2009). Cross-Validation in Encyclopedia of Database Systems. Edited by Ling Lui & Tamer Özsu. Pages 532-538. DOI: doi:10.1007/978-0-387-39940-9\_565.

R Development Core Team (2013). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org/>.

Richardson, L.L. (1998). Coral diseases: what is really known?. *TREE*. Vol. 13 (11). Pages 438-444.

Ripley B. & Lapsley M. (2012). RODBC: ODBC Database Access. R package version 1.3-6. [Http://CRAN.R-project.org/package=RODBC](http://CRAN.R-project.org/package=RODBC).

Robertson, D.R. (1982). Fish feces as fish food on Pacific coral reef. *Mar Ecol Prog Ser*. Vol. 7. Pages 253-265.

Sabatier (2013). Cours d'Anlayse de Données. Promotion 2012/2012, UM2.

Sabatier, R., Vivien, M. & Reynes C. (2013). Une nouvelle proposition, l'Analyse Discriminante Multitableaux : STATIS-LDA. *Journal de la Société Française de Statistique* (in press).

Sano, M., Shimizu, M. & Nose, Y. (1984). Changes in structure of coral reef fish communities by destruction of hermatypic corals: observational and experimental views. *Pac Sci*. Vol. 37 (1). Pages 51-79.

Saporta, G. (2011). Probabilites Analyse des Données et Statistique. Technip, 3ème édition. 622 pages. ISBN-13 : 978-2710809807.

Scopelitis, J., Andrefouet, S., Phinn, S., Chabanet, P., Naim, O., Tourrand & Done, T. (2009). Changes of coral communities over 35 years: integrating in situ and remote-sensing data on Saint-Leu Reef (La Réunion, Indian Ocean). *Coastal and shelf science*. Vol. 84. Pages 342-352.





- Semple, R. (1997). Algal growth on two sections of a fringing coral reef subject to different levels of eutrophication in Reunion Island. *Oceanologica Acta*. Vol. 20, pages 851-861.
- Shinn, E.A., Reese, R.S. & Reich, C.D. (1994). Fate and pathways of injection-weel effluent in the Florida Keys. Department of the Interior US Geological Survey, Open-File Report. Pages 94-276.
- Smith, G.W., Harvell, C.D & Kim, K. (1998). Response of sea fans to infection with *Aspergillus* sp. (Fungi). *Rev. Biol. Trop.* Vol. 46. Pages 205-208.
- Smith, S.V., Kimmerer, W.J., Laws, E.A., Brock, R.E. & Walsh, T.W. (1981). Kaneohe Bay sewage diversion experiment, perspectives on ecosystem responses to nutritional perturbation. *Pac. Sci.* Vol. 35(4). Pages 279-395.
- Stieglitz, T.C., Cook, P.G. & Burnett, W.C. (2010). Inferring Coastal processes form regional-scale mapping of  $^{222}\text{Rn}$  and Salinity, examples from the Great Barrier Reef, Australia. *Journal for Environmental Radioactivity*. Vol. 101. Pages 544-552.
- Szmant, A.M. (2002). Nutrient enrichment on coral reefs: is it a major cause of coral reef decline?. *Estuaries*. Vol. 25. Pages 743-766.
- Tessier, E., Bigot, L., Cadet, C., Cauvin, B., Chabanet, P., Conand, C., Nicet, J-B. & Quod, J-P. (2008). Les récifs coralliens de La Réunion en 2007: état des lieux et réseau du suivi. *Revue d'Ecologie (Terre & Vie)*. Vol. 63. Pages 85-102.
- Thacker, R.W. (2001). Effects of herbivore exclusion and nutrient enrichment on coral reef macroalgae and cyanovacteria. Vol. 19 (4). Springer Berlin/Heidelberg. Pages 318-329.
- The Document Foundation (2013). LibreOffice 2013. Version 4.0.3. All right reserved.
- Tourrand, C., Naim, O., Bigot, L., Cadet, C., Cauvin, B., Semple, S., Montaggioni, L. & Bruggemann, H. (2012). Fringing reefs of Reunion Island. Part I: Long-term monitoring of two shallow coral reef communities. *Atoll Research Bulletin*. 33 pages.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. 4th edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Walsh, B. (2004). Multiple Comparisons: Bonferroni Corrections and False Discovery Rates. [Consulté le 20/06/2013] [Disponible en ligne]. URL: <http://nitro.biosci.arizona.edu/workshops/Aarhus2006/pdfs/Multiple.pdf>
- Warwick, R.M. & Clarke, K.R. (1995). New “biodiversity” measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 129. Pages 301-305.
- Warwick, R.M. & Clarke, K.R. (1998). A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 35. Pages 523-531.
- Warwick, R.M. & Clarke, K.R. (1999). The taxonomic distinctness mesasure of biodiversity: weighting of step lengths between hierarchical levels. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 184. Pages 21-29.
- Warwick, R.M. & Clarke, K.R. (2001). A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 216. Pages 265-278.



Wells, E., Wilkinson, M., Wood, P. & Scanlan, C. (2007). The use of macroalgae species richness and composition on intertidal rocky seashores in the assessment of ecological quality under the European Water Framework Directive. *Marine pollution bulletin*. Vol. 55 (1-6). Pages 151-161.

Zubia, M. & Peyrot-Clausade, M. (2001). Internal bioerosion of *Acropora Formosa* in Réunion (Indian Ocean): microborer and macroborer activities. *Oceanologica Acta*. Vol 24(3). Pages 251-262.

Zubia, M., Cuet, P., Nicet, J.B., Cambert, H., Bein, A. & Turquet, J. (2012). Définition d'un bio-indicateur d'eutrophisation (coraux, algues, invertébrés) pour les récifs coralliens de La Réunion. Rapport final. 188 pages.





**Mots clés** : Directive Cadre sur l'Eau, gestion intégrée, île de La Réunion, eutrophisation, bioindicateurs, analyse discriminante k-tableaux.

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000, établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, et renforce la prise en compte des milieux aquatiques par le Droit en instaurant notamment un objectif de « bon état » écologique et chimique des différents milieux aquatiques des pays de l'UE à atteindre. Cependant, dans le cas des départements d'Outre-Mer, comme l'île de La Réunion, des questions se posent quant à la mise en œuvre de la DCE en raison des particularités des écosystèmes qui les composent. De plus, des études ont mises en évidence un enrichissement « chronique » en sels nutritifs au niveau de la côte Ouest de l'île de La Réunion, entraînant la dégradation des écosystèmes récifaux. Le programme EUTROLAG a été initié en 2011 pour répondre à ces problématiques de dégradation des milieux. Ce programme multidisciplinaire a comme objectif d'appréhender le phénomène d'enrichissement en nutriments dans son ensemble, et pourra permettre d'établir des mesures de gestion en conséquence. En utilisant les données recueillies durant les campagnes d'échantillonnage, ce présent rapport a comme vocation de définir des bioindicateurs potentiels. Des analyses descriptives réalisées sur le compartiment hydrologique ont permis de construire des groupes de stations hiérarchisées en fonction d'un gradient d'apport terrigène. Des analyses discriminantes (AFD et la nouvelle méthode de discrimination multi-tableaux : STATIS-LDA) ont été appliquées aux données des compartiments biologiques (ichthyologique, algal et benthique), ce qui a permis de mettre en évidence 38 variables permettant de discriminer les stations en fonction du gradient d'apport terrigène. Plusieurs variables ont ensuite été sélectionnées en fonction de leur intérêt écologique, et seront testées pendant 5 ans au sein du prochain plan de gestion de la DCE (2014-2019). Cela permettra à terme d'élaborer des indicateurs pertinents qui permettront de quantifier « l'état de santé » des écosystèmes coralliens et d'entreprendre des actions de gestions et protection de ces milieux fragiles.

**Keywords** : Water Framework Directive, integrated management, Reunion Island, eutrophication, bioindicators, multiway Discriminant Analysis.

Water Framework Directive (WFD) of 2000, establishes a framework for community action in the field of water, and strengthens the inclusion of aquatic environments by law including by establishing a goal of «good condition» ecological and chemical aquatic different countries of the EU to achieve. However, in the case of overseas territories, such as the island of Reunion, questions arise as to the implementation of the WFD due to the particularities of the ecosystems that make up. In addition, studies have highlighted an enrichment «chronic» in nutrients at the west coast of Reunion Island, resulting in the degradation of reef ecosystems. EUTROLAG program was initiated in 2011 to address these issues of environmental degradation. This multidisciplinary program aims to understand the phenomenon of nutrient enrichment as a whole, and may help to establish management measures accordingly. Using data collected during sampling campaigns, this report has the purpose to define potential bioindicators. Descriptive analyzes of the water compartment were used to build groups of stations ranked according to a gradient of terrigenous input. Discriminant analysis (AFD and the new method of multi-tables discrimination STATIS-LDA) were applied to the data of biological compartments (ichthyological, algal and benthic), which helped to identify 38 variables to discriminate stations depending on the gradient terrigène intake. Several variables were selected according to their ecological value, and will be tested for 5 years in the next management plan for the WFD (2014-2019). This will eventually develop relevant indicators to quantify the «health» of coral reef ecosystems and to undertake management actions and protection of these fragile environments.

Académie de Montpellier

# Université Montpellier II

(Sciences et Techniques du Languedoc)

Statistique des Sciences de la Vie et de la Santé

Master 2

Parcours professionnel

Méthodes Statistiques des Industries Agronomiques  
Agroalimentaires et Pharmaceutiques

Annexes

*Etude de l'impact des résurgences d'eau douce sur la  
biocénose des récifs coralliens de l'île de La Réunion :  
analyses multifactorielles et définition de bioindicateurs*

Effectué du 18 février au 16 août 2013

au sein de

l'Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines

sous la direction du

Dr. Mayalen Zubia et du Dr. Olivier Flores

par

M. Mathieu Depetris

soutenu le

10 septembre 2013

devant la commission d'examen composée du

Dr. Christelle Reynes, Pr Jean-Noël Bacro et du Pr Robert Sabatier





# Tables des annexes

<b>Annexe 1 :</b> Localisation géographique des différentes stations suivies à Toboggan, sur le récif frangeant de Saint-Gilles .....	Page 1
<b>Annexe 2 :</b> Localisation géographique des différentes stations suivies à Trou d'eau, sur le récif frangeant de Saint-Gilles .....	Page 1
<b>Annexe 3 :</b> Localisation géographique des différentes stations suivies sur le récif frangeant de Saint-Leu .....	Page 2
<b>Annexe 4 :</b> Localisation géographique des différentes stations suivies sur le récif frangeant de l'Etang-Salé .....	Page 2
<b>Annexe 5 :</b> Localisation géographique des stations suivies sur le récif frangeant de Saint-Pierre .....	Page 3
<b>Annexe 6 :</b> Liste des différentes variables en relation avec le compartiment hydrologique, mesurées lors du programme EUTROLAG .....	Page 3
<b>Annexe 7 :</b> Taxonomie et identification des différentes espèces de poissons recensées lors du programme EUTROLAG .....	Page 4
<b>Annexe 8 :</b> Paramètres de suivi des communautés coralliennes .....	Page 4
<b>Annexe 9 :</b> Paramètres de suivi des invertébrés benthiques .....	Page 5
<b>Annexe 10 :</b> Taxonomie et identification des différentes espèces de coraux recensées lors du programme EUTROLAG .....	Page 6
<b>Annexe 11 :</b> Taxonomie et identification des différentes espèces d'invertébrés benthiques recensées lors du programme EUTROLAG .....	Page 6
<b>Annexe 12 :</b> Taxonomie et identification des différentes espèces algales recensées lors du programme EUTROLAG .....	Page 7
<b>Annexe 13 :</b> Représentation type des différentes analyses multivariée réalisées sous R grâce au package ade4 .....	Page 8
<b>Annexe 14 :</b> Liste des variables conservées pour l'analyse du compartiment hydrologique.....	Page 8
<b>Annexe 15 :</b> Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 9
<b>Annexe 16 :</b> Représentation des axes 3-4 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichtyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 9
<b>Annexe 17 :</b> Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données compartiment algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin ....	Page 10
<b>Annexe 18 :</b> Représentation des axes 2-3 de l'ACP réalisée sur les moyennes des variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale sans la station RI40) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 10



<b>Annexe 19 :</b> Représentation des stations et variables des axes 2-1 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 10
<b>Annexe 20 :</b> Représentation des stations et variables des axes 3-4 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin .....	Page 11
<b>Annexe 21 :</b> Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données des communautés sessiles) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 11
<b>Annexe 22 :</b> Représentation des axes 3-4 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données des communautés sessiles) pour les mois de Février, Avril et Juin .....	Page 11
<b>Annexe 23 :</b> Listes finales des variables sélectionnées dans le cadre de l'AFD sur les 3 compartiments biologiques .....	Page 12
<b>Annexe 24 :</b> Résultats des tests de comparaisons multiples réalisés sur les 38 variables sélectionnées ..	Page 13
<b>Annexe 25 :</b> Liste des variables utilisées pour l'application de la méthode STATIS-LDA .....	Page 14



**Annexe 1 :** Localisation géographique des différentes stations (ou transects) suivies à Toboggan, sur le récif frangeant de Saint-Gilles



**Annexe 2 :** Localisation géographique des différentes stations (ou transects) suivies à Trou d'eau, sur le récif frangeant de Saint-Gilles





**Annexe 3 :** Localisation géographique des différentes stations (ou transects) suivies sur le récif frangeant de Saint-Leu



**Annexe 4 :** Localisation géographique des différentes stations (ou transects) suivies sur le récif frangeant de l'Etang-Salé







## Annexe 5 : Localisation géographique des stations (ou transects) suivies sur le récif frangeant de Saint-Pierre



## Annexe 6 : Liste des différentes variables en relation avec le compartiment hydrologique, mesurées lors du programme EUTROLAG

PARAMETRES	MESURES	METHODES	PARTENAIRES
Paramètres physico-chimiques			
Température/salinité/ Oxygène dissous	Sonde Ysi	<i>In situ</i>	ARVAM
Turbidité	Turbidimètre IR	Aminot & Kérouel 2004	ARVAM
Matière en suspension (MES)	Filtration	Aminot & Kérouel 2004	ARVAM
Teneurs en nutriments			
Nitrites (NO <sub>2</sub> ) / Nitrates (NO <sub>3</sub> )	Flux continu	Aminot & Kérouel 2007	ECOMAR
Silicates	Flux continu	Aminot & Kérouel 2007	ECOMAR
Ammonium (NH <sub>4</sub> ) / Orthophosphate (PO <sub>4</sub> )	Spectrophotomètre	Aminot & Kérouel 2004	ARVAM
Azote organique dissous (NOD)	Flux continu	Persulfate	ECOMAR
Azote particulaire (NP)	CHN		ECOMAR
Phosphore organique dissous (POD)	Flux continu	Persulfate	ECOMAR
Azote particulaire (PP)	CHN	Calcination	ECOMAR
Carbone organique total / dissous (COT et COD)			ARVAM
15N dans les macroalgues			RSI Lab
15N dans eau douce/mer			Université de Californie
C:N dans macroalgues			RSI Lab
Carbone organique particulaire	CHN		ECOMAR
Urée	Spectrophotomètre	Imidazolone	ECOMAR
Estimation de la production primaire			
Chlorophylle dans les sédiments	Spectrophotomètre	Aminot & Kérouel 2004	ARVAM
Contamination chimique			
Analyses contaminants chimiques	SBSE		ARVAM



## Annexe 7 : Taxonomie et identification des différentes espèces de poissons recensées lors du programme EUTROLAG

Code sp	Nom vulgarisé	Phyla	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce
Acnigri	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	nigricauda
Acten	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	tennentii
Actri	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	triostegus
Chnoi	Poisson chirurgien noir	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Acanthurus	nigrofuscus/ striatus
Chsor	Poisson perroquet	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Chlorurus	sordidus
Cicas	Blennie chataigne	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Blennidae	Cirripectes	castaneus
Nalit	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Naso	lituratus
Nauni	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Naso	unicornis
Scgho	Poisson perroquet	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Scaridae	Scarus	ghobban
Siarg	Poisson lapin argente	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Siganidae	Siganus	argenteus
Stalb	Stégaste	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	albifasciatus
Stfas	Stégaste	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	fasciatus
Stlim	Stégaste	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	limbatus
Stliv	Stégaste	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	lividus
Strig	Stégaste	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Pomacentridae	Stegastes	nigricans
Zesco	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Zebrasoma	scopas
Zevel	Poisson chirurgien	Chordata	Actinopterygii	Perciformes	Acanthuridae	Zebrasoma	veliferum

## Annexe 8 : Paramètres de suivi des communautés coralliennes

	Paramètres «Suivi récifs Réunion» GCRNM		Variables utilisées	Précisions apportées dans l'étude						
Type	Code Coremo3	Signification	Identification	Précision taxonomique	Santé coraux	Substrat	Identif corail mort	Geomorphologie	Blanchissement	
Algues et Cyanobactéries	CA	Algues calcaires	<i>Neogoniolithon sp.</i>	Au genre	Algues calcaires au pied, aucune espèce, cyanobactéries au pied, gazon algal au pied, <i>Lobophora</i> au pied, non corail, corail non ramifié, rien (bonne santé corail), turf au pied	Corail mort, débris, débris basaltiques, roche, sable, substrat corallien	Acropore branchu, Acropore digité, Acropore sp., non-Acropore massif, millépore, non-Acropore submassif, inconnu, <i>Montipora sp.</i> , non corail mort, <i>Pavona sp.</i> , <i>Porites lutea</i> , <i>Porites nigrescens</i> , <i>Porites sp.</i> , <i>Porites rus</i>	Travée corallienne, travée sableuse/détritique	Aucun, blanc, non corail, partiellement ou blanchissement pâle	
	FMA	Algues molles dressées	Algue calcaire encroûtante							
			Algue verte							
			<i>Boergesenia sp.</i>							
			<i>Lobophora sp.</i>							
			<i>Dictyota sp.</i>							
			<i>Dictyosphaeria sp.</i>							
		<i>Padina sp.</i>								
	HMA	Algues dures dressées	Algues dures dressées							
	TA	Turf	Turf							
Gazon algal										
Turf calcaire										
Non pris en compte		Cyanobactéries								
Cnidaires	ACB	Acropore branchu	Acropore branchu	A l'espèce	Algues calcaires au pied, aucune espèce, cyanobactéries au pied, gazon algal au pied, <i>Lobophora</i> au pied, non corail, corail non ramifié, rien (bonne santé corail), turf au pied	Corail mort, débris, débris basaltiques, roche, sable, substrat corallien	Acropore branchu, Acropore digité, Acropore sp., non-Acropore massif, millépore, non-Acropore submassif, inconnu, <i>Montipora sp.</i> , non corail mort, <i>Pavona sp.</i> , <i>Porites lutea</i> , <i>Porites nigrescens</i> , <i>Porites sp.</i> , <i>Porites rus</i>	Travée corallienne, travée sableuse/détritique	Aucun, blanc, non corail, partiellement ou blanchissement pâle	
	ACD	Acropore digité	Acropore digité							
	CB	Non-Acropore branchu	Non-Acropore branchu							
	ACS	Acropore submassif	Acropore submassif							
	ACT	Acropore tabulaire	Acropore tabulaire							
	CE	Non-Acropore encroûtant	Non-Acropore encroûtant							
	CF	Non-Acropore foliace	Non-Acropore foliace							
	CM	Non-Acropore massif	Non-Acropore massif							
	CS	Non-Acropore submassif	Non-Acropore submassif							
	CMR	Non-Acropore «champignon»	Non-Acropore «champignon»							
	CME	Millépore	Millépore							
		SC	«Solf coral»	«Solf coral»						Au genre
		CTU	<i>Tubipora</i>	<i>Tubipora</i>						
		CHL	<i>Heliopora</i>	<i>Heliopora</i>						
Eponges	SP	Eponges	<i>Cliona sp.</i>	Au genre	Algues calcaires au pied, aucune espèce, cyanobactéries au pied, gazon algal au pied, <i>Lobophora</i> au pied, non corail, corail non ramifié, rien (bonne santé corail), turf au pied	Corail mort, débris, débris basaltiques, roche, sable, substrat corallien	Acropore branchu, Acropore digité, Acropore sp., non-Acropore massif, millépore, non-Acropore submassif, inconnu, <i>Montipora sp.</i> , non corail mort, <i>Pavona sp.</i> , <i>Porites lutea</i> , <i>Porites nigrescens</i> , <i>Porites sp.</i> , <i>Porites rus</i>	Travée corallienne, travée sableuse/détritique	Aucun, blanc, non corail, partiellement ou blanchissement pâle	
			<i>Dysidea sp.</i>							
			Eponges							
Autre	Non pris en compte		Aucune espèce	Aucune espèce						



## Annexe 9 : Paramètres de suivi des invertébrés benthiques

Type	Variables utilisées	Précisions	Travées	Autres
Oursins herbivores	Diadema sp.	Les valeurs sont données initialement en nombre d'individus observés. Les valeurs terminées par m2 correspondent aux nombres d'individus rapportés sur le substrat ou l'espèce vie, et cela pour 1 m <sup>2</sup>	Exprimée en cm. Le codage T correspond aux travées coralliennes et le TRS aux travées sableuses/détritiques/rocheuses (tout sauf du corail)	Il a été considéré que les oursins herbivores et benthiques vivent sur les travées coralliennes et les holothuries sur les travées autres que coralliennes
	Diadema sp. m2			
	Echinotrix sp.			
	Echinotrix sp. m2			
	Echinometra sp.			
	Echinometra sp. m2			
Holothuries	Holothuridae sp1			
	Holothuridae sp1 m2			
	Holothuridae sp2			
	Holothuridae sp2 m2			
	Actinopyga echinites			
	Actinopyga echinites m2			
	Actinopyga sp.			
	Actinopyga sp. m2			
	Holothuria leucospilota			
	Holothuria leucospilota m2			
	Holothuria sp.			
	Holothuria sp. m2			
	Stichopus chloronotus			
	Stichopus chloronotus m2			
Autres	Synapta maculate			
	Synapta maculate m2			
	Toxopneustes pileolus			
	Toxopneustes pileolus m2			
	Toxopneustes sp.			
	Toxopneustes sp. m2			
	Etoile de mer			
	Etoile de mer m2			
	Ophiure			
	Ophiure m2			
	Spirographe			
	Spirographe m2			
	SPVerte			
	SPVerte m2			
	(vide)			
	(vide) m2			
	Tripneustes gratilla			
	Tripneustes gratilla m2			
Benthiques	Tridacna maculatga			
	Tridacna maculatga m2			
Totaux	Oursins herbivores m2			
	Benthiques m2			
	Holothuries m2			





## Annexe 10 : Taxonomie et identification des différentes espèces de coraux recensées lors du programme EUTROLAG

Code sp	Nom vulgarisé	Phyla	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce
ACB	Acropore branchu	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Acropora	overta/hemiphris/muricata/spp.
ACD	Acropore digitale	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Acropora	digitifera/gemmifera/humilis/tenuis/spp.
ACR	Acropore	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Acropora	spp.
ACS	Acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Acropora	obrotundoides/robusta/spp.
ACT	Acropore tabulaire	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Acropora	eleuthera/cytherea/hyacinthus/spp.
Aesp	Aucune espèce	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
CB	Non-acropore branchu	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	Porites	nigrescens
CE	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Agariciidae	Pavona	varians/vemosa/spp.
CEacespp	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Mussidae	Acanthostrea	spp.
CEechsp	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	Echinopora	spp.
CEfas	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Oculinidae	Galaxea	fascicularis
CEgem	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	Echinopora	gemmacea
CEmontsp	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Montipora	spp.
CEturspp	Non-acropore encroûtant	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Dendrophylliidae	Turbinaria	spp.
CF	Non-acropore foliace	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Agariciidae	Pavona	decussata/cactus/spp.
CM	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	Porites	lutea/spp.
CME	Millepora	Cnidaria	Hydrozoa	Anthothecatae	Milleporidae	Millepora	spp.
CMinc	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	NA	NA	spp.
CMleptsp	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	Leptoria	spp.
CMleptaspp	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	Leptastrea	spp.
CMnis	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Merulinidae	Hydnophora	microcoris
CMmyr	Non-acropore massif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Acroporidae	Astreopora	myriophthalma
CMlsp	Non-acropore champignon	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Fungidae	Fungia	spp.
CS	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	Porites	rus
CScn	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Siderastreidae	Psammocora	confusa
Csdim	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	Pocillopora	danicornis
CSeyd	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	Pocillopora	eydouxi
CSinc	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	NA	NA	spp.
CSpen	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Faviidae	Favites	pentagona
CSopj	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	Pocillopora	spp.
CSverr	Non-acropore submassif	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Pocilloporidae	Pocillopora	verrucosa
INC	NA	Cnidaria	NA	NA	NA	NA	spp.
NDC	Non corail mort	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PAV	NA	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Agariciidae	Pavona	spp.
POR	NA	Cnidaria	Anthozoa	Scleractinia	Poritidae	Porites	spp.
SCip	Soft coral	Cnidaria	Anthozoa	Alcyonacea	Alcyoniidae	Simuloria	spp.

## Annexe 11: Taxonomie et identification des différentes espèces d'invertébrés benthiques recensées lors du programme EUTROLAG

Code sp	Nom vulgarisé	Phyla	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce	Type
FV1	Oursin-diadème	Echinodermata	Echinozoa	Diadematoida	Diadematidae	Diadema	sp.	Oursins herbivores
FV10	Concombre de mer	Echinodermata	Holothurozoa	Aspidochirotrida	Holothuridae	Actinopyga	echinus	Holothuries
FV11	Concombre de mer noir	Echinodermata	Holothurozoa	Aspidochirotrida	Holothuridae	Holothuria	truncatata	Holothuries
FV12	Concombre de mer	Echinodermata	Holothurozoa	Aspidochirotrida	Stichopodidae	Stichopus	rhinoceros	Holothuries
FV13	Cordon mauresque	Echinodermata	Holothurozoa	Apodida	Synaptidae	Synapta	maculata	Holothuries
FV14	Oursin mitre	Echinodermata	Echinozoa	Temnopleurida	Toxopneustidae	Toxopneustes	granilis	Oursins vivants sur TD et TDC
FV15	Benitier	Mollusca	Bivalvia	Veneroida	Tridacnidae	Tridacna	maculifera	Benitiers
FV2	Oursin à doubles ptiquants	Echinodermata	Echinozoa	Diadematoida	Diadematidae	Echinostoma	sp.	Oursins herbivores
FV3	Oursin fleur	Echinodermata	Echinozoa	Temnopleurida	Toxopneustidae	Toxopneustes	pilularis	Oursins vivants sur TD et TDC
FV4	Echinometra sp	Echinodermata	Echinozoa	Camarodonta	Echinometridae	Echinometra	sp.	Oursins herbivores
FV5	Etoile de mer	Echinodermata	Asteroida	NA	NA	NA	sp.	Autres
FV6	Holothurie	Echinodermata	Holothurozoa	NA	NA	NA	sp1	Holothuries
FV7	Holothurie	Echinodermata	Holothurozoa	NA	NA	NA	sp2	Holothuries
FV8	Ophiure	Echinodermata	Ophiurozoa	NA	NA	NA	sp.	Autres
FV9	Spirigraphe	Annelida	Polychaeta	Canalipalpa	Sabellidae	Spirigraphe	sp.	Autres



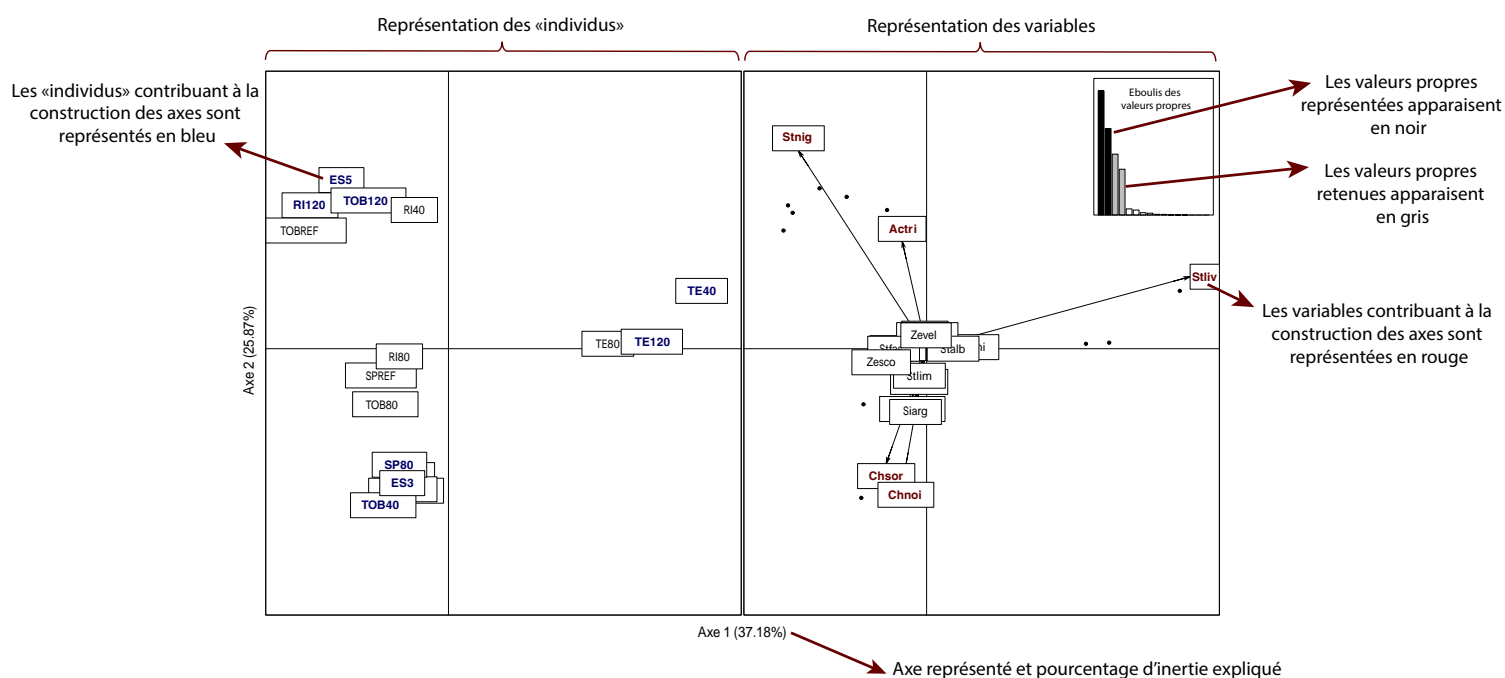


## Annexe 12: Taxonomie et identification des différentes espèces algales recensées lors du programme EUTROLAG

Ecode sp	Nom vulgaire	Phyla	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce	Statut	Env	code groupe	code nat
ACT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sp	Non opportuniste	E301	ACT	NT
ACT FRAG	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Nemaliales	Galaxauraceae	Actinofraga	fragilis	Non opportuniste	E301	ACT	NT
ALIV	Algues vertes	Chlorophyta	NA	NA	NA	NA	sp	NA	NA	AD51	NT
AMP FRAG	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Corallinales	Oculitaceae	Ampiroa	fragilissima	Non opportuniste	E301	ACT	TAC
ANA SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Nostocales	Nostocaceae	Anabaena	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
ANA WRII	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Cladophorales	Anadycomenaceae	Anadycomena	wrightii	Non opportuniste	E301	AD51	NT
ASP TAH	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Bennettianiales	Bennettianaceae	Asporogonium	taeharense	Opportuniste	E303	AD51	NT
BCE FORR	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Bongardia	fortisii	Non opportuniste	E301	AD51	NT
BCE COMF	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Bongardiaceae	Bongardia	ochroleuca	Non opportuniste	E301	AD51	NT
BCE SPMA	Algues vertes	Chlorophyta	Dactylophyceae	Dactylophytales	Dactylophyaceae	Bongardia	spheerula	Non opportuniste	E301	AD51	NT
BRI VERN	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Bryodiphyaceae	Bryopsis	peruviana	Opportuniste	E303	AD51	NT
CAI TH	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Haliptales	Haliptaceae	Carpothrix	sp.	Non opportuniste	E301	AD51	NT
CAU NIRM	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	rumicarpa	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CAU RACT	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	retrofracta var. bennettianae	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CAU SERR	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	serotina	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CAU SERR	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	serotina	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CAU SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	sp.	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CAU WERI	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Caulerpaceae	Caulerpa	peruviana	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CBE VTRI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Rhodiales	Lichnietaceae	Ceratodictyon	stratum	Non opportuniste	E303	AD51	TAC
CIA IVRI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Cladophorales	Cladophoraceae	Chloromorpha	viridis	Opportuniste	E303	AD51	NT
CNE HELI	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Udoteaceae	Chlorodictyon	halodictyon	Non opportuniste	E303	AD51	NT
CDA JUND	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Bongardiaceae	Chlorophorum	aviculare	Opportuniste	E303	AD51	NT
COD ANAB	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Codiumaceae	Codium	gracile	Non opportuniste	E303	AD51	NT
COD SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Codiumaceae	Codium	sp.	Non opportuniste	E303	AD51	NT
COC RUB	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Rhodiales	Champiaaceae	Cochlidium	marginatum	Non opportuniste	E303	AD51	TAC
CYANO	Cyanobactéries	Cyanobacteria	NA	NA	NA	NA	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
CYANO SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Oscillatoria	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
DIB SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Darbaceae	Darbacia	sp.	Opportuniste	E303	AD51	NT
DIAO	Diatomées	Ochrophyta	Rhizosoleniaceae	NA	NA	NA	sp.	Opportuniste	E303	DIAO	NT
DC SPI	Algues brunes	Ochrophyta	Phaeophyceae	Dicrytales	Dicrytaceae	Dicryta	sp.	Non opportuniste	E301	AD51	NT
DICT CAUS	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Dictyosphaera	causarum	Non opportuniste	E301	AD51	NT
DICT SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Dictyosphaera	sp.	Non opportuniste	E301	AD51	NT
DICT VTRI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Dictyosphaera	viridis	Non opportuniste	E301	AD51	NT
DIO SPI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Ceramiales	Rhododermaceae	Dimeria	sp.	Non opportuniste	E301	AD51	NT
EBN VTRI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Emiliania	viridis	Non opportuniste	E301	AD51	NT
GA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sp	Opportuniste	E303	AD51	GA
GAL BULO	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Nemaliales	Galaxauraceae	Gelidium	bulosum	Non opportuniste	E301	AD51	NT
GAL FRAG	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Nemaliales	Galaxauraceae	Gelidium	fragile	Non opportuniste	E301	AD51	NT
GEL ACTR	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Gelidiales	Gelidiaceae	Gelidium	acerosum	Non opportuniste	E303	AD51	NT
GFA CANA	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Gelidiales	Gelidiaceae	Gelidium	canaliculatum	Opportuniste	E303	AD51	NT
HAC DUC	Algues vertes	Chlorophyta	Bryodiphyceae	Bryodiales	Haliptaceae	Haliptis	diversa	Non opportuniste	E301	ACT	NT
HYD COCC	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Hydrocoleum	coctum	Opportuniste	E303	CYANO	NT
HYD COIT	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Hydrocoleum	glutinosum	Opportuniste	E303	CYANO	NT
HYD LYNO	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Hydrocoleum	amygdaleum	Opportuniste	E303	CYANO	NT
HYD MALI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Hydrocoleum	malin	Opportuniste	E303	CYANO	NT
HYD SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Hydrocoleum	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
HEIMO SPI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Corallinales	Cyrtolobaceae	Hyalobrya	sp.	Non opportuniste	E301	ACT	NT
IMP SPI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Gelidiales	Cyrtolobaceae	Hyalobrya	sp.	Opportuniste	E303	AD51	NT
JAN ADIA	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Corallinales	Corallinaceae	Jania	adhaerens	Non opportuniste	E301	ACT	TAC
JSP SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Phormidiumales	Phormidiumaceae	Leptodermis	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
LT ACTS	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Corallinales	Corallinaceae	Leptodermis	actinophora	Non opportuniste	E301	ACT	NT
LOB VARI	Algues brunes	Ochrophyta	Phaeophyceae	Dicrytales	Dicrytaceae	Lobophora	variegata	Non opportuniste	E303	AD51	NT
LYN MAU	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Lynceus	marginatus	Opportuniste	E303	CYANO	NT
LYN NORD	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Lynceus	marginatus	Opportuniste	E303	CYANO	NT
MEO ANAB	Algues vertes	Chlorophyta	Dactylophyceae	Dactylophytales	Dactylophyaceae	Mertensia	marginata	Non opportuniste	E301	AD51	NT
REO SPI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Corallinales	Corallinaceae	Megastictis	sp.	Non opportuniste	E301	ACT	NT
MEO VARI	Algues vertes	Chlorophyta	Dactylophyceae	Dactylophytales	Dactylophyaceae	Mertensia	marginata	Non opportuniste	E301	AD51	NT
RAO SPI	Algues brunes	Ochrophyta	Rhizosoleniaceae	Dicrytales	Dicrytaceae	Podocarpus	sp.	Non opportuniste	E301	AD51	NT
RAB PABU	Algues vertes	Chlorophyta	Dactylophyceae	Dactylophytales	Rhizosoleniaceae	Rhizosolenia	porphyra	Non opportuniste	E301	AD51	NT
REI SPI	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	Phormidiumales	Phormidiumaceae	Phormidium	sp.	Non opportuniste	E301	ACT	NT
PWO HEND	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Phormidium	marginatum	Opportuniste	E303	CYANO	NT
PHO LARI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Phormidium	marginatum	Opportuniste	E303	CYANO	NT
PHI ANAB	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Bongardiaceae	Phyllocladus	marginatus	Non opportuniste	E301	AD51	NT
SPH THO	Algues brunes	Ochrophyta	Phaeophyceae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Siphonocladus	marginatus	Opportuniste	E303	AD51	NT
SPV SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Phormidiumales	Phormidiumaceae	Spirulina	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
SYM SPI	Cyanobactéries	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Phormidiumaceae	Symphylla	sp.	Opportuniste	E303	CYANO	NT
TAC	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sp	Non opportuniste	E301	ACT	TAC
TAR	Algues rouges	Rhodophyta	Floridophyceae	NA	NA	NA	sp	Non opportuniste	E303	AD51	TAC
TI	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sp	NA	NA	TI	NT
TUE OINA	Algues brunes	Ochrophyta	Phaeophyceae	Fucales	Fucales	Turbinella	marginata	Non opportuniste	E301	AD51	NT
UVI SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Ulvothrixales	Ulvothrixaceae	Ulva	sp.	Opportuniste	E303	AD51	NT
VAL SPI	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Valoniopsis	sp.	Opportuniste	E303	AD51	NT
VIL VENT	Algues vertes	Chlorophyta	Ulvothrixidae	Siphonocladales	Siphonocladaceae	Villosa	ventricosa	Non opportuniste	E301	AD51	NT



## Annexe 13: Représentation type des différentes analyses multivariées réalisées sous R grâce au package ade4



## Annexe 14: Liste des variables conservées pour l'analyse du compartiment hydrologique

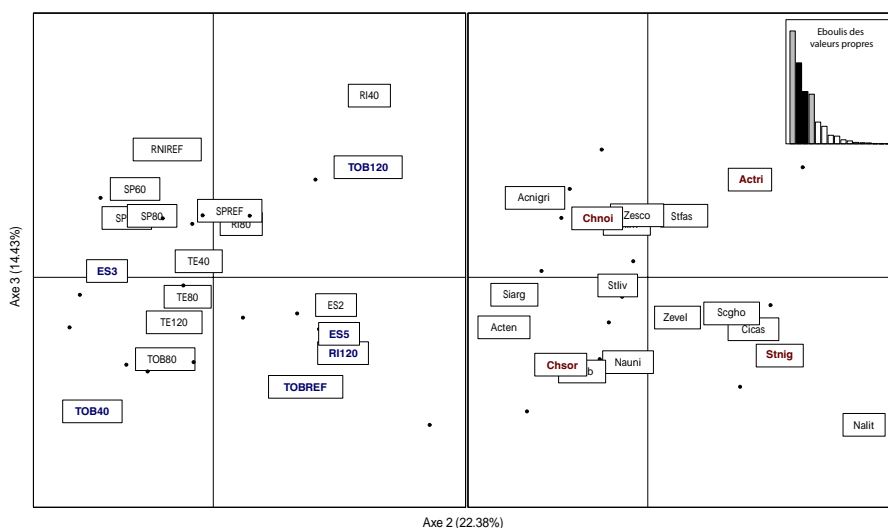
La liste des variables utilisées est la suivante :

- Chla\_mg\_m2 : quantité de chlorophylle-a en fonction d'une surface (exprimé en mg/m<sup>2</sup>, calculée à partir de la méthode Aminot),
- Pheoa\_mg\_m2 : quantité de phéophytine-a en fonction d'une surface (exprimé en mg/m<sup>2</sup>, calculée à partir de la méthode Aminot),
- Salinite : salinité exprimé en Pratical Salinity Unit (PSU),
- MES : Matière En Suspension exprimé en mg/l,
- Turbidite : exprimé en unités néphélométriques formazine (FNU),
- NH4 : ammonium exprimé en μM,
- NO3 : nitrate exprimé en μM,
- PO4 : phosphate exprimé en μM,
- Silice : silice exprimé en μM,
- NO2 : nitrite exprimé en μM,
- N\_org\_dissous : azote organique dissous exprimé en μM,
- P\_org\_dissous : phosphore organique dissous exprimé en μM,
- POC : carbone organique particulaire exprimé en μmol/L,
- PN : azote particulaire exprimé en μmol/L,
- C\_N : rapport molaire carbone sur azote,
- D13C : composition isotopique du carbone dans la matière particulaire exprimé en ‰,
- D15N : composition isotopique de l'azote dans la matière particulaire exprimé en ‰,

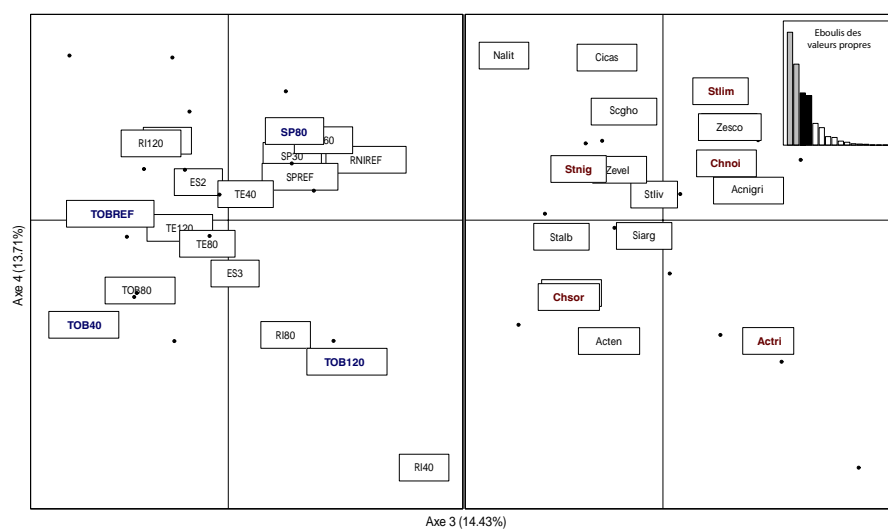


- PP : phosphore particulaire exprimé en  $\mu\text{mol/L}$ ,
- C\_P : rapport carbone sur phosphate exprimé en molaire,
- N\_P : rapport azote sur phosphate exprimé en molaire.

**Annexe 15 :** Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichthyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

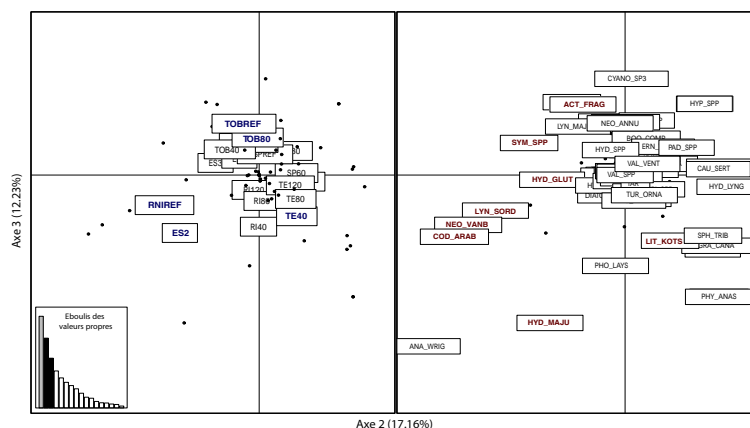


**Annexe 16 :** Représentation des axes 3-4 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données compartiment ichthyologique) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin

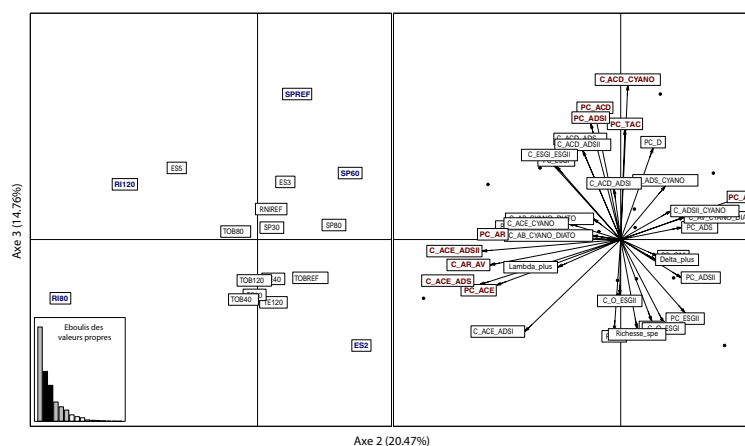




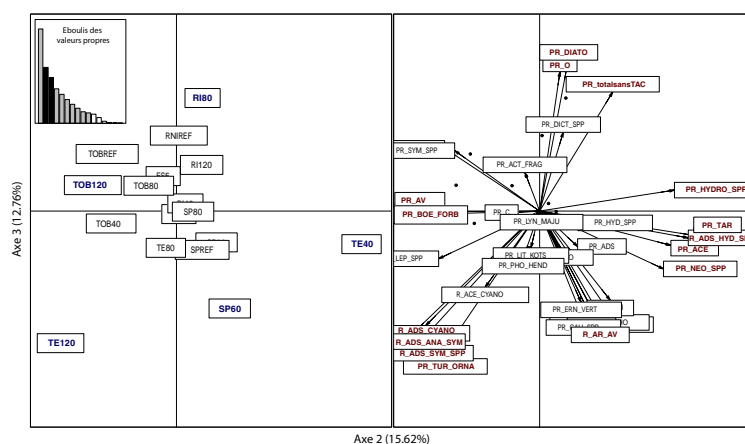
**Annexe 17 :** Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs médianes de l'indice d'abondance relative (données compartiment algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



**Annexe 18 :** Représentation des axes 2-3 de l'ACP réalisée sur les moyennes des variables taxonomiques et écologiques (données composition spécifique algale sans la station RI40) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin



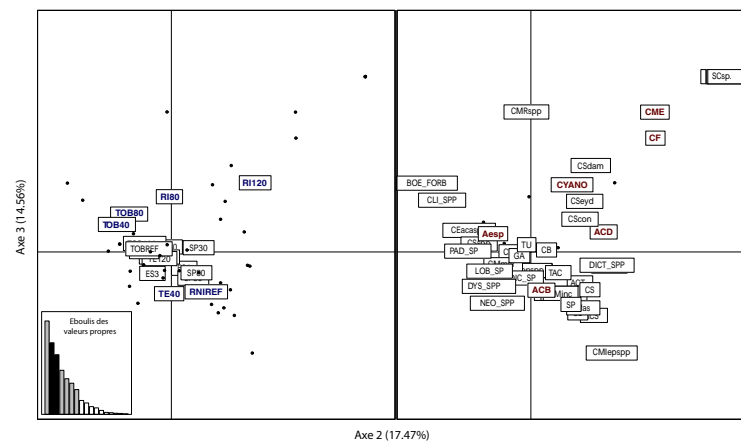
**Annexe 19 :** Représentation des stations et variables des axes 2-1 de l'ACP centrée/réduite réalisée sur les valeurs moyennes réduite (données du recouvrement algal) des mois de Décembre, Février, Avril et Juin







**Annexe 21 :** Représentation des axes 2-3 de l'AFC réalisée sur les valeurs moyennes (données des communautés sessiles) pour les mois de Février, Avril et Juin

[illegible]



## Annexe 23 : Listes finales des variables sélectionnées dans le cadre de l'AFD sur les 3 compartiments biologiques

- PR\_CLI\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Cliona sp.*,
- PR\_DYS\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Dysidea sp.*,
- PR\_ACT\_FRAG : pourcentage de recouvrement *Actinotrichia fragilis*,
- PR\_HYDRO\_SPP : pourcentage de recouvrement *Hydrolithon spp*,
- PR\_SYM\_SPP : pourcentage de recouvrement *Symploca spp*,
- R\_ADS\_CYANO : rapport Algues Dressées Souples sur cyanobactéries (données recouvrement),
- PC\_TAC : pourcentage richesse spécifique Turf d'Algues Calcaires (données composition spécifique),
- PC\_ADSI : pourcentage richesse spécifique algues adhérente/rampantes en forte interaction avec le corail (données composition spécifique),
- PC\_OM : pourcentage richesse spécifique espèces opportunistes macroalgues (données composition spécifique),
- PR\_AR : pourcentage de recouvrement algues rouges,
- PR\_DIATO : pourcentage de recouvrement diatomées,
- PR\_HYD\_SPP : pourcentage de recouvrement *Hydrocoleum spp*,
- PR\_NEO\_SPP : pourcentage de recouvrement *Neogoniolithon spp*,
- R\_ADS\_ANA\_SYM : rapport ADS sur *Anabaena sp1* et *Symploca spp* (données recouvrement),
- C\_ACE\_ADSI : rapport ACE sur ADSI (données composition spécifique),
- PC\_AV : pourcentage richesse spécifique algues vertes,
- C\_ACD\_ADSII : rapport ACD sur Algues Dressées Souples sur Algues adhérente/rampantes sans forte interaction avec corail (données composition spécifique),
- C\_AV\_CYANO\_DIATO : rapport algues vertes sur cyanobactéries et diatomées (données composition spécifique),
- ACB : pourcentage par transect *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.*,
- ACD : pourcentage par transect *Acropora digitifera/gemmifera/humilis/tenuis/spp.*,
- ACS: pourcentage par transect *Acropora abrotanoides/robusta/spp.*,
- CB : pourcentage par transect *Porites nigrescens*,
- CEmonspp : pourcentage par transect *Montipora spp.*,
- Pour\_ACBsains : pourcentage d'Acropores branchus sains (sans algues) parmi les Acropores vivants,
- Pour\_ACB\_morts : pourcentage d'Acropores branchus morts parmi tous les Acropores branchus (vivants : sains ou enalgues),
- FV14m2 : *Tripneustes gratilla* par m<sup>2</sup> de substrat,
- FV2m2 : *Echinothrix sp.* par m<sup>2</sup> de substrat,
- Holo\_TOTm2 : holothuries totales par m<sup>2</sup> de substrat,
- CME : pourcentage par transect *Millepora spp*,
- FV1m2 : *Diadema sp.* par m<sup>2</sup> de substrat,
- Chnoi : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Acanthurus nigrofuscus/striatus*,



- Scgho: biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Scarus ghobban*,
- Siarg: biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Siganus argenteus*,
- Stlim\_ACB : rapport *Stegastes limbatus* sur *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.*,
- Stfas\_ACB : rapport *Stegastes fasciatus* sur *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.*,
- Steg : fusion des espèces de *Stegastes* (*Stegastes fasciatus*, *Stegastes limbatus*, *Stegastes lividus* et *Stegastes nigricans*),
- Steg\_ACB : rapport fusion des espèces de *Stegastes* sur *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.*,
- ACB\_PR\_AR : rapport *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.* sur pourcentage de recouvrement algues rouges.

## Annexe 24 : Résultats des tests de comparaisons multiples réalisés sur les 38 variables sélectionnées

		Variables retenues en fonction du gradient d'apport terrigène	Variables retenues en fonction du «gradient de turbidité»
PR_CLI_SPP	4 1 3 2	Oui	
PR_DYS_SPP	3 4 1 2		
PR_ACT_FRAG	3 4 1 2		
PR_HYDRO_SPP	2 3 4 1	Oui	
PR_SYM_SPP	4 1 2 3	Oui	
R_ADS_CYANO	4 2 3 1	Oui	Oui
PC_TAC	3 2 1 4		
PC_ADSI	3 1 2 4		Oui
PC_OM	1 2 3 4	Oui	
PR_AR	1 3 2 4	Oui	Oui
PR_DIATO	1 3 2 4	Oui	Oui
PR_HYD_SPP	1 2 4 3	Oui	
PR_NEO_SPP	2 4 3 1		Oui
R_ADS_ANA_SYM	4 1 2 3	Oui	
C_ACE_ADSI	2 4 1 3		Oui
PC_AV	1 2 4 3	Oui	
C_ACD_ADSII	3 2 4 1		
C_AV_CYANO_DIATO	1 2 4 3	Oui	
ACB	3 1 4 2		Oui
ACD	1 3 4 2		Oui
ACS	1 2 4 3	Oui	
CB	2 4 1 3		Oui
Cemonspp	4 2 3 1	Oui	Oui
Pour_ACBsains	3 1 4 2		Oui
Pour_ACB_morts	1 4 2 3		
FV14m2	2 3 1 4		
FV2m2	3 2 4 1		
Holo_TOTm2	3 4 2 1		
CME	4 2 1 3	Oui	Oui
FV1m2	3 2 4 1		
Chnoi	1 3 2 4	Oui	Oui
Scgho	3 1 2 4		Oui
Siarg	1 3 4 2		Oui
Stlim_ACB	1 3 2 4	Oui	Oui
Stfas_ACB	1 4 3 2	Oui	
Steg	4 3 2 1	Oui	
Steg_ACB	4 2 1 3		Oui
ACB_PR_AR	4 3 2 1	Oui	



## Annexe 25 : Liste des variables utilisées pour l'application de la méthode STATIS-LDA

- PR\_CLI\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Cliona sp.*,
- PR\_DYS\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Dysidea sp.*,
- PR\_BOE\_FORB : pourcentage de recouvrement de *Boergesenia forbesii*,
- PR\_GEL\_ACER : pourcentage de recouvrement de *Gelidiella acerosa*,
- PR\_HYDRO\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Hydrolithon spp*,
- PR\_LEP\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Leptolynghya spp*,
- PR\_TAR : pourcentage de recouvrement de TAR,
- R\_ADS\_CYANO : rapport ADS sur cyanobactéries (données recouvrement),
- R\_ACE\_CYANO : rapport ACE sur cyanobactéries (données recouvrement),
- R\_AR\_AV : rapport algues rouges sur algues vertes (données recouvrement),
- PC\_AB : pourcentage richesse spécifique algues brunes,
- PC\_C : pourcentage richesse spécifique cyanobactéries,
- PC\_D : pourcentage richesse spécifique des diatomées,
- PC\_TAC : pourcentage de richesse spécifique du TAC,
- PC\_ADSI : pourcentage de richesse spécifique d'ADSI,
- PC\_OM : pourcentage de richesse spécifique des espèces opportunistes,
- C\_AB\_CYANO\_DIATO : rapport algues brunes sur cyanobactéries et diatomées (données composition),
- C\_AR\_CYANO\_DIATO : rapport algues rouges sur cyanobactéries et diatomées (données composition),
- C\_ACE\_CYANO : rapport ACE sur cyanobactéries (données composition),
- C\_ACD\_CYANO : rapport ACD sur cyanobactéries (données composition),
- C\_ESGI\_ESGII : rapport ESGI et ESGII (données composition),
- PR\_AR : pourcentage de recouvrement d'algues rouges,
- PR\_DIATO : pourcentage de recouvrement de diatomées,
- PR\_NEO\_SPP : pourcentage de recouvrement de *Neogoniolithon spp*,
- PC\_ACE : pourcentage de richesse spécifique d'ACE,
- C\_ACE\_ADSI : rapport ACE sur ADSI (données composition),
- PC\_AV : pourcentage de richesse spécifique d'algues vertes,
- C\_ACD\_ADSII : rapport ACD sur ADSII (données composition),
- C\_O\_ESGII : rapport espèces opportunistes sur ESGII (données composition),
- C\_AV\_CYANO\_DIATO : rapport algues verts sur cyanobactéries et diatomées (données composition),
- ACB : pourcentage par transect *Acropora austera/hemprichii/muricata/spp.*,
- ACD : pourcentage par transect *Acropora digitifera/gemmifera/humilis/tenuis/spp.*,
- ACS: pourcentage par transect *Acropora abrotanoides/robusta/spp.*,
- CB : pourcentage par transect *Porites nigrescens*,
- CEmonspp : pourcentage par transect *Montipora spp.*,





- CM : pourcentage par transect *Porites lutea/spp.*,
- CS : pourcentage par transect *Porites rus*,
- CSdam : pourcentage par transect *Pocillopora damicornis*,
- Richesse\_spe : pourcentage par transect d'espèces coralliennes,
- Pour\_ACBsains : pourcentage d'Acropores branchus sains (sans algues) parmi les Acropores vivants,
- Pour\_ACB\_morts : pourcentage d'Acropores branchus morts parmi tous les Acropores branchus (vivants : sains ou en algues),
- FV14m2 : *Tripneustes gratilla* par m<sup>2</sup> de substrat,
- FV2m2 : *Echinothrix sp.* par m<sup>2</sup> de substrat,
- Holo\_TOTm2 : holothuries totales par m<sup>2</sup> de substrat,
- CME : pourcentage par transect *Millepora spp.*,
- FV1m2 : *Diadema sp.* par m<sup>2</sup> de substrat,
- Acnigri : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Acanthurus nigricauda*,
- Actri : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Acanthurus triostegus*,
- Chnoi : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Acanthurus nigrofuscus/striatus*,
- Chsor : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Chlorurus sordidus*,
- Nauni : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Naso unicornis*,
- Siarg: biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Siganus argenteus*,
- Stfas : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Stegastes fasciolatus*,
- Stlim : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Stegastes limbatus*,
- Stnig : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Stegastes nigricans*,
- Zesco : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Zebrasoma scopas*,
- Zevel : biomasse (en g par m<sup>2</sup>) de l'espèce *Zebrasoma veliferum*.