

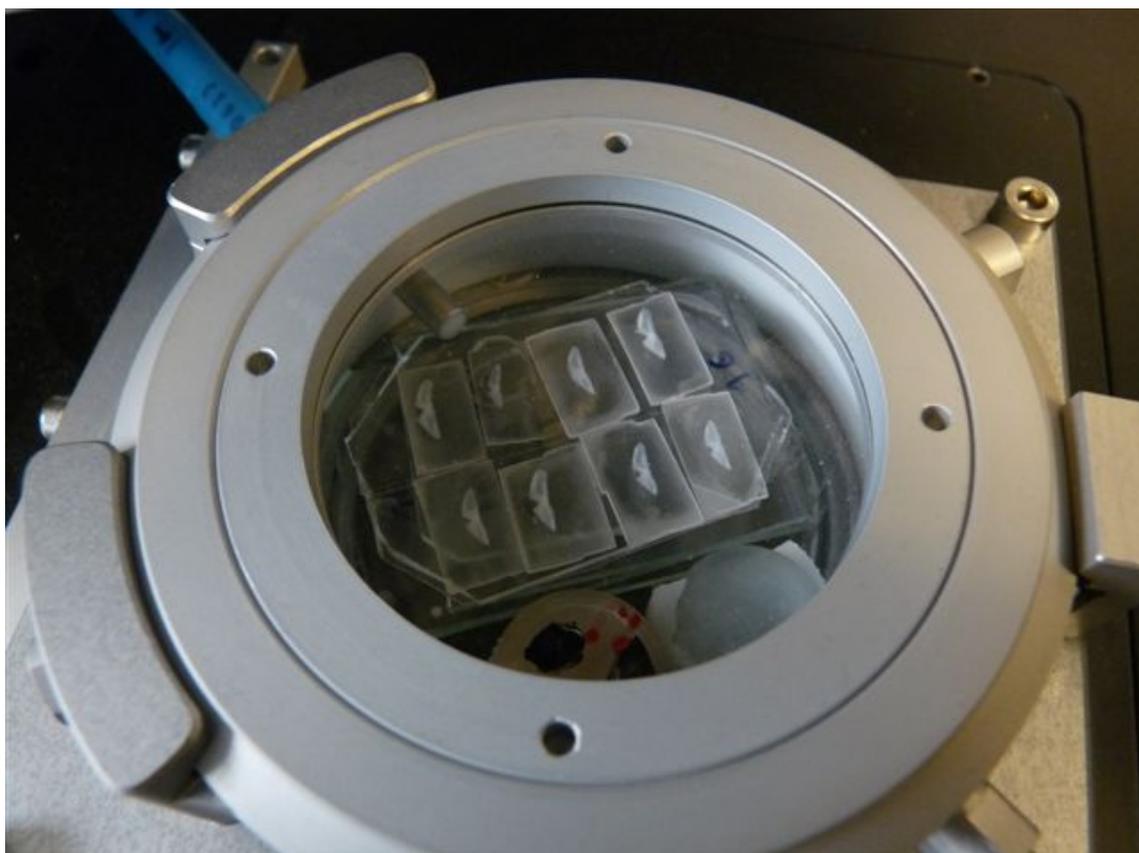
Opération ZONECO « microchimie des otolithes »

Laurent Vigliola¹, Christelle Paillon^{1,2}, Laurent Wantiez²

¹ Institut de recherche pour le développement (IRD), Laboratoire Excellence LABEX Corail, UMR 227 CoRéUs, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

² Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC), EA 4243 LIVE, , Nouméa, Nouvelle-Calédonie

RAPPORT FINAL
Septembre 2013



RESUME

L'opération « microchimie des otolithes » du programme ZONECO avait pour objectif de tenter de caractériser la microchimie de l'environnement lagunaire de la Nouvelle-Calédonie, de déterminer dans les otolithes de poisson les signatures microchimiques caractéristiques des habitats constitutifs des paysages lagunaires de Nouvelle-Calédonie, d'appliquer ces connaissances à une espèce modèle pour quantifier la connectivité entre écosystèmes dans 4 sites pilotes, de réviser en conséquence les unités fonctionnelles et de gestion, et de statuer sur la sensibilité de ce modèle aux activités minières et sur l'étendu des impacts en fonction des habitats. Au terme de l'étude, nous avons caractérisé la microchimie de l'eau, des sédiments, et des otolithes de 53 espèces de poisson dans 4 habitats et 11 sites tout autour de la Grande Terre. Nous montrons que la chimie de l'eau et des otolithes possèdent une structure spatiale corrélée à la température et la salinité de l'eau et liée à l'identité des habitats mangrove, récif frangeant, intermédiaire et barrière interne. Ceci n'est pas le cas pour les sédiments. Les variations mesurées de chimie ont permis de révéler des signatures microchimiques caractéristiques de ces quatre habitats. L'outil microchimie des otolithes permet de discriminer avec une excellente précision les mangroves des récifs à l'échelle de la grande terre, et les 4 types d'habitats à l'échelle locale des sites. Il est également possible de discriminer avec une bonne précision les différentes mangroves de la grande terre. Les signatures chimiques archivées dans les otolithes de poisson varient en fonction des espèces. Ainsi, une signature caractérisée pour une espèce ne peut pas être utilisée pour prédire l'habitat d'une autre espèce. Néanmoins, le fait que chaque espèce enregistre l'environnement de manière unique s'est révélé être un atout pour une utilisation de l'outil microchimie comme indicateur d'impact minier. Sur la base d'analyses de 10 espèces, nous avons pu mettre en évidence un impact dans 100% des sites sous influence minière, industrielle et/ou urbaine que notre échantillonnage a permis de tester. L'outil microchimie semble donc avoir un fort potentiel dans ce domaine même si des études supplémentaires sont nécessaires pour le confirmer. La chimie des otolithes a été appliquée à l'étude de la dorade *Lutjanus fulviflamma*. Nous démontrons que les mangroves sont un habitat juvénile obligatoire et un habitat adulte essentiel pour cette espèce. Ce résultat de microchimie est vérifié par des comptages en plongée et explique l'absence de l'espèce dans les îles et récifs éloignés de Calédonie où les mangroves ne sont pas présentes, et la corrélation forte entre l'abondance des mangroves et de l'espèce. Pour les espèces de ce type, la gestion de la mangrove, des récifs frangeants, intermédiaires et barrières doit être planifiée de concert.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Table des matières	3
Liste des tableaux, figures et annexes	4
1. Introduction	9
1.1. Contexte scientifique général	9
1.2. Contexte des récifs coralliens en Nouvelle-Calédonie	10
1.3. Objectifs de l'étude	11
2. Méthodes	12
2.1. Echantillonnage sur le terrain	12
2.1.1. Plan d'échantillonnage	13
2.1.2. Techniques d'échantillonnage	16
2.2. Analyses en laboratoire	17
2.2.1. Protocole de préparation des échantillons	17
2.2.2. Analyses ICPMS	20
2.2.3. Sous-échantillonnage	22
2.3. Traitement des données	23
2.3.1. Estimation des concentrations	23
2.3.2. Détermination des signatures chimiques	24
2.3.3. Echelles d'analyse	24
3. Résultats et discussion	25
3.1. Caractérisation de la microchimie de l'environnement et des otolithes	25
3.1.1. Eau	25
3.1.2. Sédiments	29
3.1.3. Otolithes	32
3.1.4. Corrélations environnement-otolithes	36
3.1.5. Synthèse	40
3.2. Détermination du pouvoir discriminant de la microchimie	40
3.2.1. Environnement	40
3.2.2. Otolithes	42
3.2.3. Synthèse	46
3.3. Connectivité mangrove-récif chez <i>L. fulviflamma</i> par microchimie	46
3.3.1. Habitats juvéniles essentiels	46
3.3.2. Patterns de connectivité entre habitats	48
3.3.3. Implications pour la distribution et l'abondance de l'espèce	50
3.3.4. Synthèse	52
3.4. Potentiel de la microchimie comme indicateur d'impact minier	53
3.4.1. Eau	53
3.4.2. Sédiments	55
3.4.3. Otolithes	56
3.4.4. Synthèse	60
5. Conclusion	61
6. Bilan financier	62
7. Production scientifique	63
8. Remerciements	63
9. Littérature citée	63
10. Annexes	68

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET ANNEXES

Tableau 1 : Les onze sites d'échantillonnages (* Sites ateliers). (M : mangrove ; RF : récif frangeant ; RI : récif intermédiaire ; RB : récif barrière interne)

Tableau 2. Calendrier des missions terrains et coordonnées des sites et habitats échantillonnés

Tableau 3 : Composition moyenne de l'eau (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 4 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique de l'eau dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes– contamination probable).

Tableau 5 : Composition moyenne de l'eau (% de 12 éléments) par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 6 : PERMANOVA à deux facteurs (site x habitat) sur la composition chimique de l'eau dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes– contamination probable).

Tableau 7 : Composition moyenne des sédiments (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 8 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique des sédiments dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Tableau 9 : Composition moyenne des sédiments (% de 12 éléments) par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 10 : PERMANOVA à deux facteurs (site x habitat) sur la composition chimique des sédiments dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Tableau 11 : Composition moyenne des otolithes (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 12 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Tableau 13 : Composition moyenne des otolithes (% de 12 éléments) de 53 espèces par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 14 : PERMANOVA à deux facteurs (Site x habitat) sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Tableau 15 : Température et salinité moyenne dans les 30 sites échantillonnés au cours de l'hiver 2010. NA : donnée non disponible.

Tableau 16 : Corrélations entre chimie et physique de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : $P < 0.05$ (significatif). Gras : $P < 0.1$ (marginalelement significatif).

Tableau 17 : Corrélations entre la chimie des otolithes de 53 espèces confondues et la physico-chimie de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : $P < 0.05$ (significatif). Gras : $P < 0.1$ (marginalelement significatif).

Tableau 18 : Corrélations entre la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* (Fulvi), la chimie des otolithes de 53 sp confondues (Oto) et la physico-chimie de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : $P < 0.05$ (significatif). Gras : $P < 0.1$ (marginalelement significatif).

Tableau 19 : Résultats des analyses de random forest pour l'eau. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % $> 70\%$ (excellente classification) ; en gras les % $> 60\%$ (bonne classification).

Tableau 20 : Résultats des analyses de random forest pour les sédiments. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % $> 70\%$ (excellente classification) ; en gras les % $> 60\%$ (bonne classification).

Tableau 21 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de *L. fulviflamma*. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % $> 70\%$ (excellente classification) ; en gras les % $> 60\%$ (bonne classification).

Tableau 22 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de 8 espèces de poisson pour lesquelles suffisamment d'individus ont été collectés pour tenter des analyses au niveau mono-spécifique. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % $> 70\%$ (excellente classification) ; en gras les % $> 60\%$ (bonne classification). L. fulvi : *L. fulviflamma* (Lutjanidae) ; D. aru : *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae) ; C. stria : *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae) ; C. lunu : *Chaetodon lunulatus* (Chaetodontidae) ; S. line : *Siganus lineatus* (Siganidae) ; G. oye : *Gerres oyena* (Gerreidae) ; S. bili : *Scolopsis bilineata* (Nemipteridae) ; G. aure : *Gnathodentex aureolineatus* (Lethrinidae).

Tableau 23 : Comparaison des % de classification correcte obtenus à partir de forêts d'arbres mono-spécifique et multi-spécifiques dans 63 cas. En gras italique, les % $> 70\%$ (excellente classification) ; en gras les % $> 60\%$ (bonne classification).

Tableau 24 : Echantillonnage de *Lutjanus fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie

Tableau 25 : Analyse de random forest mangrove versus récifs pour *Lutjanus fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie.

Tableau 26 : Analyse de random forest mangrove versus récifs pour *Lutjanus fulviflamma* dans les 4 sites ateliers en Nouvelle-Calédonie.

Tableau 27 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne de l'eau dans les sites miniers/industriels potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 28 : PERMANOVA de la chimie de l'eau dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 29 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 30 : PERMANOVA de la chimie des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 31 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne dans les otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 32 : PERMANOVA de la chimie des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 33 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne dans les otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 34 : PERMANOVA de la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 35 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de 10 espèces de poisson pour lesquelles suffisamment d'individus ont été collectés pour tenter des analyses de discrimination des sites potentiellement impactés et contrôles au niveau mono-spécifique. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification).

Tableau 36 : Combinaison des prédictions d'impact minier/industriel/urbain pour chaque espèce et site par random forest. L. fulvi : *L. fulviflamma* (Lutjanidae) ; D. aru : *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae) ; C. stria : *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae) ; C. lunu : *Chaetodon lunulatus* (Chaetodontidae) ; C. sordi : *Chlorurus sordidus* (Scarinae) ; E. merra : *Epinephelus merra* (Epinephelinae) ; G. oye : *Gerres oyena* (Gerreidae) ; G. aure : *Gnathodentex aureolineatus* (Lethrinidae) ; S. bili : *Scolopsis bilineata* (Nemipteridae) ; S. line : *Siganus lineatus* (Siganidae). Gras italique : probabilité d'impact $\geq 70\%$ (forte) ; Gras : probabilité d'impact $\geq 50\%$ (modérée). « c » : Contrôle ; « i » : Impact ; « ci » : égalité de votes contrôle et impact.

Tableau 37. Bilan financier du projet en CFP

Figure 1. Carte des sites d'échantillonnages

Figure 2 : Méthodes de prélèvements. (a) mangrove : filets maillants ; (b) récifs : fusil harpon et eugénol.

Figure 3 : Protocole de digestion acide et mise en solution des sédiments.

Figure 4 : ICP-MS, Environmental Analytical Chemistry Unit, Research Institute for the Environment and Livelihoods, Charles Darwin University.

Figure 5 : (a) montage des otolithes entiers sur lame et (b) position de l'analyse laser sur otolithe in toto.

Figure 6 : (a) coupes transversales positionnées dans la chambre du LA-ICP-MS et (b) transect sur une coupe transversale d'otolithe.

Figure 7 : Analyse en composante principale de la composition chimique de l'eau dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes – contamination probable)

Figure 8 : Analyse en composante principale sur la composition chimique de l'eau dans les 11 sites et 4 habitats échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes–contamination probable).

Figure 9 : Analyse en composantes principales de la composition chimique des sédiments dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Figure 10 : Analyse en composante principale de la composition chimique des sédiments dans les 11 sites et 4 habitats échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. NB : les ellipses sont plates car seuls deux échantillons ont été analysés par station.

Figure 11 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans 11 sites autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Figure 12 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes des *Lutjanus fulviflamma* collectés dans 11 sites autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Figure 13 : Analyse en composante principale sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces collectées dans 11 sites et 4 habitats autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Figure 14 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes des *Lutjanus fulviflamma* collectés dans 11 sites et 4 habitats autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Figure 15 : Prédiction par random forest de l'habitat juvénile de 20 adultes *L. fulviflamma* collectés dans les récifs barrières des 4 sites ateliers. Les analyses d'âge indiquent qu'un rayon d'otolithe de 1260 μm correspond à un âge d'environ 1 an. R : Récif ; M : Mangrove.

Figure 16 : Les trois patterns principaux de connectivité entre les mangroves, les récifs côtiers et les récifs océaniques chez *L. fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie. Les % de vote indiquent la probabilité de la classification par random forest.

Figure 17 : Comptages en plongée des *L. fulviflamma* dans les différents lagons de la grande terre et différentes îles et récifs éloignés de la Nouvelle-Calédonie. Les chiffres indiquent le nombre de plongées par unité spatiale, pour un total de 2864 plongées UVC (bases IRD, UNC, CPS combinées).

Figure 18 : Corrélation de Spearman entre le rang de la surface des mangroves standardisé par le linéaire côtier et le rang de l'abondance des *L. fulviflamma* pour les différents lagons de la grande terre et certaines îles et récifs éloignés de Nouvelle-Calédonie. L'absence des dorades et des mangroves à Entrecasteaux, Lifou, Chesterfield, Astrolabe et Beautemps (5 sites), leur confère un rang moyen de $(1+2+3+4+5)/5=3$.

Figure 19 : Analyse en composante principale de la chimie de l'eau dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Figure 20 : Analyse en composante principale de la chimie des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Figure 21 : Analyse en composante principale de la chimie des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Figure 22 : Analyse en composante principale de la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Annexe 1. Liste des échantillons de poissons disséqués au laboratoire.

Annexe 2. Liste des échantillons de poissons analysés par ICPMS laser.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte scientifique général

Les écosystèmes tropicaux subissent de nombreux impacts d'origine anthropique qui remettent en question leur persistance et leur productivité (Lotze *et al.* 2006). Parmi les processus les plus inquiétants, on peut citer la surpêche (Jackson *et al.* 2001), les changements climatiques (Harley *et al.* 2006, Munday *et al.* 2008), la pollution (Munday 2004) et la dégradation des habitats (Boesch *et al.* 2001). Les impacts sociaux et économiques de ces processus sont déjà visibles. Plus grave, les prévisions indiquent une détérioration croissante due notamment au déclin de la productivité (Cardinale *et al.* 2006), au déplacement de l'activité économique (Balmford *et al.* 2002), à l'érosion de la biodiversité (Worm *et al.* 2006) et à l'extinction des espèces (Davis *et al.* 1998, Cury and Miserey 2008) dans les écosystèmes marins. En termes de stratégies de gestion, une des principales réponses à ces challenges a consisté à mettre en place des plans de zonages spatiaux, dont l'objectif est de réguler et partitionner les effets des activités humaines sur les écosystèmes. Un des éléments clef de ces plans a été de placer certains habitats en Aire Marine Protégée (AMP) où, dans de nombreux cas, toutes les activités de pêche sont interdites. L'hypothèse sous-jacente de cette approche est que les plans de zonages sont mis en place à des échelles appropriées à la connectivité entre populations locales au sein des écosystèmes et entre les différents habitats et écosystèmes nécessaires au cycle de vie complet des individus. Ainsi, les AMP pourraient à la fois assurer la survie des individus tout au long de leur vie, servir de source pour réapprovisionner les zones non-protégées, et protéger les espèces dans le cadre de réseaux interconnectés d'AMP. Pour valider ce concept, il est nécessaire de mesurer les patterns de connectivité à différentes échelles, mais ceci a constitué un challenge logistique majeur pour les chercheurs compte tenu de la difficulté à tracer les déplacements des individus au cours de leur vie et notamment durant leur phase larvaire planctonique.

Des développements récents dans l'analyse des signatures microchimiques dans les otolithes de poissons ont permis de faire des avancées significatives dans notre capacité à tracer les mouvements des poissons, y compris au cours de leur phase larvaire. Les otolithes sont localisés dans l'oreille interne des poissons téléostéens et sont composés de cristaux de carbonate de calcium (CaCO_3) agrégés dans une matrice protéinique. Leur croissance s'effectue par dépôt journalier de CaCO_3 autour d'un noyau central formé à la naissance et conduit à la formation de structures concentriques pouvant être utilisées pour estimer l'âge et la croissance des poissons par rétro-calcul (Vigliola & Meekan 2009). Les éléments traces (i.e. Ba, Mg, Kr, Sr, Rb, Mn, Fe, Zn, Pb, Ce...) présents dans l'environnement immédiat du poisson peuvent se substituer au calcium ou être adsorbés dans les espaces interstitiels de la matrice cristalline de l'otolithe. Ces éléments traces pourraient donc être révélateurs des caractéristiques physiques et chimiques des masses d'eau traversées (synthèse par Eldson & Gillanders 2003). Ainsi, les otolithes constitueraient une archive de l'environnement rencontré, et leur analyse optique (âge, croissance) et microchimique (par spectrométrie de masse à ablation laser LA-ICP-MS) pourrait permettre de déterminer rétrospectivement l'histoire environnementale des individus, notamment établir leur histoire migratoire et leur origine, avec une précision encore jamais atteinte (McCulloch *et al.* 2005, Warner *et al.* 2005, Almany *et al.* 2007).

L'étude de la dispersion et des mouvements des individus est classiquement réalisée par la génétique et le marquage, classique ou acoustique. Aucune de ces techniques ne permet néanmoins de mesurer la connectivité réelle à l'échelle écologique tout au long de la vie des

individus. Les méthodes génétiques indirectes (basées sur F_{st}) ne permettent pas par exemple de distinguer un échange entre populations de 1000 individus chaque 100 générations, d'un échange de 10 individus par générations (le nombre moyen de migrants par génération $N_m=10$ dans les deux cas) (Hedgcock et al. 2007). La distinction est pourtant cruciale pour la gestion des populations locales. L'analyse génétique parentale permettrait en théorie de résoudre totalement les mystères de la dispersion larvaire, cette technique pouvant déterminer de quel parent est issu chaque individu. Néanmoins, cette technique est inapplicable aux espèces mobiles présentant des populations importantes car elle implique d'analyser une grande partie voire la totalité de la population de parents. D'autre part, l'analyse parentale reste silencieuse à propos des déplacements des individus au cours de leur vie. Sur ce point, le marquage, et en particulier le marquage acoustique permet d'obtenir des données remarquables (Chateau & Wantiez 2009). Cependant, cette technique ne permet pas d'étudier les déplacements des individus tout au long de leur vie, mais juste pendant une fraction de leur existence. Ainsi, la microchimie des otolithes apparaît comme une technique très complémentaire à la génétique et aux marquages, apportant une information différente, notamment la possibilité de reconstruire l'histoire migratoire des individus tout au long de leur vie. Cette technique a également ses défauts. Notamment, c'est une méthode indirecte et il est donc important de bien déterminer sa précision et ses limites avant de s'en servir pour inférer les mouvements des individus au cours de leur vie.

1.2. Contexte des récifs coralliens en Nouvelle-Calédonie

De part son contexte géologique particulier, la Nouvelle-Calédonie se présente comme un terrain d'étude particulièrement intéressant qui permet l'analyse de la connectivité réelle par microchimie. En effet, elle abrite le plus grand lagon du monde dans lequel différents écosystèmes (mangroves, herbiers et algueraias, fonds meubles, récifs coralliens...) peuvent présenter des influences terrigènes et océaniques très contrastées. L'assemblage plus ou moins fragmenté de ces écosystèmes forme une mosaïque qui constitue le paysage lagonaire corallien. Par conséquent, l'intensité des liaisons fonctionnelles (connectivité) entre ces écosystèmes est probablement cruciale pour le bon fonctionnement du paysage. Pour les poissons par exemple, certaines espèces peuvent avoir une phase juvénile dans les mangroves et des adultes dans les fonds meubles ou les récifs coralliens (e.g. Lutjanidae, Holocentridae, Mullidae, Acanthuridae, Serranidae, Carangidae), d'autres peuvent réaliser des migrations trophiques dans les mangroves (e.g. Leiognathidae, Sillaginidae, Chirocentridae, Haemulidae, Lethrinidae), et d'autres encore sont des espèces ubiquistes qui fréquenteraient plusieurs habitats (e.g. Serranidae, Gerreidae, Haemulidae). Par ailleurs, l'état de santé des écosystèmes constitutifs du paysage lagonaire corallien en Nouvelle-Calédonie varie fortement en fonction de l'impact des activités minières. Ces activités, qui font partie des principales sources de perturbations environnementales (Labrosse et al. 2000 ; Wantiez 2008), génèrent la déforestation des sites miniers ce qui amplifie les apports en éléments tels que le nickel, le chrome, le cobalt et bien d'autres encore, qui sont susceptibles de venir enrichir les signatures microchimiques environnementales au niveau des zones côtières.

A leur tour, les métaux traces caractéristiques de l'environnement du lagon de Nouvelle-Calédonie peuvent s'incorporer dans les otolithes des poissons et former des signatures multi-élémentaires spécifiques d'environnements différents. L'hypothèse de départ est que le gradient environnemental à l'origine de la mosaïque d'écosystèmes constitutifs d'un paysage se retrouve au niveau des signatures microchimiques dans les otolithes. Une fois isolées, ces signatures pourraient être utilisées pour étudier la connectivité entre populations, reconstruire

l'histoire environnementale des individus, détecter des stress de pollution, redéfinir les unités fonctionnelles et de gestion, et délimiter les zones effectivement impactées par l'activité minière.

Les signatures microchimiques enregistrées au niveau des otolithes ont permis de discriminer spatialement des poissons collectés dans différents habitats (e.g., Dove et Kingsford 1998; Kingsford et Gillanders 2000; Rooker et al. 2003; Gillanders 2002; Hamer et al. 2003). Certains auteurs ont suggéré que la variabilité spatiale des signatures microchimiques serait favorisée par les apports en éléments naturels ou anthropiques (De Pontual et Geffen 2002; Gillanders et al. 2001; Patterson et al. 2004). En effet, les concentrations élevées de certains éléments dans les otolithes seraient liées à la géologie locale et à la pollution (Dove et Kingsford 1998). Par ailleurs, de nombreuses études sur la microchimie des otolithes ont relevé des différences notables dans les concentrations en éléments traces entre sites séparés de plus de 10 km (Thorrold et al. 1998; Milton et al. 2000; Gillanders et al. 2001). De plus en plus d'études mettent en évidence des différences à plus petite échelle (Dove et Kingsford 1998; Kingsford et Gillanders 2000; Yamashita et al. 2000; Chittaro et al. 2004 ; Vigliola et al. 2009). Les résultats préliminaires obtenus par les proposant dans le cadre d'une étude pilote (Sigura 2009) indiquent que l'outil microchimique a un potentiel informatif exceptionnellement élevé en Nouvelle-Calédonie.

1.3. Objectifs de l'étude

A ce jour, les travaux réalisés sur la structure et le fonctionnement des communautés de poissons des paysages coralliens suggèrent 1) que la connectivité entre les écosystèmes constitutifs est probablement plus importante que ce qui est généralement admis 2) que les unités fonctionnelles et de gestion devraient être révisées en conséquence et 3) que les interactions entre écosystèmes seraient quelquefois de nature différente de ce que l'on pensait, notamment les relations mangrove-récif (e.g. Parrish 1989; Dorenbosch et al. 2005; Harborne et al. 2006; Lugendo et al. 2006; Chateau et Wantiez 2009). Toutefois, la mise en évidence, la quantification et l'importance écologique des processus de connectivité d'une part, et leurs conséquences sur le fonctionnement d'un paysage corallien d'autre part, restent encore méconnus (e.g. Lugendo et al. 2006, 2007 ; Nagelkerken 2007). Pourtant, l'efficacité des modèles de gestion des ressources ou de protection de la biodiversité dépendra de notre capacité à délimiter et construire des réseaux d'habitats et d'écosystèmes connectés 1) effectivement et 2) à l'échelle spatiale appropriée.

Au stade actuel des connaissances il devient nécessaire de caractériser la microchimie de l'environnement lagonaire de la Nouvelle-Calédonie et d'étudier la connectivité entre les écosystèmes constitutifs des paysages récifo-lagonaires pour apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quelles sont les signatures microchimiques des habitats du lagon de Nouvelle-Calédonie ?
- Quel est le pouvoir discriminant de l'outil microchimique ?
- Quels écosystèmes sont connectés, à quelle échelle spatio-temporelle, et pour quelles espèces ?
- Quelles sont les modalités des connections des écosystèmes ? Varient-elles en fonction des habitats et des espèces ?

- Quelles seraient les conséquences d'une modification de la connectivité pour le fonctionnement des paysages, pour la diversité et les ressources récifo-lagonaires ?
- Dans quelle mesure la microchimie de l'environnement est-elle affectée par l'activité minière, exportée et transportée par les organismes vivants, et en quoi cela peut-il affecter le fonctionnement du lagon, la quantité et la qualité de la ressource ?
- L'outil microchimique peut-il être utilisé comme indicateur d'impact ?

Les réponses à ces questions permettront, d'une part, d'optimiser la gestion de la biodiversité et des ressources en milieu récifo-lagonaire, et d'autre part, de mieux appréhender les changements environnementaux induits par l'activité minière et transportés par les organismes vivants du lagon. Jusqu'à très récemment, il était extrêmement difficile de répondre aux questions que se posent les gestionnaires sur la connectivité à petite échelle spatiale. Le développement récent d'outils de haute technologie comme la microchimie des otolithes pourrait permettre d'apporter des éléments de réponses sur ce thème, et la Nouvelle-Calédonie est particulièrement adaptée à l'application de ces technologies. Bien que ce projet soit orienté recherche, des applications à court terme sont envisageables :

- Potentialité d'un nouvel indicateur d'impact.
- Aide à la définition des unités fonctionnelles.
- Aide à la définition des unités de gestion.
- Identification des réseaux/corridors d'habitats et des espèces à protéger.
- Suivi de la microchimie de l'environnement et des otolithes (archives).
- Suivi de la connectivité / rupture de la connectivité.

Dans ce cadre, les objectifs de cette étude sont quadruples :

Objectif 1 : Caractériser la microchimie de l'environnement et des otolithes de poissons en Nouvelle-Calédonie

Objectif 2 : Déterminer le pouvoir discriminant de la microchimie, et donc son utilité pour étudier la connectivité en Nouvelle-Calédonie

Objectif 3 : Utiliser l'outil microchimique pour étudier la connectivité mangrove-récif chez une espèce de poisson de Nouvelle-Calédonie

Objectif 4 : Evaluer la microchimie comme indicateur d'impact minier en Nouvelle-Calédonie

2. METHODES

2.1. Echantillonnage sur le terrain

Dans un premier temps, il était prévu d'échantillonner de l'eau, du sédiment, des matériaux carbonatés (corail, coquillage) et des poissons dans les mangroves et récifs barrières d'une dizaine de sites autour de la Calédonie de manière à produire une cartographie de la microchimie environnementale et des otolithes du lagon. Les sites devaient être choisis en concertation avec les services techniques des Provinces nord et sud, en fonction des caractéristiques d'habitat, de géologie, d'activité minière, de l'existence d'information historique et des statuts et projets de gestion. Au moment de l'écriture du projet, les sites suivant nous paraissaient de bons candidats : Nouméa (usine SLN + pollution urbaine), St

Vincent (référence, non-minier), Ouano (problématique réserve-mangrove-récif, site Patrimoine Mondial), Nepoui (mine SLN), Voh (projet KNS SAS et développement de la zone VKP), Tiébaghi (mine SLN), Pouebo (référence, non-minier, site Patrimoine Mondial), Hienghène (référence, non-minier), Houaïlou (mine Poro), Thio (mine SLN), Prony (projet VALE INCO).

Dans un second temps, il était prévu d'identifier quatre sites ateliers parmi les précédents, où l'environnement et les poissons seraient échantillonnés dans le maximum d'habitats et d'écosystèmes (mangroves, herbiers et algueraies, fonds meubles et récifs coralliens frangeants, intermédiaires, barrières). Au moment de l'écriture du projet, il était envisagé de sélectionner deux sites potentiellement « impactés », les lagons de Voh et Prony (développement des deux projets industriels), et deux sites « références », Ouano (Patrimoine mondial) et St Vincent.

2.1.1. Plan d'échantillonnage

Les mangroves et récifs barrières de onze sites ont été échantillonnés au cours de l'hiver 2010 (Nouméa, St Vincent, Ouano, Népoui, Gatope, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama, Port-Bouquet, Prony). Pour quatre d'entre eux (Prony, St Vincent, Ouano, Gatope), les récifs frangeants et intermédiaires ont été également échantillonnés, portant à quatre le nombre d'habitats échantillonnés dans ces quatre sites ateliers. Pour certaines espèces cibles, notamment *Lutjanus fulviflamma*, une réplication temporelle au cours de l'hiver 2011 a été réalisée dans les quatre sites ateliers. A ces échantillons, se sont ajoutés ceux collectés par Sigura (2009) au cours de l'été 2009. Les sites et habitats initiaux ont été légèrement modifiés car les échantillonnages en mangrove n'étaient pas toujours possibles sur les sites originaux (Fig. 1, Tableau 1).

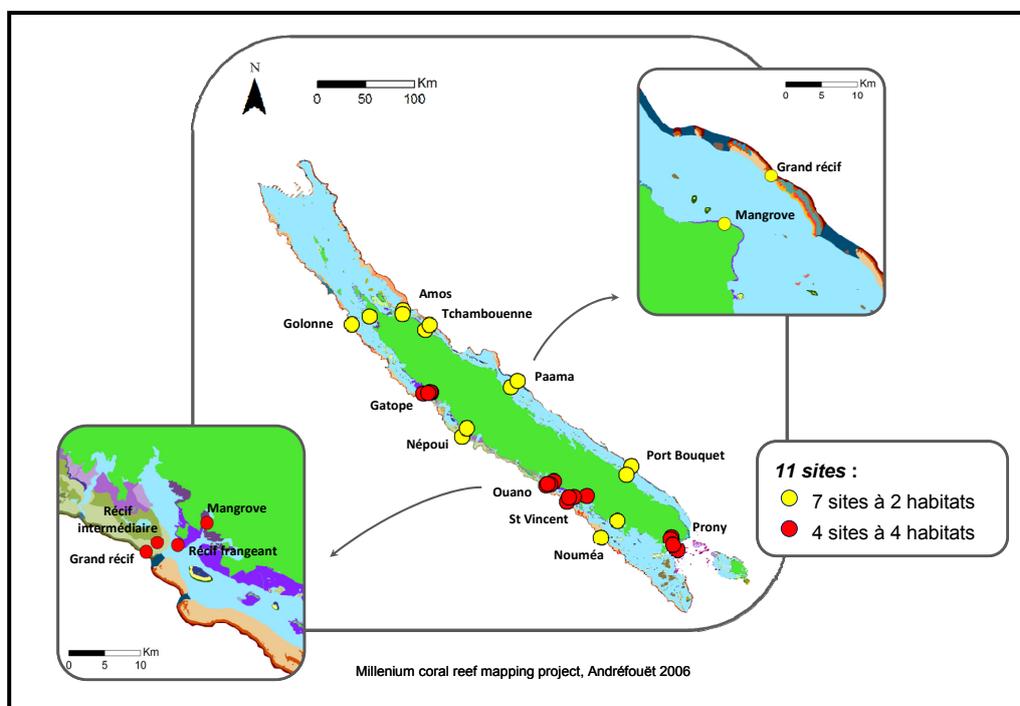


Figure 1. Carte des sites d'échantillonnages

Tableau 1 : Les onze sites d'échantillonnages (* Sites ateliers)

(M : mangrove ; RF : récif frangeant ; RI : récif intermédiaire ; RB : récif barrière interne)

Sites	Caractéristiques	Habitats
Nouméa	Usine pyrométallurgique de Doniambo (SLN : Société Le Nickel) Pollution urbaine	M, RB
St Vincent*	Site non-minier dans sa partie échantillonnée	M, RF, RI, RB
Ouano*	Site non-minier Problématique AMP-mangrove-récifs Inscription au Patrimoine Mondial Unesco	M, RF, RI, RB
Népoui	Exploitation minière de Népoui-Kopéto (SLN)	M, RB
Gatope*	Projet minier Koniambo Nickel SAS (KNS) Développement de la zone urbaine Voh-Koné-Pouembout	M, RF, RI, RB
Golonne	Site non-minier	M, RB
Amos	Site non-minier	M, RB
Tchambouenne	Site non-minier Inscription au Patrimoine Mondial Unesco	M, RB
Paama	Site non-minier Inscription au Patrimoine Mondial Unesco	M, RB
Port Bouquet	Exploitation minière de Thio (SLN)	M, RB
Prony*	Projet minier Vale Inco Présences de cheminées hydrothermales	M, RF, RI, RB

Il a été décidé d'abandonner l'échantillonnage des fonds meubles et des algueraies car cela demandait trop d'efforts logistiques, humains et financier par rapport au nombre d'espèces et d'individus récoltés. Pour l'ensemble des habitats, des poissons ont été collectés à l'aide de filets petite, moyenne et grande maille (mangroves), filets petite maille et roténone (pied isolé de palétuvier), fusil harpon (récifs), eugénol et épuisette (récifs). Des échantillons d'eau (trois répliques par habitat) et de sédiments (deux répliques par habitat), la température et la salinité de l'eau ont également été mesurés dans chaque habitat échantillonné. Il a été décidé de ne pas collecter de matériaux carbonatés (corail, coquillage) car le temps terrain ne le permettait pas (une journée d'échantillonnage terrain par habitat). Les missions terrain se sont parfaitement déroulées que cela soit au niveau des conditions météorologiques, de l'organisation des missions et des contacts avec les personnes extérieures (Province Sud et Nord, chefs coutumiers). Comme initialement prévu, la plupart des missions ont été réalisées à quatre personnes, un chercheur (Laurent Vigliola), une doctorante (Christelle Paillon), un technicien (Gérard Mou-Tham), un pilote (Miguel Clarque). Le calendrier des missions et les coordonnées des sites et habitats échantillonnés sont consignés dans le Tableau 2. Les échantillonnages ont permis la récolte de 3365 individus et 177 espèces de poisson (campagnes 2009, 2010 et 2011, Annexe 1), 90 échantillons d'eau (campagne 2010 uniquement) et 58 échantillons de sédiments (campagne 2010 uniquement).

Tableau 2. Calendrier des missions terrains et coordonnées des sites et habitats échantillonnés

N° mission	Date	Site	Habitat	S	E	Sortie
1	05/05/2010	Ouano	récif barrière interne	21°50.492'	165°42.873'	1 journée
2	06/05/2010	St Vincent	récif barrière interne	21°59.614'	165°54.698'	1 journée
3	07/05/2010	Nouméa	récif barrière interne	22°19.631'	166°13.468'	1 journée
4	17/05/2010	Ouano	mangrove	21°48.337'	165°47.446'	2 journées
	18/05/2010	St Vincent	mangrove	21°56.422'	166°05.794'	1 nuit
5	26/05/2010	Nouméa	mangrove	22°10.184'	166°22.523'	1 journée
6	31/05/2010	Prony	récif barrière interne	22°26.700'	166°55.565'	1 journée
7	01/06/2010	Prony	mangrove	22°19.461'	166°52.600'	1 journée
8	08/06/2010	Golonne	récif barrière interne	20°21.419'	163°55.526'	6 journées 5 nuits
	09/06/2010	Golonne	mangrove	20°16.891'	164°05.090'	
	10/06/2010	Amos	récif barrière interne	20°13.504'	164°23.644'	
	11/06/2010	Amos	mangrove	20°15.539'	164°23.484'	
9	28/06/2010	St Vincent	récif frangeant	21°56.965'	165°58.449'	1 journée
10	29/06/2010	St Vincent	récif intermédiaire	21°57.243'	165°55.679'	1 journée
11	30/06/2010	Prony	récif frangeant	22°20.639'	166°51.969'	1 journée
12	01/07/2010	Ouano	récif frangeant	21°50.006'	165°45.256'	2 journées
	02/07/2010	Ouano	récif intermédiaire	21°49.805'	165°43.711'	1 nuit
13	09/07/2010	Prony	récif intermédiaire	22°23.489'	166°53.097'	1 journée
14	20/07/2010	Gatope	récif barrière interne	20°59.699'	164°35.106'	5 journées 4 nuits
	21/07/2010	Népoui	récif barrière interne	21°23.583'	164°56.325'	
	22/07/2010	Népoui	mangrove	21°19.055'	164°59.182'	
	23/07/2010	Gatope	mangrove	20°59.001'	164°39.258'	
15	11/08/2010	Tchambouenne	mangrove	20°24.295'	164°36.129'	5 journées
	12/08/2010	Paama	mangrove	20°56.214'	165°23.584'	4 nuits
16	24/08/2010	Gatope	récif frangeant	20°58.884'	164°38.623'	4 journées
	25/08/2010	Gatope	récif intermédiaire	20°59.213'	164°37.603'	3 nuits
17	07/09/2010	Port Bouquet	récif barrière interne	21°40.148'	166°30.381'	3 journées
	08/09/2010	Port Bouquet	mangrove	21°44.714'	166°27.589'	2 nuits
18	06/10/2010	Paama	récif barrière interne	20°52.600'	165°27.103'	4 journées
	07/10/2010	Tchambouenne	récif barrière interne	20°21.719'	164°38.280'	3 nuits
19	29/08/2011	St Vincent	récif barrière interne	réplication	réplication	3 journées
	29/08/2011		récif intermédiaire			
	01/09/2011		mangrove			
	09/09/2011		récif frangeant			
20	12/09/2011	Gatope	Récif intermédiaire	réplication	réplication	3 journées
	13/09/2011		Récif frangeant			
	13/09/2011		Mangrove			
	14/09/2011		Récif barrière interne			
21	19/09/2011	Ouano	Mangrove	réplication	réplication	2 journées
	19/09/2011		Récif frangeant			
	20/09/2011		Récif intermédiaire			
	20/09/2011		Récif barrière interne			
22	30/08/2011	Prony	Récif barrière interne	réplication	réplication	3 journées
	08/09/2011		Récif intermédiaire			
	30/09/2011		Mangrove			
	30/09/2011		Récif frangeant			

2.1.2. Techniques d'échantillonnage

Poissons de mangroves

La méthode de prélèvement consiste à poser, à marée haute, un ensemble de filets maillants d'une longueur totale de 250 m le long des palétuviers et de récupérer les individus à marée basse (Fig. 2). Afin d'obtenir des espèces de tailles diverses ainsi que différents stades ontogéniques (juvénile et adultes), l'ensemble est composé de six filets de tailles de maille différentes : quatre filets de 50 m longueur, d'1,5 m de chute et de 45 mm de taille de maille carrée auxquels s'ajoute deux filets de 25 m de long, d'1,5 m de chute et de 25 mm de taille de maille. Afin d'échantillonner les juvéniles dissimulés entre les racines de palétuviers, un pied isolé est entouré de deux filets de 25 m de long, 1,5 m de chute et 7 mm de taille de maille. Une substance épaisse issue d'un mélange d'1 kg de poudre de roténone et d'eau de mer est versée à marée basse au niveau de la zone entourée. La roténone est une molécule toxique se présentant sous la forme d'une poudre et provoquant un empoisonnement des poissons présents dans la zone ciblée. Un laps de temps d'environ 15 minutes est nécessaire avant d'observer les premiers poissons remonter à la surface. Tous les individus empoisonnés sont récoltés à l'aide d'épuisettes.

Poissons de récifs

Les prélèvements sont réalisés en chasse sous marine, principalement au fusil harpon. Pour les poissons de petite taille (e.g. Chaetodontidae et Pomacentridae), la collecte est réalisée à l'aide de fléchettes fines propulsées par un élastique. Certaines espèces sont récupérées grâce à l'utilisation d'un mélange d'eugénol et d'alcool (Fig. 2). L'eugénol est un composé anesthésiant provoquant, à dose adéquate, un étourdissement des petites espèces (e.g. *Dascyllus aruanus*) et permettant de les récupérer facilement à l'épuisette (Soto & Burhanuddin 1995; Munday & Wilson 1997).

Sur place, les échantillons récoltés sont stockés dans une glacière avant d'être congelés en chambre froide (-10°C) au laboratoire.

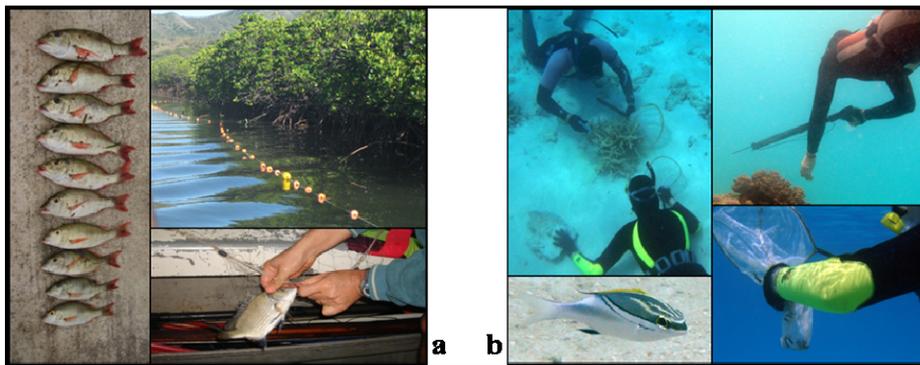


Figure 2 : Méthodes de prélèvements
(a) mangrove : filets maillants ; (b) récifs : fusil harpon et eugénol.

Echantillons de l'environnement

Pour la campagne hivernale de 2010, trois prélèvements d'eau ont été réalisés sur chaque site et pour chaque habitat. En mangrove, les échantillons sont prélevés à marée basse, au niveau de la couche d'eau de surface. Pour les récifs, les prélèvements sont aussi effectués au niveau de la couche de surface, sans tenir compte de la marée. Chaque échantillon est prélevé avec une seringue de 40ml et uniquement 10ml de l'échantillon est filtré à l'aide d'un filtre à membrane en polyestersulfone (membrane PES de porosité 0,45µm) et directement versé dans des tubes en polypropylène de 15 ml. Les échantillons sont ensuite fixés par ajout

de 0,2 ml d'HNO₃ Suprapur® à 2% afin d'éviter le développement des organismes vivants présents dans l'eau. Ils sont conservés au laboratoire, à l'abri de la lumière.

Durant la campagne hivernale de 2010, deux prélèvements d'1kg de sédiments sont réalisés dans chaque station. En mangrove, les prélèvements sont réalisés à marée basse et espacés de 10 mètres. Au niveau des récifs, les prélèvements sont effectués en apnée, sans tenir compte de la marée. Ils sont également espacés de 10 mètres. Les échantillons sont stockés dans une glacière sur le terrain puis congelés dans une chambre froide du laboratoire.

Les paramètres environnementaux, température et salinité, sont également mesurés à trois reprises au niveau de la couche d'eau de surface pour chaque habitat échantillonné. La température est mesurée grâce à une sonde thermomètre Testo® d'une précision de 0,1°C. Un réfractomètre automatique Atago® d'une précision de 1‰ est utilisé pour les mesures de salinité.

2.2. Analyses en laboratoire

Il était prévu que les signatures microchimiques présentes dans l'environnement et les otolithes soient caractérisées par ICPMS haute résolution en mode solution (liquides ou solides dissous) et en mode laser (solides) pour l'ensemble des habitats, écosystèmes, sites et espèces échantillonnés en 2010. Pour au moins un modèle biologique, vraisemblablement *Lutjanus fulviflamma* qui avait donné de bons résultats préliminaires, les otolithes devaient être sectionnés, poncés, et analysés par transects ICPMS laser de manière à reconstruire l'histoire environnementale des individus et générer des données de connectivité réelle.

2.2.1. Protocole de préparation des échantillons

L'ensemble de l'étude se déroule suivant les précautions de non contamination métallique nécessaires pour les analyses de microchimie. Pour les extractions des otolithes, des pinces céramiques sont utilisées et la totalité du matériel (bêchers, boîtes de Pétri, instruments de dissection) est rincé à l'eau ultra-pure avant et après dissection de chaque individu. Le matériel employé pour la préparation des otolithes est préalablement nettoyé à l'acide nitrique (HNO₃, 2%) et rincée à l'eau ultra-pure.

Extraction des otolithes

Les individus collectés sont mesurés au mm près selon la longueur à la fourche (LF) puis sont pesés au mg près. Les otolithes sont ensuite extraits puis plongés dans deux bains consécutifs d'eau ultra-pure afin d'éliminer les éventuels tissus résiduels, notamment le sac otique. Ils sont ensuite placés à sécher sous une hotte à flux laminaire (conditions HEPA 100), et conservés dans des microtubes.

Otolithes entiers

Les analyses du bord des otolithes entiers permettent de révéler la microchimie la plus récemment incorporée au sein des otolithes, caractéristique du lieu d'échantillonnage. Ces analyses permettent la détermination des signatures microchimiques, l'élaboration des fonctions discriminantes des sites et habitats et l'étude de la relation microchimie otolithe/environnement.

Les otolithes entiers sont nettoyés en conditions ultra-propres suivant la procédure de Warner *et al* (2005) afin d'éliminer les contaminants de surface et les résidus de matière organique.

Lors de cette procédure, les otolithes sont individuellement déposés dans les puits d'une plaque en plastique. Un premier bain d'une heure est effectué dans une solution 50/50 d'eau oxygénée (qualité Suprapur® H₂O₂, 30%) et de soude (qualité Suprapur® NaOH, 0,1 mol.l⁻¹). Durant les 5 dernières minutes, la plaque est déposée dans une cuve à ultrasons. Les otolithes sont ensuite rincés cinq fois cinq minutes dans des bains successifs d'eau ultra-pure. Ils sont ensuite placés à sécher sous une hotte à flux laminaire (conditions HEPA 100), et conservés dans des microtubes.

Ainsi préparés, les otolithes entiers sont prêts pour analyse laser ICPMS.

Lames minces d'otolithes

Les lames minces sont des otolithes montés en coupes transversales c'est-à-dire sectionnés de manière à découvrir l'ensemble de la vie des poissons, du noyau jusqu'au bord de l'otolithe. Ce type de montage permet de retracer l'histoire environnementale des individus. La coupe transversale ne peut être réalisée directement, les otolithes doivent être inclus dans des blocs de résine. La résine utilisée est une résine Araldite® 2020, composée d'une résine et d'un agent durcisseur mélangés en proportions adéquates. Préalablement aux inclusions des otolithes, une petite quantité de résine est répartie dans les puits d'un moule en silicone. Ceci permet de réaliser les fonds qui sont laissés à sécher durant minimum 12h. Ensuite, les otolithes sont déposés individuellement, face convexe sur le fond, et recouverts de résine. L'ensemble des blocs est placé sous une hotte pendant quelques heures avant d'être placé dans une étuve à 50°C durant 24h.

Une fois les blocs de résine secs, des sections transversales fines contenant le noyau de l'otolithe sont réalisées à l'aide d'une scie circulaire diamantée (Buehler®). La coupe fine réalisée est collée avec de la résine adhésive Crystalbond 509® sur une cale en verre, elle-même fixée sur une lame porte-objet (Secor 1992). La section est polie à l'aide de disques de polissage successifs aux grains de plus en plus fins (de 900 à 1200 grains/cm²). Le polissage s'affinera avec des films abrasifs (de 9, 3 puis 1 µm) et deux solutions diamantées (1 et 0,3 µm) jusqu'à obtenir une section plane passant par le noyau de l'otolithe. Pour finir, les coupes seront nettoyées à l'eau ultra-pure, séchées sous la hotte à flux laminaire (HEPA 100) et conservées dans des boîtes plastiques.

Ainsi préparées, les lames minces d'otolithes sont prêtes pour analyse laser ICPMS.

Echantillons de sédiments

Le protocole de préparation des échantillons de sédiments suit le protocole de (Totland *et al.* 1992). Le but du protocole de traitement est de récupérer la fraction fine (<63µm) des sédiments car c'est au niveau de cette fraction granulométrique que la majorité des éléments sont biodisponibles.

Une fois décongelés, les échantillons sont tamisés sur une maille de 63µm à l'aide d'eau ultra-pure afin de récupérer uniquement la fraction fine du sédiment. La fraction fine du sédiment et l'eau ultra-pure sont récupérées dans un bécher. Le bécher est ensuite placé dans une étuve à 100°C jusqu'à complète évaporation de l'eau en excès. Une fois sèche, la fraction fine est broyée au mortier en agate puis placée dans un sachet plastique propre et conservée dans un endroit sec, à l'abri de la lumière.

Le passage à l'ICP-MS nécessite une mise en solution de ce broyat de la fraction fine des sédiments. Pour cela, plusieurs attaques acides successives sont réalisées dans des béchers en

Téflon® sur 100mg de portion fine pour chaque échantillon. Les acides utilisés sont de grade Suprapur®, l'eau utilisée est ultrapure et la totalité du protocole se réalise sous hotte aspirante. La procédure consiste en deux phases de digestion aux acides HNO₃ (69%) et HF (40%) (Fig. 3, étapes 1 et 2). Ensuite, deux phases de digestion à l'acide HNO₃ (69%) (Fig. 3, étape 3). Une reprise est effectuée et diluée avec de l'H₂O. Un aliquote d'1/10 ml est réalisé (Fig. 3, étape 4). La solution finale de sédiment est diluée par 1000. Pour les analyses, la solution introduite dans l'appareil est constituée de 0.25 ml de solution finale diluée avec 9.4 ml d'H₂O, 0.25 ml d' HNO₃ et 1 ml d'Indium.

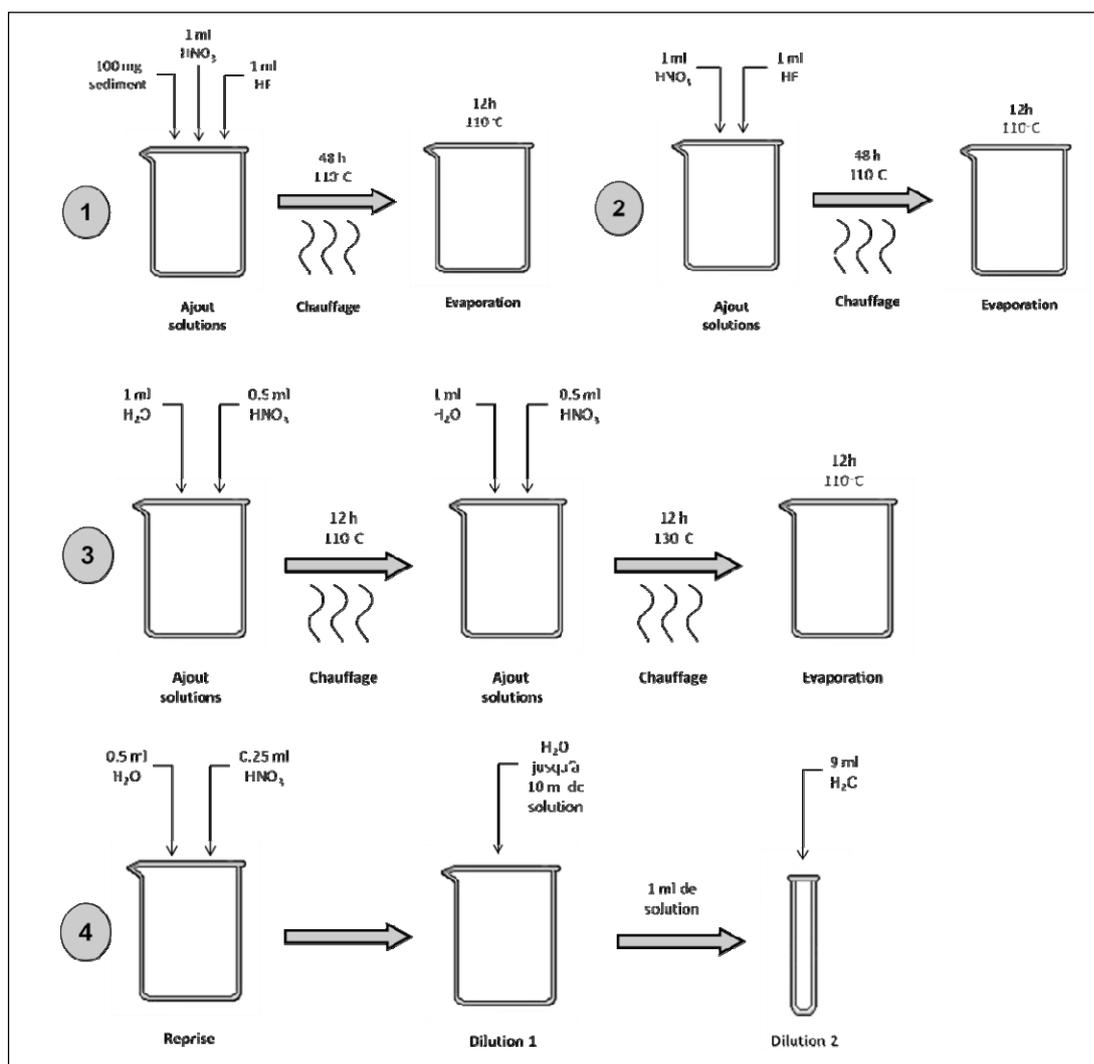


Figure 3 : Protocole de digestion acide et mise en solution des sédiments.

Echantillons d'eau

Avant analyse ICPMS, les échantillons d'eau sont dilués par 40 afin d'obtenir une solution de salinité proche de 1 dans un milieu matriciel de 2.5% d'HNO₃ contenant 1.0% d'Indium, standard interne qui permet de corriger la dérive de l'ICP-MS. Pour cela, 0.25 ml de l'échantillon d'eau de mer est dilué avec 9.4 ml d'H₂O ultrapure, 0.25 ml d' HNO₃ et 1 ml d'Indium.

2.2.2. Analyses ICPMS

Principes de fonctionnement de l'ICP-MS

Les signatures microchimiques sont caractérisées par méthode de spectrométrie de masse grâce à un spectromètre de masse à source plasma haute résolution ou ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) (Fig. 4). Cet appareil permet de déterminer la composition en éléments traces d'échantillons liquides en mode solution ou solides en mode laser. L'analyse des échantillons par ICP-MS peut se diviser en quatre étapes :

- phase d'introduction et de nébulisation
- phase d'ionisation
- phase de séparation en masse et charge
- phase de détection

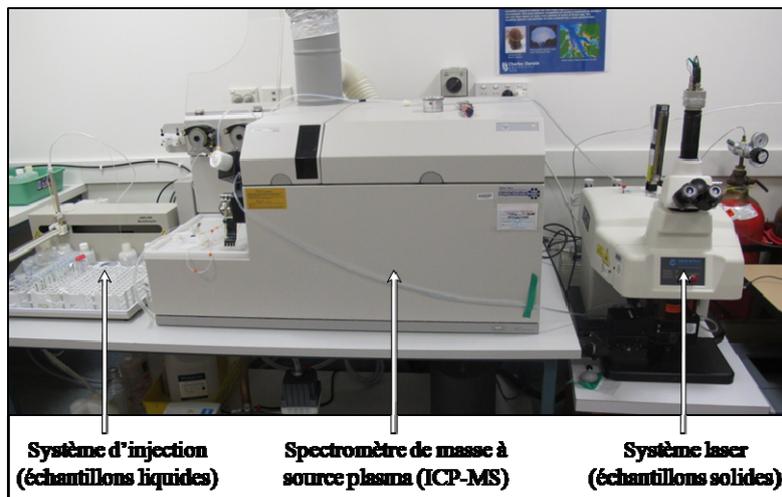


Figure 4 : ICP-MS, Environmental Analytical Chemistry Unit, Research Institute for the Environment and Livelihoods, Charles Darwin University.

La première phase ne suit pas le même déroulement pour les deux types d'échantillons. Les échantillons liquides sont injectés dans le système par une aiguille de prélèvement automatique en téflon et entraînés à l'aide d'une pompe péristaltique jusqu'au nébuliseur qui permet de faire passer l'échantillon à l'état d'aérosol liquide (microgouttelettes de quelques μm). Pour les échantillons solides, l'appareil est couplé à un système d'ablation laser qui dégage les éléments traces en provoquant une ablation à la surface des otolithes. Ces éléments traces sous forme d'aérosols, sont véhiculés grâce à un courant d'argon et d'hélium. A partir de la phase d'ionisation, le principe de l'appareil est le même pour les deux types d'échantillons. Les aérosols passent au niveau d'une torche à plasma d'argon et sont vaporisés, dissociés, atomisés et ionisés sous l'effet d'une température élevée (entre 5000 à 8000°C). Pour la phase de séparation, une lentille ionique conduit les ions vers le spectromètre de masse quadripolaire où ils sont séparés selon leur charge (z) et leur masse (m). Seuls les ions sélectionnés au préalable sont transmis au détecteur dans lequel ils percutent un multiplicateur d'électrons à dynodes. Pour chaque ion qui percute la paroi des dynodes, ces dernières émettent des électrons. La série de dynodes de l'appareil va provoquer un effet « boule de neige » et les électrons émis heurtent au final un collecteur équipé d'un préamplificateur. C'est la phase de détection où les électrons émis sont dénombrés par le collecteur. Le signal se traduit en nombre de coups par seconde (nombre d'impulsions) et est directement proportionnel à la concentration de l'élément étudié dans l'échantillon. Pour finir, une interface informatique assure le transfert des données afin qu'elles soient traitées.

Choix des éléments analysés

Outre le Sr, le Ba et le Mn, des éléments tels que le Fe, Pb, Li, Mg, Cu et Ni sont susceptibles de servir de marqueurs caractéristiques de l'environnement (Campana 2005). Afin d'augmenter l'efficacité discriminatoire entre les sites et habitats, le maximum d'éléments possible est retenu pour les analyses d'où la notion d'« empreinte multi-élémentaire ». L'ICP-MS va permettre de déterminer la composition en éléments traces suivants : Li, B, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Ba, Pb, Th, U, Mg, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn via la mesure des isotopes ^7Li , ^{11}B , ^{85}Rb , ^{88}Sr , ^{95}Mo , ^{111}Cd , ^{117}Sn , ^{138}Ba , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U , ^{25}Mg , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{47}Ti , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{55}Mn , ^{60}Ni , ^{65}Cu , ^{66}Zn .

Paramètres d'analyse

Contrairement à la technique de dissolution des otolithes expérimentée dans plusieurs études de comparaisons interspécifiques (Gillanders et al. 2003; Swearer et al. 2003), la technique de l'ICP-MS couplée à un laser permet de s'affranchir d'une différence d'incorporation des éléments due à une fréquentation d'environnements distincts au cours de la vie des espèces étudiées. La technique du laser permet de faire une ablation du bord de l'otolithe et donc une analyse des éléments les plus récemment incorporés au sein de l'otolithe alors que la dissolution analyse l'ensemble de la vie. De ce fait, les comparaisons de la microchimie du bord des otolithes devraient refléter plus précisément l'exposition aux mêmes conditions environnementales que la chimie de l'environnement (eau et sédiment) où les individus ont été capturés. Les analyses du bord des otolithes se font toujours au même point sur l'otolithe entier c'est-à-dire au niveau du post-rostre (Fig. 5). Cette précaution est importante afin de s'assurer que les différences ne soient pas dues à des variations dans le site d'analyse (Hamer & Jenkins 2007). Une face d'une lame porte-objet est recouverte de scotch transparent et double face sur lequel les otolithes sont collés. Ils sont agencés de manière à ce que les post-rostres soient alignés horizontalement. Cette démarche permet de simplifier la recherche du point d'analyse une fois la lame installée dans la chambre du laser. L'analyse par laser ICP-MS se constitue d'un tir laser sur le bord postérieur des otolithes (Fig. 5). En moyenne, 80 analyses laser correspondant à 80 tirs peuvent être réalisées par journée d'ICP-MS.

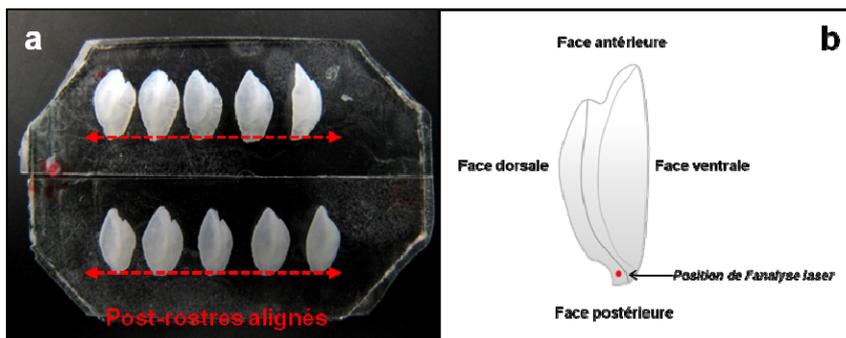


Figure 5 : (a) montage des otolithes entiers sur lame et (b) position de l'analyse laser sur otolithe in toto.

L'analyse des lames minces d'otolithe par laser ICP-MS s'effectue de la même manière que l'analyse des bords, si ce n'est que les transects microchimiques se présentent sous la forme d'une succession de tir laser tout les $120\ \mu\text{m}$ le long d'un transect entre le noyau (naissance du poisson) et le bord (capture de l'individu) de l'otolithe (Fig. 6). Cette méthode permet de retracer l'histoire de vie environnementale des poissons tout au long de leur vie. Le nombre de transect réalisé en une journée d'analyse dépend de la taille de l'otolithe (i.e. distance

noyau-bord). En moyenne, 3 transects constitués de 25 ablations laser chacun peuvent être effectués chaque jour (75 ablations par jour).

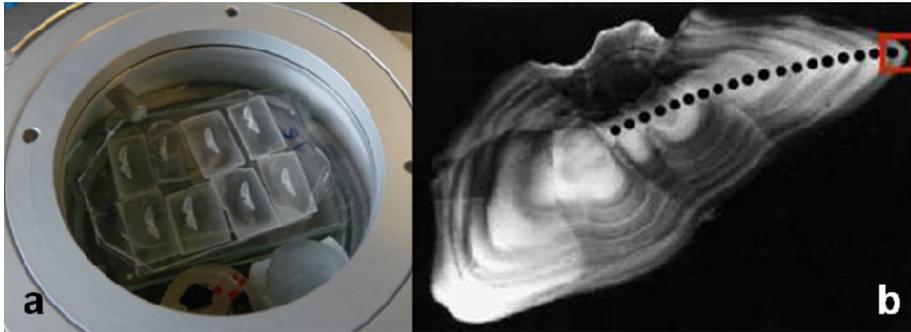


Figure 6 : (a) coupes transversales positionnées dans la chambre du LA-ICP-MS et (b) transect sur une coupe transversale d'otolithe.

Que ce soit pour l'analyse des bords ou des transects d'otolithes, la procédure d'analyse ICPMS laser consiste en 30 secondes de blanc (laser non actionné) suivie de 2 minutes d'acquisition avec un faisceau laser de 90 μm de diamètre, 5 Htz de fréquence et 15 joules.cm^{-2} de puissance.

Compte tenu de l'absence d'ICPMS laser haute résolution en Nouvelle-Calédonie, les analyses ont dû être réalisées à l'extérieur du territoire, sur plusieurs machines, ce qui n'est pas sans poser de problèmes à la fois logistiques et sur la qualité des données.

Les analyses ICP-MS en solution des échantillons d'eau et de sédiments ont été effectuées à l'aide d'un ICP-MS Thermo Finnigan Element XR au laboratoire Géosciences (Université Montpellier II) en avril 2011.

Les otolithes de la campagne estivale 2009 ont été analysés à l'Institut Universitaire Européen de la Mer de Brest (laboratoire Domaines Océaniques) durant le mois d'avril 2009 à l'aide d'un spectromètre de masse à source plasma haute résolution Thermo Element 2 couplé à un laser 193 nm CopexPro 102 Coherent.

Une partie des otolithes de la campagne hivernale 2010 ont été analysés à l'Institut Universitaire Européen de la Mer de Brest (laboratoire Domaines Océaniques) durant le mois d'avril 2011 à l'aide du même appareil utilisé en 2009.

L'autre partie a été analysée à la Charles Darwin University (Environmental Analytical Chemistry Unit, Research Institute for the Environment and Livelihoods RIEL) en novembre 2011 sur un ICP-MS Agilent 7500ce couplé à un laser New Wave 213 nm.

Les otolithes de la campagne hivernale 2011 ont été analysés en juillet 2012 à Darwin.

2.2.3. Sous-échantillonnage

Tous les individus collectés (Annexe 1) ont été mesurés, pesés, sexés puis disséqués. Afin que l'échantillonnage puisse aussi être utile aux études ultérieures, pour chaque poisson les otolithes ont été extraits (microchimie, âge, croissance, forme...), une nageoire conservée dans l'alcool (génétique), et un bout de chair congelé (isotopes).

Lorsqu'aucun problème technique ne survient, un ICPMS laser permet de réaliser environ 80 points d'analyses par jour. En dix jours d'analyses, il est donc possible d'analyser environ 800 bords d'otolithes (800 poissons), et 3 transects d'otolithe (3 poissons) avec 25 ablations laser par transect et par jour. Compte tenu des coûts et de la difficulté d'obtenir des créneaux ICPMS, 20 jours d'analyses avaient été prévus. Cela correspond à environ 1600 analyses. Un sous-échantillonnage était donc nécessaire. Il a été décidé d'analyser les bords des otolithes pour au maximum 3 individus par site et habitat pour les 53 espèces les plus fréquentes dans les captures, au maximum 5 individus par site, habitat et année pour l'espèce modèle, *Lutjanus fulviflamma*, et deux autres espèces aux traits de vie contrastés (*Dascyllus aruanus* et *Ctenochaetus striatus*), et des transects otolithes pour 20 adultes de l'espèce modèle. Au total, les bords des otolithes de 1043 poissons ont été analysés (Annexe 2), auxquels se rajoutent 461 analyses de transect otolithes, soit un total de 1504 analyses laser ICPMS. A cela s'ajoutent les 90 analyses d'eau et les 58 analyses de sédiment, soit un total général de 1652 analyses ICPMS.

2.3. Traitement des données

2.3.1. Estimation des concentrations

Les résultats bruts ICPMS sont en coups par seconde et doivent être convertis en concentrations, exprimées en ppm (i.e. partie par millions) correspondant à un rapport de 10^{-6} ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Les concentrations sont calculées à l'aide d'un standard interne dont la concentration dans l'échantillon est connue. Pour les échantillons solides (otolithes), le standard interne utilisé est le calcium alors que pour les échantillons liquides (eau et sédiments), le standard interne est une solution d'Indium/Bismuth. De plus, pour les échantillons solides, un standard externe (NIST 612) est utilisé au début et à la fin de chaque procédure pour obtenir des courbes de calibration et palier la dérive temporelle de l'appareil. Pour les sédiments en solution, deux standards externes sont analysés en fin de procédure (UBR et BEN).

Les coups par seconde ont été transformés en concentrations suivant Longerich *et al.* (1996) et Heinrich *et al.* (2003). Dans un premier temps, les mesures aberrantes ont été éliminées du jeu de données. Cette procédure est courante en ICPMS lors de la mesure d'éléments traces avec cette machine très sensible. Les mesures aberrantes ont été définies comme celles trois fois plus grandes que la distance interquartile. Dans un second temps, les concentrations et les limites de détection (LOD) des éléments ont été calculées (Longerich *et al.* 1996). Parmi les 19 éléments au menu de l'ICPMS (Li, B, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Ba, Pb, Th, U, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn), seuls ceux détectables dans plus de 70% des analyses dans au moins un habitat (e.g. mangrove) ou une station (e.g. mangrove de Gatope) ont été conservés pour les analyses statistiques. Ces éléments sont au nombre de 12 : B, Ba, Cr, Mg, Mn, Pb, Rb, Sn, Sr, Th, U, Zn. Le Ca et l'In sont également mesurés en tant que standards internes pour les otolithes et l'eau/sédiments respectivement.

Afin de limiter les biais liés à l'utilisation de différents ICPMS, chacun doté d'une sensibilité propre et par conséquent susceptible de générer des mesures absolues différentes, et compte tenu de l'impossibilité d'intercalibrer les appareils au regard des coûts que cela impliquerait en termes d'analyses et de missions, les concentrations absolues (en ppm) ont été standardisées en % des 12 éléments mesurés. Cette procédure a le désavantage de faire perdre

du pouvoir discriminant à nos analyses, mais l'avantage de permettre l'utilisation combinée de données acquises sur plusieurs machines.

2.3.2. Détermination des signatures chimiques

Le pouvoir de la composition chimique de l'eau, des sédiments et des otolithes à discriminer différents habitats ou sites a été estimé par la méthode des Random Forests (RF), que l'on peut traduire par forêts aléatoires en français. Cette technique est la plus récente, la moins biaisée et la plus puissante des analyses discriminantes disponibles à ce jour. Elle est particulièrement bien adaptée à la microchimie des otolithes (Mercier *et al.* 2011 ; Mercier *et al.* 2012). RF est une méthode de classification utilisant un algorithme d'apprentissage machine ne faisant aucune hypothèse sur la normalité et l'homoscédasticité des données (Breiman 2001). Son principe est le suivant. Dans un premier temps, un jeu de données d'apprentissages est tiré aléatoirement dans le jeu de données disponibles. Le jeu d'apprentissage a une dimension d'environ 2/3 des données disponibles (individus) et contient un assortiment aléatoire de variables (éléments chimiques). Le 1/3 restant constitue le jeu de données tests. Dans un second temps, un arbre de classification est construit à partir du jeu de données d'apprentissages. Cet arbre est ensuite utilisé pour prédire la classe d'appartenance (e.g. l'habitat) des individus du jeu de données tests. Cette procédure est répétée n fois, ce qui génère une forêt aléatoire de n arbres de classifications avec pour chaque arbre des prédictions de classe (e.g. habitat) pour 1/3 des individus (jeu test) en fonction de différentes variables (éléments chimiques). En fin de procédure, la forêt d'arbre permet de classer chaque individu dans une classe donnée (e.g. habitat), celle prédite à la majorité de la forêt d'arbres, mais permet également de déterminer l'incertitude de cette classification majoritaire puisqu'il est possible de mesurer le pourcentage de prédiction de chaque individu dans chaque classe, paramètre appelé % de vote (chaque arbre étant considéré comme un vote pour une classe). Le fait de tirer aléatoirement les variables (éléments chimiques) à chaque pas de l'analyse, permet également de mesurer l'importance de chaque variable (élément chimique) à la classification. Finalement, une forêt d'arbre construite à partir d'un jeu de données (e.g. bord des otolithes) peut ensuite être utilisée pour prédire l'appartenance à une classe (e.g. habitat) des analyses d'un autre jeu de données (e.g. transects otolithes) en y associant des probabilités de classification (% des votes).

Dans ce travail, les RF ont été implémentées avec 5000 arbres. De plus, une analyse RF a été réalisée pour chaque combinaison possible d'éléments afin de ne garder que la combinaison et le RF permettant la meilleure discrimination. Ceci a demandé des temps de calcul considérables au regard du nombre d'arbres, de combinaisons possibles d'éléments, et du nombre d'individus et de facteurs de classification.

L'ensemble des analyses statistiques (random forest, PERMANOVA, ACP, tests de Mantel, corrélations de Spearman) ont été faites sous R2.12.2 (<http://www.r-project.org/>) après transformation $\arcsin\sqrt{x}$ des concentrations relatives lorsque nécessaire.

2.3.3. Echelles d'analyse

Plusieurs échelles spatiales et organisationnelles ont été testées dans ce travail.

A l'échelle globale (11 sites autour de l'île), nous avons examiné les différences :

- entre habitats (mangrove versus récif barrière interne)
- entre sites, au sein de l'habitat mangrove
- entre sites, au sein de l'habitat récif barrière interne
- entre sites et habitats (e.g. mangrove d'Amos)

A l'échelle régionale (4 sites ateliers de la côte ouest), nous avons examiné les différences :

- entre habitats (mangrove vs récifs frangeants, intermédiaires et barrière interne)
- entre sites, au sein de l'habitat mangrove
- entre sites, au sein de l'habitat récif frangeant
- entre sites, au sein de l'habitat récif intermédiaire
- entre sites, au sein de l'habitat récif barrière interne
- entre sites et habitats

A l'échelle locale (pour chacun des 4 sites ateliers), nous avons examiné les différences :

- entre habitats (mangrove vs récifs frangeants, intermédiaires et barrière interne) à St Vincent
- entre habitats (mangrove vs récifs frangeants, intermédiaires et barrière interne) à Ouano
- entre habitats (mangrove vs récifs frangeants, intermédiaires et barrière interne) à Gatope
- entre habitats (mangrove vs récifs frangeants, intermédiaires et barrière interne) à Tchambouenne

Ces analyses à différentes échelles spatiales ont été réalisées pour les échelles organisationnelles suivantes :

- au niveau de l'espèce pour les 8 espèces suffisamment abondantes
- au niveau multispecificque pour les 53 sp suffisamment abondantes
- au niveau famille pour les 53 sp suffisamment abondantes
- au niveau fonctionnel (régime alimentaire) pour les 53 sp suffisamment abondantes

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation de la microchimie de l'environnement et des otolithes

3.1.1. Eau

Variation entre habitats à l'échelle globale

Parmi les 12 métaux mesurés, le Mg représente plus de 99% de la composition chimique de l'eau collectée dans 11 sites et 90 échantillons dans les mangroves et récifs tout autour de la grande terre (Tableau 3).

Tableau 3 : Composition moyenne de l'eau (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Habitat	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
M	3.65E-03	3.88E-06	2.71E-06	9.91E-01	4.57E-06	5.01E-07	7.67E-05	1.81E-08	5.40E-03	2.53E-09	1.82E-06	1.81E-05
RB	3.62E-03	3.52E-06	1.58E-06	9.91E-01	3.19E-07	2.14E-06	7.59E-05	2.02E-08	5.48E-03	1.33E-09	1.85E-06	4.24E-05
RF	3.53E-03	2.73E-06	2.32E-06	9.91E-01	1.48E-07	1.87E-07	7.66E-05	2.20E-09	5.30E-03	1.79E-09	1.76E-06	1.52E-05
RI	3.42E-03	2.45E-06	2.13E-06	9.91E-01	3.36E-08	2.87E-07	7.66E-05	4.63E-09	5.30E-03	1.46E-09	1.75E-06	1.57E-05

Bien que les 11 autres éléments ne soient présent qu'à l'état de trace (<1%, Tableau 3), une PERMANOVA indique que la composition chimique de l'eau diffère significativement entre les différents habitats récifaux et la mangrove, même si l'effet de l'habitat n'explique que 9.5% de la variation des données (Tableau 4).

Tableau 4 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique de l'eau dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes– contamination probable).

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Habitat	3	0.00017469	5.82E-05	2.9268	0.09567	0.01 **
Residuals	83	0.00165129	1.99E-05		0.90433	
Total	86	0.00182597			1	

Une ACP illustre cette forte variabilité de la chimie de l'eau dans les échantillons mais suggère néanmoins que les mangroves pourraient en effet se différencier des récifs avec notamment une plus forte concentration relative de Mn (Fig. 7). Les récifs barrières internes semblent se différencier des récifs frangeants et intermédiaires plus côtiers, notamment par une abondance relative plus importante de Pb, Sr, U et plus faible de Mg, Th, alors que les récifs frangeants et intermédiaires ne semblent guère différents en terme de composition chimique de l'eau.

Ces résultats suggèrent que d'une manière générale, l'eau de mer pourrait contenir des signatures chimiques caractéristiques :

- des mangroves
- des récifs sous influence terrigène, notamment les frangeants et intermédiaires
- des récifs sous influence océanique, notamment les barrières internes.

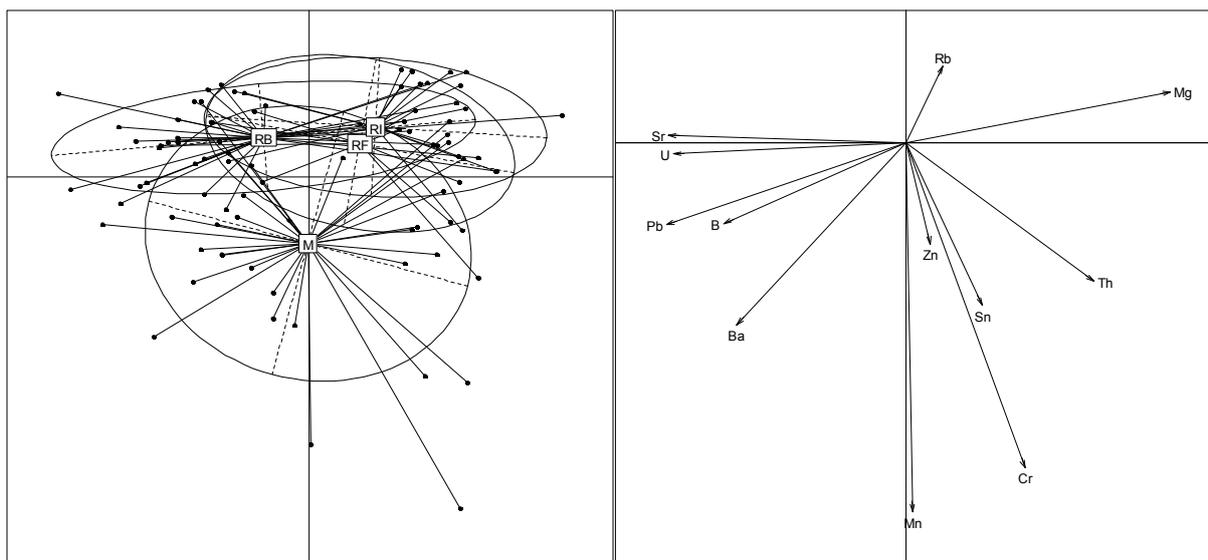


Figure 7 : Analyse en composante principale de la composition chimique de l'eau dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes – contamination probable)

Variation entre habitats et sites à l'échelle globale

A une échelle plus fine, l'eau reste dominée à 99% par le Mg dans l'ensemble des sites et habitats échantillonnés autour de la grande terre (Tableau 5).

Une PERMANOVA à deux facteurs indique que l'effet significatif de l'habitat est relativement homogène dans chacun des sites (interaction habitat x site non significative), ce qui suggère qu'à l'échelle locale la chimie de l'eau devrait contenir des signatures caractéristiques des différents habitats (Tableau 6).

Néanmoins, une analyse en composante principale indique qu'une variation importante et complexe de la chimie de l'eau existe entre les différents sites et habitats échantillonnés (Fig. 8), probablement en relation avec les caractéristiques locale des sites, et notamment en relation avec les apports terrigènes très différents dans les mangroves estuariennes et de fond de baies par exemple, mais aussi de la distance à la côte des différents récifs, ou de la présence de rivières.

Tableau 5 : Composition moyenne de l'eau (% de 12 éléments) par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Habitat	Site	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn	
M	amos		3.56E-03	4.32E-06	1.77E-06	9.91E-01	1.02E-06	5.44E-07	7.58E-05	0.00E+00	5.20E-03	2.19E-09	1.83E-06	1.36E-05
M	gat		3.85E-03	2.54E-06	3.84E-06	9.90E-01	7.28E-06	6.01E-07	8.18E-05	0.00E+00	5.88E-03	9.96E-09	1.93E-06	2.49E-05
M	gol		3.67E-03	7.27E-06	2.12E-06	9.91E-01	1.58E-06	3.51E-07	7.52E-05	4.07E-09	5.25E-03	1.65E-09	1.82E-06	1.04E-05
M	nep		3.56E-03	2.53E-06	2.50E-06	9.91E-01	9.36E-06	3.04E-07	7.60E-05	0.00E+00	5.28E-03	2.07E-09	1.77E-06	1.50E-05
M	noun		3.85E-03	4.15E-06	2.16E-06	9.91E-01	2.98E-06	6.27E-07	7.77E-05	0.00E+00	5.35E-03	1.42E-09	1.90E-06	1.55E-05
M	oua		3.46E-03	3.24E-06	1.48E-06	9.91E-01	1.22E-06	2.49E-07	7.62E-05	0.00E+00	5.53E-03	1.19E-09	1.79E-06	3.00E-06
M	paa		3.72E-03	3.25E-06	1.53E-06	9.91E-01	4.17E-07	6.47E-07	7.68E-05	0.00E+00	5.31E-03	1.14E-09	1.86E-06	3.12E-05
M	port		3.70E-03	2.33E-06	4.27E-06	9.91E-01	4.56E-06	3.05E-07	7.64E-05	4.85E-09	5.36E-03	2.88E-09	1.72E-06	3.31E-05
M	pro		3.78E-03	6.05E-06	5.36E-06	9.91E-01	7.60E-06	9.72E-07	7.76E-05	1.35E-07	5.51E-03	8.77E-10	1.79E-06	9.74E-06
M	stvin		3.45E-03	4.35E-06	3.46E-06	9.91E-01	1.25E-05	4.68E-07	7.43E-05	0.00E+00	5.45E-03	2.08E-09	1.80E-06	1.86E-05
M	tchar		3.56E-03	2.65E-06	1.33E-06	9.91E-01	1.79E-06	4.48E-07	7.55E-05	5.52E-08	5.26E-03	2.42E-09	1.81E-06	2.47E-05
RB	amos		3.68E-03	5.73E-06	2.26E-06	9.90E-01	2.64E-06	1.47E-05	7.63E-05	1.54E-07	5.47E-03	1.41E-09	1.84E-06	3.07E-04
RB	gat		3.64E-03	2.42E-06	1.32E-06	9.91E-01	0.00E+00	3.23E-07	7.64E-05	0.00E+00	5.54E-03	5.31E-10	1.94E-06	1.43E-06
RB	gol		3.58E-03	4.26E-06	1.83E-06	9.91E-01	0.00E+00	2.82E-06	7.56E-05	8.66E-10	5.48E-03	5.86E-10	1.86E-06	8.17E-06
RB	nep		3.56E-03	2.76E-06	1.37E-06	9.91E-01	0.00E+00	7.40E-07	7.65E-05	0.00E+00	5.53E-03	1.19E-09	1.81E-06	1.24E-05
RB	noun		3.66E-03	3.91E-06	1.56E-06	9.91E-01	3.94E-07	9.74E-07	7.53E-05	2.33E-08	5.44E-03	1.62E-09	1.86E-06	1.55E-05
RB	oua		3.65E-03	3.46E-06	1.43E-06	9.91E-01	0.00E+00	3.55E-07	7.53E-05	2.79E-08	5.44E-03	1.79E-09	1.86E-06	8.04E-06
RB	paa		3.64E-03	4.51E-06	1.61E-06	9.91E-01	8.95E-08	1.24E-06	7.64E-05	0.00E+00	5.52E-03	4.92E-10	1.84E-06	3.43E-05
RB	port		3.60E-03	3.16E-06	1.65E-06	9.91E-01	1.60E-07	9.07E-07	7.67E-05	0.00E+00	5.55E-03	4.70E-10	1.84E-06	3.66E-05
RB	pro		3.62E-03	2.77E-06	1.52E-06	9.91E-01	0.00E+00	3.55E-07	7.56E-05	0.00E+00	5.29E-03	4.18E-09	1.81E-06	6.82E-06
RB	stvin		3.62E-03	2.71E-06	1.38E-06	9.91E-01	0.00E+00	5.41E-07	7.55E-05	1.57E-08	5.49E-03	1.02E-09	1.90E-06	2.30E-06
RB	tchar		3.57E-03	3.02E-06	1.41E-06	9.91E-01	2.33E-07	6.39E-07	7.58E-05	0.00E+00	5.48E-03	1.36E-09	1.81E-06	3.40E-05
RF	gat		3.52E-03	2.45E-06	1.53E-06	9.91E-01	2.28E-07	3.95E-07	7.62E-05	0.00E+00	5.27E-03	1.48E-09	1.75E-06	3.35E-05
RF	oua		3.47E-03	2.54E-06	2.35E-06	9.91E-01	0.00E+00	8.88E-08	7.62E-05	0.00E+00	5.27E-03	1.96E-09	1.76E-06	3.41E-06
RF	pro		3.54E-03	2.78E-06	2.96E-06	9.91E-01	4.07E-09	1.43E-07	7.70E-05	8.82E-09	5.32E-03	1.90E-09	1.77E-06	1.95E-05
RF	stvin		3.57E-03	3.16E-06	2.44E-06	9.91E-01	3.60E-07	1.21E-07	7.69E-05	0.00E+00	5.33E-03	1.82E-09	1.77E-06	4.31E-06
RI	gat		3.45E-03	2.28E-06	2.30E-06	9.91E-01	7.67E-08	3.42E-07	7.65E-05	2.84E-09	5.31E-03	2.08E-09	1.75E-06	3.35E-05
RI	oua		3.37E-03	2.49E-06	1.55E-06	9.91E-01	0.00E+00	8.67E-08	7.70E-05	0.00E+00	5.26E-03	1.48E-09	1.73E-06	8.40E-06
RI	pro		3.44E-03	2.58E-06	2.33E-06	9.91E-01	5.78E-08	6.11E-07	7.67E-05	0.00E+00	5.32E-03	1.16E-09	1.74E-06	1.05E-05
RI	stvin		3.41E-03	2.47E-06	2.33E-06	9.91E-01	0.00E+00	1.09E-07	7.64E-05	1.57E-08	5.30E-03	1.11E-09	1.76E-06	1.04E-05

Tableau 6 : PERMANOVA à deux facteurs (site x habitat) sur la composition chimique de l'eau dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes— contamination probable).

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
1.Site	10	0.00022309	2.23E-05	1.04E+00	0.12217	0.418
2.Habitat	3	0.00018967	6.32E-05	2.95477	0.10387	0.007 **
1x2	15	0.00017218	1.15E-05	0.53644	0.09429	0.988
Residuals	58	0.00124104	2.14E-05		0.67966	
Total	86	0.00182597			1	

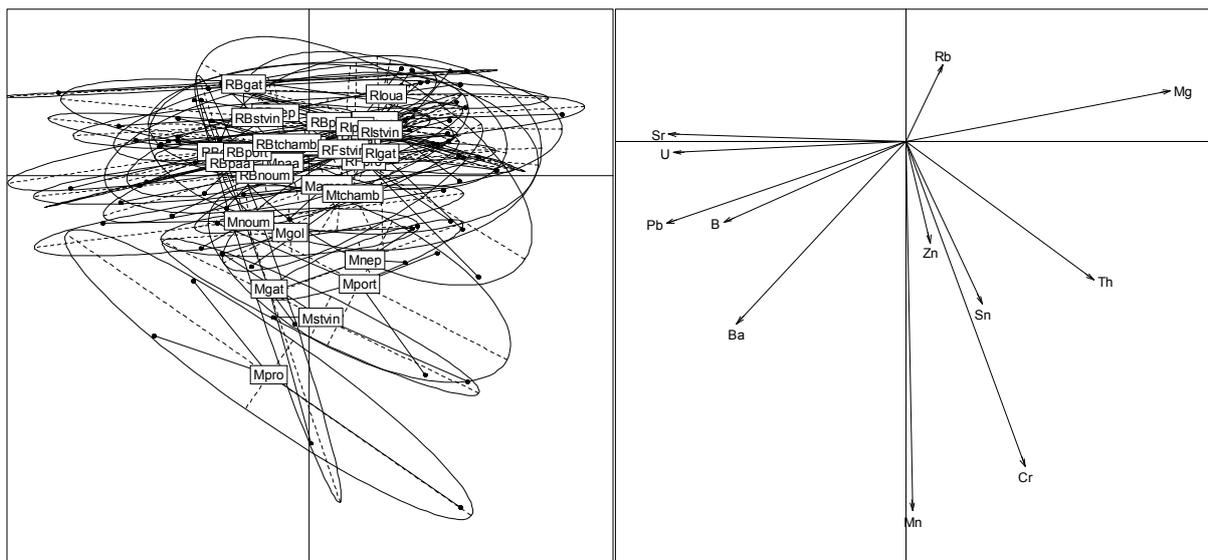


Figure 8 : Analyse en composante principale sur la composition chimique de l'eau dans les 11 sites et 4 habitats échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. (NB : les échantillons du récif barrière d'Amos ont été retirés du jeu de données car les valeurs étaient aberrantes—contamination probable).

3.1.2. Sédiments

Variation entre habitats à l'échelle globale

Comme pour l'eau, mais dans une moindre mesure, l'analyse des sédiments indique une forte dominance du Mg qui représente entre 84 et 90% des 12 éléments mesurés (Tableau 7). Le second élément le plus abondant est le Sr qui représente 7 à 9% de la composition chimique ; vient ensuite le Cr qui de manière intéressante semble plus abondant dans les zones côtières, 3 à 6 % dans les mangroves et récifs frangeants, que les zones plus océaniques, 0.6 à 0.8%. Les autres éléments sont à l'état de trace, largement inférieurs à 1%.

Tableau 7 : Composition moyenne des sédiments (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Habitat B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn	
M	3.09E-03	2.53E-03	3.71E-02	8.76E-01	6.07E-03	1.02E-04	4.55E-04	1.59E-05	7.34E-02	3.15E-05	6.54E-05	9.67E-04
RB	2.73E-03	1.82E-03	8.74E-03	9.07E-01	6.39E-03	8.64E-05	3.89E-04	1.19E-05	7.19E-02	3.76E-05	4.67E-05	7.27E-04
RF	2.04E-03	1.30E-03	6.52E-02	8.40E-01	1.55E-02	6.99E-05	2.89E-04	1.02E-05	7.41E-02	2.18E-05	4.60E-05	1.06E-03
RI	4.49E-03	1.97E-03	1.56E-02	8.79E-01	5.90E-03	1.58E-04	6.33E-04	2.34E-05	9.05E-02	3.56E-05	1.28E-04	1.29E-03

Malgré ces différences apparentes, une PERMANOVA ne peut détecter de différences significatives entre habitats dans la composition chimique des sédiments (Tableau 8).

Tableau 8 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique des sédiments dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Habitat	3	0.1375	0.045837	0.70914	0.0379	0.68
Residuals	54	3.4905	0.064638		0.9621	
Total	57	3.628			1	

Une ACP confirme ce résultat avec un chevauchement important des échantillons de sédiments des différents habitats dans l'espace des deux premières composantes principales et une tendance au Cr à différencier légèrement les récifs frangeants (Fig. 9).

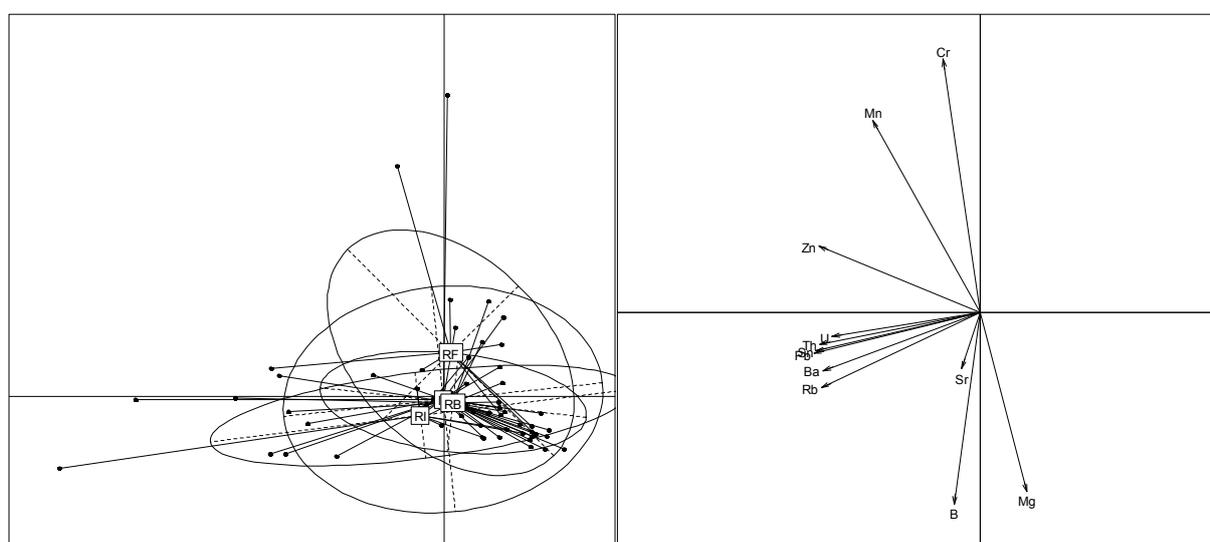


Figure 9 : Analyse en composantes principales de la composition chimique des sédiments dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Variation entre habitats et sites à l'échelle globale

Les résultats à cette échelle plus fine confirment les précédents, avec notamment une dominance de Mg dans tous les échantillons, puis de Sr et de Cr (Tableau 9), et une très forte variabilité de la composition chimique des sédiments entre sites et habitats. Une PERMANOVA à 2 facteurs non significative (Tableau 10) et une analyse en composante principale où les stations se chevauchent très largement, confirment ces résultats (Fig. 10).

Encore plus que pour l'eau, ces résultats suggèrent peu de structuration spatiale de la composition chimique des éléments à l'échelle fine des stations échantillonnées.

Tableau 9 : Composition moyenne des sédiments (% de 12 éléments) par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Habitat	Site	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
M	amos	2.40E-03	1.33E-03	2.98E-03	9.39E-01	5.66E-03	7.20E-05	3.16E-04	1.24E-05	4.71E-02	2.19E-05	2.92E-05	6.30E-04
M	gat	3.11E-03	4.52E-04	1.73E-03	8.78E-01	1.39E-03	4.05E-05	1.61E-04	4.04E-06	1.15E-01	5.59E-06	4.35E-05	3.32E-04
M	gol	2.20E-03	1.24E-04	1.38E-02	9.62E-01	6.35E-03	1.92E-05	9.54E-05	2.59E-06	1.53E-02	2.89E-06	1.06E-05	5.73E-04
M	nep	2.82E-03	4.33E-03	3.95E-03	9.05E-01	5.25E-03	1.53E-04	5.29E-04	1.97E-05	7.65E-02	6.24E-05	6.44E-05	1.47E-03
M	noum	3.94E-03	1.86E-03	3.60E-03	9.13E-01	3.37E-03	1.37E-04	1.07E-03	1.98E-05	7.16E-02	4.87E-05	1.17E-04	1.18E-03
M	oua	3.56E-03	6.32E-04	5.11E-04	8.72E-01	7.74E-04	3.17E-05	1.37E-04	3.91E-06	1.22E-01	4.51E-06	5.01E-05	2.07E-04
M	paa	4.78E-03	7.58E-03	3.50E-03	9.06E-01	2.10E-03	1.11E-04	7.13E-04	1.65E-05	7.40E-02	4.51E-05	1.16E-04	1.20E-03
M	port	3.83E-03	5.74E-03	2.63E-02	8.84E-01	1.14E-02	3.92E-04	1.17E-03	7.33E-05	6.42E-02	9.75E-05	1.08E-04	2.66E-03
M	pro	2.45E-03	7.00E-04	1.95E-02	9.12E-01	9.14E-03	3.82E-05	2.56E-04	5.84E-06	5.57E-02	1.17E-05	4.54E-05	4.62E-04
M	stvin	2.21E-03	6.44E-04	8.72E-03	8.69E-01	5.73E-03	5.01E-05	1.24E-04	4.82E-06	1.13E-01	1.05E-05	3.94E-05	4.57E-04
M	tchamb	2.72E-03	4.46E-03	3.23E-01	5.99E-01	1.55E-02	8.21E-05	4.38E-04	1.15E-05	5.24E-02	3.60E-05	9.61E-05	1.47E-03
RB	amos	2.98E-03	1.11E-03	2.91E-03	9.51E-01	3.00E-03	4.56E-05	3.34E-04	7.85E-06	3.81E-02	1.83E-05	2.63E-05	4.60E-04
RB	gat	3.57E-03	2.38E-04	1.08E-03	9.59E-01	9.78E-04	3.70E-05	1.29E-04	2.63E-06	3.48E-02	1.88E-06	1.26E-05	1.76E-04
RB	gol	1.35E-03	6.73E-03	1.48E-02	9.37E-01	1.72E-02	3.08E-04	9.21E-04	3.47E-05	1.91E-02	2.14E-04	8.87E-05	1.78E-03
RB	nep	3.18E-03	3.76E-03	8.46E-03	8.86E-01	9.26E-03	1.41E-04	8.00E-04	2.18E-05	8.67E-02	4.50E-05	7.20E-05	1.33E-03
RB	noum	2.56E-03	2.15E-03	3.17E-03	9.48E-01	3.06E-03	2.49E-05	1.76E-04	3.49E-06	4.00E-02	5.05E-06	1.90E-05	3.91E-04
RB	oua	2.26E-03	5.54E-04	8.55E-03	8.86E-01	5.36E-03	3.58E-05	2.41E-04	5.01E-06	9.63E-02	8.41E-06	4.10E-05	5.46E-04
RB	paa	2.26E-03	3.82E-04	7.74E-04	8.65E-01	1.60E-03	3.05E-05	1.17E-04	1.97E-06	1.30E-01	4.68E-06	4.69E-05	1.81E-04
RB	port	4.59E-03	2.39E-04	1.39E-02	7.97E-01	6.15E-03	1.96E-05	1.00E-04	2.08E-06	1.77E-01	1.21E-06	5.43E-05	3.95E-04
RB	pro	1.70E-03	1.98E-04	1.89E-02	9.50E-01	8.61E-03	2.15E-05	9.53E-05	2.89E-06	2.01E-02	3.64E-06	1.43E-05	5.85E-04
RB	stvin	1.60E-03	1.97E-03	3.49E-03	8.81E-01	4.48E-03	6.65E-05	4.80E-04	8.71E-06	1.06E-01	2.53E-05	5.02E-05	6.35E-04
RB	tchamb	3.30E-03	2.90E-03	1.47E-02	9.25E-01	7.94E-03	1.79E-04	8.20E-04	3.42E-05	4.36E-02	6.40E-05	7.61E-05	1.30E-03
RF	gat	2.40E-03	1.93E-04	1.15E-02	8.69E-01	4.59E-03	1.20E-05	7.61E-05	1.42E-06	1.12E-01	1.44E-06	3.59E-05	1.91E-04
RF	oua	1.70E-03	7.35E-04	2.17E-01	6.89E-01	2.92E-02	5.68E-05	3.32E-04	9.17E-06	6.04E-02	1.51E-05	5.90E-05	1.84E-03
RF	pro	2.69E-03	3.67E-03	1.49E-02	8.99E-01	1.29E-02	1.81E-04	5.30E-04	2.58E-05	6.48E-02	6.16E-05	6.09E-05	1.48E-03
RF	stvin	1.35E-03	5.89E-04	1.75E-02	9.05E-01	1.54E-02	3.04E-05	2.18E-04	4.30E-06	5.92E-02	9.04E-06	2.83E-05	7.36E-04
RI	gat	7.49E-03	6.02E-03	2.37E-02	8.02E-01	1.30E-02	5.00E-04	1.74E-03	6.94E-05	1.41E-01	1.06E-04	3.48E-04	4.00E-03
RI	oua	2.67E-03	1.27E-03	3.95E-03	9.08E-01	5.89E-03	7.65E-05	5.00E-04	1.25E-05	7.67E-02	2.60E-05	6.71E-05	5.70E-04
RI	pro	4.44E-03	2.88E-04	1.48E-03	8.97E-01	7.91E-04	1.76E-05	1.22E-04	2.68E-06	9.61E-02	2.96E-06	3.14E-05	1.50E-04
RI	stvin	3.36E-03	3.14E-04	3.32E-02	9.10E-01	3.86E-03	3.66E-05	1.66E-04	8.95E-06	4.84E-02	7.03E-06	6.74E-05	4.39E-04

Tableau 10 : PERMANOVA à deux facteurs (site x habitat) sur la composition chimique des sédiments dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
1.Site	10	0.66	0.065995	0.92312	0.18191	0.567
2.Habitat	3	0.154	0.051345	0.71819	0.04246	0.67
1 x 2	16	0.8122	0.050762	0.71004	0.22387	0.852
Residuals	28	2.0018	0.071492		0.55176	
Total	57	3.628			1	

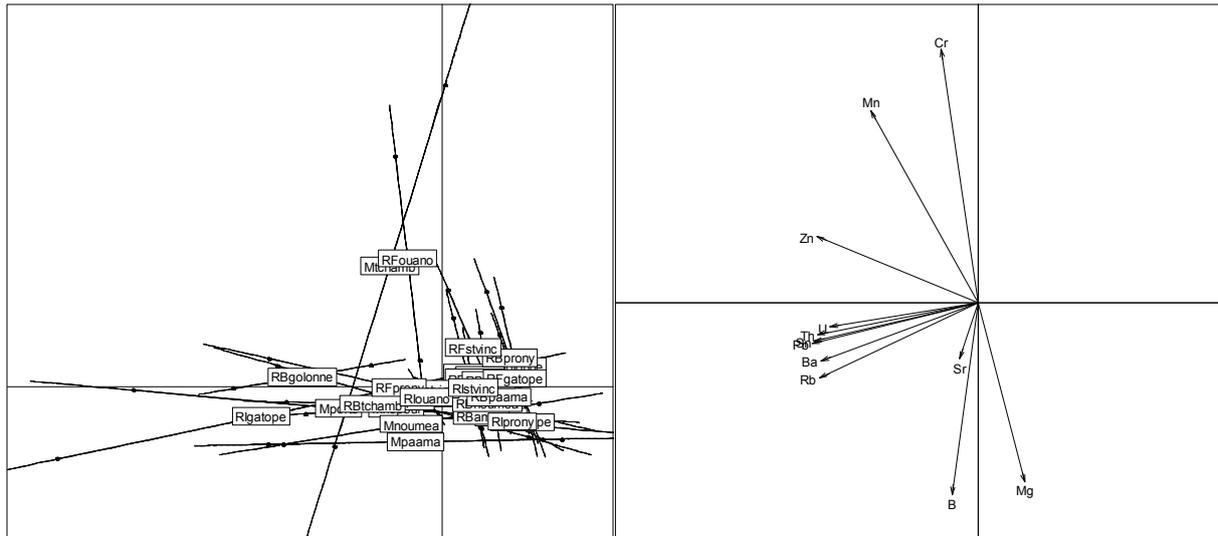


Figure 10 : Analyse en composante principale de la composition chimique des sédiments dans les 11 sites et 4 habitats échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire. NB : les ellipses sont plates car seuls deux échantillons ont été analysés par station.

3.1.3. Otolithes

Variation entre habitats à l'échelle globale

Contrairement à l'eau et au sédiment dont la composition chimique est dominée par le Mg, les otolithes, toutes espèces confondues, ont une composition chimique dominée par le Sr qui représente 91 à 98% des 12 éléments mesurés (Tableau 11). Ceci illustre l'importance fondamentale des processus biologiques de bioaccumulation dans les tissus durs des organismes vivants. De manière intéressante, le Mn a une concentration relative 10 fois plus élevée dans les mangroves (0,0597%) que dans les récifs (0,00175 à 0,00673%).

Tableau 11 : Composition moyenne des otolithes (% de 12 éléments) par habitat dans les 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Habitat	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
M	1.89E-03	2.51E-03	7.57E-05	6.29E-03	5.97E-04	5.08E-06	2.08E-05	2.43E-05	9.88E-01	1.95E-08	8.90E-08	2.56E-04
RB	1.66E-03	1.91E-03	4.87E-05	5.60E-03	5.91E-05	3.01E-06	1.94E-05	2.15E-05	9.91E-01	2.91E-08	1.86E-07	1.25E-04
RF	1.69E-03	1.57E-03	5.13E-05	4.27E-03	6.73E-05	1.59E-06	1.76E-05	1.92E-05	9.92E-01	3.33E-08	6.33E-08	9.57E-05
RI	1.58E-03	1.25E-03	4.94E-05	2.37E-03	1.75E-05	1.95E-06	1.80E-05	1.69E-05	9.95E-01	1.28E-08	5.18E-08	7.59E-05

Une PERMANOVA montre des différences significatives fortes entre les quatre habitats (Tableau 12). Une ACP tempère ce résultat au vu de la très forte variabilité de la chimie des otolithes et du chevauchement des habitats lorsque toutes les espèces sont confondues (Fig. 11). Néanmoins, l'ACP confirme que le Mn, mais aussi le Ba et Mg semblent être caractéristiques de la mangrove alors que les récifs semblent se différencier par une composition relativement plus élevée en Sr (Fig. 11).

Ces résultats, notamment celui de la PERMANOVA, suggèrent que la chimie des otolithes toutes espèces confondues pourrait contenir des signatures caractéristiques utiles à la discrimination des habitats à cette échelle.

Tableau 12 : PERMANOVA testant l'effet de l'habitat sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Habitat	3	0.2076	0.069188	14.364	0.0493	0.001 ***
Residuals	831	4.0026	0.004817		0.9507	
Total	834	4.2102			1	

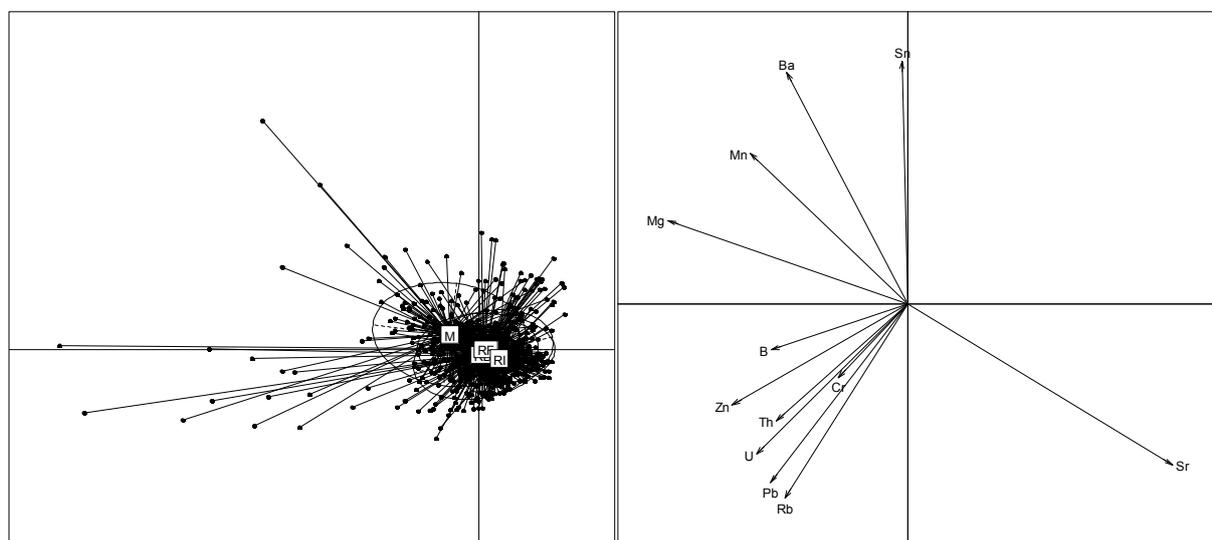


Figure 11 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans 11 sites autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Une analyse au niveau mono-spécifique, par exemple pour la dorade *Lutjanus fulviflamma* indique une amélioration forte des signatures chimiques dans les otolithes lorsque la variabilité liée au mélange des espèces est éliminée (Fig. 12). Ce résultat confirme l'importance du Mn, Ba, Mg comme caractéristiques chimiques des mangroves par rapport aux récifs plus riches en Sr, et suggère des taux d'accumulation des éléments dans les otolithes variables entre les espèces.

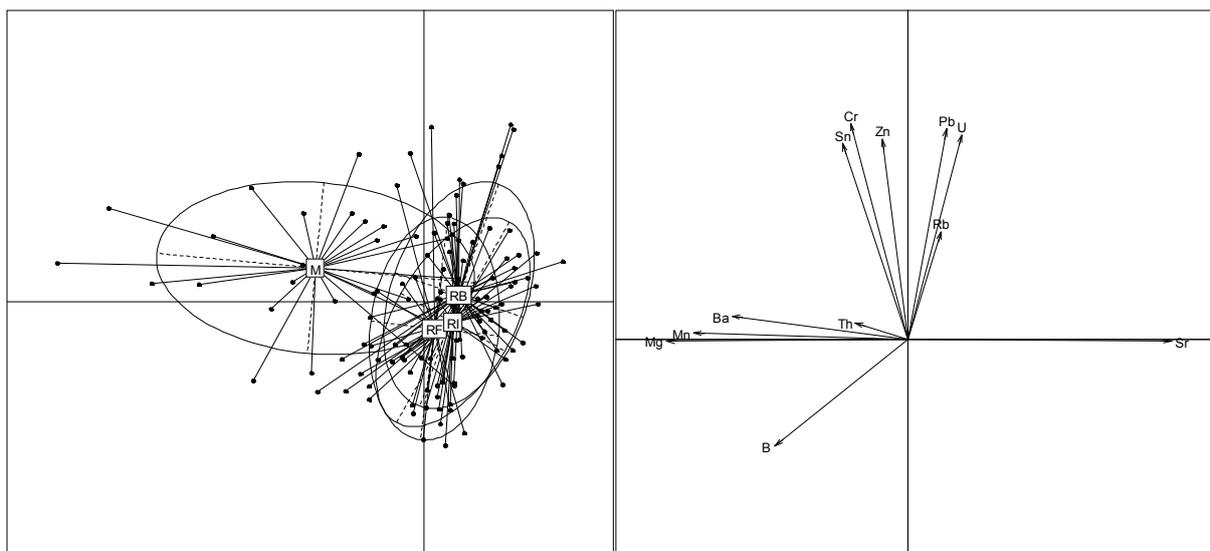


Figure 12 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes des *Lutjanus fulviflamma* collectés dans 11 sites autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Variation entre habitats et sites à l'échelle globale

A cette échelle plus fine, la composition chimique relative dans les otolithes reste dominée par le Sr, quelque soit l'habitat et le site (Tableau 13). La variabilité importante entre sites est illustrée par une analyse en composante principale (Fig. 13). Néanmoins, une PERMANOVA à 2 facteurs indique que la chimie des otolithes toutes espèces confondues est significativement différente entre habitats malgré la variation inter-sites (Tableau 14). Comme pour l'eau (Tableau 6) mais contrairement aux sédiments (Tableau 10), ce résultat suggère une possible structuration entre mangroves et récifs à cette échelle.

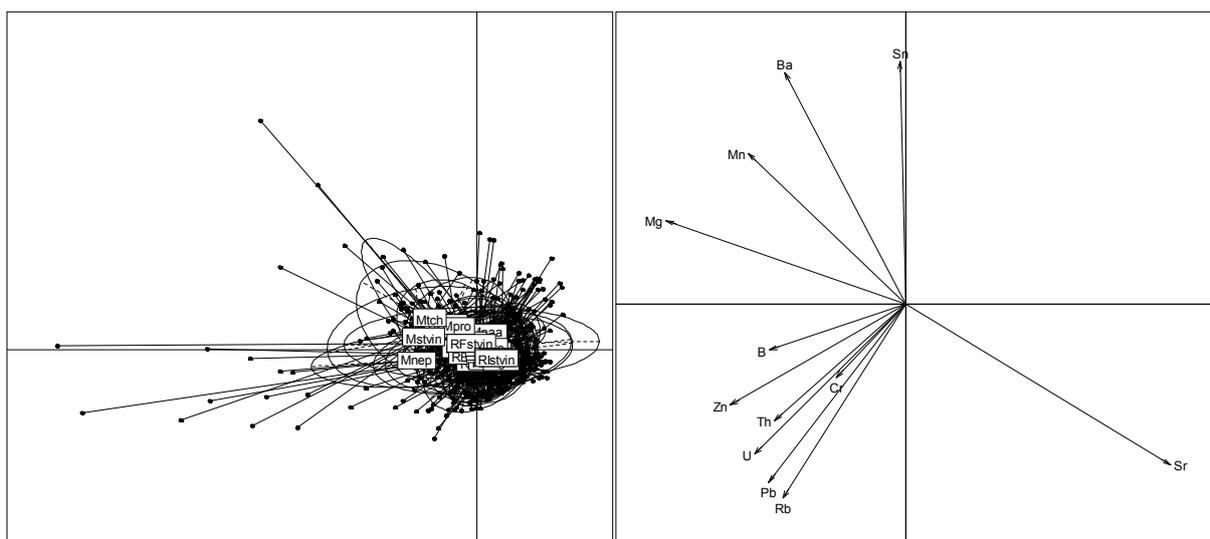


Figure 13 : Analyse en composante principale sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces collectées dans 11 sites et 4 habitats autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Tableau 13 : Composition moyenne des otolithes (% de 12 éléments) de 53 espèces par habitat pour chacun des 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

Hab	Station	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
M	amos	1.75E-03	1.10E-03	6.47E-05	5.57E-03	1.84E-04	1.76E-06	1.29E-05	2.13E-05	9.91E-01	0.00E+00	1.27E-08	2.31E-04
M	gat	1.80E-03	5.05E-03	8.64E-05	5.90E-03	7.80E-04	1.85E-06	2.11E-05	1.76E-05	9.86E-01	9.80E-09	4.08E-08	4.44E-04
M	gol	1.94E-03	1.80E-03	4.46E-05	4.59E-03	1.25E-04	2.64E-06	2.37E-05	2.81E-05	9.91E-01	2.91E-08	1.33E-07	2.15E-04
M	nep	1.48E-03	1.30E-03	6.79E-05	6.87E-03	9.38E-04	6.59E-05	3.38E-05	4.34E-05	9.89E-01	3.66E-08	5.54E-08	4.95E-04
M	noum	2.20E-03	1.93E-03	8.13E-05	6.19E-03	6.17E-04	2.57E-06	1.17E-05	3.92E-05	9.89E-01	0.00E+00	3.78E-08	2.41E-04
M	oua	1.56E-03	1.23E-03	5.17E-05	5.15E-03	1.80E-04	9.87E-07	1.98E-05	1.19E-05	9.92E-01	2.94E-08	3.05E-08	1.29E-04
M	paa	1.11E-03	9.15E-04	4.05E-05	3.97E-03	3.98E-04	6.47E-07	1.21E-05	3.02E-05	9.93E-01	1.52E-08	0.00E+00	1.46E-04
M	port	1.89E-03	1.57E-03	5.70E-05	4.76E-03	1.87E-04	6.87E-07	1.94E-05	2.00E-05	9.91E-01	5.23E-09	5.95E-08	9.67E-05
M	pro	1.54E-03	3.01E-03	9.77E-05	5.61E-03	3.35E-04	1.29E-06	1.71E-05	3.34E-05	9.89E-01	0.00E+00	7.72E-08	1.78E-04
M	stvin	2.34E-03	1.92E-03	9.41E-05	7.67E-03	1.17E-03	8.90E-06	2.85E-05	1.85E-05	9.86E-01	3.52E-08	2.65E-07	2.54E-04
M	tchamb	2.29E-03	2.61E-03	7.89E-05	1.18E-02	4.46E-04	1.49E-06	1.95E-05	5.32E-05	9.83E-01	6.50E-08	3.69E-08	9.98E-05
RB	amos	1.62E-03	2.09E-03	2.63E-05	2.51E-03	4.85E-05	1.60E-06	2.07E-05	2.26E-05	9.94E-01	0.00E+00	8.26E-08	8.93E-05
RB	gat	1.73E-03	1.68E-03	6.01E-05	4.92E-03	5.19E-05	2.64E-06	1.76E-05	1.83E-05	9.91E-01	3.20E-08	2.07E-07	1.51E-04
RB	gol	1.66E-03	1.22E-03	4.94E-05	2.74E-03	4.20E-05	2.58E-06	1.86E-05	2.95E-05	9.94E-01	2.64E-08	7.64E-08	9.74E-05
RB	nep	1.53E-03	3.42E-03	4.14E-05	3.00E-03	5.01E-05	2.05E-06	2.08E-05	1.65E-05	9.92E-01	1.68E-08	8.66E-08	2.71E-04
RB	noum	1.62E-03	1.97E-03	4.98E-05	2.51E-03	5.51E-05	7.32E-06	2.08E-05	2.50E-05	9.94E-01	2.88E-08	7.48E-08	1.61E-04
RB	oua	1.62E-03	1.45E-03	5.21E-05	2.70E-02	7.75E-05	2.24E-06	1.88E-05	2.17E-05	9.70E-01	3.21E-09	4.44E-07	5.32E-05
RB	paa	1.64E-03	1.94E-03	3.85E-05	2.88E-03	5.56E-05	3.81E-06	1.88E-05	2.71E-05	9.93E-01	1.80E-08	1.12E-07	1.48E-04
RB	port	1.53E-03	3.33E-03	4.00E-05	3.18E-03	5.33E-05	2.61E-06	1.98E-05	1.73E-05	9.92E-01	1.96E-08	8.76E-08	7.38E-05
RB	pro	1.53E-03	1.42E-03	4.89E-05	3.13E-03	4.66E-05	3.08E-06	1.91E-05	2.61E-05	9.94E-01	1.10E-08	5.06E-08	8.86E-05
RB	stvin	1.79E-03	1.81E-03	6.13E-05	4.42E-03	8.32E-05	2.80E-06	1.93E-05	1.86E-05	9.92E-01	6.76E-08	3.43E-07	1.46E-04
RB	tchamb	1.63E-03	1.34E-03	2.59E-05	2.57E-03	4.02E-05	3.09E-06	2.11E-05	2.22E-05	9.94E-01	2.37E-08	7.87E-08	5.62E-05
RF	gat	1.77E-03	1.39E-03	6.17E-05	2.94E-03	5.27E-05	1.89E-06	1.89E-05	1.71E-05	9.94E-01	1.04E-08	5.80E-08	1.15E-04
RF	oua	1.72E-03	1.93E-03	3.13E-05	2.61E-03	4.75E-05	1.17E-06	1.96E-05	2.33E-05	9.94E-01	1.91E-08	8.60E-08	4.82E-05
RF	pro	1.64E-03	1.30E-03	5.04E-05	3.51E-03	9.59E-05	9.09E-07	1.41E-05	1.62E-05	9.93E-01	2.48E-08	3.32E-08	1.23E-04
RF	stvin	1.60E-03	1.69E-03	6.53E-05	9.06E-03	7.43E-05	2.63E-06	1.79E-05	2.05E-05	9.87E-01	9.16E-08	7.95E-08	9.76E-05
RI	gat	1.52E-03	1.07E-03	3.17E-05	2.02E-03	1.43E-05	3.64E-06	1.79E-05	1.85E-05	9.95E-01	1.35E-08	5.48E-08	6.72E-05
RI	oua	1.62E-03	1.56E-03	6.09E-05	2.38E-03	1.20E-05	1.45E-06	1.68E-05	1.69E-05	9.94E-01	1.96E-08	8.27E-08	7.60E-05
RI	pro	1.62E-03	1.30E-03	4.52E-05	2.46E-03	1.75E-05	1.30E-06	2.15E-05	1.68E-05	9.94E-01	8.87E-09	2.20E-08	7.75E-05
RI	stvin	1.54E-03	1.08E-03	5.96E-05	2.59E-03	2.58E-05	1.49E-06	1.57E-05	1.54E-05	9.95E-01	9.81E-09	5.13E-08	8.22E-05

Tableau 14 : PERMANOVA à deux facteurs (Site x habitat) sur la composition chimique des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les mangroves, récifs barrières internes, frangeants et intermédiaires de 11 sites échantillonnés autour de la Nouvelle-Calédonie.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
1.Site	10	0.031	0.003099	0.6444	0.00736	0.729
2.Habitat	3	0.2155	0.071821	14.9332	0.05118	0.001 ***
1 x 2	16	0.0921	0.005754	1.1963	0.02187	0.188
Residuals	805	3.8717	0.00481		0.9196	
Total	834	4.2102			1	

Ce résultat est encore plus visible lorsque la variabilité engendrée par le mélange d'espèces est éliminée des analyses. Par exemple, une ACP sur la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* révèle non seulement une structure entre mangroves et récifs, mais laisse présager de possibles signatures utiles au niveau des stations, tout particulièrement entre les mangroves des différents sites (Fig. 14). Par exemple, la mangrove de Tchambouene semble se différencier de toutes les autres stations.

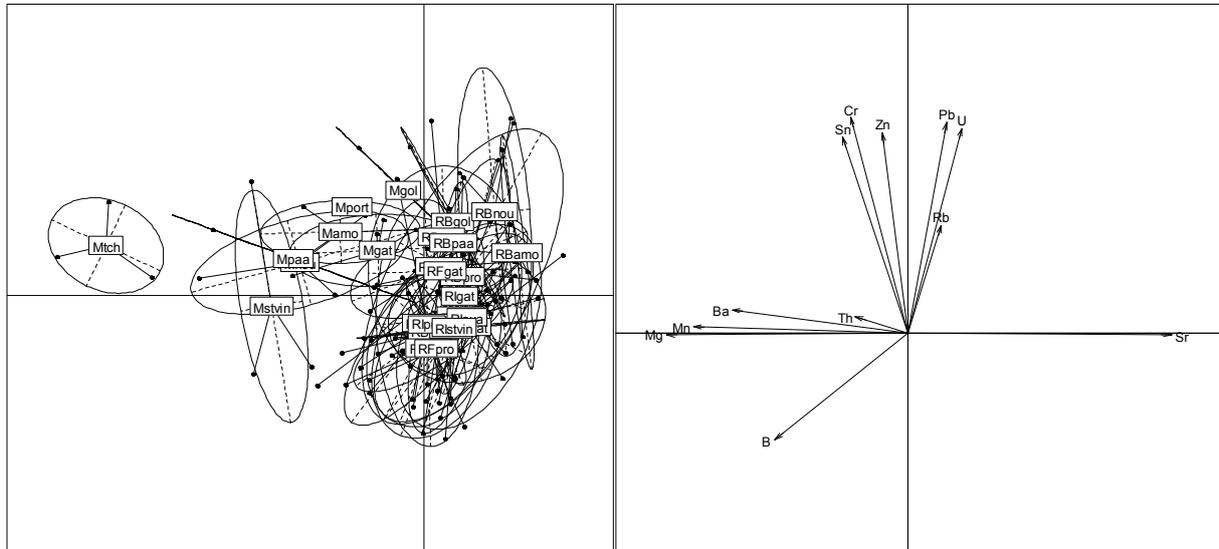


Figure 14 : Analyse en composante principale de la composition chimique des otolithes des *Lutjanus fulviflamma* collectés dans 11 sites et 4 habitats autour de la Nouvelle-Calédonie. M : Mangrove ; RB : Récif barrière interne ; RF : Récif frangeant ; RI : Récif intermédiaire.

3.1.4. Corrélations environnement-otolithes

Environnement

La température moyenne de l'eau dans les 30 sites échantillonnés en hiver 2010 autour de la grande terre variait entre 22.2 et 26 °C (moyenne $24.4 \pm 1.16SD$) ; la salinité variait entre 24.3 et 37.3 (moyenne $35.3 \pm 2.57SD$) (Tableau 15). Dans cette gamme de variation, aucune corrélation entre ces deux variables n'a pu être mise en évidence ($R_{spearman} = -0.02$; $P = 0.928$).

Bien que la chimie de l'eau ne soit pas d'une manière générale corrélée à la température et à la salinité (R de Mantel, Tableau 16), le Mg, Pb et Sn montrent une corrélation significative avec à la fois la température et la salinité, le B, Ba, Mn et U uniquement avec la salinité, le Cr et Th uniquement avec la température (R de Spearman, Tableau 16).

A l'inverse de l'eau, aucune corrélation significative n'a pu être mise en évidence entre la chimie des sédiments, la salinité et la température. Néanmoins, une corrélation marginalement significative ($P < 0.1$) existe entre la chimie de l'eau et des sédiments pour B, Mg, Sr (Tableau 16).

Tableau 15 : Température et salinité moyenne dans les 30 sites échantillonnés au cours de l'hiver 2010. NA : donnée non disponible.

Habitat	Site	Temp (°C)	Salinité
M	amos	22.2	35.7
M	gat	24.1	36
M	gol	25.3	33
M	nep	23	36.3
M	noum	22.8	31
M	oua	24.7	37
M	paa	NA	36
M	port	NA	NA
M	pro	24.1	24.3
M	stvin	22.6	34
M	tchamb	NA	35
RB	amos	26	34.7
RB	gat	24	36
RB	gol	25.4	34.3
RB	nep	23.9	36.7
RB	noum	25.7	36
RB	oua	25.9	36
RB	paa	26	NA
RB	port	25.9	36.5
RB	pro	24.4	35
RB	stvin	25.7	35
RB	tchamb	25.7	37
RF	gat	24.7	36.7
RF	oua	24.3	36.7
RF	pro	23.1	36.3
RF	stvin	22.8	37.3
RI	gat	24.6	36.3
RI	oua	24.1	36
RI	pro	24.3	37.3
RI	stvin	23.4	37

Ces résultats montrent la complexité de la physico-chimie de l'eau et des sédiments. Pour l'eau, ils suggèrent que :

- les eaux plus froides et plus salées sont plus riches en Mg,
- les eaux plus chaudes et moins salées sont plus riches en Sn et Pb,
- les eaux moins salées sont moins riches en B, Ba, Mn, Pb, Sn, U,
- les eaux plus salées sont plus riches en Mg,
- les eaux plus froides sont plus riches en Cr, Mg, Th,
- les eaux plus chaudes sont plus riches en Pb, Sn.

Les sédiments dans les eaux plus salées semblent être plus riches en B et Sr, alors que ceux en eaux moins salées semblent plus riches en Mg (Tableau 16).

Tableau 16 : Corrélations entre chimie et physique de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : P<0.05 (significatif). Gras : P<0.1 (marginalelement significatif).

	Eau-Sal		Eau-Temp		Sed-Sal		Sed-Temp		Eau-Sed	
	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P
B	-0.56	0.002	0.31	0.112	0.32	0.095	-0.06	0.770	0.01	0.978
Ba	-0.56	0.002	0.20	0.326	-0.11	0.577	-0.14	0.494	-0.07	0.723
Cr	-0.05	0.817	-0.43	0.024	0.02	0.926	-0.14	0.492	0.25	0.180
Mg	0.41	0.030	-0.38	0.054	-0.35	0.064	-0.09	0.672	-0.16	0.400
Mn	-0.34	0.078	-0.21	0.304	-0.06	0.743	-0.15	0.444	-0.14	0.449
Pb	-0.38	0.047	0.45	0.019	-0.15	0.443	-0.29	0.141	-0.05	0.800
Rb	0.23	0.230	-0.32	0.109	-0.09	0.637	-0.18	0.367	0.21	0.261
Sn	-0.40	0.036	0.36	0.062	-0.05	0.798	-0.31	0.121	0.17	0.369
Sr	0.01	0.942	0.30	0.135	0.34	0.079	0.08	0.682	0.29	0.119
Th	-0.09	0.652	-0.41	0.033	-0.15	0.456	-0.24	0.233	0.23	0.219
U	-0.53	0.004	0.26	0.184	0.10	0.614	-0.09	0.644	-0.18	0.335
Zn	0.01	0.951	0.20	0.308	-0.09	0.636	-0.23	0.251	0.02	0.908
ALL	0.12	0.125	0.03	0.359	-0.10	0.789	-0.10	0.857	-0.04	0.522

Otolithes

Globalement, la chimie des otolithes de 53 espèces confondues de poisson n'est pas corrélée à la physico-chimie de l'eau et des sédiments (tests de Mantel, Tableau 17). Néanmoins, plus de Mn et moins de Rb dans l'eau est concordant avec significativement plus de Mn et de Rb dans les otolithes (Tableau 17). La chimie des sédiments n'est corrélée à la chimie des otolithes pour aucun élément, ce qui suggère que les éléments traces dans les otolithes proviennent plutôt de l'eau que des sédiments.

Tableau 17 : Corrélations entre la chimie des otolithes de 53 espèces confondues et la physico-chimie de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : P<0.05 (significatif). Gras : P<0.1 (marginalelement significatif).

	Eau-Oto		Sed-Oto		Oto-Sal		Oto-Temp	
	Rs	P	Rs	P	Rs	P	Rs	P
B	0.13	0.483	-0.29	0.126	-0.40	0.036	-0.10	0.632
Ba	0.23	0.221	-0.19	0.317	-0.30	0.126	0.19	0.348
Cr	0.25	0.185	0.00	0.989	-0.33	0.086	-0.63	0.000
Mg	-0.22	0.238	-0.12	0.520	-0.30	0.119	-0.42	0.031
Mn	0.75	0.000	-0.13	0.486	-0.42	0.028	-0.33	0.094
Pb	0.21	0.273	-0.11	0.548	-0.16	0.411	0.15	0.451
Rb	-0.42	0.021	-0.28	0.136	0.13	0.515	0.27	0.170
Sn	0.21	0.274	0.14	0.468	-0.60	0.001	0.15	0.446
Sr	-0.16	0.404	-0.09	0.650	0.37	0.050	0.34	0.084
Th	-0.05	0.798	-0.01	0.971	0.12	0.551	-0.04	0.852
U	0.20	0.298	-0.27	0.144	-0.16	0.414	0.37	0.057
Zn	-0.01	0.953	-0.15	0.439	-0.39	0.039	-0.46	0.016
ALL	-0.02	0.400	0.10	0.130	-0.058	0.54	0.11	0.115

Une corrélation négative entre la salinité de l'eau et la chimie des otolithes est observée pour le B, Cr, Mn, Sn et Zn, et une corrélation positive est observée pour le Sr. Une corrélation négative entre la température et la chimie des otolithes est observée pour Cr, Mg, Mn et Zn ; une corrélation positive est observée pour Sr et U (Tableau 17).

Toutes espèces confondues, les otolithes de poissons vivant dans des eaux moins salées auraient une concentration plus élevée en B, Cr, Mn, Sn et Zn ; les otolithes de poissons vivant dans des eaux plus salées auraient une concentration plus élevée en Sr. Ceux vivant dans les eaux plus froides auraient des otolithes avec plus de Cr, Mg, Mn et Zn ; ceux vivant dans des eaux plus chaudes auraient plus de Sr et U dans leurs otolithes.

Ces corrélations pourraient soit correspondre à des processus physico-chimiques avec un transfert environnement-otolithe d'éléments chimiques lié à la salinité et la température du milieu, soit à des espèces différentes vivant dans ces différents milieux. Si seuls les éléments concordants sont considérés, alors, toutes espèces confondues, des eaux moins salées semblent être moins riches en B, Mn et Sn, et cela semble se retrouver dans les otolithes de poissons vivant dans ces eaux. De même, les eaux plus chaudes ont moins de Cr et de Mg, et il en est de même pour les otolithes de poissons vivant dans ces eaux.

Ces résultats toutes espèces confondues ne sont pas confirmés au niveau mono-spécifique. Bien que des corrélations positives existent entre la chimie des otolithes des 53 espèces confondues et celle de *L. fulviflamma* pour B, Cr, Mg, Mn, Pb, Sn, Sr, Zn (Tableau 18), la chimie de l'eau est corrélée pour B, Mn et Zn avec celle des otolithes de *L. fulviflamma* (Mn et Rb toutes sp confondues), la chimie des sédiments pour Sn chez *L. fulviflamma* (aucun éléments en toutes espèces), la salinité pour Cr, Sn, Zn chez *L. fulviflamma* (B, Cr, Mn, Sn, Sr et Zn en toutes espèces), la température pour B, Mg, Mn, Rb, Sr et U chez *L. fulviflamma* (Cr, Mg, Mn, Sr, U et Zn en toutes espèces).

Tableau 18 : Corrélations entre la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* (Fulvi), la chimie des otolithes de 53 sp confondues (Oto) et la physico-chimie de l'eau et des sédiments (R de spearman en univarié, R de Mantel en multivarié). Gras italique : P<0.05 (significatif). Gras : P<0.1 (marginalelement significatif).

	Oto-Fulvi		Eau-Fulvi		Sed-Fulvi		Sal-Fulvi		Temp-Fulvi	
	Rs	P	Rs	P	Rs	P	Rs	P	Rs	P
B	0.37	0.054	-0.32	0.097	0.02	0.932	-0.17	0.415	-0.61	0.001
Ba	0.26	0.176	0.29	0.136	-0.13	0.502	-0.17	0.409	0.10	0.625
Cr	0.54	0.003	0.17	0.380	0.05	0.801	-0.51	0.007	-0.32	0.122
Mg	0.54	0.003	0.01	0.952	-0.13	0.507	-0.26	0.200	-0.40	0.047
Mn	0.66	0.000	0.49	0.008	0.00	0.987	0.11	0.579	-0.59	0.002
Pb	0.45	0.017	0.18	0.359	-0.28	0.149	-0.30	0.138	-0.07	0.722
Rb	0.25	0.194	-0.15	0.431	0.05	0.814	0.11	0.586	0.53	0.006
Sn	0.36	0.057	-0.09	0.635	0.36	0.063	-0.37	0.061	-0.12	0.570
Sr	0.43	0.023	0.22	0.249	-0.01	0.959	0.31	0.125	0.42	0.038
Th	0.19	0.335	0.31	0.105	0.25	0.207	0.10	0.615	-0.03	0.878
U	0.31	0.111	-0.12	0.549	-0.21	0.283	-0.19	0.351	0.45	0.023
Zn	0.46	0.015	0.37	0.054	0.00	0.997	-0.50	0.009	0.22	0.300
ALL	0.19	0.087	-0.03	0.449	0.52	0.038	0.23	0.071	0.34	0.003

3.1.5. Synthèse

L'utilisation de la microchimie des otolithes dans les études de connectivité est basée sur une double hypothèse :

1. qu'il existe une structure spatiale dans la chimie de l'environnement et
2. que cette structure se retrouve dans les otolithes.

Dans cette analyse de la chimie de l'environnement et des otolithes en Nouvelle-Calédonie, nous montrons que :

- contrairement aux sédiments, la composition chimique de l'eau et des otolithes montrent une structure entre les habitats
- toutes espèces confondues, cette structure est particulièrement visible entre les mangroves et les récifs à l'échelle de l'île
- à l'échelle du site, la structuration par habitat reste maintenue lorsque toutes les espèces sont confondues
- cette structure semble pouvoir être affinée lorsque les analyses sont faites au niveau mono-spécifique
- contrairement aux sédiments, de nombreux éléments chimiques dans l'eau et dans les otolithes sont corrélés à la température et la salinité
- la chimie des otolithes et de l'environnement sont peu corrélées
- la relation entre température, salinité et chimie des otolithes est différente pour une espèce donnée en comparaison avec un signal toutes espèces confondues.

Les hypothèses de la microchimie des otolithes comme outil de connectivité ne semblent donc pas vérifiées. Néanmoins, la salinité et la température de l'eau semblent avoir un effet structurant à la fois sur la chimie de l'eau et celle des otolithes, ce qui se traduit probablement par une structuration spatiale entre habitats contrastés le long d'un gradient terre-mer. Cette structuration semble être différente selon que l'on analyse une espèce en particulier ou un signal moyen pour plusieurs espèces combinées, en liaison probable avec des taux d'accumulation des éléments et une écologie différente entre les espèces (effet intégrateur du multi-spécifique). Cependant, le respect des hypothèses de la microchimie des otolithes n'est pas nécessaire pour effectivement utiliser l'outil. Pour cela, il suffit de montrer que la chimie des otolithes permet de discriminer des habitats, quelles qu'en soient les causes. Dans la partie suivante, nous quantifions par random forest le pouvoir de discrimination des habitats par microchimie des otolithes, et donc l'utilité de l'outil pour étudier la connectivité en Nouvelle-Calédonie. Nous évaluons également les différences de pouvoir discriminant entre chimie de l'environnement et des otolithes afin de mieux comprendre les limites de l'outil.

3.2. Détermination du pouvoir discriminant de la microchimie

3.2.1. Environnement

A l'échelle globale de l'île, les analyses de random forest indiquent que la chimie de l'eau permet de classer correctement les mangroves et récifs barrières internes dans 95% des 11

sites échantillonnés autour de la grande terre sur la base de 3 éléments, le Mg, Mn et Zn (Tableau 19). Les 11 mangroves étudiées peuvent être classifiées correctement dans 63% des cas avec le Cr, Mg, Mn et Zn. Il est probable qu'une analyse plus approfondie avec plus d'échantillons et intégrant le type de mangrove permettrait de mieux faire. Par contre, les récifs barrières internes (22% classification correcte), et les stations de différents habitats (39% classification correcte) ne peuvent pas être discriminés à cette échelle spatiale.

A l'échelle régionale des 4 sites ateliers, il est possible de discriminer très correctement (74% de classification correcte) les 4 types d'habitat (mangrove, récifs frangeants, récifs intermédiaires, récifs barrières) à partir de 5 éléments mesurés dans l'eau (Mg, Mn, Rb, Sn, Sr). A cette échelle, il est possible de discriminer les mangroves avec 86% de classification correcte à partir du Cr, Mg et Th. Il n'est pas possible néanmoins de discriminer les habitats récifaux entre sites, ni les stations.

A l'échelle locale d'un site, il est généralement possible de discriminer très correctement les 4 habitats : 79% de classification correcte à Gatope, 71% à St Vincent, 67% à Ouano. Seul Prony ne permet pas cela. Néanmoins, il est probable qu'un regroupement des habitats suivant un gradient côte large (en regroupant frangeants et intermédiaires par exemple), permettrait d'augmenter ces %.

Ces résultats montrent que d'une manière générale, la chimie de l'eau est relativement bien structurée entre :

- habitats contrastés (mangrove vs barrière) à l'échelle globale de l'île
- mangroves à l'échelle globale de l'île
- habitats à l'échelle régionale des 4 sites ateliers
- mangroves à l'échelle régionale des 4 sites ateliers
- habitats à l'échelle locale d'un site.

Tableau 19 : Résultats des analyses de random forest pour l'eau. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification).

Echelle	comparaison	% classif	elements
Globale	entre habitats M et RB	95	Mg Mn Zn
Globale	entre sites M	63	Cr Mg Mn Zn
Globale	entre sites RB	22	Pb
Globale	entre stations M et RB	39	B Cr Mn Pb Zn
Régionale	entre habitats M, RF, RI, RB	74	Mg Mn Rb Sn Sr
Régionale	entre sites M	86	Cr Mg Th
Régionale	entre sites RF	33	Th
Régionale	entre sites RI	50	Zn
Régionale	entre sites RB	35	Ba Pb
Régionale	entre stations M, RF, RI, RB	42	Mn Th
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Gatope	79	Ba Cr Sn Zn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Ouano	67	B Mg Mn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Prony	50	Ba Mn U
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à St Vincent	71	Mn Pb

La chimie des sédiments est moins structurée que celle de l'eau (Tableau 20). A l'échelle globale de l'île, la chimie des sédiments permet de classier correctement 76% des mangroves et récifs barrières avec le B, Mg et Sr. A l'échelle régionale des 4 sites atelier, le Pb dans les sédiments permet de discriminer correctement 75% des récifs intermédiaires. A l'échelle locale des sites, la teneur en Cr à Ouano permet de discriminer les 4 habitats à 88%, et le Zn 63% à Gatope (Tableau 20).

Tableau 20 : Résultats des analyses de random forest pour les sédiments. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification); en gras les % >60% (bonne classification).

Echelle	comparaison	% classif	elements
Globale	entre habitats M et RB	76	B Mg Sr
Globale	entre sites M	23	Pb
Globale	entre sites RB	30	Cr Sr
Globale	entre stations M et RB	12	Mg Sr
Régionale	entre habitats M, RF, RI, RB	42	Mg Mn Pb Sn
Régionale	entre sites M	25	Cr
Régionale	entre sites RF	50	Pb
Régionale	entre sites RI	75	Pb
Régionale	entre sites RB	57	B Cr Sr
Régionale	entre stations M, RF, RI, RB	16	Pb
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Gatope	63	Zn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Ouano	88	Cr
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Prony	50	Pb U
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à St Vincent	43	B

3.2.2. Otolithes

Suffisamment d'individus ont été collectés dans suffisamment de sites et d'habitats pour permettre une évaluation de l'outil microchimie des otolithes pour 8 espèces de poisson : *L. fulviflamma* (Lutjanidae), *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae), *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae), *Chaetodon lunulatus* (Chaetodontidae), *Siganus lineatus* (Siganidae), *Gerres oyena* (Gerreidae), *Scolopsis bilineata* (Nemipteridae), *Gnathodentex aureolineatus* (Lethrinidae).

Chez *Lutjanus fulviflamma*, il est possible de discriminer les mangroves et récifs barrières à l'échelle globale de l'île avec 96% de classification correcte à partir du B, Cr, Mn, Pb, Rb, Sn, Th et U (Tableau 21). Les mangroves des 11 sites peuvent également être discriminées avec un taux de réussite de 65%, probablement améliorable avec plus d'échantillons et en intégrant le type de mangrove dans les analyses.

A l'échelle régionale des 4 sites atelier, la chimie des otolithes permet de classier correctement 67% des *L. fulviflamma* dans les 4 habitats étudiés, 100% dans la bonne mangrove et 63% dans le bon récif frangeant.

A l'échelle locale, il est possible de classier correctement 73 à 78% des *L. fulviflamma* dans le bon habitat pour 3 sites sur 4. Seul Ouano montre un mauvais % de classification.

Tableau 21 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de *L. fulviflamma*. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification).

Echelle	comparaison	% classif	elements
Globale	entre habitats M et RB	96	B Cr Mn Pb Rb Sn Th U
Globale	entre sites M	65	B Ba Mn Pb Sn Zn
Globale	entre sites RB	29	Ba Cr Sn U Zn
Globale	entre stations M et RB	28	B Ba Mn Sn Zn
Régionale	entre habitats M, RF, RI, RB	67	Cr Mg Mn Pb Rb Sr
Régionale	entre sites M	100	Ba Cr Mg Pb Rb Sn Zn
Régionale	entre sites RF	63	B Mg Mn Pb Rb Sn)
Régionale	entre sites RI	54	Ba Mg Mn Sr U
Régionale	entre sites RB	48	Cr Mn Pb Sn U Zn
Régionale	entre stations M, RF, RI, RB	33	B Ba Cr Mn Rb Sn U Zn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Gatope	74	Ba Cr Mg Mn U Zn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Ouano	43	Ba Mg Sr
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Prony	78	B Ba Mg Mn Pb Sn
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à St Vincent	73	B Cr Mn Pb Rb U

Les résultats pour les autres espèces sont donnés sous format condensé (sans les éléments discriminants) dans le Tableau 22.

A l'échelle globale de l'île, la discrimination des mangroves et récifs barrières internes n'a pu être tentée que pour *L. fulviflamma* avec d'excellents résultats (96% classification correcte). Pour 3 espèces, dont deux de mangroves (*Siganus lineatus* et *Gerres oyena*) et une récifale (*L. fulviflamma*), il a été possible de tenter une discrimination des 11 mangroves échantillonnées autour de la grande terre, et nous trouvons un taux de classification correct (63-67% en fonction des espèces), probablement améliorable avec plus de données.

A l'échelle régionale des 4 sites ateliers, la discrimination des 4 habitats a pu être tentée pour 4 espèces récifales (*L. fulviflamma*, *D. aruanus*, *C. striatus* et *C. lunulatus*), avec à chaque fois de bon résultats (64-71% de classification correcte). La discrimination des mangroves des 4 sites ateliers a été tentée pour 3 espèces dont 2 de mangroves avec d'excellents résultats (83-100% de classification correcte). La classification des récifs frangeants a pu être tentée pour 5 espèces récifales, avec des bons résultats pour 4 espèces. Les récifs intermédiaires ont été correctement classés pour 2 espèces sur 4 possibles, les barrières pour 5 espèces sur 6 possibles. A cette échelle régionale, le classement des stations n'a été possible que pour une espèce sur 5 possibles.

A l'échelle locale du site, d'excellents résultats ont été obtenus pour tous les sites (4) et pour toutes les espèces (4) pour lesquelles les analyses ont pu être analysées avec 67 à 96 % de classification correcte des 4 habitats à cette échelle locale, mis à part pour *L. fulviflamma* à Ouano (43%) (Tableau 22).

Tableau 22 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de 8 espèces de poisson pour lesquelles suffisamment d'individus ont été collectés pour tenter des analyses au niveau mono-spécifique. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés à chaque échelle spatiale pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification). *L. fulvi* : *L. fulviflamma* (Lutjanidae) ; *D. aru* : *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae) ; *C. stria* : *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae) ; *C. lunu* : *Chaetodon lunulatus* (Chaetodontidae) ; *S. line* : *Siganus lineatus* (Siganidae) ; *G. oye* : *Gerres oyena* (Gerreidae) ; *S. bili* : *Scolopsis bilineata* (Nemipteridae) ; *G. aure* : *Gnathodentex aureolineatus* (Lethrinidae).

Echelle	comparaison	<i>L. fulvi</i>	<i>D. aru</i>	<i>C. stria</i>	<i>C. lunu</i>	<i>S. line</i>	<i>G. oye</i>	<i>S. bili</i>	<i>G. aure</i>
Globale	entre habitats M et RB	96							
Globale	entre sites M	65				63	67		
Globale	entre sites RB	29	41	47	41			37	24
Globale	entre stations M et RB	28							
Régionale	entre habitats M, RF, RI, RB	67	64	71	67				
Régionale	entre sites M	100				84	83		
Régionale	entre sites RF	63	64	71	50			78	
Régionale	entre sites RI	54	67	64	58				
Régionale	entre sites RB	48	60	63	83			100	80
Régionale	entre stations M, RF, RI, RB	33	37	39	38			67	
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Gatope	74	74	79	67				
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Ouano	43	74	83	80				
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à Prony	78	67	96	67				
Locale	entre stations M, RF, RI, RB à St Vincent	73	85	71	80				

Au regard de la difficulté à collecter certaines espèces en nombre suffisant et dans tous les habitats, il nous apparaît essentiel de déterminer si les arbres de classification random forest construits à partir d'un assortiment d'espèces différentes avaient un pouvoir prédictif sur l'habitat d'une espèce donnée. Si tel était le cas, nous pourrions reconstruire l'histoire environnementale d'un individu sans nécessairement avoir échantillonné son espèce.

Les arbres de classification multi-spécifiques peuvent être construits en combinant toutes les espèces pour lesquelles de la donnée est disponible, ou bien par groupe d'espèces (même famille, même régime alimentaire) supposées proches sur le plan écologique, et par conséquent peut être sur le plan microchimique. Une fois construits, il est possible d'utiliser ces forêts d'arbres multi-spécifiques pour prédire l'habitat des individus d'une espèce pour laquelle nous avons suffisamment de données pour une comparaison à partir d'arbres mono-spécifiques. Bien entendu, les espèces testées ne doivent pas rentrer dans la construction des forêts d'arbres multi-spécifiques.

Tableau 23 : Comparaison des % de classification correcte obtenus à partir de forêts d'arbres mono-spécifique et multi-spécifiques dans 63 cas. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification).

Groupement sp	Habitat	Echelle	Espèce	% classification Mono_sp	% classification Multi-sp
Toutes espèces	M	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	100	20
Même régime alimentaire	RB	Régionale	<i>S.bilineata</i>	100	17
Même régime alimentaire	M	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	100	11
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>S.bilineata</i>	100	0
Toutes espèces	3hab	Locale prony	<i>C.striatus</i>	96	46
Toutes espèces	3hab	Locale stvincent	<i>D.aruanus</i>	85	52
Même famille	3hab	Locale stvincent	<i>D.aruanus</i>	85	23
Toutes espèces	M	Régionale	<i>S.lineatus</i>	84	44
Toutes espèces	3hab	Locale ouano	<i>C.striatus</i>	83	48
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>C.lunulatus</i>	83	46
Toutes espèces	M	Régionale	<i>G.oyena</i>	83	25
Même régime alimentaire	M	Régionale	<i>G.oyena</i>	83	0
Toutes espèces	3hab	Locale stvincent	<i>C.lunulatus</i>	80	42
Toutes espèces	3hab	Locale ouano	<i>C.lunulatus</i>	80	22
Même régime alimentaire	RB	Régionale	<i>G.aureolineatus</i>	80	20
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>G.aureolineatus</i>	80	10
Toutes espèces	2hab	Globale	<i>L.fulviflamma</i>	79	79
Même régime alimentaire	2hab	Globale	<i>L.fulviflamma</i>	79	51
Toutes espèces	3hab	Locale gatope	<i>C.striatus</i>	79	32
Même régime alimentaire	4hab	Locale prony	<i>L.fulviflamma</i>	78	26
Toutes espèces	RF	Régionale	<i>S.bilineata</i>	78	22
Toutes espèces	4hab	Locale prony	<i>L.fulviflamma</i>	78	22
Même régime alimentaire	RF	Régionale	<i>S.bilineata</i>	78	0
Toutes espèces	3hab	Locale gatope	<i>D.aruanus</i>	74	41
Même famille	3hab	Locale gatope	<i>D.aruanus</i>	74	31
Toutes espèces	4hab	Locale gatope	<i>L.fulviflamma</i>	74	29
Même régime alimentaire	4hab	Locale gatope	<i>L.fulviflamma</i>	74	29
Même famille	3hab	Locale ouano	<i>D.aruanus</i>	74	24
Toutes espèces	3hab	Locale ouano	<i>D.aruanus</i>	74	17
Même régime alimentaire	4hab	Locale stvincent	<i>L.fulviflamma</i>	73	58
Toutes espèces	4hab	Locale stvincent	<i>L.fulviflamma</i>	73	49
Toutes espèces	3hab	Locale stvincent	<i>C.striatus</i>	71	42
Toutes espèces	RF	Régionale	<i>C.striatus</i>	71	32
Toutes espèces	3hab	Régionale	<i>C.striatus</i>	71	29
Toutes espèces	3hab	Régionale	<i>C.lunulatus</i>	67	52
Toutes espèces	3hab	Locale gatope	<i>C.lunulatus</i>	67	50
Toutes espèces	4hab	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	67	40
Même régime alimentaire	4hab	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	67	39
Toutes espèces	RI	Régionale	<i>D.aruanus</i>	67	38
Même famille	3hab	Locale prony	<i>D.aruanus</i>	67	37
Même famille	RI	Régionale	<i>D.aruanus</i>	67	33
Toutes espèces	3hab	Locale prony	<i>D.aruanus</i>	67	33
Toutes espèces	3hab	Locale prony	<i>C.lunulatus</i>	67	22
Même famille	RF	Régionale	<i>D.aruanus</i>	64	44
Toutes espèces	RI	Régionale	<i>C.striatus</i>	64	39
Même régime alimentaire	RI	Régionale	<i>C.striatus</i>	64	39
Toutes espèces	3hab	Régionale	<i>D.aruanus</i>	64	35
Même famille	3hab	Régionale	<i>D.aruanus</i>	64	32
Toutes espèces	RF	Régionale	<i>D.aruanus</i>	64	31
Même régime alimentaire	RB	Régionale	<i>C.striatus</i>	63	39
Même régime alimentaire	RF	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	63	32
Toutes espèces	RF	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	63	28
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>C.striatus</i>	63	18
Même famille	RB	Régionale	<i>D.aruanus</i>	60	42
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>D.aruanus</i>	60	35
Toutes espèces	RI	Régionale	<i>C.lunulatus</i>	58	17
Toutes espèces	RI	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	54	26
Même régime alimentaire	RI	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	54	23
Toutes espèces	RF	Régionale	<i>C.lunulatus</i>	50	8
Même régime alimentaire	RB	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	48	35
Toutes espèces	RB	Régionale	<i>L.fulviflamma</i>	48	31
Même régime alimentaire	4hab	Locale ouano	<i>L.fulviflamma</i>	43	29
Toutes espèces	4hab	Locale ouano	<i>L.fulviflamma</i>	43	26

Cette approche a été tentée pour 63 cas consignés dans le tableau 23. Malheureusement, dans tous les cas sauf un, les forêts d'arbres multi-spécifiques n'ont aucun pouvoir de prédiction pour une espèce n'ayant pas contribué à la construction de cet arbre. Cela signifie que l'utilisation de la microchimie des otolithes pour étudier la connectivité des poissons nécessite des données et un échantillonnage important pour chaque espèce étudiée.

3.2.3. Synthèse

Dans cette partie, nous avons étudié le pouvoir de discrimination des habitats de la microchimie de l'eau, des sédiments et des otolithes par random forest. Nous trouvons que :

- la chimie de l'eau permet de caractériser les habitats dans de nombreux cas, notamment entre habitats contrastés (mangroves vs barrières), pour un même habitat (mangroves) variable à l'échelle globale de l'île, entre habitats (mangroves, frangeants, intermédiaires, barrières) et entre sites mangroves à l'échelle régionale des 4 sites ateliers, et enfin entre 4 habitats à l'échelle locale des sites
- contrairement à l'eau, la chimie des sédiments est très peu discriminante entre habitats, même si certaines différences existent
- exactement comme pour l'eau mais avec des éléments chimiques sensiblement différents, la chimie des otolithes permet de discriminer correctement les habitats à plusieurs échelles
- pour être utilisable, les forêts d'arbres de classification doivent être construites à partir de données de microchimie des otolithes des espèces étudiées. En aucun cas un arbre construit pour une espèce donnée est utilisable pour une autre espèce, probablement en liaison avec l'écologie et la physiologie différentes des espèces.

Dans la partie suivante, nous utilisons ces résultats pour étudier la connectivité mangrove-récif de l'espèce *Lutjanus fulviflamma*.

3.3. Connectivité mangrove-récif chez *L. fulviflamma* par microchimie

3.3.1. Habitats juvéniles essentiels

Plusieurs espèces de poissons récifaux utilisent les habitats adjacents aux récifs coralliens comme zone de nurserie. Par exemple, il est connu que les juvéniles de la dorade *L. fulviflamma* sont abondants dans les mangroves alors que les adultes sont plutôt abondants dans les récifs. Cette particularité du cycle de vie de plusieurs espèces de poissons coralliens est souvent évoquée dans les Caraïbes pour expliquer la richesse supérieure des récifs proches des mangroves par rapport à ceux distants et/ou déconnectés des mangroves (Nagelkerken et al. 2000; Dorenbosch et al. 2004; Mumby et al. 2004; Lugendo et al. 2007).

Que certaines espèces utilisent les mangroves comme zone de nurserie est un fait connu. Ce qui n'est pas connu aujourd'hui, c'est le degré d'utilisation de cet habitat comme zone de nurserie. Les mangroves sont-elles un habitat juvénile obligatoire par lequel l'ensemble des juvéniles d'une espèce doit transiter, un habitat juvénile essentiel par lequel une majorité des juvéniles d'une espèce transite, ou un habitat juvénile accessoire par lequel seule une minorité

des juvéniles d'une espèce transite ? La réponse à cette question est essentielle en gestion mais aussi en biogéographie puisque le caractère obligatoire d'un habitat juvénile implique l'absence ou la disparition locale de l'espèce là où l'habitat juvénile obligatoire est absent naturellement ou éliminé par les activités anthropiques.

Dans ce paragraphe, nous répondons à cette question pour *L. fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie par microchimie des otolithes.

Pour cela, nous utilisons l'échantillonnage réalisé pour cette espèce pendant 3 années en Nouvelle-Calédonie, dans 2 sites en été 2009, 11 sites en hiver 2010, et 4 sites en hiver 2011 (Tableau 24) afin de construire un classifiant random forest intégrant la variabilité spatio-temporelle de la chimie des otolithes de cette espèce entre différentes mangroves et différents types de récifs (frangeant, intermédiaire et barrière interne).

Tableau 24 : Echantillonnage de *Lutjanus fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie

Objectif	Année	Site	Habitat	Analyses ICPMS	n otolithes
Signature microchimique	2009	2	M and Reefs	Ablation on surface	20
	2010	11	M and Reefs	Ablation on surface	114
	2011	4	M and Reefs	Ablation on surface	62
Mouvements poissons	2010	4	Barrier Reef	Transects	20

Ce classifiant random forest indique un % de classification correcte de 96% entre mangroves et récifs pour cette espèce (Tableau 25). La matrice de confusion indique que 99% des individus collectés dans les récifs sont correctement classifiés dans les récifs et 84% des individus collectés en mangrove sont correctement classifiés en mangrove. De fait, 16% des individus collectés en mangrove sont incorrectement classifiés en récifs, du fait de la proximité sur le plan chimique de certains récifs frangeants avec des mangroves non-estuariennes.

Tableau 25 : Analyse de random forest mangrove versus récifs pour *Lutjanus fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie.

Habitats	% classif	n Mangrove	n Récifs	n poissons
Mangrove	84	31	6	37
Récifs	99	2	157	159
% classif	96			196

Parmi les 37 poissons juvéniles collectés dans les mangroves, le plus petit avait un otolithe de rayon 1260µm. Lorsque le classifiant mangroves/récifs (Tableau 25) est appliqué à la partie juvénile (rayon otolithe < 1260 µm) des transects otolithes des 20 adultes collectés dans les récifs barrières des 4 sites ateliers (5 adultes par site), alors la forêt d'arbres indique que 100% des *L. fulviflamma* adultes collectés dans les récifs barrières ont effectué leur phase juvénile dans les mangroves (Fig. 15). Un seul individu a utilisé la mangrove durant une courte période (140µm soit quelques mois). Cet individu a été collecté à Prony. Pour 90% des poissons, l'habitat juvénile mangrove a été utilisé pendant au moins une année (1260 µm de

rayon otolithe). Il est important de noter que cette estimation est conservative. En effet, le classifiant ne fait quasiment pas d'erreur lorsqu'il prédit une mangrove (99% de classification correcte des poissons collectés dans les récifs) mais peut se tromper lorsqu'il prédit un récif (16% des poissons collectés en mangrove sont incorrectement classifiés en récif). Par conséquent, l'utilisation des mangroves par les juvéniles de *L. fulviflamma* est probablement plus important que nos estimations le prédisent. Il est parfaitement possible que l'individu de Prony ait été incorrectement classifié en récif alors qu'il vivait dans les mangroves de la baie de Prony.

Ce résultat suggère que la mangrove est un habitat juvénile obligatoire pour l'espèce *L. fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie. Néanmoins, la faible taille de l'échantillon (20 poissons) requiert de la prudence, et une validation de ce résultat est nécessaire (voir paragraphe 3.3.3).

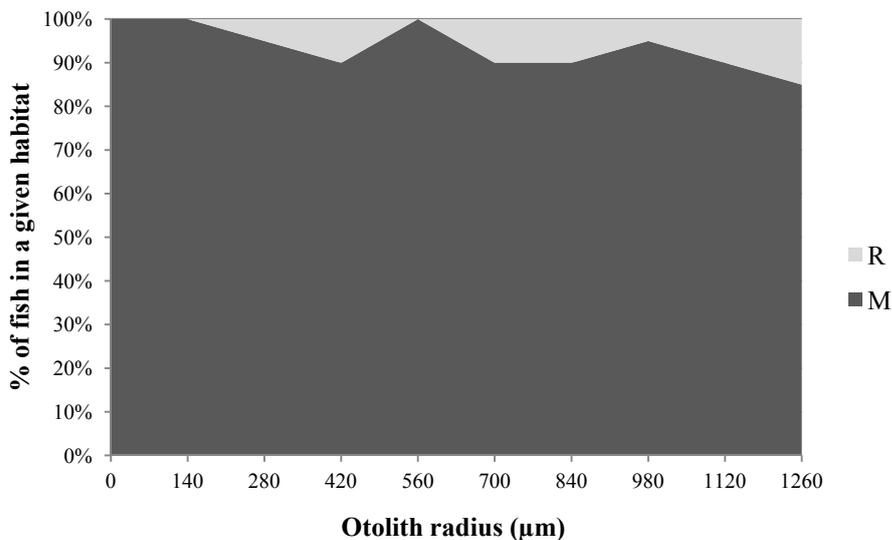


Figure 15 : Prédiction par random forest de l'habitat juvénile de 20 adultes *L. fulviflamma* collectés dans les récifs barrières des 4 sites ateliers. Les analyses d'âge indiquent qu'un rayon d'otolithe de 1260 µm correspond à un âge d'environ 1 an. R : Récif ; M : Mangrove.

3.3.2. Patterns de connectivité entre habitats

Etant démontré que l'habitat mangrove est probablement un habitat juvénile obligatoire pour les *L. fulviflamma* de Nouvelle-Calédonie, se pose la question de son utilisation par les adultes. Le passage de la mangrove au récif barrière se fait-il brusquement ou bien par aller-retour successifs entre les deux habitats via des habitats intermédiaires ? Les adultes ont-ils besoin de retourner régulièrement en mangrove ou bien une fois leur phase juvénile réalisée, ils deviennent récifaux à 100% et n'ont nullement besoin de la proximité d'une mangrove pour survivre ? Ces poissons sont-ils plutôt sédentaires dans un type de récif (e.g. barrière) ou utilisent-ils plusieurs types de récifs durant leur phase adulte ? La réponse à ces questions a des implications en termes de design de réseau d'AMP, même si une distance importante existe entre la connaissance fondamentale de la connectivité chez une espèce et la création d'un réseau d'AMP par les gestionnaires.

Pour répondre à ces questions chez *L. fulviflamma*, nous utilisons le même échantillonnage que précédemment (Tableau 24). Dans un premier temps, le classifiant mangroves/récifs (Tableau 25) est utilisé pour prédire l'habitat mangrove ou récifal des 20 adultes pour lesquels un transect d'otolithe a été analysé. Dans un second temps, nous utilisons un autre classifiant random forest pour déterminer quel type de récif est utilisé.

Les analyses précédentes sur le pouvoir discriminant de la chimie des otolithes (Tableau 21) indiquent qu'il est possible de discriminer les différents types de récif à l'échelle locale des sites, mais que cela ne fonctionne pas dans tous les sites, avec un mauvais % de classification correcte (43%) à Ouano notamment. Pour améliorer cela, nous avons recherché la combinaison optimale des différents types de récifs pour chacun des sites. Nous trouvons qu'il est possible d'augmenter substantiellement (70-94% de classification correcte) le pouvoir discriminant des random forest en classifiant les récifs en deux types : les récifs côtiers à influence terrigène et les récifs à influence océanique (Tableau 26). Pour trois sites (Gatope, Ouano et Prony) les récifs à influence océanique combinent les récifs intermédiaires et barrières internes. Pour St Vincent, les récifs intermédiaires sont combinés aux récifs frangeants pour former la classe récif côtier.

Tableau 26 : Analyse de random forest mangrove versus récifs pour *Lutjanus fulviflamma* dans les 4 sites ateliers en Nouvelle-Calédonie.

Site	Habitat	Elements	% classif	% classif côtier	% classif océanique
Gatope	RF vs RI/RB	Cr, Mn, Sn	94	80	100
Ouano	RF vs RI/RB	Sn U	70	50	80
Prony	RF vs RI/RB	Ba Mg Mn Sr	85	80	88
StVincent	RF/RI vs RB	Cr Mg Pb Rb Sr Zn	75	78	72

Ce nouveau classifiant « type de récif » (Tableau 26) est appliqué à l'ensemble des points sur les transects otolithes qui avaient été prédits « récifs » par le classifiant « mangrove/récif » (Tableau 25).

Les résultats indiquent trois patterns principaux de connectivité entre les mangroves et les différents types de récif chez *L. fulviflamma* (Figure 16).

Le pattern 1 a été observé pour 4 individus sur les 20 analysés (20%), deux collectés à Gatope et deux à Prony. Suivant ce pattern, *L. fulviflamma* effectue une phase juvénile en mangrove pendant environ 2 ans (15 cm de longueur à la fourche) et rejoint directement les récifs barrières internes ou il séjourne pour le restant de sa vie (11 ans et 26 cm pour l'individu de la Figure 16 avec ce pattern).

Le pattern 2 a été observé pour 5 poissons (25%), dont 1 de Gatope, 2 de Prony et 2 de St Vincent). Suivant ce pattern, les *L. fulviflamma* réalisent leur phase juvénile en mangrove pendant 1-2 ans, puis quittent la mangrove sans jamais y retourner, afin de séjourner sur des récifs océaniques mais aussi côtiers au cours de leur vie adulte (15 ans et 29 cm pour l'individu avec ce pattern sur la Fig. 16).

Le pattern 3 a été observé pour 11 individus (55%) dont 2 de Gatope et 3 dans chacun des autres sites. Il consiste en une phase juvénile en mangrove variable de quelques mois à 1-2

ans, suivie d'une utilisation aléatoire de l'ensemble des habitats récifaux et mangrove au cours de la phase adulte (11 ans et 27 cm pour l'individu de la Fig. 16).

Ces résultats montrent que l'habitat récifal à influence océanique est l'habitat principal des *L. fulviflamma* adultes, que cette espèce peut survivre à l'âge adulte en n'utilisant que cet habitat, mais que la plupart des individus transitent aléatoirement entre plusieurs types de récifs, mais peuvent également retourner dans les mangroves, même si cela n'est pas très fréquent.

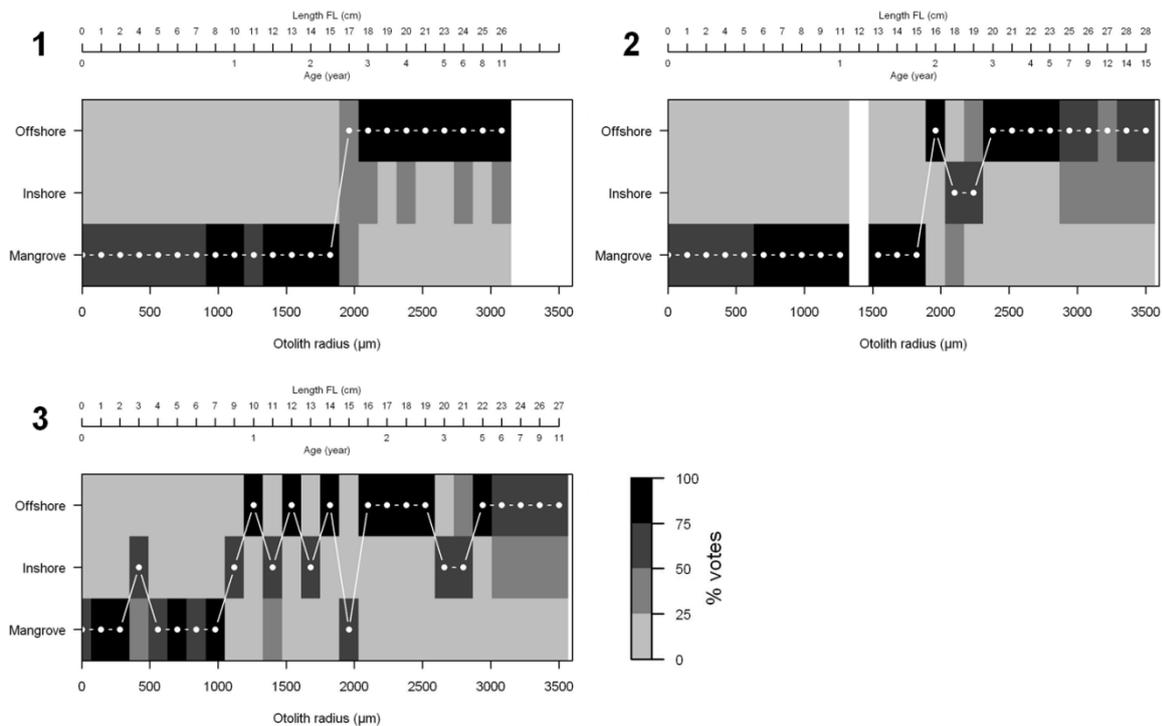


Figure 16 : Les trois patterns principaux de connectivité entre les mangroves, les récifs côtiers et les récifs océaniques chez *L. fulviflamma* en Nouvelle-Calédonie. Les % de vote indiquent la probabilité de la classification par random forest.

3.3.3. Implications pour la distribution et l'abondance de l'espèce

Les résultats de l'analyse de la microchimie des otolithes suggèrent que la mangrove est un habitat juvénile obligatoire, ce qui prédit que l'espèce est absente des îles et récifs inatteignables par les adultes. La microchimie suggère également que les adultes peuvent survivre sans mangrove, ce qui prédit qu'ils peuvent se trouver dans des récifs très éloignés de leur zone de nurserie (mais pas déconnectés). Finalement, la microchimie suggère que non seulement les juvéniles dépendent obligatoirement des mangroves, mais la majorité des adultes y retournent de temps en temps, ce qui suggère que l'abondance et la biomasse de cette espèce est liée à l'étendue des mangroves.

Ces prédictions peuvent être testées par comptage en plongée et en utilisant le SIG mangrove disponible pour la Nouvelle-Calédonie (Zonoco-2006).

Notre groupe dispose d'une base de données de 2864 plongées UVC sur l'ensemble des lagons de la grande terre et pour plusieurs récifs et îles éloignées de la Nouvelle-Calédonie (Fig. 17 ; comptages IRD, UNC, CPS combinant les plongées réalisées par M. Kulbicki, L. Vigliola et L. Wantiez).

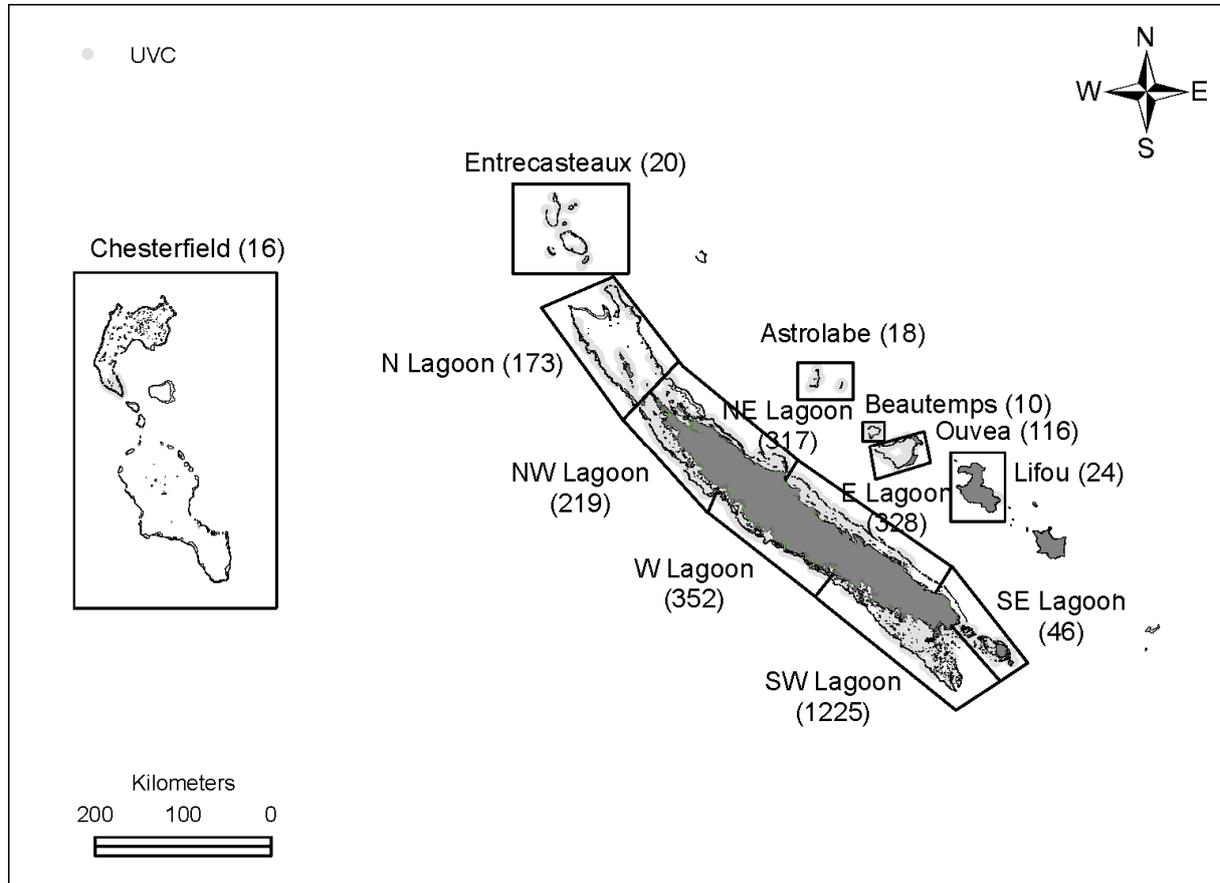


Figure 17 : Comptages en plongée des *L. fulviflamma* dans les différents lagons de la grande terre et différentes îles et récifs éloignés de la Nouvelle-Calédonie. Les chiffres indiquent le nombre de plongées par unité spatiale, pour un total de 2864 plongées UVC (bases IRD, UNC, CPS combinées).

Les comptages en plongée indiquent la présence de *L. fulviflamma* partout en Nouvelle-Calédonie sauf à Chesterfield, Entrecasteaux, Astrolabe, Beautemps, Beauprés et Lifou. Les mangroves sont également absentes de ces sites mais présentes partout ailleurs. Remarquablement, les *L. fulviflamma* sont présents à Ouvéa, un atoll avec mangrove, mais absent dans l'atoll proche de Beautemps Beauprés, qui ne possède pas de mangrove.

Un test de χ^2 fortement significatif ($P < 0.0003$) entre la présence des mangroves et la présence de *L. fulviflamma* formalise le caractère obligatoire de cet habitat juvénile pour la survie de l'espèce.

Des corrélations fortes et significatives entre la surface des mangroves standardisée par le linéaire côtier et la densité (R de Spearman = 0.92, $P < 0.000001$), la biomasse (R de Spearman = 0.86, $P < 0.0001$) et la fréquence d'occurrence (R de Spearman = 0.80, $P <$

0.0009) des dorades indiquent le lien direct entre l'abondance de l'espèce et l'étendue des mangroves (Fig. 18).

La présence des *L. fulviflamma* dans des récifs très éloignés mais pas déconnectés des mangroves, comme par exemple dans la Corne Nord, juste avant le grand passage, confirme également les résultats de la microchimie, avec la capacité de cette espèce de survivre dans des récifs barrières sans retour dans les mangroves et habitats côtiers à l'âge adulte.

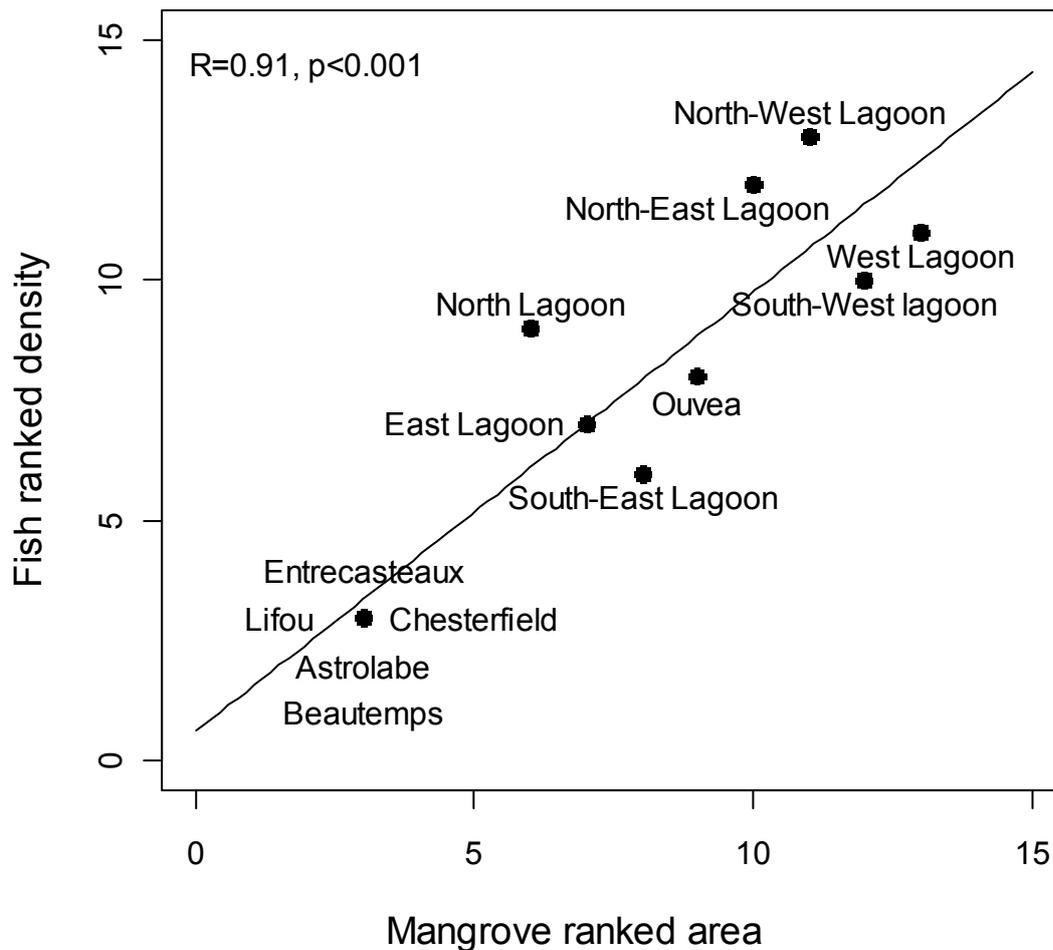


Figure 18 : Corrélation de Spearman entre le rang de la surface des mangroves standardisé par le linéaire côtier et le rang de l'abondance des *L. fulviflamma* pour les différents lagons de la grande terre et certaines îles et récifs éloignés de Nouvelle-Calédonie. L'absence des dorades et des mangroves à Entrecasteaux, Lifou, Chesterfield, Astrolabe et Beautemps (5 sites), leur confère un rang moyen de $(1+2+3+4+5)/5=3$.

3.3.4.Synthèse

Dans cette partie nous avons appliqué l'outil de microchimie des otolithes à l'espèce *Lutjanus fulviflamma* afin d'étudier la connectivité de cette espèce entre les mangroves et les différents récifs du lagon. Nous avons trouvé que :

- les signatures microchimiques des habitats peuvent être considérablement améliorées en intégrant les caractéristiques locale des sites, et notamment l'influence terrigène plus ou moins forte subie par les récifs frangeants et intermédiaires
- les mangroves sont un habitat juvénile obligatoire pour cette espèce en Nouvelle-Calédonie
- après avoir quitté les mangroves à la fin de leur phase juvénile, les adultes de l'espèce vivent préférentiellement dans les récifs barrières mais une majorité d'individus fréquente plusieurs types de récifs et retourne régulièrement en mangrove
- au stade adulte, l'espèce peut survivre uniquement dans les récifs barrières, même si cela n'est le cas que pour une minorité d'individus
- l'espèce est absente des îles et récifs éloignés déconnectés des mangroves
- l'espèce est présente dans les récifs éloignés mais connectés à des mangroves.

Après une application de l'outil microchimie pour une meilleure connaissance de l'écologie de *L. fulviflamma* avec application possible à terme en design d'AMP, la partie suivante s'intéressera à la potentialité de l'outil comme indicateur d'impact minier.

3.4. Potentiel de la microchimie comme indicateur d'impact minier

Dans cette partie, nous avons considéré les sites de Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet et Prony comme sites potentiellement pollués de manière substantielle par l'activité minière ou urbaine et industrielle, et les sites de St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne et Paama comme sites contrôles avec un impact anthropique proche de zéro (Tableau 1).

3.4.1. Eau

La composition chimique moyenne des eaux dans les sites sous influence minière/industrielle (potentiellement impactés) et les sites contrôles est donnée dans le tableau 27. Aucune différence évidente n'est apparente entre les deux groupes.

Tableau 27 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne de l'eau dans les sites miniers/industriels potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
Controle	3.56E-03	3.71E-06	1.89E-06	9.91E-01	1.36E-06	1.46E-06	7.59E-05	1.71E-08	5.38E-03	1.48E-09	1.81E-06	3.26E-05
Impact	3.63E-03	3.05E-06	2.48E-06	9.91E-01	2.34E-06	5.43E-07	7.69E-05	1.25E-08	5.42E-03	2.27E-09	1.81E-06	1.91E-05

Une ACP confirme cela avec un chevauchement quasi complet des sites potentiellement impactés et contrôles (Fig. 19) dans l'espace des éléments chimiques. Une PERMANOVA

formalise la non-significativité du facteur « impact potentiel » sur la chimie de l'eau ($P > 0.169$, Tableau 28) dans nos échantillons.

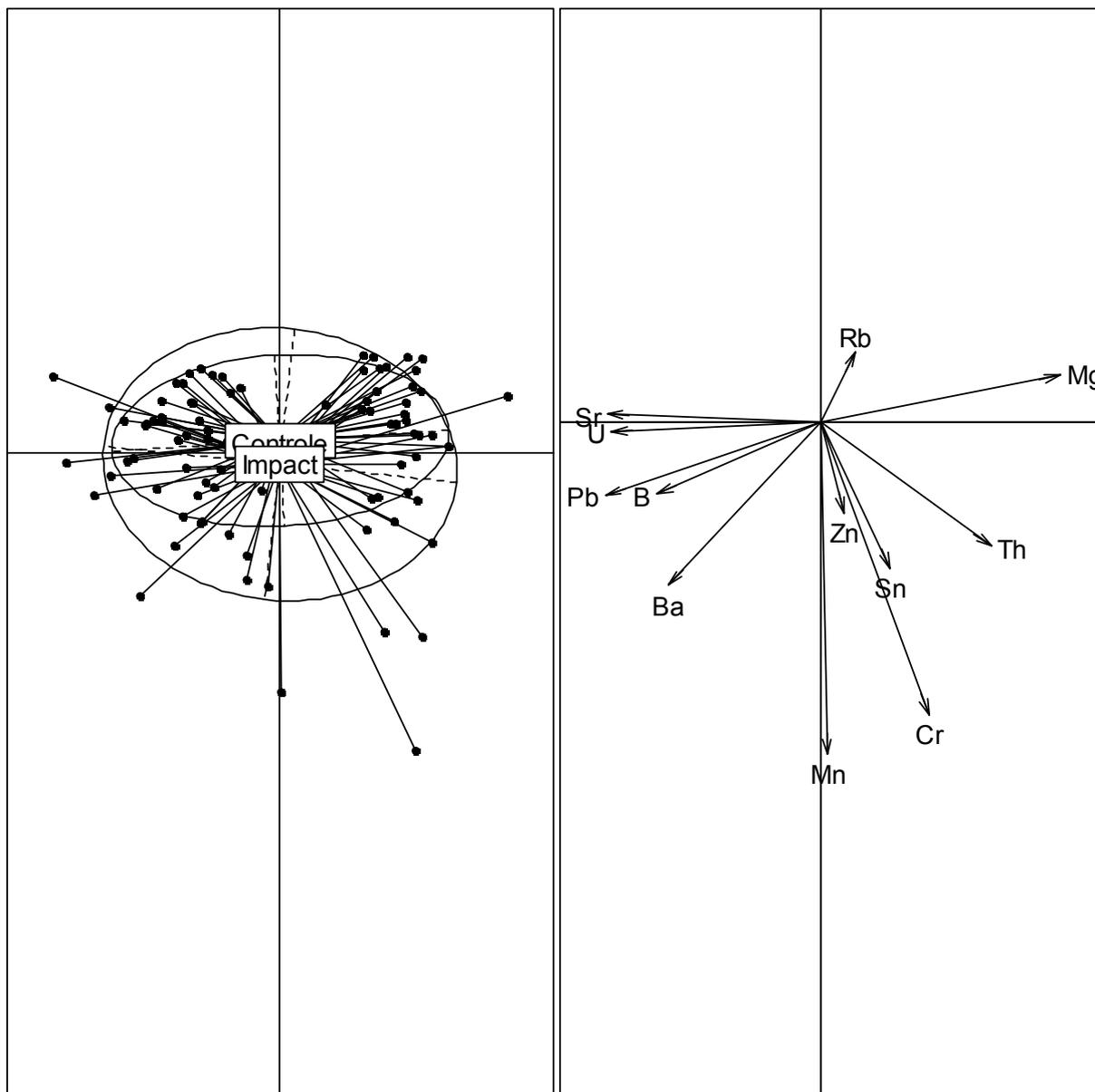


Figure 19 : Analyse en composante principale de la chimie de l'eau dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 28 : PERMANOVA de la chimie de l'eau dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Impact	1	0.00003343	3.34E-05	1.5853	0.01831	0.169
Residuals	85	0.00179254	2.11E-05		0.98169	
Total	86	0.00182597				1

3.4.2. Sédiments

Des résultats similaires sont obtenus pour la chimie des sédiments, avec des valeurs moyennes très proches dans les sites potentiellement impactés et contrôles (Tableau 29), un chevauchement quasi complet des deux groupes dans l'espace multivarié d'une ACP (Fig. 20) et une PERMANOVA non-significative ($P > 0.513$, Tableau 30).

Tableau 29 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
Controle	2.57E-03	1.96E-03	4.31E-02	8.75E-01	8.24E-03	7.73E-05	3.69E-04	1.13E-05	6.77E-02	3.23E-05	5.59E-05	8.20E-04
Impact	3.52E-03	2.13E-03	1.11E-02	8.91E-01	6.55E-03	1.26E-04	5.09E-04	1.87E-05	8.41E-02	3.35E-05	7.53E-05	1.08E-03

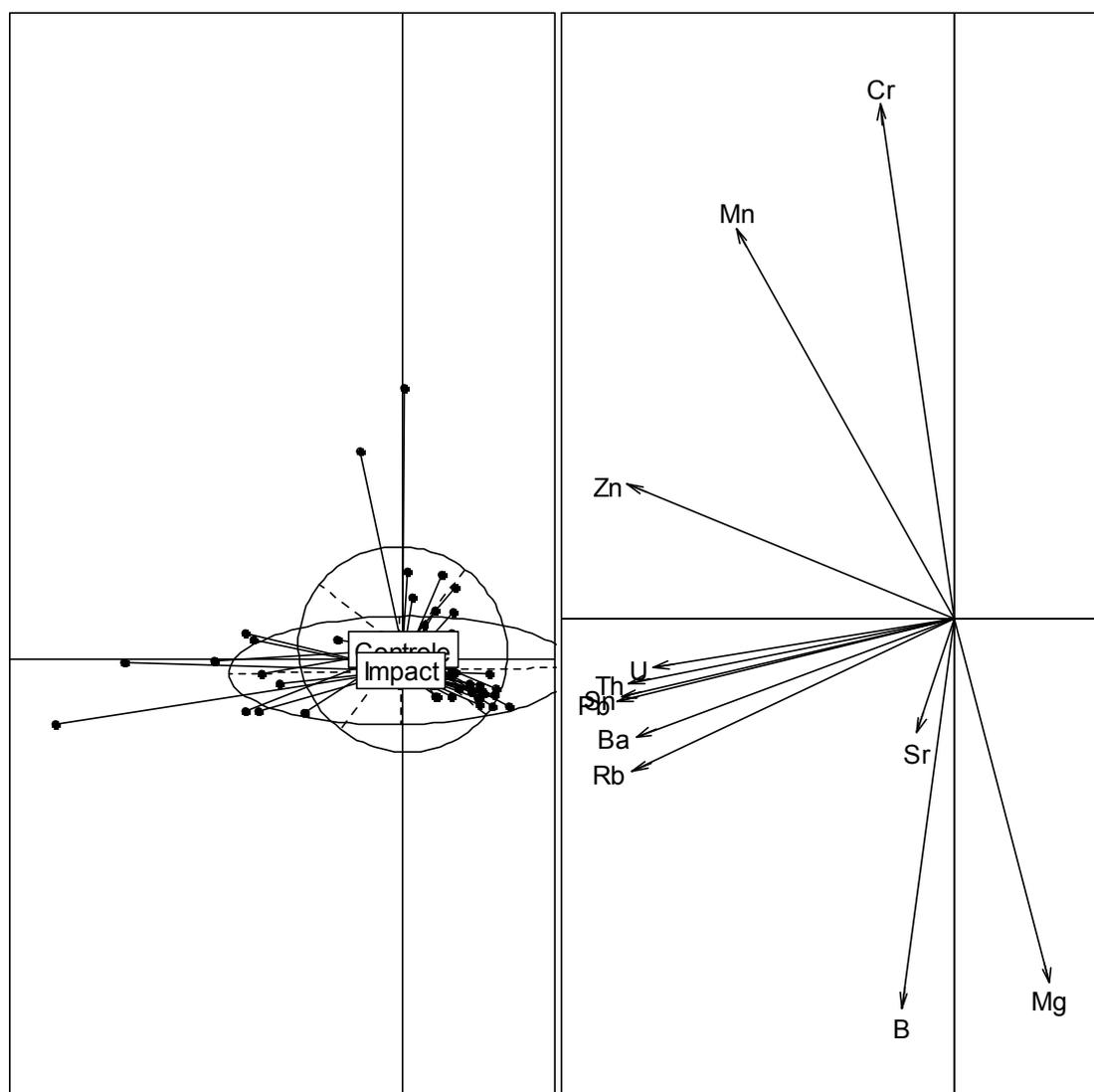


Figure 20 : Analyse en composante principale de la chimie des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 30 : PERMANOVA de la chimie des sédiments dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Impact	1	0.0509	0.050878	0.79651	0.01402	0.513
Residuals	56	3.5771	0.063876		0.98598	
Total	57	3.628				1

3.4.3. Otolithes

Les mêmes résultats sont obtenus avec les otolithes combinés de 53 espèces : aucune tendance dans les compositions moyennes (Tableau 31), un chevauchement dans l'ACP (Fig. 21) et une PERMANOVA non-significative ($P > 0.392$, Tableau 32).

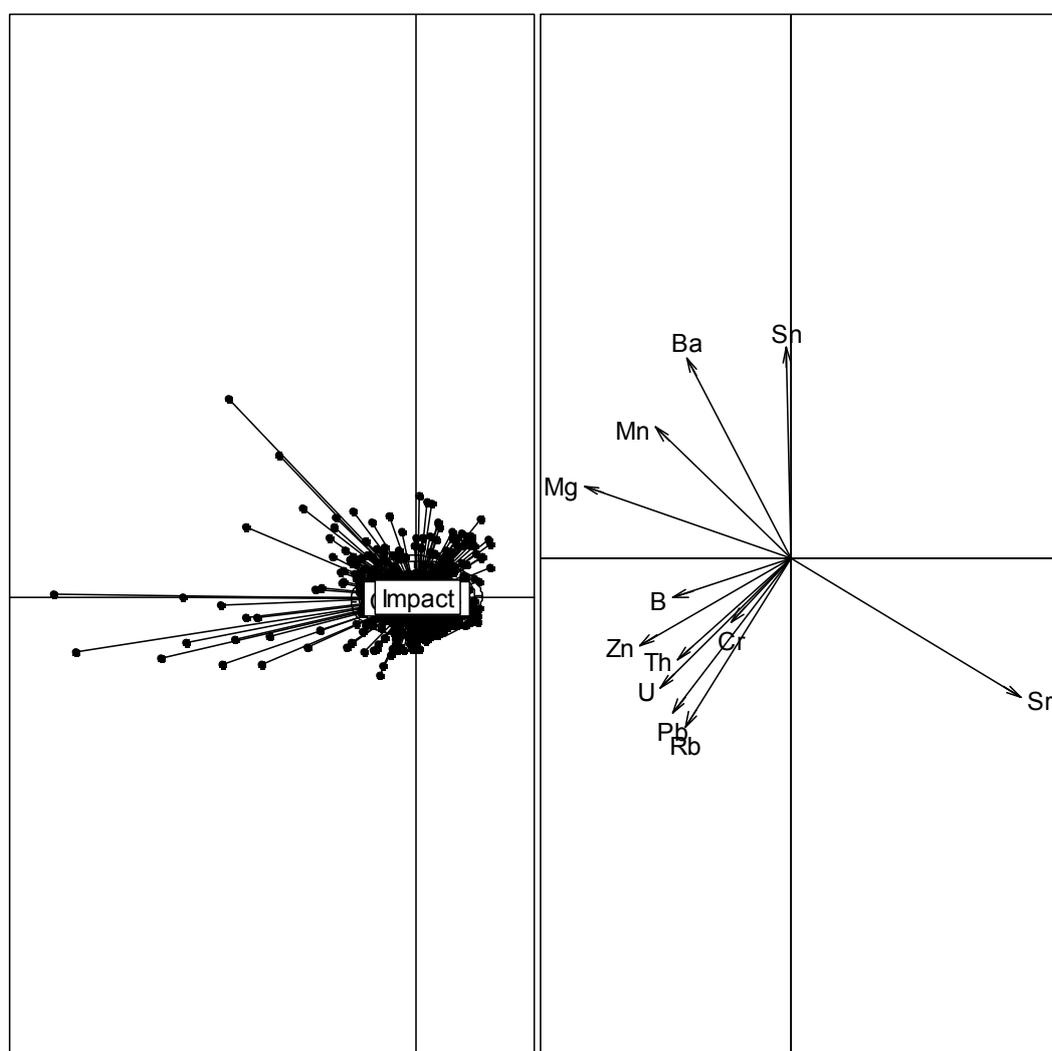


Figure 21 : Analyse en composante principale de la chimie des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Tableau 31 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne dans les otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
Controle	1.73E-03	1.63E-03	5.46E-05	6.08E-03	1.76E-04	2.73E-06	1.94E-05	2.15E-05	9.90E-01	3.22E-08	1.64E-07	1.19E-04
Impact	1.67E-03	2.16E-03	5.61E-05	3.79E-03	1.73E-04	3.45E-06	1.90E-05	2.03E-05	9.92E-01	1.66E-08	7.54E-08	1.67E-04

Tableau 32 : PERMANOVA de la chimie des otolithes de 53 espèces de poissons collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Impact	1	0.0047	0.0046689	0.92478	0.00111	0.392
Residuals	833	4.2055	0.0050486		0.99889	
Total	834	4.2102			1	

Pour chacune des 10 espèces pour lesquelles nous avons suffisamment de données pour réaliser des tests de comparaison de sites potentiellement impactés et contrôles, le même résultat est obtenu avec une incapacité de l'outil à détecter un impact. Un exemple est donné avec *L. fulviflamma* (Tableaux 33 et 34, Fig. 22).

Tableau 33 : Composition chimique (% des 12 éléments) moyenne dans les otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	B	Ba	Cr	Mg	Mn	Pb	Rb	Sn	Sr	Th	U	Zn
Controle	1.60E-03	9.48E-04	9.30E-05	4.26E-03	7.63E-05	1.48E-06	2.02E-05	1.82E-05	9.93E-01	2.65E-08	9.98E-08	1.33E-04
Impact	1.52E-03	6.85E-04	9.70E-05	3.99E-03	4.92E-05	4.20E-06	2.30E-05	1.53E-05	9.94E-01	2.01E-08	1.24E-07	9.69E-05

Tableau 34 : PERMANOVA de la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Facteur	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Impact	1	0.000948	0.00094787	1.4079	0.0116	0.221
Residuals	120	0.080789	0.00067324		0.9884	
Total	121	0.081737			1	

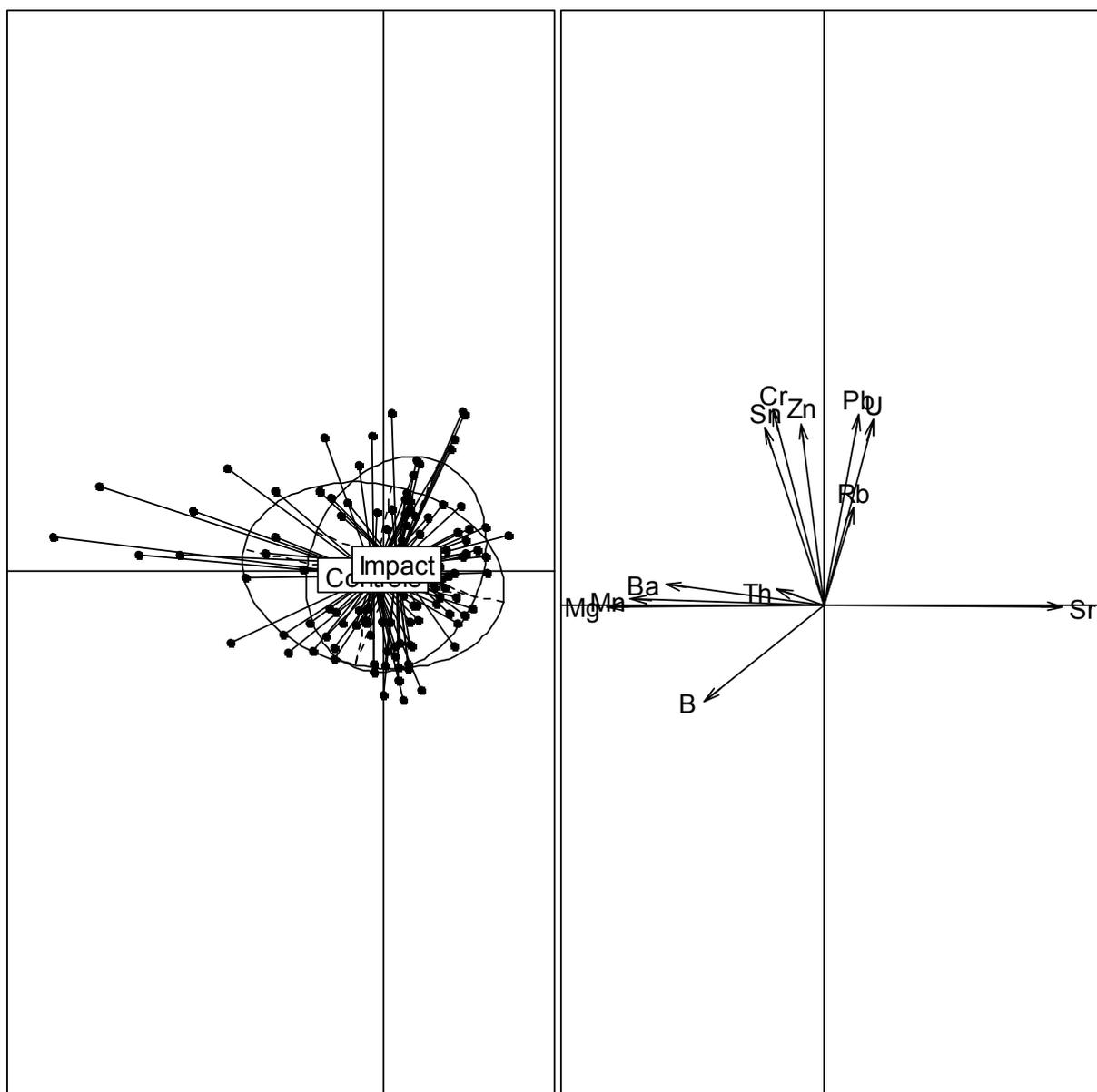


Figure 22 : Analyse en composante principale de la chimie des otolithes de *L. fulviflamma* collectés dans les sites potentiellement impactés (Nouméa, Népoui, Gatope, Port-Bouquet, Prony) et contrôles (St Vincent, Ouano, Golonne, Amos, Tchambouenne, Paama) autour de la grande terre.

Néanmoins, et malgré les PERMANOVA non-significatives, les random forest sont capables de discriminer les sites potentiellement impactés et contrôles avec un % de classification correcte supérieur à 60% pour toutes les espèces et supérieur à 70% pour 8 espèces sur 10 (Tableau 35).

La meilleure classification est obtenue pour le picot rayé *Siganus lineatus* avec 80 % de classification correcte.

Des random forest très discriminantes ne sont pas opposées à des PERMANOVA non significatives. En effet, un taux de classification correct de 80% correspond toujours à une erreur de 20%, et par conséquent une variation suffisamment importante pour rendre une

différence indétectable par PERMANOVA. Les deux techniques ne sont simplement pas comparables.

Tableau 35 : Résultats des analyses de random forest pour les otolithes de 10 espèces de poisson pour lesquelles suffisamment d'individus ont été collectés pour tenter des analyses de discrimination des sites potentiellement impactés et contrôles au niveau mono-spécifique. Le % de classification correcte et les éléments discriminants sont donnés pour le meilleur modèle random forest parmi les centaines de combinaisons possibles testées. En gras italique, les % >70% (excellente classification) ; en gras les % >60% (bonne classification).

Species	% classif	Elements
Toutes sp	61	B Ba Cr Mn Pb Rb Sn Sr Th
<i>Lutjanus fulviflamma</i>	65	B Ba Mn Rb Sr Zn
<i>Dascyllus aruanus</i>	65	Sn Th
<i>Ctenochaetus striatus</i>	74	B Ba Pb Th U
<i>Chaetodon lunulatus</i>	74	Ba Mg Mn Rb Sn Sr U
<i>Chlorurus sordidus</i>	73	Mg Mn Pb U Zn
<i>Epinephelus merra</i>	77	Ba Rb Th
<i>Gerres oyena</i>	88	B Mg
<i>Gnathodentex aureolineatus</i>	79	Pb Sn U
<i>Scolopsis bilineata</i>	74	Rb U
<i>Siganus lineatus</i>	80	B Ba Cr Rb Sr

Puisque chaque espèce possède son propre filtre biologique, que chacune réagit différemment à l'environnement en fonction de son écologie, de sa physiologie et de son identité génétique, alors il est possible que chacune marque à sa manière unique l'impact minier ou industriel, ce qui expliquerait les bons résultats des random forest (Tableau 35).

En combinant les résultats de chaque espèce, il est possible de tirer parti de cette unicité dans la réponse des espèces à l'impact. C'est ce que nous faisons ci-dessous.

Pour chaque espèce, nous utilisons les random forest mono-spécifique (Tableau 35) pour prédire le statut impacté ou contrôle de chaque site (Tableau 36). Nous obtenons ainsi 10 prédictions par sites (une prédiction par espèce). Il est ainsi possible de calculer la probabilité sur 10 espèces qu'un site soit impacté. Par exemple, le site de Gatope est prédit comme impacté par 8 espèces, contrôle pour 1 espèce, et à égalité de votes pour une espèce. Cela correspond à un total de 9 votes « impact » et 2 votes « contrôle », soit une probabilité de 82% (9/11) d'être impacté.

Avec cette technique, et sur la base d'analyses sur 10 espèces, nous obtenons par random forest de la microchimie des otolithes une classification à 100% correcte des sites miniers et contrôles (Tableau 36). De manière importante, une probabilité est associée, avec par exemple les sites de Gatope, Port-Bouquet et Prony prédits clairement en catégorie impactée (probabilité de 70-82%) et les sites de Nouméa et Népoui prédits dans une catégorie d'impact faible (probabilité $\geq 50\%$).

La variation dans le temps de ces probabilités pourraient être utilisées par exemple dans le cadre d'une surveillance de l'extension d'une pollution à des zones non impactées.

Tableau 36 : Combinaison des prédictions d'impact minier/industriel/urbain pour chaque espèce et site par random forest. L. fulvi : *L. fulviflamma* (Lutjanidae) ; D. aru : *Dascyllus aruanus* (Pomacentridae) ; C. stria : *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae) ; C. lunu : *Chaetodon lunulatus* (Chaetodontidae) ; C. sordi : *Chlorurus sordidus* (Scarinae) ; E. merra : *Epinephelus merra* (Epinephelinae) ; G. oye : *Gerres oyena* (Gerreidae) ; G. aure : *Gnathodentex aureolineatus* (Lethrinidae) ; S. bili : *Scolopsis bilineata* (Nemipteridae) ; S. line : *Siganus lineatus* (Siganidae). Gras italique : probabilité d'impact $\geq 70\%$ (forte) ; Gras : probabilité d'impact $\geq 50\%$ (modérée). « c » : Contrôle ; « i » : Impact ; « ci » : égalité de votes contrôle et impact.

Site	Statut	L.fulvi	D.aru	C.stria	C.lunu	C.sordi	E.merra	G.oye	G.aureo	S.bili	S.linea	Total i	total c	prob impact	Prédit
amos	Contrôle	i	i	c	c	c	c	c	ci	c		3	7	30	Contrôle
gatope	Impact	i	i	i	i	ci	c	i	i	i	i	9	2	82	Impact
golonne	Contrôle	c		c	c	c	c	c	c	ci	c	1	9	10	Contrôle
nepoui	Impact	c	i	c	ci	i	i		c	i	ci	6	5	55	Impact
noumea	Impact	i	i	c	c	i	c	i	i	c	c	5	5	50	Impact
ouano	Contrôle	c	c	c	c	c	c		c	c	c	0	8	0	Contrôle
paama	Contrôle	c	i	c	c	c	c	c	c	c		1	8	11	Contrôle
portb	Impact	i	i	i	i	i		i	i	i	c	8	1	89	Impact
prony	Impact	c	i	i	i	i	c	ci		i	i	7	3	70	Impact
stvincent	Contrôle	c	i	c	c	c	c	c	c	c	ci	2	9	18	Contrôle
tchamb	Contrôle	c	c	c	c	i	c		ci	c	ci	3	8	27	Contrôle

3.4.4. Synthèse

Le test de l'utilité de la microchimie des otolithes comme indicateur d'impact minier/industriel/urbain n'était pas l'objectif principal de notre étude. Néanmoins, en choisissant nos sites d'études dans des zones connues comme plutôt minières/industrielles et plutôt contrôles, nous pouvions tenter une première évaluation de l'outil. Nos résultats indiquent que :

- la chimie de l'eau ne montre aucune différence entre sites potentiellement impactés et sites contrôles
- la chimie des sédiments ne montre aucune différence entre sites potentiellement impactés et sites contrôles
- la chimie des otolithes ne montre aucune différence entre sites potentiellement impactés et sites contrôles
- mais l'utilisation d'outils puissants de classifications basés sur la microchimie des otolithes de plusieurs espèces aux traits de vie contrastés permet non seulement de caractériser un impact minier/industriel/urbain dans 100% des cas, mais aussi et surtout d'associer une probabilité à cet indicateur d'impact.

A l'évidence, plus d'échantillons et plus de rigueur dans les tests, notamment dans les choix des sites, dans la caractérisation de l'impact minier supposé (type de mine, durée de l'exploitation etc) sont nécessaires pour le développement d'un indicateur otolithe. Néanmoins, ces premiers résultats sont très prometteurs. De plus, les otolithes peuvent être

analysés *in toto* après dissolution dans de l'acide. Cela permet d'une part de mesurer un impact intégré sur la vie complète du poisson (que l'on peut par détermination préalable de l'âge faire varier de quelques mois – juvéniles – à plusieurs années – adultes de différentes classes d'âges), et d'autre part de mesurer beaucoup plus d'éléments que par laser. A l'inverse, des transects otolithes par laser ICPMS pourraient permettre d'étudier les temps de contact à l'impact (espèces mobiles et/ou impacts de durée finie).

5. CONCLUSION

Les objectifs de cette étude étaient quadruples et nos conclusions pour chacun d'entre eux sont résumées ci-dessous :

Objectif 1 : Caractériser la microchimie de l'environnement et des otolithes de poissons en Nouvelle-Calédonie

Les analyses de la microchimie de l'environnement et des otolithes de poissons indiquent globalement une corrélation forte de la chimie de l'eau et des otolithes avec la salinité et la température de l'eau, mais peu de corrélation entre la chimie de l'environnement et la chimie des otolithes. Nous montrons également que la chimie des otolithes varie entre espèces pour un même environnement. Nous concluons que les processus biologiques et écologiques jouent un rôle majeur dans la composition chimique des otolithes et interagissent de manière complexe avec la physico-chimie de l'environnement, notamment de l'eau.

Objectif 2 : Déterminer le pouvoir discriminant de la microchimie, et donc son utilité pour étudier la connectivité en Nouvelle-Calédonie

Une structuration spatiale forte existe dans la chimie de l'eau et des otolithes, mais pas dans celle des sédiments. Les analyses de random forest indiquent que les habitats des poissons peuvent être discriminés avec une forte résolution à l'échelle de l'île entre mangroves et récifs et à l'échelle locale entre mangroves, récifs côtiers et récifs océaniques. Il n'est pas possible d'identifier les stations à l'échelle de l'île, sauf pour les mangroves. Les signatures chimiques obtenues pour une espèce donnée ne peuvent pas être utilisées pour prédire l'habitat d'une autre espèce.

Objectif 3 : Utiliser l'outil microchimique pour étudier la connectivité mangrove-récif chez une espèce de poisson de Nouvelle-Calédonie

L'utilisation de l'outil microchimique chez la dorade *Lutjanus fulviflamma* a permis de démontrer que les mangroves étaient un habitat juvénile obligatoire et un habitat adulte essentiel pour cette espèce. Ce résultat nous permet de comprendre pourquoi l'espèce est absente de certaines îles et récifs éloignés de Nouvelle-Calédonie, et pourquoi une relation forte existe entre l'étendue des mangroves et l'abondance de l'espèce. Nous concluons que l'outil microchimie des otolithes apporte non seulement des informations importantes sur la connectivité mangrove-récif, mais aussi sur l'écologie, la distribution géographique et la vulnérabilité de certaines espèces de poisson.

Objectif 4 : Evaluer la microchimie comme indicateur d'impact minier en Nouvelle-Calédonie

L'analyse de la chimie de l'eau, des sédiments et des otolithes de poisson ne permet pas de différencier les sites sous influence minière, industrielle ou urbaine. En revanche, l'utilisation d'outils puissants de classification et des propriétés uniques de plusieurs espèces de poisson dans leur incorporation des éléments traces dans leurs otolithes a permis de détecter à 100% les sites sous influence minière, industrielle ou urbaine. De manière importante, notre méthode permet d'associer une probabilité et donc un degré d'impact. Nous concluons que la microchimie des otolithes possède un fort potentiel pour la création d'un indicateur d'impact. Néanmoins, des études supplémentaires dédiées sont nécessaires pour développer un tel indicateur.

La chimie des otolithes a été utilisée pour la première et unique fois en Nouvelle-Calédonie par Labonne *et al.* (2008) pour étudier les potentialités de l'outil à discriminer les baies du lagon de Nouméa chez une espèce de poisson papillon. Notre étude est la seconde en Calédonie et la première à cette échelle, en termes d'habitats, de sites et d'espèces analysées. Les problèmes d'analyses ont été énormes. Au terme de ce projet, une collaboration solide avec l'Université de Darwin est en place et les méthodes laboratoires et analytiques développées. Cet outil est donc aujourd'hui totalement opérationnel sur le territoire. Ce point est à notre avis une conclusion importante de ce projet.

Les résultats de cette étude ont été fortement handicapés par l'utilisation de plusieurs ICPMS à Montpellier, Brest et Darwin. Pour pallier aux problèmes d'inter-calibration de ces différents appareils, nous avons dû standardiser nos données. Les analyses ont donc portées sur les concentrations relatives des éléments chimiques (en %) plutôt que sur les concentrations absolues (en ppm). Ceci est une perte très importante d'information. Par exemple, deux habitats ou sites avec les mêmes % d'éléments mais avec des concentrations variant d'un facteur 10 seraient non-discriminables dans notre étude alors qu'un des habitats ou sites avait des concentrations 10 fois plus élevées. Les résultats présentés dans ce rapport sont donc très conservatifs ; la chimie des otolithes peut faire bien mieux si l'ensemble des analyses est réalisé sur le même appareil. La collaboration avec Darwin permettra de corriger cela dans le futur. Néanmoins, un laser ICPMS doit être acquis sur le centre IRD de Nouméa ce qui permettra de régler ces problèmes techniques et logistique, mais aussi de gagner en flexibilité et réactivité dans les analyses.

En conclusion, cette étude a permis de mieux cerner les capacités d'un outil clairement utile pour mieux comprendre les relations entre habitats et écosystèmes, la connectivité et la biologie des espèces, et les impacts miniers, industriels et urbains. Les méthodes mises au point au cours de cette étude et l'acquisition programmée d'un laser ICPMS rendent cet outil aujourd'hui opérationnel sur le territoire.

6. BILAN FINANCIER

Le bilan financier est consigné en Tableau 37. Hors investissements matériels (2,930,000 CFP – achat sorbonne, hotte HEPA 100, polyseur easypure par IRD), frais d'infrastructures (plateforme optique) et salaires (12 mois équivalent temps plein chercheur, 12 mois

équivalent temps plein technicien, 36 mois temps plein doctorant, soit ~15,000,000 CFP), le projet a coûté en fonctionnement 4,233,227 CFP pour un montant de 3,850,000 CFP financé par ZONECO, soit un déficit de 383,227 CFP lié à une erreur de budgétisation des perdiems et comblé sur fonds propres IRD.

Tableau 37. Bilan financier du projet en CFP

Poste	Prévision	réalisation	Bilan
frais bateaux et véhicules pour mission	480,000	291,120	188,880
perdiem missions	336,000	887,595	-551,595
petit équipements et consommables terrain	650,000	647,505	2,495
TOTAL TERRAIN	1,466,000	1,826,220	-360,220
Consommables labo	320,000	266,935	53,065
missions (avion et perdiem) ICPMS	1,200,000	1,255,967	-55,967
Analyses ICPMS	840,000	884,105	-44,105
TOTAL LABO	2,360,000	2,407,007	-47,007
Total	3,826,000	4,233,227	-407,227
TOTAL	3,850,000	4,233,227	-383,227

7. PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- une communication orale à un congrès international (ICRS, 2012, CAIRNS)
- 3 publications en cours de correction (3 chapitres thèse C. Paillon)
- 1 publication en cours de rédaction (1 chapitre thèse C. Paillon)
- 1 thèse de doctorat en fin de rédaction (soutenance C. Paillon prévue avant avril 2014)

8. REMERCIEMENTS

Gérard Mou-Tham et Miguel Clarque pour le travail remarquable à la mer. Joseph Baly pour l'aide au labo. Province Sud et Province Nord pour l'aide à l'organisation des missions. L'ADECAL pour la flexibilité, la compréhension et le professionnalisme.

9. LITTERATURE CITEE

- Almany GR, Berumen ML, Thorrold SR, Planes S, Jones GP (2007) Local replenishment of coral reef fish populations in a marine reserve. *Science* 316:742–744.
- Balmford A, Bruner A, Cooper P, Costanza R, Farber S, Green RE, Jenkins M, Jefferiss P, Jessamy V, Madden J, Munro K, Myers N, Naeem S, Paavola J, Rayment M, Rosendo S, Roughgarden J, Trumper K, Turner RK (2002) Economic reasons for conserving wild nature. *Science* 297:950–953.

- Boesch D, Burreson E, Dennison W, Houde E, Kemp M, Kennedy V, Newell R, Paynter K, Orth R, Ulanowicz R (2001) Factors in the decline of coastal ecosystems. *Science* 293:1589–1590.
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45: 5–32
- Campana, S. E. (2005). Otolith Elemental Composition as a Natural Marker of Fish Stocks. *Stock Identification Methods. Applications in Fishery Science*. S. X. Cadrin, K. D. Friedland and J. R. Waldman, Elsevier Academic Press: 227-245.
- Cardinale BJ, Srivastava DS, Duffy JE, Wright JP, Downing AL, Sankaran M, Jouseau C (2006) Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature* 443:989–992.
- Chateau O, Wantiez L (2009). Movement patterns of four coral reef fish species in a fragmented habitat in New Caledonia: implications for the design of marine protected area networks. *ICES Journal of Marine Science* 66: 50-55
- Chittaro PM, Fryer BJ, Sale PF (2004) Discrimination of French grunts (*Haemulon flavolineatum*, Desmaret, 1823) from mangrove and coral reef habitats using otolith microchemistry. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 308: 169-183
- Cury P, Miserey Y (2008) Une mer sans poissons. Calmann-Lévy, 279 p.
- Davis G, Haaker P, Richards D (1998) The perilous condition of white abalone *Haliotis sorenseni*, Bartsch, 1940. *Journal of Shellfish Research* 17:871–875.
- De Pontual H, Geffen A (2003) Otolith microchemistry. In: Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ Editors, *Manual of Fish Sclerochronology*, Editions Ifremer (2003).
- Dorenbosch M, Grol MGG, Nagelkerken I, van der Velde G (2005) Distribution of coral reef fishes along a coral reef-seagrass gradient: edge effects and habitat segregation. *Marine Ecology Progress Series* 299: 277-288
- Dorenbosch, M., M. Verweij, et al. (2004). "Homing and Daytime Tidal Movements of Juvenile Snappers (Lutjanidae) between Shallow-Water Nursery Habitats in Zanzibar, Western Indian Ocean." *Environmental Biology of Fishes* 70(3): 203-209.
- Dove SG, Kingsford MJ (1998) Use of otoliths and eye lenses for measuring trace-metal incorporation in fishes: a biogeographic study. *Marine Biology* 130: 377-387
- Elsdon TS, Gillanders BM (2003) Reconstructing migratory patterns of fish based on environmental influences on otolith chemistry. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 13: 219–235.
- Gillanders BM (2002) Connectivity between juvenile and adult fish populations: do adults remain near their recruitment estuaries? *Marine Ecology Progress Series* 204: 215-223
- Gillanders BM, Sanchez-Jerez P, Bayle-Sempere J, Ramos-Espla A (2001) Trace elements in otoliths of the two-banded bream from a coastal region in the south-west Mediterranean: are there differences among locations? *Journal of Fish Biology* 59: 350-363
- Gillanders, B. M., K. W. Able, et al. (2003). "Evidence of connectivity between juvenile and adult habitats for mobile marine fauna: an important component of nurseries." *Marine Ecology Progress Series* 247: 281-295.
- Hamer PA, Jenkins GP, Gillanders BM (2003) Otolith chemistry of juvenile snapper *Pagrus auratus* in Victorian waters: natural chemical tags and their temporal variation. *Marine Ecology Progress Series* 263: 261-273
- Hamer, P. A. and G. P. Jenkins (2007). "Comparison of spatial variation in otolith chemistry of two fish species and relationships with water chemistry and otolith growth." *Journal of Fish Biology* 71(4): 1035-1055.
- Harborne AR, Mumby PJ, Micheli F, Perry CT, Dahlgren CP, Holmes KE, Brumbaugh DR (2006) The functional value of Caribbean coral reef, seagrass and mangrove habitats to ecosystem processes. *Advances in Marine Biology* 50: 57-189

- Harley CDG, Hughes AR, Hultgren KM, Miner BG, Sorte CJB, Thornber CS, Rodriguez LF, Tomanek L, Williams SL (2006) The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters* 9:228–241.
- Hedgecock D, Barber PH, Edmands S (2007) Genetic approaches to measuring connectivity. *Oceanography* 20:70-79
- Heinrich CA, Pettke T, Halter WE, Aigner-Torres M, Audétat A, Günther D, Hattendorf B, Bleiner D, Guillong M, Horn I 2003. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-couple-plasma mass-spectrometry. *Geo. Cosmo. Acta* 67(18): 3473-3496.
- Jackson JBC, Kirby MX, Berger WH, Bjorndal KA, Botsford LW, Bourque BJ, Bradbury RH, Cooke R, Erlandson J, Estes JA, Hughes TP, Kidwell S, Lange CB, Lenihan HS, Pandolfi JM, Peterson CH, Steneck RS, Tegner MJ, Warner RR (2001) Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293:629–638.
- Kingsford MJ, Gillanders BM (2000) Variation in concentrations of trace elements in otoliths and eye lenses of a temperate reef fish, *Parma microlepis*, as a function of depth, spatial scale, and age. *Marine Biology* 137: 403-414
- Labonne M., Morize E., Kulbicki M., Ponton D., Marec L. 2008. Otolith chemical signature and growth of *Chaetodon speculum* in coastal areas of New Caledonia, Est, Coast Shelf Sci 78(3):493-504
- Labrosse P, Letourneur Y, Kulbicki M (2000) Fish stock assessment of the northern New Caledonian lagoons: 3 - Fishing pressure, potential yields and impact on management options. *Aquatic Living Resources* 13: 91-98
- Longerich HP, Jackson SE, Günther D 1996. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric transient signal data acquisition and analyte concentration calculation. *J Anal At Spectrom* 11(9):899-904
- Lotze HK, Lenihan HS, Bourque BJ, Bradbury RH, Cooke RG, Kay MC, Kidwell SM, Kirby MX, Peterson CH, Jackson JBC (2006) Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science* 312:1806–1809.
- Lugendo BR, Nagelkerken I, van der Velde G, Mgaya YD (2006) The importance of mangroves, mud and sand flats, and seagrass beds as feeding areas for juvenile fishes in Chwaka Bay, Zanzibar: gut content and stable isotope analyses. *Journal of Fish Biology* 69: 1639-1661
- Lugendo BR, Nagelkerken Y, Kruitwagen G, van der Velde G, Mgaya YD (2007) Relative importance of mangroves as feeding habitats for fishes: a comparison between mangrove habitats with different settings. *Bulletin of Marine Science* 80: 497-512
- McCulloch M., Cappo M., Aumend J., Müller W. (2005) Tracing the life history of individual barramundi using laser ablation MC-ICP-MS Sr-isotopic and Sr/Ba ratios in otoliths. *Mar. Fresh. Res.* 56:637-644
- Mercier L, Darnaude AM, Bruguier O, Vasconcelos RP and others. 2011. Selecting statistical models and variable combinations for optimal classification using otolith microchemistry. *Ecol Appl* 21: 1352–1364
- Mercier L., Darnaude A.M., Bruguier O., Vigliola L., Mouillot D. 2012. Multi-element otolith fingerprints unravel sea-lagoon lifetime migrations of the gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 444:175–194
- Milton DA, Tenakana CD, Chenery SR (2000) Can the Movements of Barramundi in the Fly River Region, Papua New Guinea be Traced in their Otoliths? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 20: 855-868
- Mumby, P. J., A. J. Edwards, et al. (2004). "Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean." *Nature* 427: 533-536.

- Munday PL (2004) Habitat loss, resource specialization, and extinction on coral reefs. *Global Change Biology* 10:1642–1647.
- Munday PL, Jones GP, Pratchett MS, Williams AJ (2008) Climate change and the future for coral reef fishes. *Fish and Fisheries* 9:261–285.
- Munday, P. L. and S. K. Wilson (1997). "Comparative efficacy of clove oil and other chemicals in anaesthetization of *Pomacentrus amboinensis*, a coral reef fish." *Journal of Fish Biology* 51(5): 931-938.
- Nagelkerken I (2007) Are non-estuarine mangroves connected to coral reefs through fish migration? *Bulletin of Marine Science* 80: 595-607
- Nagelkerken, I., M. Dorenbosch, et al. (2000). "Importance of shallow-water biotopes of a Caribbean bay for juvenile coral reef fishes: patterns in biotope association, community structure and spatial distribution." *Marine Ecology Progress Series* 202: 175-192.
- Parrish JD (1989) Fish communities of interacting shallow-water habitats in tropical oceanic regions. *Marine Ecology Progress Series* 58: 143-160
- Patterson HM, Kingsford MJ, McCulloch MT (2004) Elemental signatures of *Pomacentrus coelestis* otoliths at multiple spatial scales on the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Ecology Progress Series* 270: 229-239
- Rooker JR, Secor DH, Zdanowicz VS, De Metrio G, Relini LO (2003) Identification of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) stocks from putative nurseries using otolith chemistry. *Fisheries Oceanography* 12: 75-84
- Secor, D. H. (1992). "Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake bay striped bass *Morone saxatilis*." *Fishery Bulletin* 90(4): 798-806.
- Sigura A. 2009. La microchimie des otolithes : un outil pour étudier la connectivité entre écosystèmes du lagon calédonien. Rapport de master 2, Université Bordeaux 1, 25 p.
- Soto, C. G. and Burhanuddin (1995). "Clove oil as a fish anaesthetic for measuring length and weight of rabbitfish (*Siganus lineatus*)." *Aquaculture* 136(1-2): 149-152.
- Swearer, S. E., G. E. Forrester, et al. (2003). "Spatio-temporal and interspecific variation in otolith trace-elemental fingerprints in a temperate estuarine fish assemblage." *Estuarine Coastal and Shelf Science* 56(5-6): 1111-1123.
- Thorrold SR, Jones CM, Campana SE, McLaren JW, Lam JWH (1998) Trace Element Signatures in Otoliths Record Natal River of Juvenile American Shad (*Alosa sapidissima*). *Limnology and Oceanography* 43: 1826-1835
- Totland, M., I. Jarvis, et al. (1992). "An assessment of dissolution techniques for the analysis of geological samples by plasma spectrometry." *Chemical Geology* 95: 35-62.
- Vigliola L, Labonne M, Martino A, Durand JD, Bruguier O, Panfili J (2009) Can otolith microchemistry be used to reconstruct movement patterns and environmental history of mullets in hyperhaline estuaries? 4th International Otolith Symposium, Monterey, California, USA.
- Vigliola L, Meekan MG (2009) Chapter 6. The back-calculation of fish growth from otoliths. In: Green BS, Mapstone BM, Carlos G, Begg GA (eds). *Tropical fish otoliths: information for assessment, management and ecology*. Springer, pp. 174–211.
- Wantiez L (2008). Les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie en 2006 : état des lieux et réseau de suivi. *Revue d'Ecologie Terre et Vie* 63: 55-70
- Warner RR, Swearer SE, Caselle JE, Sheehy M, Paradis G (2005) Nata trace-elemental signatures in the otoliths of an open-coast fish. *Limnol. Oceanogr.* 50(5):1529-1542
- Worm B, Barbier EB, Beaumont N, Duffy JE, Folke C, Halpern BS, Jackson JBC, Lotze HK, Micheli F, Palumbi SR, Sala E, Selkoe KA, Stachowicz JJ, Watson R (2006) Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* 314:787–790.

Yamashita Y, Otake T, Yamada H (2000) Relative contributions from exposed inshore and estuarine nursery grounds to the recruitment of stone flounder, *Platichthys bicoloratus*, estimated using otolith Sr:Ca ratios. Fisheries Oceanography 9: 316-327

10. ANNEXES

Annexe 1. Liste des échantillons de poissons disséqués au laboratoire.

Espèce	Récif barrière interne											Récif frangeant				Récif intermédiaire				Mangrove											Total
	amos	gatope	golonne	nepoui	noumea	ouano	paama	port bouquet	prony	st vincent	tchambouenne	gatope	ouano	prony	st vincent	gatope	ouano	prony	st vincent	amos	gatope	golonne	nepoui	noumea	ouano	paama	port bouquet	prony	st vincent	tchambouenne	
<i>Abudefduf sexfasciatus</i>	6	3	6	4	6	12	1	8	1	11	6	1	1	2				4				1	20	1	2	1			2	4	78
<i>Acanthopagrus berda</i>																		12													30
<i>Acanthurus albipectoralis</i>															1										3						12
<i>Acanthurus blochii</i>		2	3	1														11													14
<i>Acanthurus dussumieri</i>						2				2							1														16
<i>Acanthurus nigricauda</i>							1	1							2																4
<i>Acanthurus olivaceus</i>			2			1	1																								4
<i>Acanthurus pyroferus</i>											1																				1
<i>Acanthurus xanthopterus</i>	1												2														11				14
<i>Anodontosma chacunda</i>																													3		3
<i>Anyperodon leucogrammicus</i>									1		1						2														4
<i>Apogon hyalosoma</i>																											6				6
<i>Balistoides viridescens</i>						1																									1
<i>Calotomus carolinus</i>																		1													1
<i>Caranx papuensis</i>																			1	2									8		11
<i>Cephalopholis argus</i>						1																									1
<i>Cephalopholis boenak</i>																		1													1
<i>Cephalopholis miniata</i>											1																				1
<i>Cephalopholis urodeta</i>		2				1	1	2		1	1				1																9
<i>Cetoscarus bicolor</i>																1				1											1

Siganus fuscescens											1					1	1	6	2	4	23	45	5						88		
Siganus lineatus												2						32	21	2	1	38	1	5	10	2			118		
Siganus puellus						1																								3	
Siganus punctatus	7	2	8	6	2	2						1																	31		
Siganus randalli																											8			8	
Siganus vulpinus												1												2						4	
Silago sihama																						1								1	
Sphaeramia orbicularis																							10							10	
Sphyaena barracuda																		1	1			1	1		1				5		
Stegastes nigricans	2	24				2						13																	43		
Sufflamen chrysopterum											1																			1	
Terapon jarbua																		10	2			30							42		
Thalassoma lunare																														1	
Thalassoma lutescens		2			2		2					3																		9	
Trachinotus blochii																								1						1	
Tylosorus crocodilus																			1	1									2		
Upeneus tragula											1								3										5		
Variola luti												1																		1	
Zebrasoma scopa				10	10	1	2	6									6	2	6	1										44	
Anodonstoma chacunda																											1			1	
Bolbometopon muricatum																									1					1	
Cheilinus trilobatus												1																		1	
Elops machnata																									1					1	
Liza macrolepis																									18					18	
Liza melinoptera																			1					16						17	
Lutjanus argentimaculatus																			8						1					9	
Lutjanus fulviflamma																									4					4	
Megalops cyprinoides																			2											2	
Parapercis hexophtalma												1																		1	
Plectorynchus gibbosus																										2				2	
Pomacentrus moluccensis												10																		10	
Sargocentron spiniferum												1																		1	
Scarus fraenatus												1																		1	
Sillago sihama																											1			1	
Sufflamen chrysopterum																														6	
Thalassoma fuscens																														8	
Valamugil sp																											1			3	
Total général	85	255	101	141	142	172	67	92	122	288	56	80	157	110	52	119	125	147	156	46	145	43	8	30	167	22	97	77	221	13	3365

Lutjanus fulviflamma	4	8	8	3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	2	5	1	4	5	5	2	1	5	5	5	4	5	1	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	196								
Lutjanus fulvus			1	2	3					1				1	3		2	3		1	2			2	3			2																		26					
Lutjanus kasmira	1		2																																											3					
Lutjanus quinquelineatus	1		1																																											2					
Megalops cyprinoides	1																																													1					
Naso unicornis							3							2						3				2																						10					
Parapercis hexoptalma			1																																												1				
Parupeneus barberinus			1																																													1			
Parupeneus ciliatus							1						1							3				3																							8				
Parupeneus indicus	1		3	3						1				3				3																														17			
Plectorhinchus gibbosus			1																																													1			
Pomacentrus moluccensis			1				3	3						3	3					3	3			3	3			3	3																		25				
Pomadasys argenteus	3		3																																													6			
Sargocentron spiniferum			1																																													1			
Scarus fraenatus			1																																														1		
Scarus ghobban			1																																														1		
Scolopsis bilineata					3	3	3			2	3	3	3	3			1	3	3	3			3					3																				39			
Siganus corallinus			1																																														1		
Siganus doliatus			1																																														1		
Siganus fuscescens				1	3					2	3	1					3	3																															16		
Siganus lineatus	1																																																41		
Sillago sihama	1																																																1		
Sphyaena barracuda				1									1				1																																4		
Stegastes nigricans	3		3																																														6		
Sufflamen chrysopterygum			1																																															1	
Thalassoma sp			1																																															1	
Valamugil sp	2		1																																														3		
Zebrasoma scopas																																																		9	
TOTAL	4	34	0	59	7	28	8	31	29	9	3	26	6	29	5	31	5	29	30	9	9	29	6	30	0	26	30	1	0	33	24	2	2	29	6	15	14	14	3	0	14	15	4	4	15	15	5	15	10	5	1043