

Caractérisation spatiale des habitats potentiels de trois espèces de poissons plats par le couplage de marqueurs naturels (signatures isotopiques, microchimie des otolithes et contenus digestifs).



Dubé Benoît

Mémoire de stage de Master 2 ingénierie mathématique
spécialité probabilités et statistiques

Tuteurs de Stage :

Mme PHILIPPE Anne, Professeur des universités à l'Université de Nantes

Mme BRIND'AMOUR Anik, chercheur à l'IFREMER de Nantes

Mme MORIN Jocelyne, cadre à l'IFREMER de Port en Bessin

Mr MAHÉ Kélig, cadre à l'IFREMER de Boulogne-sur-Mer.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Anik Brind'Amour pour m'avoir encadré durant tout ce stage, pour ses conseils, son écoute et sa disponibilité malgré sa surcharge de travail. Merci à Jocelyne Morin, Kelig Mahé et Anne Philippe pour leurs conseils et leurs corrections.

Merci également à tous ceux du Département EMH pour leur bonne humeur et leur sympathie. Un merci tout particulier à Estelle, Maxime, Weppe, Camille, Loïc, Natacha, David et Laurence. Vous allez me manquer, certains me manquent déjà ! Les bureaux sont vides en ce moment!!!

Enfin je tiens à remercier mes parents, Solène et Guillaume qui ne comprennent pas toujours ce que je fais mais qui me soutiennent.

Merci à Charlotte d'être avec moi chaque jour.

Notes :

- Les mots suivis d'un « * » sont définis dans le lexique en annexe.
- Les cartes réalisées avec le logiciel R ont été faites à l'aide de la library `PBSmapping` et du fichier `shapeCOLMATAGE2.shp`.

Table des matières

I) Introduction générale	4
1) Contexte écologique.....	4
2) Objectifs du stage.....	5
3) Description des marqueurs	5
a) Les contenus digestifs.....	5
b) Signature isotopique du carbone $\delta^{13}\text{C}$ et de l'azote $\delta^{15}\text{N}$	6
c) Microchimie des otolithes.....	7
4) Complémentarité des échelles temporelles.....	8
II) Matériels et méthodes.....	9
1) Site d'étude et échantillonnage	9
2) Description des données	12
3) Analyse individuelle des marqueurs	13
a) Contenus digestifs.....	15
b) Isotope $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$	15
c) Microchimie des otolithes	15
4) Première approche statistique pour combiner les marqueurs: analyse multi-couches.....	16
a) Création des couches	16
b) Combinaison des couches	17
5) Deuxième approche statistique: multi-tables.....	20
a) Méthode Statist	20
b) Analyse de co-inertie multiple MCOA	21
c) Utilisation de la structure commune (STATIS ou MCOA)	22
6) Troisième approche: Modèle hiérarchique	23
a) Modèle imbriqué à 2 niveaux	23
7) Tests statistiques	24
III) Résultats.....	25
1) Cartographie des abondances	25
2) Analyse individuelle de chaque marqueur	27
a) marqueur isotopes.....	27
b) marqueur otolithes.....	35
d) Comparaison des 3 marqueurs	47
3) Analyse Multi-couches.....	48
a) Résultats obtenus	48
b) Robustesse de la méthode	50
4) Analyse Multi-tables	54
a) Méthode STATIS.....	54
b) Méthode MCOA (analyse de co-inertie multiple).....	59
5) Analyse Hiérarchique	65
IV) Conclusions et perspectives.....	71
1) Conclusion biologique.....	71
2) Conclusion méthodologique.....	73
3) Perspectives	76

I) Introduction générale

1) Contexte écologique

L'estuaire de la Seine est un exemple concret des modifications engendrées par l'activité humaine sur les estuaires. C'est une des raisons pour lesquelles il fait l'objet de nombreuses études notamment dans le cadre du programme Seine-Aval¹.

Malgré les nombreuses pressions anthropiques qu'il subit (endiguements*, chenal, contamination chimique...), l'estuaire de la Seine reste cependant un lieu de vie pour de nombreuses espèces animales. Les estuaires assurent notamment une fonction de nourricerie*, indispensable au développement des jeunes poissons qui rejoignent ensuite les populations du large et contribuent ainsi au recrutement, et donc au renouvellement des stocks de poissons adultes.

La préservation des habitats nécessaires à la survie et à la croissance des jeunes poissons impose en premier lieu de bien les identifier et de les caractériser.

Parmi les poissons présents sur le site étudié, *Solea solea* (Sole)(FIG I.1.1), *Pleuronectes platessa* (Plie) (FIG I.1.3) et *Buglossidium luteum* (Solenette)(FIG I.1.2) sont 3 espèces de poissons plats. Ces espèces sont représentatives des communautés de poissons benthiques en terme de distribution spatiale dans la baie de Seine. Les poissons plats sont connus pour être relativement sédentaires dans les premières années de leur vie et particulièrement liés aux fonds marins (benthos). Ces espèces sont donc considérées comme des espèces indicatrices des habitats benthiques particulièrement pertinentes pour l'étude de ces habitats. C'est pourquoi ce travail porte sur ces 3 espèces. A noter que dans ce rapport les noms communs des espèces sont utilisés, à l'exception de la solenette pour laquelle le nom du genre *Buglossidium* est également utilisé.



FIG I.1.1. *Solea solea* (Linné, 1758)
(source : <http://www.weblo.com>).



FIG I.1.2. *Buglossidium luteum* (Risso, 1810)
(source : <http://www.practicalfishkeeping.co.uk>).



FIG I.1.3. *Pleuronectes platessa* (Linné, 1758)
(source : <http://www3fishing.net.my>).

¹ Programme scientifique multidisciplinaire et favorisant la recherche appliquée, initié pour faciliter la compréhension des milieux et aider à la prise de décisions publiques.

2) Objectifs du stage

Les nourriceries côtières-estuariennes font l'objet de nombreuses recherches. Cependant la majorité de celles-ci se concentre sur un seul type d'habitat (fonds sablonneux, vasières, chenaux de marée, zones subtidales* ou intertidales*) sans prendre en compte les relations potentielles entre les habitats. Cette façon de ne considérer qu'un seul habitat ou au mieux d'en comparer 2 ou 3 permet difficilement d'expliquer les variations spatio-temporelles des espèces.

De même, les marqueurs naturels dont il est question dans ce stage (contenus digestifs, isotopes stables, microchimie des otolithes) font également l'objet de nombreuses publications mais la plupart de ces études ne portent que sur l'analyse d'un seul marqueur. Quelques-unes traitent des liens entre les contenus digestifs et les isotopes mais il en existe très peu qui combinent ces 3 marqueurs. Le but de ce stage est donc de contribuer au développement d'une méthodologie permettant de comprendre et combiner ces marqueurs naturels pour caractériser géographiquement des habitats potentiels de trois espèces de poissons plats (*Solea solea*, *Pleuronectes platessa* et *Buglossidium luteum*).

Nous commencerons tout d'abord par analyser chaque marqueur pour savoir s'il est pertinent de l'utiliser dans le cadre d'une caractérisation spatiale des habitats pour chacune des 3 espèces de poissons (analyse intra-espèce). Puis, nous analyserons notamment la variation inter-espèce et la variation spatiale.

Une fois l'utilité des 3 marqueurs démontrée, nous nous intéresserons à 3 méthodes pour analyser, voire combiner ces marqueurs (analyse multi-couches, analyse multi-tables et analyse hiérarchique). Chaque méthode permettra de représenter spatialement les habitats et/ou de mieux comprendre les liens entre les marqueurs. Ces résultats viendront donc compléter les cartes d'abondance des espèces. En effet, les cartes de distribution d'abondance des espèces nous donnent une information « instantanée » sur les habitats des poissons alors que les méthodes combinatoires permettent de représenter l'habitat « préférentiel » d'une espèce en tenant compte des différentes échelles temporelles et spatiales des 3 marqueurs.

3) Description des marqueurs

a) Les contenus digestifs

Le premier marqueur est le contenu digestif des poissons. En analysant ce que les poissons mangent et en connaissant la distribution spatiale de leurs proies, on peut faire des hypothèses sur l'endroit où se nourrissent les poissons selon le vieil adage « dis moi ce que tu manges et je te dirais où tu vis ».

Cependant il faut noter que les poissons étudiés ont une alimentation opportuniste, c'est à dire qu'ils s'adaptent à la disponibilité des proies qui varie selon la zone qu'ils prospectent. Notre étude porte principalement sur des juvéniles âgés de moins de 1 an. Il est admis que ceux-ci ont une faible mobilité et ainsi, il est plus facile de déterminer où vit le poisson en fonction de ce qu'il mange car il se nourrit dans une zone assez limitée.

Pour utiliser ce marqueur il faut formuler quelques hypothèses. Entre autre, il faut que la plupart des proies soit bien différenciée en termes d'habitat. En effet, si on retrouve une proie sur toute la zone géographique étudiée, le fait de la retrouver dans l'estomac du poisson ne nous indiquera pas où il vit, sauf si on part du principe que celui-ci est très peu mobile.

Il faut également noter que ce marqueur est un indicateur instantané. C'est à dire qu'il donne une information sur une échelle de moins d'un jour, voire quelques heures (le temps qu'il faut au poisson pour digérer sa proie).

Au final les contenus digestifs informent sur les mouvements du poisson sur une zone plus ou moins restreinte selon sa mobilité.

L'analyse de l'alimentation de chaque espèce a fait l'objet d'un stage de Master 2 en océanologie par TOUS RIUS Armonie (2008).

b) Signature isotopique du carbone $\delta^{13}\text{C}$ et de l'azote $\delta^{15}\text{N}$

Le contenu de l'estomac d'un consommateur représente une information à court terme de son alimentation, qui renseigne sur les proies ingérées (et non assimilées), et peut induire un biais dans l'estimation de l'importance respective des diverses proies du fait d'une digestion différentielle [Stoner et Zimmerman 1988]. Par exemple certaines proies vont se décomposer beaucoup plus vite dans l'estomac d'un poisson et ne seront donc pas prises en compte dans l'analyse des contenus digestifs.

Si l'on veut étudier les mouvements des poissons sur une échelle de temps plus large, on analyse les différences de signatures des isotopes stables du carbone $\delta^{13}\text{C}$ et de l'azote $\delta^{15}\text{N}$. En effet, la méthode isotopique fournit une mesure intégrée dans le temps de la nourriture exploitée par un organisme. En effet la composition en isotopes stables de ses tissus résulte des processus d'assimilation et de métabolisation des nutriments issus de l'alimentation. Ainsi, la composition isotopique peut fournir une information à moyen terme, jusqu'à quelques mois, sur son alimentation [Hesslein et al., 1993][Maruyama et al., 2001]. Par exemple, le temps d'intégration (turnover rate) estimé pour les trois espèces étudiées au niveau du tissu musculaire varie entre 45 et 65 jours.

De même, la composition isotopique peut servir de marqueur naturel pour discriminer des stocks de poissons et des migrations entre habitats [Ciancio et al, 2008].

Pour chaque élément, on utilise un « delta » qui permet de comparer le rapport isotopique (isotope lourd / isotope léger) de l'échantillon à celui d'une référence internationale (variation en ‰). La référence pour le carbone est le Pee Dee Belemnite (fossile) et la référence pour l'azote est l'azote atmosphérique. On calcule les « delta » selon la formule suivante:

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} = \left(\frac{RN^{15}_{\text{échantillon}}}{RN^{15}_{\text{référence}}} - 1 \right) * 1000 \quad \text{avec} \quad RN^{15} = \frac{[N^{15}]}{[N^{14}]}$$

$$\text{même calcul pour } \delta^{13}\text{C} \text{ avec } RC^{13} = \frac{[C^{13}]}{[C^{12}]}$$

Chaque élément nous donne des informations particulières. Tout d'abord le $\delta^{13}\text{C}$ varie peu entre la proie et le prédateur, il reste quasiment constant dans la chaîne trophique* (~1‰). De plus, chaque source de matière organique a une gamme propre de valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. On peut donc l'utiliser comme indicateur de la matière ingérée par les organismes (marins).

A la différence du carbone, la composition en isotopes stables de l'azote subit de plus larges variations dans les chaînes alimentaires. Le $\delta^{15}\text{N}$ d'un animal montre en moyenne un enrichissement de 3,4‰ par rapport à sa nourriture [De Niro and Epstein, 1981] [Minagawa et Wada, 1984] [Vander Zanden et Rasmussen, 2001]. Le $\delta^{15}\text{N}$ permet donc de situer le niveau trophique d'un organisme (sa place dans la chaîne trophique*); plus il est élevé plus il sera haut dans la chaîne trophique. On peut cependant noter que cet indicateur peut également varier en fonction des apports azotés de l'environnement (ex apport élevé en nitrates des zones côtières vs zones marines). L'utilisation conjointe des signatures en isotopes stables du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) permet donc de mieux positionner les individus au sein des réseaux trophiques.

L'étude de la signature isotopique et la discrimination des habitats des poissons en fonction de celle-ci nous oblige à faire l'hypothèse suivante: « Les proies des 3 espèces de poissons étudiés sont peu mobiles ». Les proies des trois poissons étudiés sont pour la majorité de petits organismes benthiques* à très faible mobilité (ex. bivalves, vers enfouis dans les sédiments...). Les poissons plats, de par leur physiologie et écologie, sont eux aussi en forte association avec les sédiments. Par ailleurs, la classe d'âge sur laquelle porte ce travail, c.-à-d. les jeunes de l'année pour les soles et les plies (les solenettes sont plus âgées) est tout particulièrement reconnue comme étant sédentaire [Durieux et al. 2010]

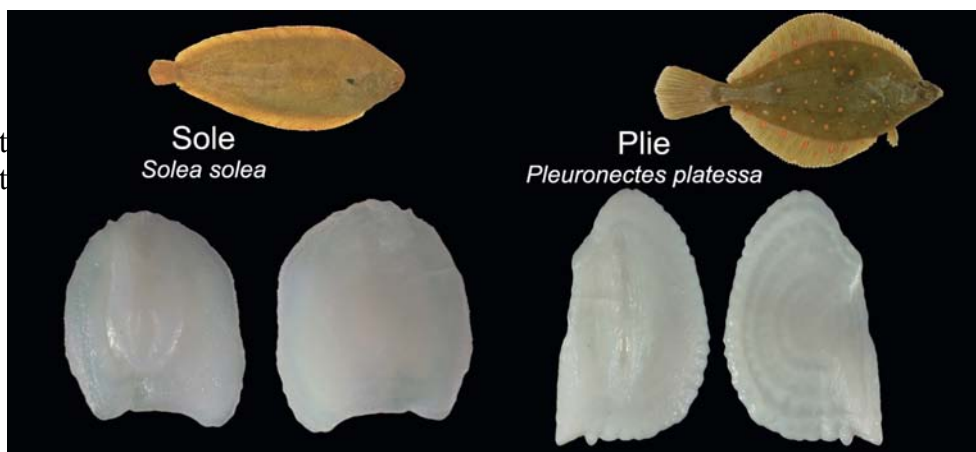
L'ensemble des échantillons de poissons des 3 espèces a fait l'objet d'un prélèvement de muscle dorsal, puis d'une préparation (lyophilisation, broyage, pesée et encapsulage) pour les analyses isotopiques. Ces dernières ont été réalisées en sous-traitance par le laboratoire SINLAB (University of New Brunswick, Canada).

c) Microchimie des otolithes

Les otolithes (ou « pierres de l'oreille ») sont des concrétions calcaires présentes dans le système vestibulaire de l'oreille interne des poissons (Fig. 1). Ils participent à l'audition et à l'équilibration du poisson.

FIG I.3.c.1

Otolithes (*sagittae*) d'une sole et d'une plie (faces concave et convexe).



Les poissons osseux possèdent 3 sacs otiques par oreille le *sacculus* (sacculle), l'*utriculus* (utricule) et la *lagna*, qui contiennent respectivement la *sagitta*, le *lapillus* et l'*asteriscus*. De ce fait, les poissons présentent 3 paires d'otolithes [Panfili et al., 2002].

La larve de poisson possède déjà ses otolithes à l'éclosion et leur croissance se poursuit durant toute la vie du poisson par formation successive de couches concentriques appelées anneaux de croissance.

Ces otolithes subissent, au cours de la vie du poisson, des variations structurales et chimiques en fonction de nombreux paramètres dont l'environnement. On peut ainsi reconstituer les traits de vie du poisson comme son âge, son lieu d'éclosion, les températures de l'eau où il a vécu en passant par ses migrations [Radtke et al., 1998].

De nombreux éléments chimiques sont intégrés au cours du processus d'accrétion de l'otolithe, et cette composition chimique reflète les conditions environnementales rencontrées par les poissons (température, salinité, composition chimique de l'eau) [Campana SE, Thorrold SR, 2001][Elsdon et al. 2008]

La composition des différents éléments chimiques présents dans les otolithes peut être déterminée par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry). Cette analyse peut se faire soit en solution, le signal est alors intégré sur la vie de l'individu, soit par ablation laser sur section d'otolithe en obtenant une chronologie du signal au cours de la vie de l'individu.

L'objectif est d'identifier les lieux de vie du poisson et en particulier son principal habitat depuis sa vie larvaire d'après les concentrations des différents éléments chimiques et certains de leur rapport (Strontium/Calcium). Grâce à une discrimination sur ces éléments chimiques on pourra regrouper les individus ayant fréquenté des masses d'eau similaires.

Là encore, on doit poser quelques hypothèses. Tout d'abord on suppose que la composition chimique des otolithes est liée à la composition chimique de l'eau où a vécu le poisson (ce qui n'est pas forcément vrai pour tous les éléments). Cette hypothèse ne pourra pas être vérifiée totalement étant donné qu'on ne connaît la composition chimique de l'eau que pour quelques paramètres environnementaux (température, salinité). Il faut également que les otolithes comparés soient de même poids pour que les concentrations soient comparables. Pour cela, il faut que les poissons soient de même taille car le poids des otolithes est corrélé à la croissance du poisson [Harvey et al., 2000]. Dans notre cas, étant donné que nous étudions des juvéniles de plies et de soles, leur otolithes ne présentent pas une gamme de poids très large (sole : $1,33 \text{ mg} \pm 0,3 \text{ mg}$, plie : $3,55 \text{ mg} \pm 1,34 \text{ mg}$).

4) Complémentarité des échelles temporelles

La description de ces trois marqueurs montre une certaine complémentarité et hiérarchisation en terme d'échelles temporelle et spatiale.

En effet, tandis que les contenus digestifs donnent des informations sur les dernières heures de la vie du poisson (information quasi instantanée), les isotopes stables nous fournissent une information temporelle plus large en donnant une indication générale de

l'alimentation sur environ les deux derniers mois de la vie du poisson. Enfin, la microchimie des otolithes permet de nous placer sur une échelle encore plus grande étant donné qu'elle prend en compte l'accumulation des éléments chimiques depuis la naissance du poisson (c'est-à-dire env. 6 mois ici pour la plie et la sole).

On a ainsi, en quelque sorte, 3 niveaux complémentaires/hiéronymiques sur l'échelle du temps.

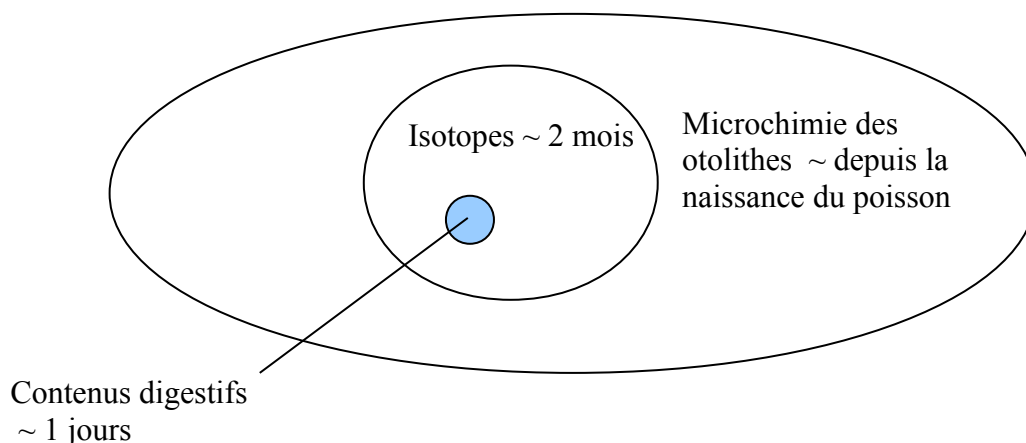


FIG I.4.1 Échelle de temps pour chaque marqueur.

L'objectif est alors d'utiliser cette complémentarité dans le but de caractériser géographiquement les habitats des trois espèces de poissons (sole (*Solea solea*), plie (*Pleuronectes platessa*) et petite sole jaune ou solenette (*Buglossidium luteum*)).

On va donc chercher à coupler ces 3 marqueurs, tout d'abord en utilisant les résultats des analyses individuelles des marqueurs et en les superposant (analyse multi-couche); ensuite, en faisant une analyse multi-tableaux (un tableau par marqueur); enfin en cherchant un modèle hiéronymique emboîté.

II) Matériels et méthodes

1) Site d'étude et échantillonnage

Échantillonnage en mer

Les poissons étudiés dans ce travail proviennent de la campagne d'échantillonnage halieutique qui a été réalisée du 22 au 27 septembre 2008 à bord du navire océanographique « Côte d'Aquitaine » dans le cadre du projet COLMATAGE : "Coupages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine Aval". Les chalutages ont été réalisés dans un secteur compris entre Ouistreham et Antifer, et s'étendant du pont de Normandie à la sonde bathymétrique* des 20 m. 47 stations (1 trait/station) ont été prospectées avec une durée de 15 minutes pour chaque trait de chalut* (FIG II.1.1).

Les points de prélèvement sont en principe positionnés par tirage aléatoire mais, en matière de chalutage, on est contraint d'utiliser des zones connues des professionnels afin d'éviter les « croches » qui endommageraient le matériel. La présence de rochers, d'épaves et d'objets divers, ainsi que l'existence de zones interdites au chalutage, rendent difficile une couverture complète de la baie de Seine.

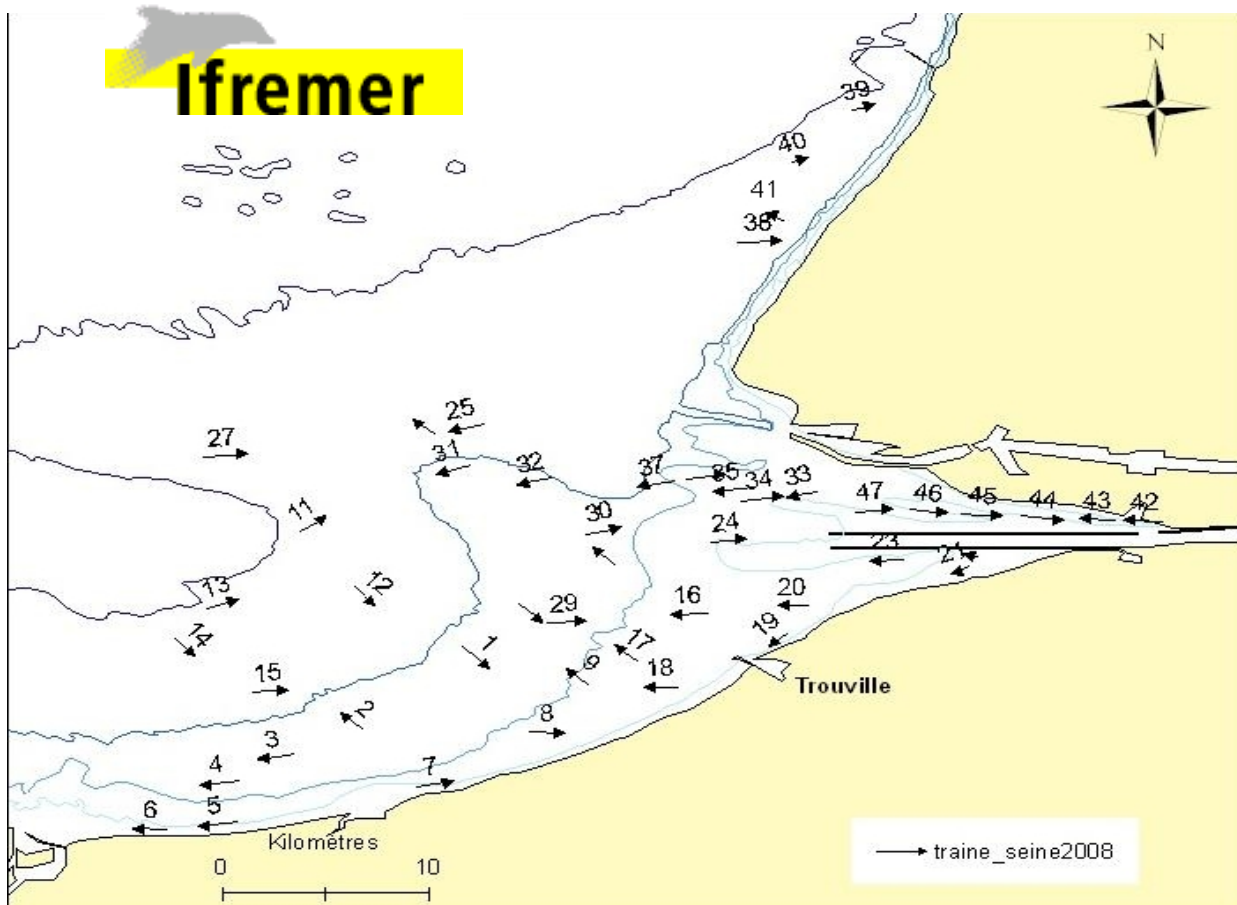


FIG II.1.1 "Localisation des traits de chaluts réalisés en estuaire de Seine, en septembre 2008, dans le cadre du projet COLMATAGE". Les flèches indiquent le sens de chalutage.

Une station correspond à un trait de chalut et les coordonnées géographiques utilisées dans le cadre de ce travail correspondent au milieu du trait de chalut.

Dans mon étude, les stations 38 à 41 ne sont pas prises en compte étant donné qu'elles sont trop éloignées des autres.

Données de poissons

Pour chaque station, nous avons les données d'abondance, c'est à dire le nombre de poissons de chaque espèce pêchés à cet endroit. Cependant tous les poissons pêchés ne sont pas analysés, pour chaque station on analyse entre 2 et 11 poissons de chaque espèce. Ainsi un total de 226 individus de solenettes, de 107 individus de plies et de 102 individus de soles ont été examinés pour leurs contenus digestifs durant le stage d'Armonie Tous Rius. Ce sont ces données que j'utilise dans mon tableau de contenus digestifs. Les mêmes poissons ont fait l'objet d'un prélèvement de muscle dorsal, puis d'une préparation (lyophilisation, broyage, pesée et encapsulage) pour les analyses isotopiques, qui ont été

réalisées en sous-traitance par le laboratoire SINLAB (University of New Brunswick). Les otolithes des mêmes poissons ont été analysés par l'IUEM (Université de Bretagne occidentale). Les données isotopes et microchimie des otolithes ont été obtenues dans le cadre du postdoc IFREMER (2009-2010) d'Eric Durieux.

Il est intéressant de regarder si les poissons d'une espèce donnée qui sont analysés sont représentatifs en terme de taille, de l'ensemble des poissons pêchés, et plus particulièrement des juvéniles pour les soles et les plies.

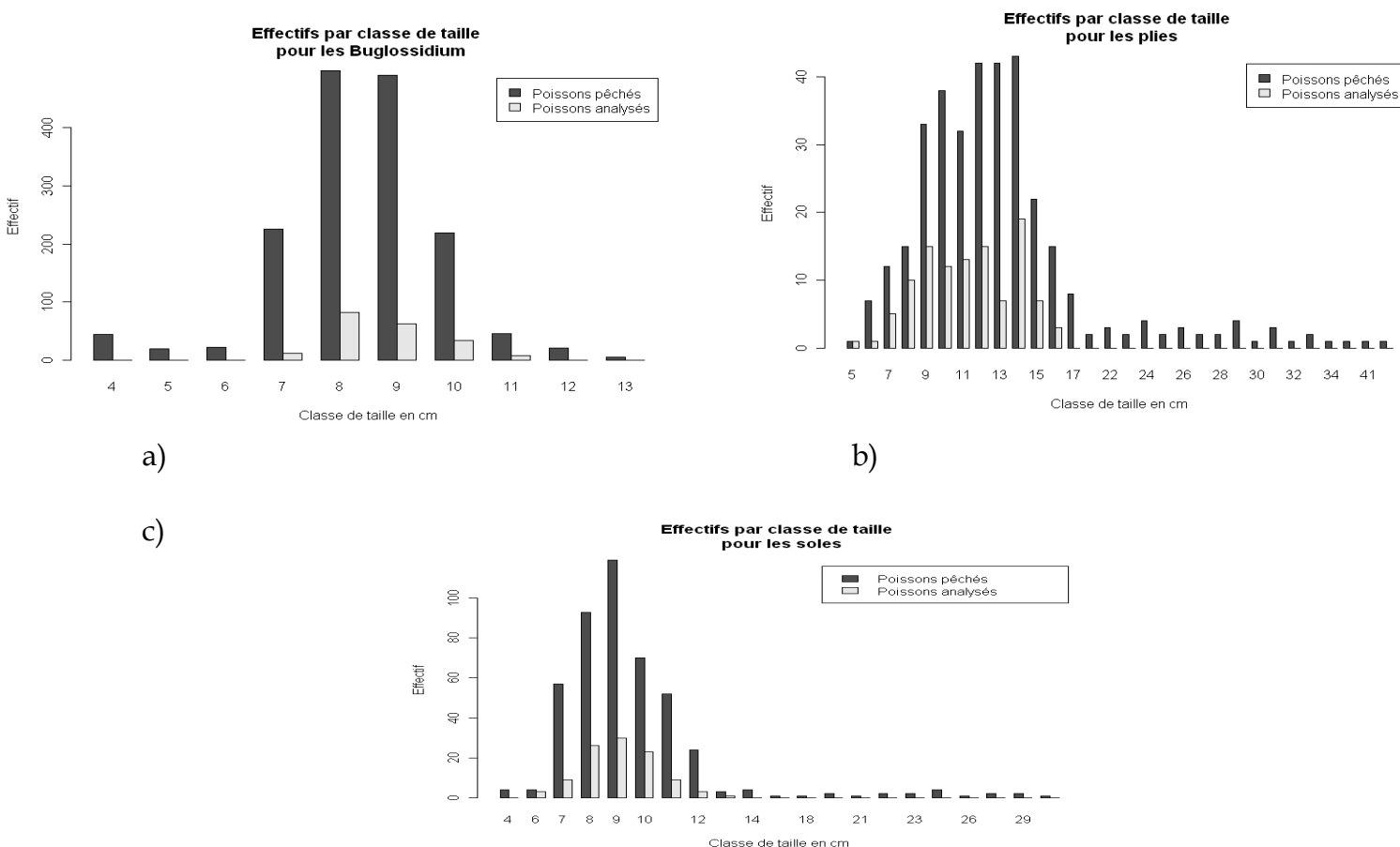


FIG II.1.2: Comparaison des effectifs de poissons pour chaque espèce, par classe de taille.(a: solenette, b: plie, c: sole).

On constate que pour les effectifs de poissons pêchés les plus élevés, on retrouve à peu près les effectifs de poissons analysés les plus élevés. Les classes de taille où on retrouve le plus de poissons sont les suivantes: de 7 à 11 cm pour les solenettes, de 7 à 16 pour les plies et de 7 à 12 cm pour les soles. Ces classes de taille représentent la classe d'âge des juvéniles pour les plies et les soles, alors que pour les solenettes elles représentent des poissons âgés de 2 à 4 ans.

Données de benthos

Des prélèvements à la benne ont eu lieu en parallèle des captures de poissons. Ces prélèvements ont été effectués afin d'étudier la distribution spatiale des proies benthiques potentielles des poissons. L'identification spécifique de ces proies a été effectuée par Sandrine Alizier (étudiante en thèse) au Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences de l'Université de Lille.

2) Description des données

Les données se composent de 3 parties/tableaux. Dans chaque tableau on retrouve certaines variables similaires: le trait de chalut* dans lequel le poisson a été pêché, son espèce, sa longueur, son âge, son poids et son identifiant. On a également les coordonnées géographiques (latitude et longitude) de chaque station. Dans notre cas une station correspond au milieu d'un trait de chalut. Chaque tableau correspond à un marqueur.

Dans le tableau des contenus digestifs (Table II.2.1), on a en plus des variables précédemment décrites, les différentes espèces de proies benthiques* retrouvées dans les contenus digestifs des poissons analysés. Une cellule $X[i, j]$ représente alors le nombre de proies (de l'espèce benthique concernée j) identifiées dans le contenu digestif de l'individu i .

Table II.2.1 Exemple de tableau des contenus digestifs (Tableau brut).

Trait	Espèces	ID	<i>Abra.alba</i>	<i>Ensis.spp</i>	...	<i>Glycera.spp</i>	<i>Nephtys.spp</i>
1	Buglossidium	Bu_1_1	0	0		2	0
1	Plie	Pl_1_3	0	1		0	3
2	Buglossidium	Bu_2_7	3	0		1	0
2	Buglossidium	Bu_2_9	1	0		0	0
8	Sole	So_8_1	0	0		0	0
...

Étant donné que les échantillons présentent de nombreuses espèces de proies (71 au total) mais que la plupart d'entre elles ne sont présentes que dans deux ou trois poissons, on obtient beaucoup de valeurs égales à 0 dans ce tableau de contenus digestif. On a donc choisi de regrouper les proies par guildes trophiques (voir table 1 en annexe). Une guildes trophique représente un groupe d'espèces ayant le même type de régime alimentaire. Ce choix nous permet de n'avoir que 7 variables qui ont une signification écologique (carnivores, détritivores, nécrophage, microbrouteurs, suspensivores, dépositives) au lieu des 71 si on avait pris chaque espèce de proie comme variable. On peut ainsi plus facilement interpréter une analyse en composantes principales (ACP) [Legendre& Legendre 1998] sur ce tableau (des 7 variables guildes trophiques) ou bien regarder les liens de ces variables avec les variables d'autres tableaux. On obtient donc, après regroupement des espèces de proies, le type de tableau suivant:

Table II.2.2 Exemple de tableau des contenus digestifs (tableau modifié).

Trait	Espèces	ID	Carnivores	Nécrophages	Détritivores	Suspensivores	Dépositives	Microbrouteurs
1	Buglossidium	Bu_1_1	7	3	0	6	0	0
1	Plie	Pl_1_3	6	1	1	0	3	0
2	Buglossidium	Bu_2_7	0	0	2	1	0	2
2	Buglossidium	Bu_2_9	1	2	0	3	5	0
8	Sole	So_8_1	0	1	1	4	0	1
...

Dans le tableau des isotopes, il n'y a que deux variables: les concentrations en d13C et en d15N pour chaque poisson.

Table II.2.3 Exemple de tableau des isotopes.

Trait	Espèces	ID	D13C	D15N
1	Buglossidium	Bu_1_1	-16,124	13,276
1	Plie	Pl_1_3	-15,777	13,512
2	Buglossidium	Bu_2_7	-15,258	15,372
2	Buglossidium	Bu_2_9	-15,817	14,439
8	Sole	So_8_1	-15,819	14,396
...

Enfin, en ce qui concerne le tableau des otolithes, le choix des éléments chimiques est le suivant :

pour la plie : Al27_MR, Ba135_LR, Ca43_MR, Cu63_MR, K39_HR, Li7_LR, Mg25_MR, Mn55_MR, Na23_MR, Sr86_MR, Sr88_MR , le rapport Sr88_MR:Ca43_MR

Ce sont les mêmes pour la sole avec en plus le Cd111_LR et il n'y a pas de données otolithes pour les solenettes car cette analyse se réalise sur des juvéniles et dans cette étude les solenettes sont toutes des adultes.

Le choix de ces éléments a été fait à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales (ACP), des informations dans littérature concernant la baie de Seine et grâce aux conseils d'Éric Durieux sur une base de 33 éléments chimiques (en fonction de la physiologie des espèces). Ce choix permet d'éliminer des variables redondantes et d'avoir des inerties plus importantes pour les deux premiers axes de l'ACP. Les variables du tableau correspondant à la microchimie des otolithes (Table II.2.4), sont donc les éléments chimiques sélectionnés dont les concentrations figurent dans les cellules de ce tableau.

Table II.2.4 Exemple de tableau des éléments chimiques dans les otolithes.

Trait	Espèces	ID	Al27_MR	Ba135_LR	Ca43_MR	...	Na23_MR	Mg25_MR
1	Plie	Pl_1_2	0,284	1,988	417624,552		2809,475	22,478
1	Plie	Pl_1_3	0,347	2,346	415673,222		2833,595	25,300
2	Plie	Pl_2_3	0,328	1,548	408439,916		2655,180	21,667
2	Sole	So_2_7	0,548	1,757	395282,831		2629,241	22,039
8	Sole	So_8_1	0,284	2,595	395911,855		2576,234	24,075
...

3) Analyse individuelle des marqueurs

Avant d'utiliser les méthodes combinatoires pour les 3 marqueurs, il faut tester la pertinence de chaque marqueur. On cherche en effet à savoir s'il existe une variabilité inter-espèce permettant de bien différencier les espèces au travers de chaque marqueur. On cherche également à savoir, pour une espèce donnée, s'il existe une variabilité spatiale du marqueur. En effet, le but étant de caractériser spatialement les habitats via les marqueurs, il faut que chaque marqueur présente une variabilité spatiale. Par exemple, pour chaque espèce, les moyennes des concentrations en d13C doivent être différentes entre les stations. Ces deux variabilités (inter-espèce et spatiale) sont ensuite utilisées pour

différencier les habitats de chaque espèce à travers les 3 marqueurs.

On commence donc par une analyse de chaque marqueur pour répondre à deux principales questions pour chaque marqueur:

« Existe-il une différence entre les 3 espèces au niveau de ce marqueur ? »

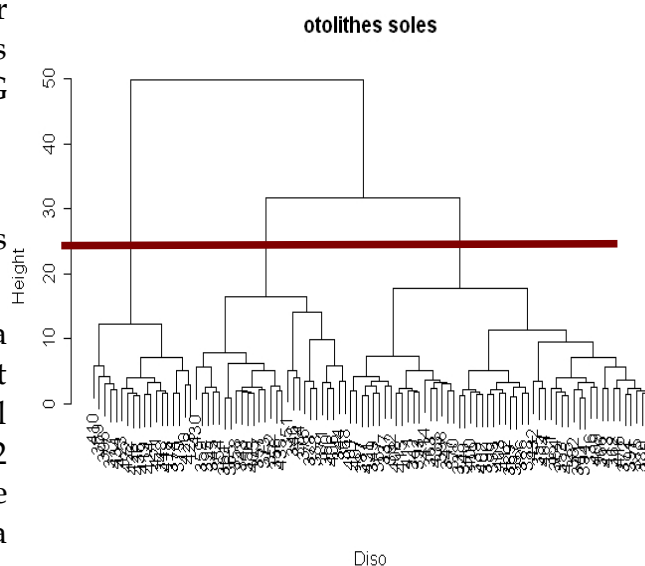
« Pour chaque espèce, ce marqueur présente-il une structure spatiale dans la baie de Seine ? »

Chaque question est traitée grâce à des méthodes statistiques adéquates (analyse de la variance, analyse graphique, etc).

Ensuite, on cherche à regrouper les individus de la même espèce par leurs caractéristiques communes pour chaque marqueur. Par exemple, on cherche à regrouper les plies qui se ressemblent en terme de concentrations isotopiques. On obtient donc pour chaque marqueur et pour chaque espèce un regroupement particulier qui a été fait par classification ascendante hiérarchique (CAH) avec la méthode de Ward [Legendre & Legendre 1998]. Le choix du nombre de groupes a été déterminé à l'aide des dendrogrammes (voir Fig 1, 2 et 3 en annexe) pour chaque couple (marqueur, espèce) en utilisant la méthode suivante: on considère les hauteurs des branches entre deux séparations et on prend la séparation où cette hauteur est la plus grande. Cependant cette séparation doit prendre en compte deux contraintes. Tout d'abord il faut qu'il y ait un assez grand nombre de groupes (au moins 3) pour qu'il y ait assez de variabilité entre les groupes en ce qui concerne les variables biologiques (Taille, Age, etc) et spatiales (Longitude et Latitude). Il faut également que les groupes aient à peu près le même nombre d'individus (au moins 8) pour qu'il y ait un minimum de variabilité intra-groupe. Par exemple pour les soles, la CAH sur les données d'otolithes donne le dendrogramme suivant (FIG II.3.1).

FIG II.3.1 Dendrogramme obtenu par CAH sur les données de microchimie des otolithes de soles.

La hauteur de branche entre 2 séparations est la plus grande si on coupe l'arbre en 2. Cependant nous ne pouvons pas prendre que 2 groupes car il n'y aurait pas assez de variabilité entre ces 2 groupes. La hauteur suivante la plus grande correspond à une séparation en 3 groupes. On va donc couper cet arbre en 3 groupes.



Ce critère de sélection pour le nombre de groupes est assez subjectif. En effet, les méthodes statistiques classiques pour choisir le nombre de groupes après une CAH ([Calinski & Harabasz],[Hartigan]) donnent des résultats souvent différents des choix de cette étude. Cependant la robustesse des méthodes utilisées avec des groupements différents est présentée plus loin. Ainsi le choix du nombre de groupes modifie assez peu les résultats finaux.

Les nombres de groupes ainsi obtenus, par espèce sont les suivants:

(7 groupes isotopes, 3 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les plies;

6 groupes isotopes, 3 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les soles;

7 groupes isotopes et 4 groupes contenus digestifs pour les solenettes)

Une fois ces groupes créés, on regarde leurs caractéristiques biologiques (Taille, Poids, Age) et spatiales (moyenne et écart type des coordonnées des stations de prélèvement des poissons qui sont dans chaque groupe). Des précisions sur chaque tableau/marqueur sont nécessaires.

a) Contenus digestifs

Il faut préciser que les données de contenus digestifs ont préalablement subi la transformation d'Hellinger[Legendre & Gallagher 2001][Legendre& Legendre 1998]. L'ACP ne préserve pas les données d'abondance des proies car elle se base sur les distances euclidiennes entre les poissons. Il nous faut donc un coefficient de transformation des données qui préserve ces relations euclidiennes. La distance d'Hellinger permet de faire cela, en plus de réduire l'importance relative des proies très abondantes. En appliquant la distance d'Hellinger sur les données des contenus digestifs, une ACP peut ainsi être effectuée.

Pour chaque ligne du tableau des contenus digestifs (pour chaque poisson en fait), la transformation d'Hellinger est la suivante: on divise chaque élément (cellule d'une ligne) par le nombre total des proies du poisson (somme sur les éléments de la ligne), puis on prend la racine carré de ce résultat.

La caractérisation des contenus digestifs de chaque espèce a été effectuée durant le stage d'Armonie TOUS RIUS.[TOUS_RIUS]. Cependant, le regroupement par guildes trophiques n'avait pas été fait. Il est donc intéressant de regarder s'il existe une différence entre les 3 espèces lorsque les proies sont regroupées par guildes trophiques.

b) Isotope $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$

Tout d'abord pour différencier les espèces en termes d'isotopes, on regarde les signatures isotopiques (moyenne et écart-type par station) de chacune des 3 espèces ainsi que les répartitions (boîtes à moustache ou boxplot) de chaque isotope pour chaque espèce.

Pour observer s'il existe une structure spatiale dans la baie de Seine, une bulle est associée à chaque station, de diamètre proportionnel à la concentration moyenne de tous les individus d'une même espèce en isotope $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$.

Il faut préciser que le tableau des isotopes a été centré et réduit avant d'être utilisé pour la CAH.

c) Microchimie des otolithes

Comme pour les isotopes, on regarde les répartitions des concentrations des éléments sélectionnés pour chaque espèce pour différencier les soles et les plies. L'intégration de la microchimie des otolithes serait difficile à interpréter et à comparer avec les autres espèces. On regarde également, pour chaque élément, la répartition par station pour une espèce grâce à un graphique par bulle.

Là encore, le tableau des otolithes a été centré et réduit avant d'être utilisé pour la CAH.

4) Première approche statistique pour combiner les marqueurs: analyse multi-couches

L'analyse multi-couches est une superposition des informations provenant des trois marqueurs. En effet après avoir réalisé, pour chaque marqueur, une analyse précise des données, on peut combiner les résultats pour notamment déterminer les zones fortement fréquentées par chaque espèce de poisson.

a) Création des couches

On crée une couche pour chaque groupe (espèce, marqueur) qui a été défini au-par-avant par CAH sur chaque marqueur.

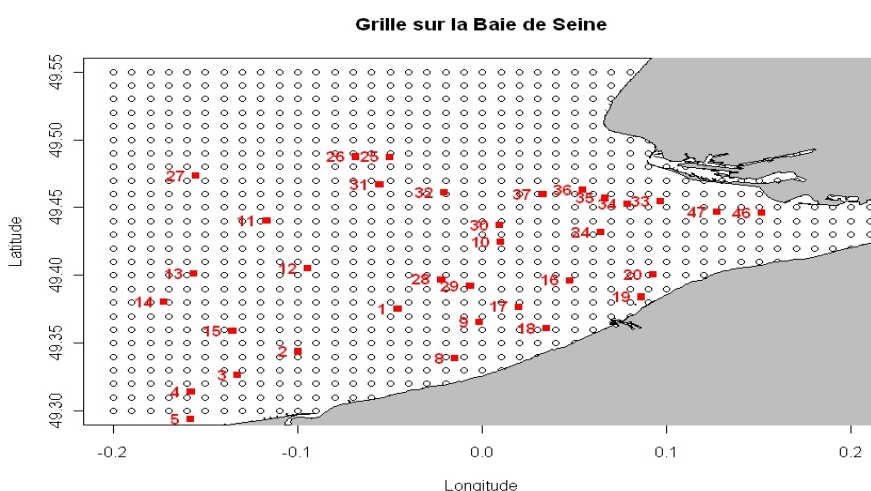


Fig II.4.a.1 Représentation des cellules sur la Baie de Seine avec l'ensemble des stations.

La création de couches se fait en commençant par un quadrillage de la baie de Seine, c'est à dire qu'on crée une grille de cellules equi-espacées sur l'ensemble de la baie de Seine. Les cellules sont séparées d'un kilomètre les unes des autres. On représente cette grille avec en rouge l'ensemble des stations considérées.

Ensuite on considère que la zone probable pour l'habitat du groupe (numéro de groupe, espèce, marqueur) est représentée par les cellules de la grille qui sont les plus proches des stations appartenant à ce groupe. Par exemple, si une plie alpha fait partie du groupe 3 des otolithes, elle n'est évidemment pas toute seule dans ce groupe. Les plies qui lui ressemblent du point de vue du marqueur otolithe ne proviennent pas obligatoirement de la même station. On considère donc que les stations liées au groupe « 3 otolithes plie » sont toutes les stations dans lesquelles on a au moins 1 poisson du groupe « 3 otolithes plie ». On ne considère donc, pour chaque station, que les présences/absences de ce groupe sans prendre en compte le nombre de poissons analysés à cette station.

Ensuite, les cellules qui vont être associées à ce groupe sont celles qui sont proches des stations du groupe 3 (à un rayon de moins de 2 km). Le choix de prendre 2 km comme distance limite (notée dlim) entre une cellule et une station vient du fait que les traits de chalut* ont été effectués en ligne droite sur une distance d'à peu près 1,5 km. Or, lorsque le chalut est remonté, il n'est pas possible de connaître l'endroit exact où a été pêché le

poisson, s'il l'a été au début ou à la fin du trait. On considère donc une zone uniforme de 2 km autour du milieu du trait de chalut comme étant le lieu où vivait le poisson lorsqu'on l'a pêché (FIG II.4.a.3).

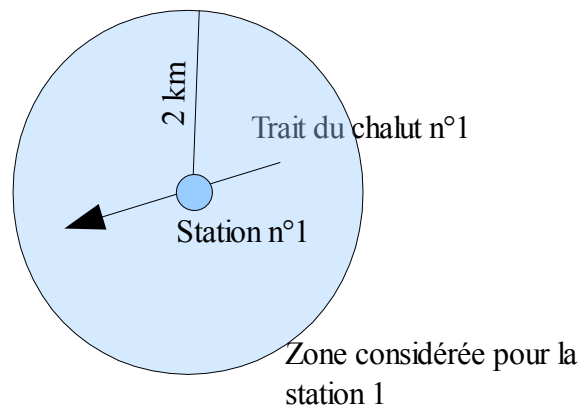
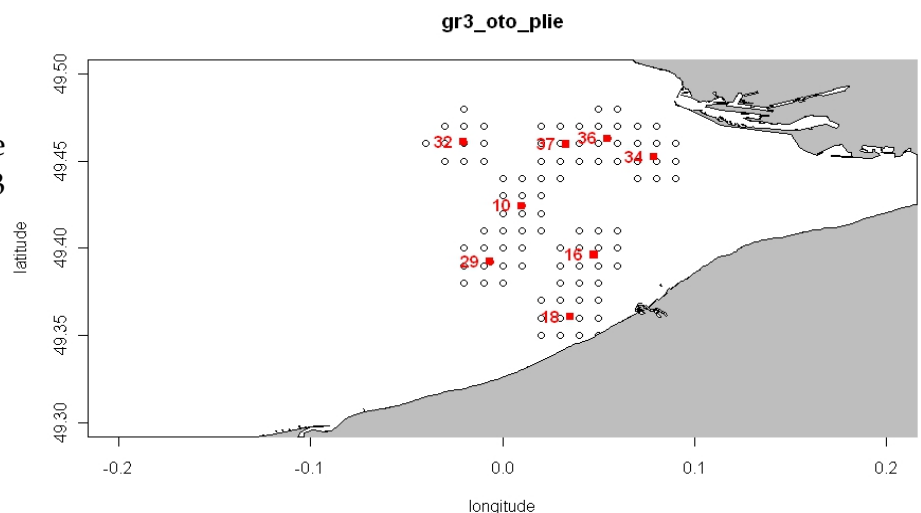


FIG II.4.a.3: schéma de la zone considérée pour une station

On sélectionne ainsi les cellules autour des stations d'un groupe pour représenter les zones de présence de ce groupe. Par exemple, pour le groupe 3 otolithes plies on ne représente que les cellules liées à ce groupe avec en rouge le positionnement et le numéro des stations liées au groupe. Chaque carte représente donc l'habitat « potentiel » des individus appartenant à un même groupe.

Fig II.4.a.3 Zone de présence du groupe 3 otolithes plies



b) Combinaison des couches

L'analyse multi-couches consiste à combiner les regroupements fait par CAH, par marqueur et par espèce, pour une meilleure caractérisation des zones géographiques de présence. Étant donné que nous avons les cartes de présence de chaque groupe, en superposant ces cartes (tous marqueurs confondus, pour une même espèce), nous obtenons une carte de présence de l'ensemble de l'espèce avec « un poids de présence » plus ou moins fort. En d'autres termes, c'est une carte déterminée par la convergence spatiale de l'information des marqueurs.

La méthode est la suivante: je commence par utiliser, sur R, une fonction qui somme, pour chaque cellule de la grille le nombre de fois ou celle ci est prise en compte dans un groupe.

Ainsi, comme chaque poisson est rattaché à un groupe contenus digestifs, un groupe isotopes et un groupe otolithes (sauf pour les solenettes où il n'y a pas de groupe otolithes), chaque cellule est associée à un « un poids de présence » $cf_{(k,i)}^G$ de 0, 1, 2 ou 3 pour un poisson donné i de l'espèce k en fonction des groupes auxquels il est rattaché.

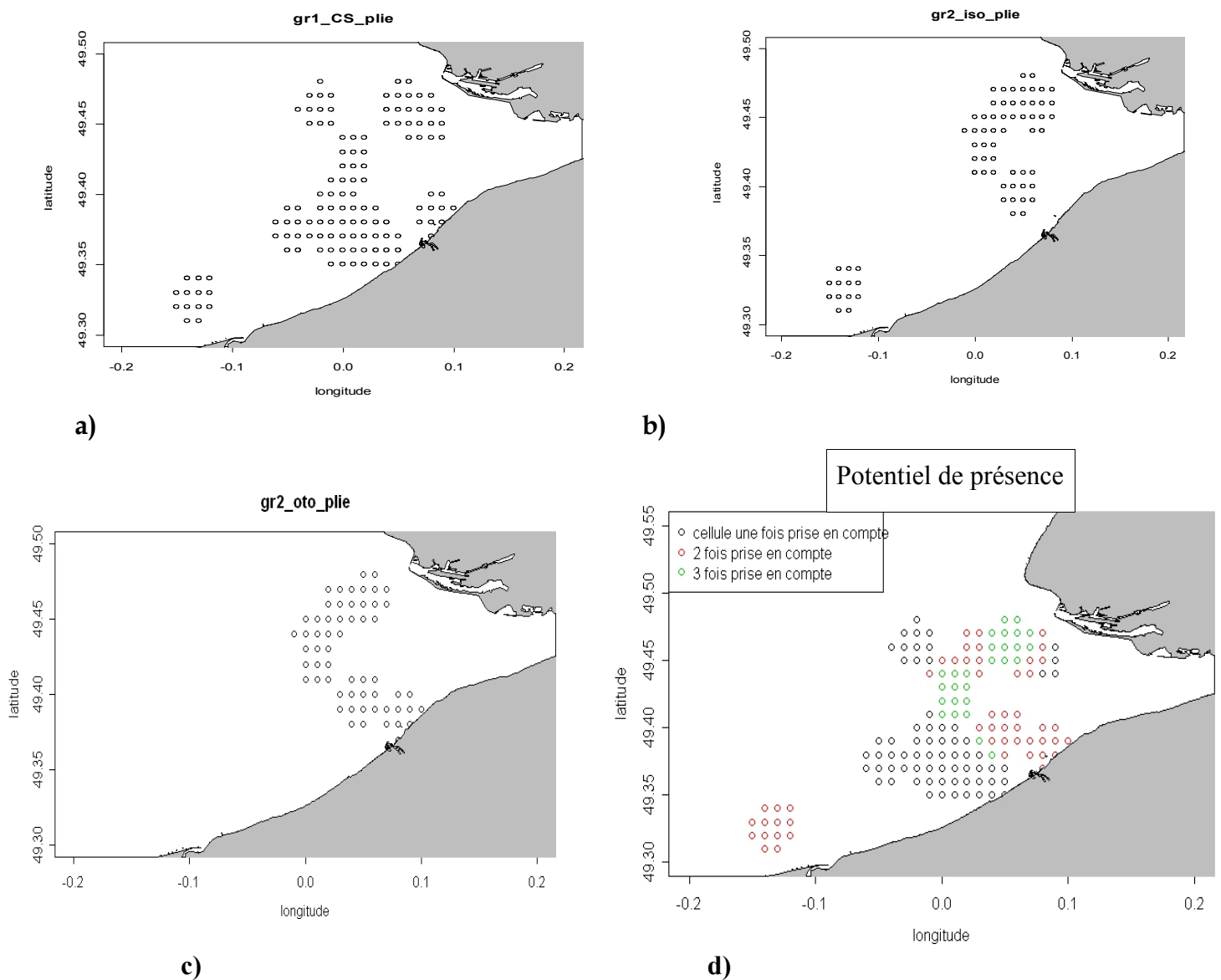


Fig II.4.b.1: Carte des habitats potentiels pour 3 groupes et carte de superposition.

Prenons par exemple une plie « alpha » qui fait partie du groupe « 1 Contenus digestifs(CS) », du groupe « 2 isotopes (iso) » et du groupe « 2 otolithes (oto) ». Les cellules rattachées à chaque groupe sont représentées sur les cartes de la figure II.4.b.1

La carte de la figure II.4.b.1 d) est le résultat de la superposition des 3 couches représentées sur les autres cartes. C'est en quelque sorte, une carte représentant un « poids » ou un « potentiel » de présence rattachée à chaque cellule. Les cellules qui font partie des 3 groupes auxquels appartient la plie alpha (intersection des 3 groupes) sont représentées en vert et correspondent à l'endroit le plus probable pour l'habitat potentiel de la plie alpha.

Ensuite, une autre fonction fait la somme des « poids de présence » $cf_{(k,i)}^G$ rattachés à chaque cellule, pour tous les poissons d'une espèce. On obtient ainsi un coefficient/poids de présence pour chaque cellule pour une espèce donnée.

Mathématiquement, Soient

- cf_k^G Le « poids de présence » rattaché à une cellule G pour l'espèce k. $1 \leq k \leq 3$
- $cf_{(k,i)}^G$ Le « poids de présence » rattaché à une cellule G pour un individu i de l'espèce k. Il prend les valeurs 0, 1, 2 ou 3 en fonction du nombre de fois où la cellule G est prise en compte dans les groupes du poisson i.
- N_k : le nombre de poissons analysés de l'espèce k.

On a alors

$$cf_k^G = \sum_i^{N_k} cf_{(k,i)}^G$$

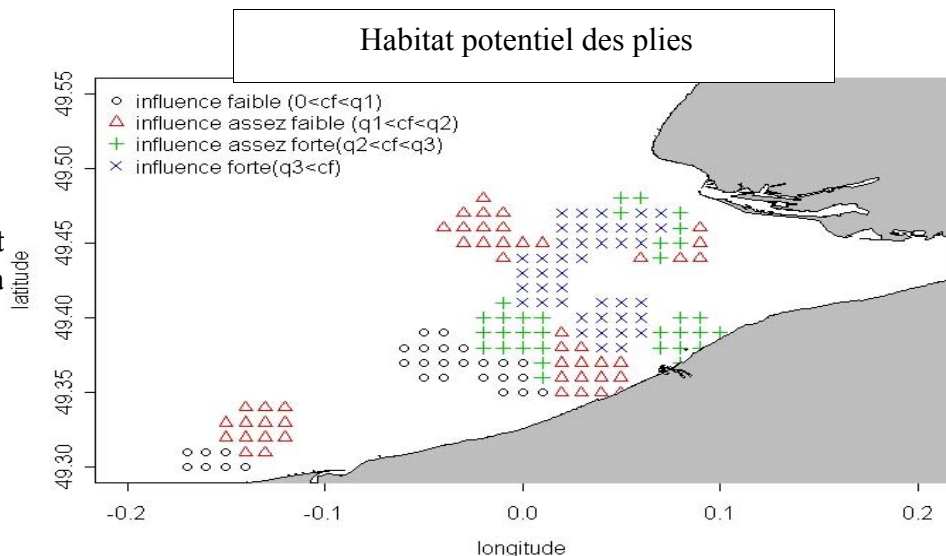
Une fois tous les cf_k^G calculés pour chaque cellule, on attribue un « coefficient de présence » à chaque cellule en fonction de la comparaison de leur cf_k^G aux quantiles de l'ensemble des cf_k^G :

- 0 si la cellule n'est jamais prise en compte dans aucun des groupes, cela signifie que la cellule est alors à plus de 2 km de n'importe quelle station.
- 1 si le cf_k^G de la cellule est inférieur au premier quantile.
- 2 si le cf_k^G de la cellule est entre le premier quantile et la médiane.
- 3 si le cf_k^G de la cellule est entre la médiane et le 3e quantile.
- 4 si le cf_k^G de la cellule est supérieur au 3e quantile.

Ainsi, si le coefficient de présence d'une cellule est de 4, elle correspond à une zone d'habitat potentiel pour plus de 75% des poissons de l'espèce considérée.

Pour montrer le type de carte qui peut être obtenu, nous prendrons pour exemple la plie (Fig II.4.b.2)

Fig II.4.b.2: Carte d'habitat potentiel pour la plie par la méthode multi-couches.



Le « poids de présence » cf_k^G d'une cellule varie donc en fonction du nombre de groupes qui recouvrent cette zone et du nombre de poissons qu'il y a dans ces groupes. Deux variables peuvent donc influencer les résultats de cette méthode : le nombre de groupements (c'est-à-dire le seuil auquel l'arbre de classification est coupé) et la distance minimale utilisée afin de considérer que deux stations appartiennent au même groupe. Afin de tester la robustesse de cette méthode à ces deux variables, des analyses de sensibilités ont été conduites en utilisant différents groupements (différents seuils de coupure du dendrogramme des CAH) sur un marqueur mais également lorsqu'on modifie les groupements des 3 marqueurs à la fois. Différentes distances minimales (dlim de 1.5 et 2 km) on également été testées. On peut également se demander si le résultat des cartes n'est pas dû tout simplement aux nombres de poissons analysés par station. En d'autres termes, peut-être que plus une station est reprise dans la superposition des couches (lorsque l'on superpose les habitats potentiels de tous les poissons) et plus le coefficient de présence à cette station est élevé. La corrélation entre le nombre de poissons analysés par station et le coefficient de présence a donc été calculé pour chaque espèce.

5) Deuxième approche statistique: multi-tables

Étant donné qu'on possède 3 tableaux (un par marqueur) pour les mêmes individus, on peut croiser ces tableaux pour identifier les structures communes. On analyse globalement les 3 tableaux pour rechercher les corrélations entre eux. Le but est de mettre en évidence les traits caractéristiques des individus et des variables ainsi que les liens entre individus et variables. Pour cela nous comparons deux méthodes statistiques (analyse de co-inertie multiple et méthode STATIS). Il existe bien sûr d'autres méthodes statistiques permettant de répondre à notre problématique (l'analyse factorielle multiple (AFMULT), analyse procrustéenne ...) mais pour des raisons évidentes de temps, seules les méthodes MCOA [P. Bady et al] [Chessel & Hanafi] et STATIS [Lebart et al] [Ch, Lavit] sont approfondies.

a) Méthode Statis

Dans la Méthode Statis (Structuration des Tableaux A Trois Indices de la Statistique), développée par l'équipe d'Escoufier (Escoufier 1980, Lavit 1988), on cherche à faire un compromis des tableaux (structure générale de l'ensemble des tableaux) avant de faire une ACP. Cela permet d'accorder à un marqueur (tableau) une importance d'autant plus grande qu'il possède une structure proche du compromis. Le principe est le suivant:

1) On note X_i le tableau centré réduit numéro i. On calcule les facteurs d'échelles

$$\mu_i = \sqrt{\text{trace}(X_i' X_i)} \quad \text{et} \quad M = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \mu_i \quad \text{On note alors} \quad Z_i = X_i * \frac{M}{\mu_i}$$

2) On calcule ensuite la matrice W de similarités entre les poissons $W_i = Z_i \cdot Z_i'$

3) On calcule la matrice des RV (corrélations vectorielles) qui donne un indice de similarité entre marqueurs $RV(W_k, W_i) = \frac{\text{trace}(W_k \cdot W_i)}{\sqrt{\text{trace}(W_k \cdot W_k) \cdot \text{trace}(W_i \cdot W_i)}}$

4) On extrait le « poids » α_i de chaque tableau X_i , $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ est le 1er vecteur propre de la matrice des RV (en valeur absolue).

5) On calcule le compromis $\bar{W} = \sum_k \alpha_k W_k$

6) On réalise une ACP sur \bar{W}

Cette méthode permet d'extraire la structure commune des tableaux et d'analyser ensuite cette structure. Il est ainsi possible de regarder les $RV(W_k, \bar{W})$ pour voir quel tableau a une structure proche du compromis.

Dans cette méthode, on utilise les similarités entre les tableaux mais il peut arriver que ce lien soit trop faible pour permettre de voir ressortir une co-structure. On peut d'ailleurs tester chaque coefficient RV en faisant un test par permutation de Monte-Carlo pour voir si la co-structure n'est pas liée au hasard [Heo et Gabriel 1997]. On compare la co-structure observée de deux tableaux à un grand nombre de permutations aléatoires dans l'appariement des deux tableaux. Ainsi les lignes des deux tableaux sont permutées simultanément. A chaque permutation aléatoire on assure un recentrage des tableaux, la pondération associée aux lignes restant fixée. On a alors $H_0 =$ « Le coefficient RV observé est plus petit que celui obtenu par permutation des lignes ». Ainsi si on refuse H_0 , c'est que le coefficient RV entre deux tableaux n'est pas dû au hasard et donc qu'il existe bien un lien entre les deux tableaux.

Si la valeur du RV pour chaque paire de tableaux est significative, alors on peut penser que l'analyse STATIS est pertinente car elle utilise ces coefficients RV (à travers le poids associé à chaque tableau) pour créer le compromis. À l'inverse, si les coefficients RV ne sont pas significatifs ou si l'on veut étudier la structure de chaque tableau avant d'en faire un compromis, il sera plus pertinent d'utiliser la méthode MCOA.

De plus, on peut représenter l'importance de chaque tableau dans la création du compromis grâce au poids α_i mais également grâce au \cos^2 , c'est à dire le cosinus-carré entre le tableau/marqueur k et le compromis. [Chessel et al.]. Plus le \cos^2 du tableau est fort et plus ce tableau est proche du compromis.

b) Analyse de co-inertie multiple MCOA

Cette technique d'ordination permet l'analyse simultanée de k tableaux. Le principe est le suivant :

- 1) On a K tableaux, X_1, X_2, X_3, \dots centrés et réduits par colonnes, ayant les mêmes lignes mais pas forcément le même nombre de colonnes (variables), ils définissent K nuages de points dans K espaces euclidiens. Les points sont pondérés de la même manière dans chaque nuage.
- 2) Pour chaque tableau X_i , tout comme dans une ACP, on cherche un vecteur normé U_i^1 sur lequel on projette le nuage. On le choisit de façon à maximiser le critère suivant:

$$\sum_{i=1}^K w_i \text{cov}^2(U_i^1, v^1) \quad \text{avec } v^1 \text{ appelée variable auxiliaire ou variable de référence.}$$

Et w_i est le poids donné pour le tableau/marqueur k et correspond ici à l'inverse de l'inertie totale du tableau/marqueur k .

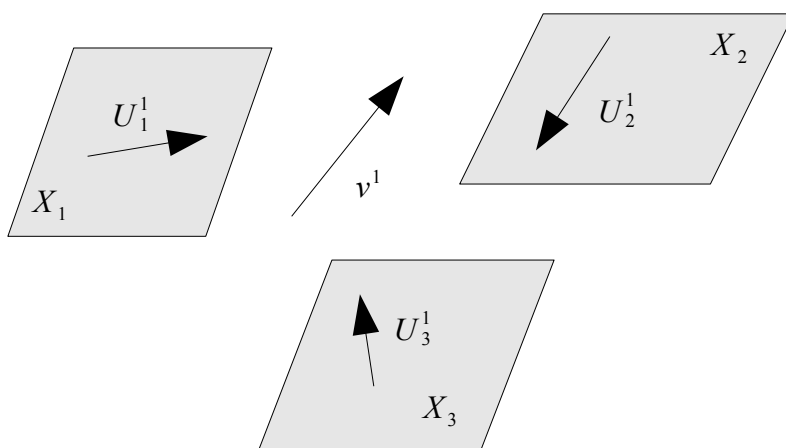


Fig II.5.b.1: schéma explicatif pour la méthode MCOA.

3) Ensuite, on cherche les vecteurs $U_1^2, U_2^2, U_3^2, \dots$ et v^2 de façon à maximiser $\sum_{i=1}^K w_i \text{cov}^2(U_i^2, v^2)$ sous la contrainte que pour tout i , U_i^1 soit orthogonale à U_i^2 et que v^1 soit orthogonale à v^2 .

4) On renouvelle l'opération m fois, m étant le minimum des nombres de colonnes des tableaux. On a donc à la fin $m \cdot K$ vecteurs U_i^j $1 \leq i \leq K$ et $1 \leq j \leq m$ qui sont les scores des axes de co-inerties. En notant $U_i^j = X_i a_i^j$, on a a_i^j vecteur des coordonnées du tableau k sur la dimension j .

La MCOA peut être vue comme un compromis entre les ACP (ou AFC) des K -tableaux. Dans notre cas on dispose ainsi d'une analyse simultanée des 3 marqueurs après leur ACP respective.

Pour avoir un indicateur de la participation de chaque tableau à la structure commune des 3 tableaux, on utilise le cov^2 . Il correspond à la covariance au carré entre les scores (coordonnées dans les deux premières dimensions de l'analyse) des individus dans l'analyse individuelle d'un tableau et les scores des individus dans l'analyse MCOA des 3 tableaux, et ceci pour une seule dimension.

Par exemple le cov^2 pour la dimension 1 du tableau des isotopes se calcule en prenant la covariance au carré entre les scores sur la dimension 1, obtenus après ACP sur les isotopes, et les scores sur la dimension 1 de l'analyse MCOA sur les 3 tableaux. Ainsi, si le cov^2 entre un tableau K et une dimension i de la co-structure est fort alors ce tableau sera d'avantage pris en compte pour créer la dimension i .

c) Utilisation de la structure commune (STATIS ou MCOA)

Après avoir obtenu un tableau de « synthèse » des 3 marqueurs, il est possible de faire de l'analyse de groupements sur les coordonnées des individus dans chaque analyse pour faire ressortir des groupes des poissons et leur typologie; notamment pour voir si les groupes se distinguent par leur zone géographique. L'analyse de groupement est effectuée de la même manière que pour l'analyse multi-couches, à savoir par CAH avec la méthode de Ward et avec le même critère pour le choix du nombre de groupes (voir II.3).

6) *Troisième approche: Modèle hiérarchique*

a) **Modèle imbriqué à 2 niveaux**

La description des différents marqueurs a montré que ceux-ci étaient hiérarchisés sur une échelle temporelle et spatiale. Il est donc pertinent de s'intéresser à cette caractéristique en utilisant un modèle statistique hiérarchisé, pour chaque espèce prise individuellement.

Le modèle à 3 niveaux hiérarchisés étant trop complexe et non envisageable dans notre cas étant donné que le nombre d'individus n'est pas suffisant; il est plus simple de considérer un modèle à 2 niveaux. Il faut pour cela, déterminer un marqueur à exclure. La microchimie des otolithes fournissant des informations sur une échelle temporelle beaucoup plus grande que les autres marqueurs (depuis la naissance du poisson), on peut penser que l'influence du marqueur isotope (échelle de temps de 1 à 2 mois) sur la microchimie des otolithes est moins forte que celle des contenus digestifs sur les isotopes. De plus les contenus digestifs et les isotopes sont liés du fait que c'est le régime alimentaire du poisson qui détermine les concentrations en $d^{13}C$ et $d^{15}N$, alors que les concentrations des éléments chimiques des otolithes varient surtout en fonction de l'environnement du poisson (concentration des éléments chimiques dans l'eau). Enfin le dernier argument allant dans le sens d'une exclusion de la microchimie des otolithes est qu'on ne possède pas de données relatives à ce marqueur pour les solenettes. Il est donc plus pertinent de choisir comme niveau 1, les contenus digestifs et comme niveau 2 les isotopes.

On commence par faire une analyse de groupement sur les isotopes pour chaque espèce de la même manière que pour l'analyse Multi-couches, c'est à dire par CAH sur les isotopes avec la méthode de « Ward ». Le critère pour le choix du nombre de groupes reste le même (hauteur des branches les plus longues entre 2 séparations). Cependant cette fois, on veillera à garder un nombre de poissons suffisant pour pouvoir refaire une CAH sur chaque groupe. En effet, après avoir créé p groupes isotopes, on réalise une nouvelle analyse de groupement (de la même manière que les précédentes) sur les contenus digestifs des poissons de chaque groupe isotope. On obtient ainsi des sous-groupes contenus digestifs à l'intérieur de chaque groupe isotope (FIG II.6.a.1).

On considère, ensuite, pour chaque poisson, l'abondance liée à la station où le poisson a été pêché, on normalise cette abondance par la surface chalutée (en km^2) pour obtenir la densité comme variable réponse. A noter que les poissons d'une même station auront la même densité.

On cherche alors à savoir s'il existe des différences de densité (en moyenne) entre les groupes isotopes mais également entre les sous-groupes contenus digestifs à l'intérieur d'un même groupe isotope. On ne peut pas utiliser une ANOVA à 2 niveaux hiérarchisés pour faire cette analyse étant donné que la variable densité est loin d'être normale, même en passant au logarithme (test de Shapiro, $pval = 6.8^{-7}$ pour les données logarithmiques) et que les différents groupes n'ont pas les mêmes variances (test de Bartlett, $pval < 0,05$). Pour analyser les effets des groupes sur les densités, on utilise donc le test de Kruskal-Wallis (test non-paramétrique sur les rangs).

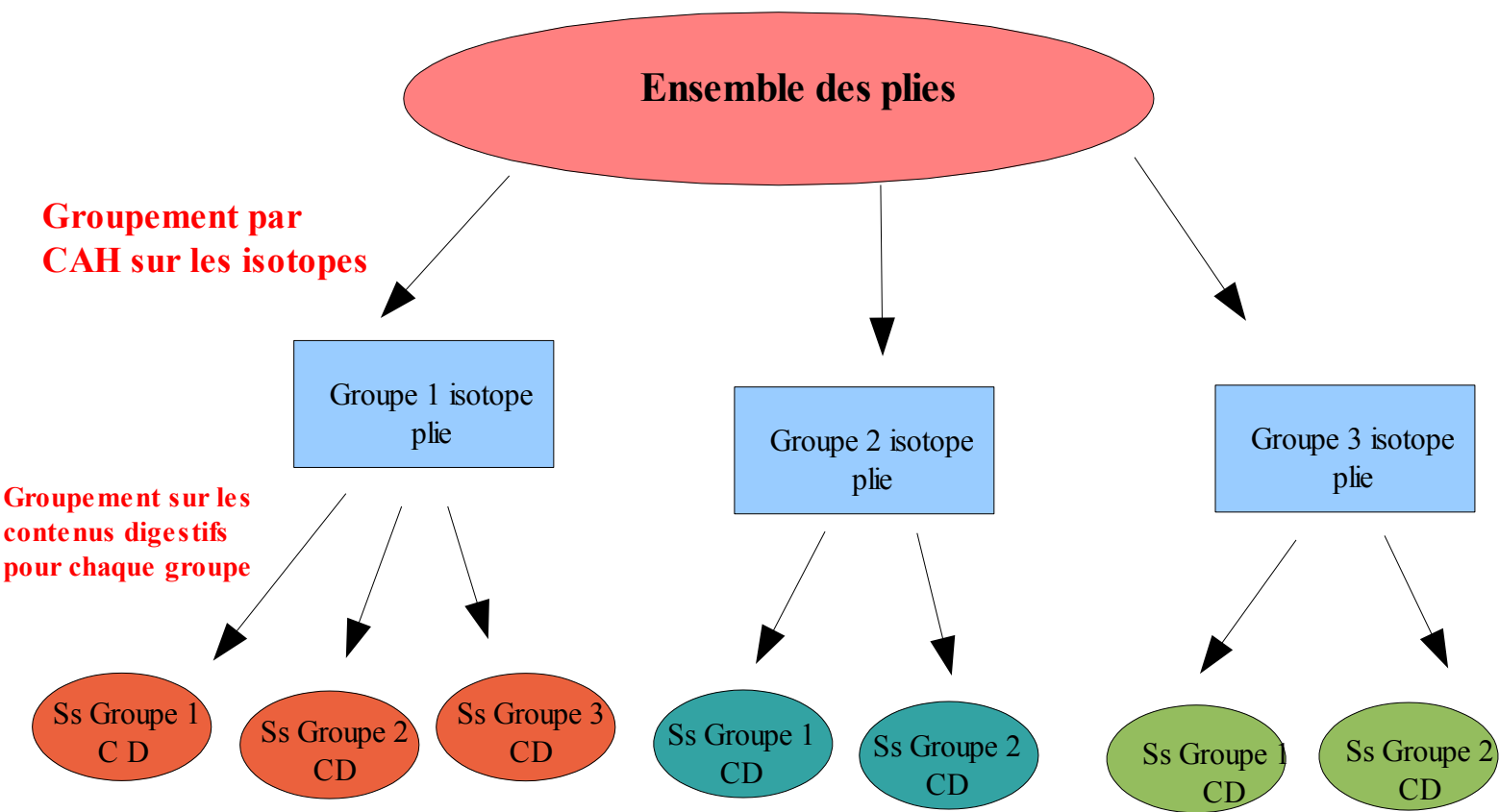


FIG II.6.a.1 Schéma récapitulatif du groupement hiérarchique.

Plusieurs tests statistiques ont été réalisés pour vérifier les différences de moyennes entre les espèces ou entre les groupes d'individus. Lorsque les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité (égalité des variances) sont vérifiées (test de Shapiro pour la normalité et test de Bartlett pour l'homoscédasticité), des tests ANOVA sont effectués. Sinon, on utilise le test de Kruskal-Wallis qui est un test non-paramétrique sur les rangs. Pour analyser les différences de moyennes 2 à 2, on utilise le test de Tuckey après une analyse ANOVA ou bien le test de Wilcoxon après un test de Kruskal-Wallis. Pour faciliter la lecture des différences significatives entre les groupes, on utilise un système alphabétique, à savoir que les groupes n'ayant pas de différences significatives ont la même lettre.

III) Résultats

1) Cartographie des abondances

Cartographie des 3 espèces de poissons

On commence par représenter les cartes d'abondance, c'est à dire le nombre de poissons pêchés dans chaque station pour chaque espèce. Cela nous donne un premier aperçu de la distribution spatiale de chaque espèce (Fig III.1.1).

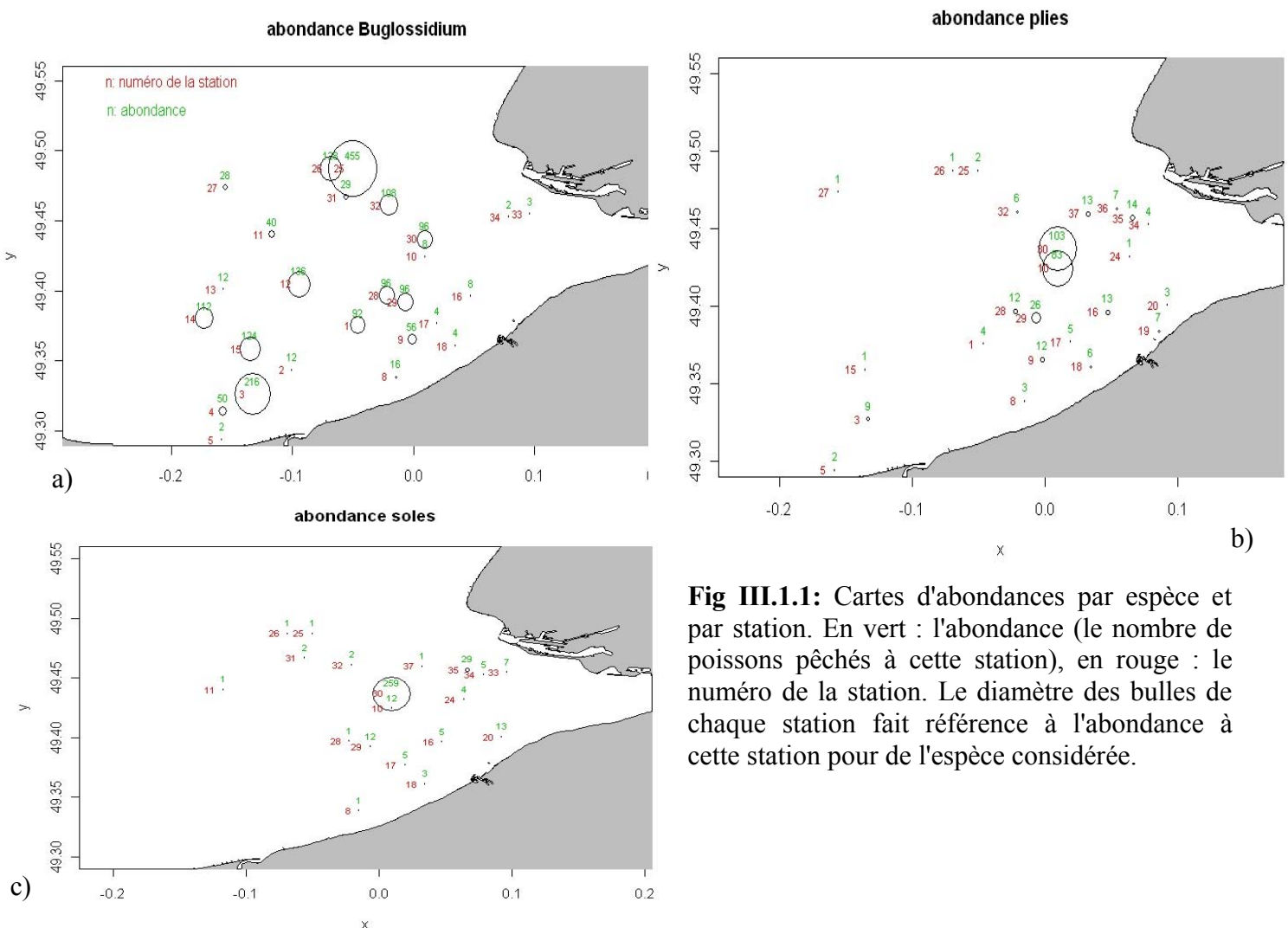


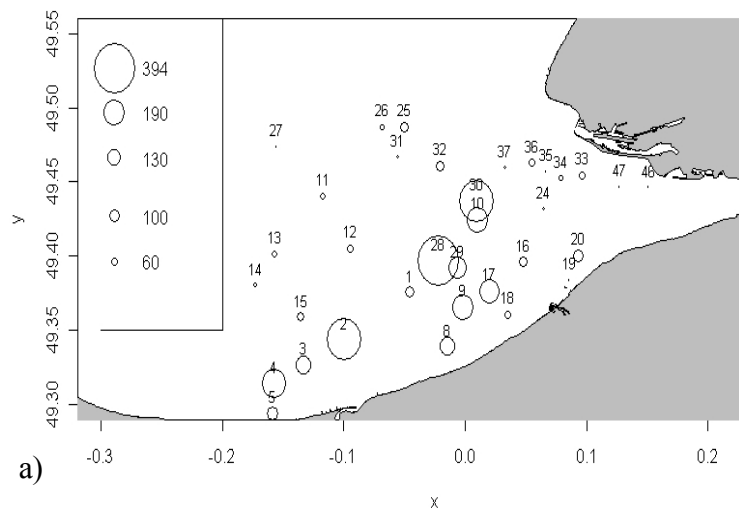
Fig III.1.1: Cartes d'abondances par espèce et par station. En vert : l'abondance (le nombre de poissons pêchés à cette station), en rouge : le numéro de la station. Le diamètre des bulles de chaque station fait référence à l'abondance à cette station pour de l'espèce considérée.

On peut constater que les abondances les plus fortes pour la plie et la sole sont quasiment au même endroit (station 30 pour les deux et station 10 en plus pour la plie: à l'embouchure de la baie de Seine) avec des abondances beaucoup plus faibles tout autour. Les solenettes sont quant à elles un peu plus présentes au large et avec des abondances plus fortes.

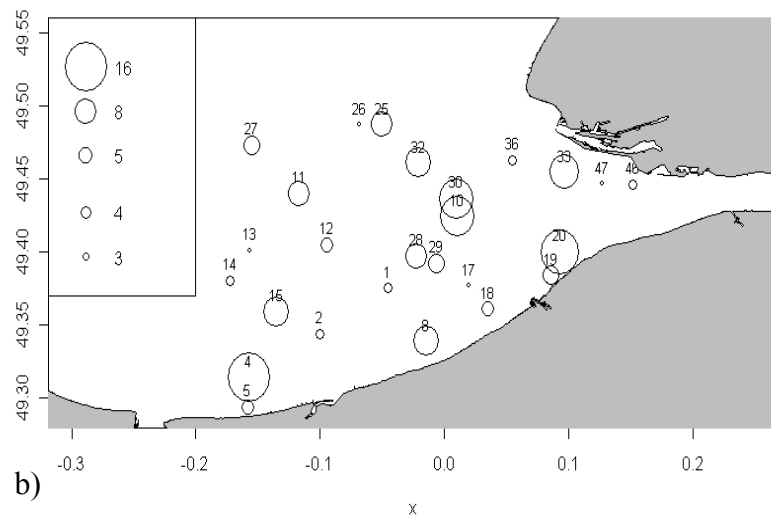
Cartographie des proies

Les proies identifiées dans les bennes* ont été classées, tout comme les proies dans les contenus digestifs, dans des guildes trophiques afin de faciliter la comparaison entre les proies disponibles (échantillonnées par les bennes*) et celles consommées (identifiées dans les estomacs). Il est à noter qu'aucune proie microbrouleur n'a été recueillie dans les bennes.

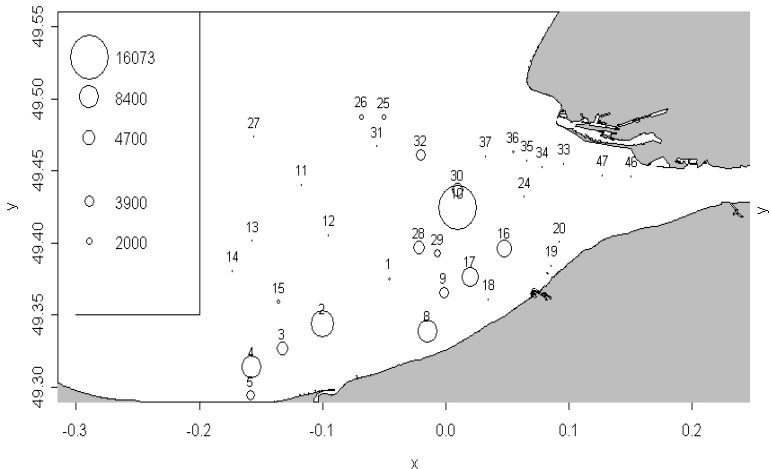
Nombre de proies carnivores par station



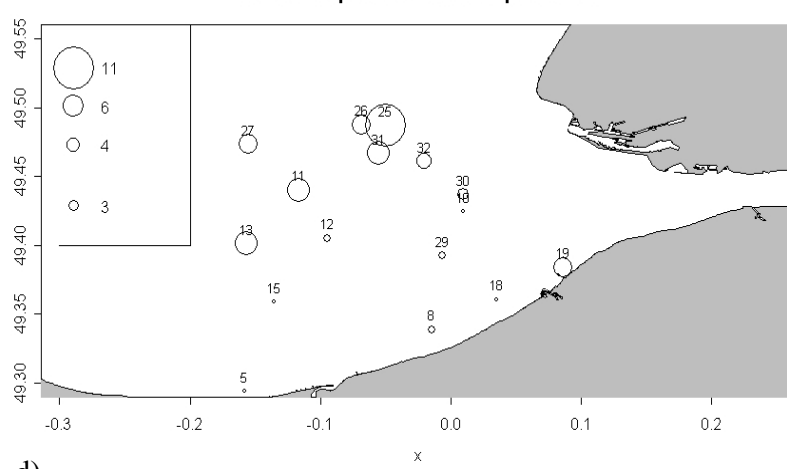
Nombre de proies nécrophages par station



Nombre de proies dépositives par station



Nombre de proies détritivores par station



Nombre de proies suspensivores par station

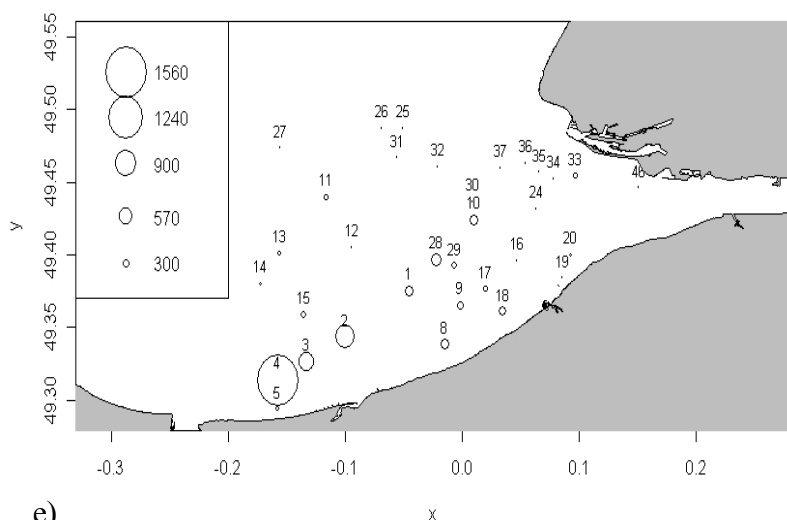


Fig III.1.2:

Cartes d'abondance des proies benthiques (a:carnivores,b:nécrophages, c:dépositives, d: détritivores, e: suspensivores).

Ces cartes sont présentées à titre indicatif et ne sont pas analysées dans ce rapport mais pourront être utile pour des travaux futurs (voir perspectives)

2) Analyse individuelle de chaque marqueur

Pour chaque marqueur, on regarde s'il existe une variabilité spatiale et inter-espèce, ce qui nous permet de justifier de son utilisation dans les différentes approches statistiques. Ensuite on crée des groupes par CAH et on analyse leur différence en taille, signature isotopique et répartition spatiale. Cette partie nous permet surtout de comprendre plus en détail les données et les liens qu'il peut y avoir entre les variables.

a) marqueur isotopes

« Existe-t-il une différence de signatures isotopiques entre les 3 espèces ? »

Pour répondre à cette question on trace les signatures isotopiques (moyenne et écarts-types) par station et par espèce ainsi que la répartition des concentrations isotopiques par espèce pour l'ensemble des stations.

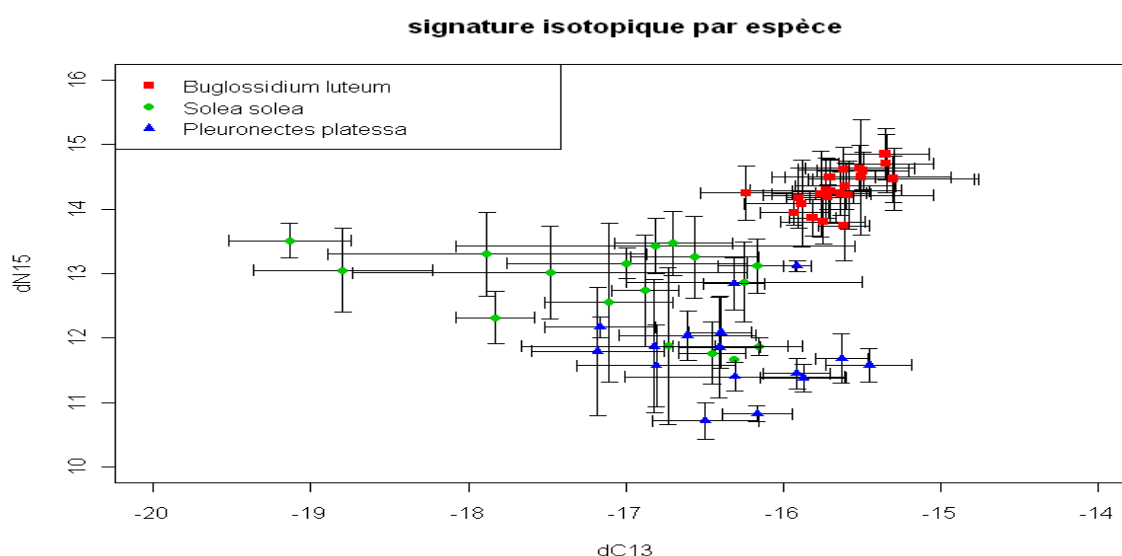


FIG III.2.a.1: Moyenne ($\pm SD$) des signatures en $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ pour les 3 espèces de poissons plats (*Solea solea*, *Pleuronectes platessa* et *Buglossidium luteum*) suivant les différentes stations échantillonnées en estuaire de Seine en septembre 2008.

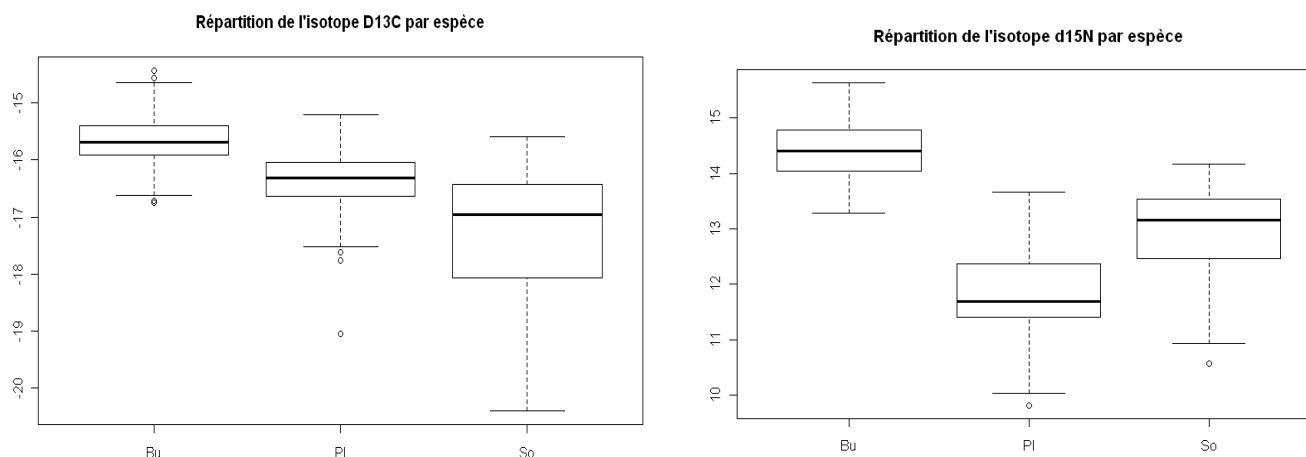


FIG III.2.a.2: Répartition des concentrations isotopiques par espèce.

Les résultats montrent une différence significative des signatures isotopiques sur le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{15}\text{N}$ entre les trois espèces (Kruskal-Wallis, p-value = 0.002). On note une plus grande variabilité des signatures pour les juvéniles de la sole et de la plie avec un certain chevauchement entre ces deux espèces à la fois au niveau du $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{15}\text{N}$. Les solenettes se détachent particulièrement bien de par leur enrichissement en $\delta^{15}\text{N}$ du fait que ceux sont des individus plus âgés ($3,2 \pm 1,5$ ans) et par leur enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$ du fait de leur distribution marine par rapport au deux autres espèces (Fig III.1.1).

On peut comparer ces graphiques aux répartitions de taille, poids et âge des espèces (voir FIG 4 en annexe) pour discuter du lien entre les caractéristiques morphologiques du poisson et ses concentrations en isotopes. Par ailleurs, on peut calculer les différentes corrélations entre les signatures isotopiques et les variables taille, poids et âge (table III.2.a.1). On constate que logiquement, la taille et le poids sont fortement liés linéairement. L'âge est lié à la taille et au poids pour les soles et les plies étant donné qu'il s'agit de juvéniles en pleine croissance. A l'inverse, les solenettes sont, pour la plupart des adultes et ont fini de grandir, d'où une corrélation moins forte.

Il est surtout intéressant de regarder les corrélations entre les isotopes et la taille (seule variable où les p-values pour le test de significativité sont inférieurs à 0,05 pour la sole). On remarque d'abord, que les corrélations entre le $\delta^{15}\text{N}$ et la taille sont négatives pour les soles et les plies, tandis qu'elles sont positives pour les solenettes. Cette relation pourrait s'expliquer par les différences de proies ingérées par les espèces [TOUS_RIUS]. Les corrélations entre le $\delta^{13}\text{C}$ et la taille sont toutes positives, ainsi lorsque les poissons grandissent, leur concentration en $\delta^{13}\text{C}$ croît. Ceci peut s'expliquer par le fait que les poissons, en vieillissant, s'éloignent de la côte et que le $\delta^{13}\text{C}$ est un indice de salinité (voir paragraphe suivant).

Table III.2.a.1 Tableau des corrélations entre variables physiques et isotopes.

* : significatif à 0.05 ; ** : significative à 0.01 ; *** : significatif à <0.001.

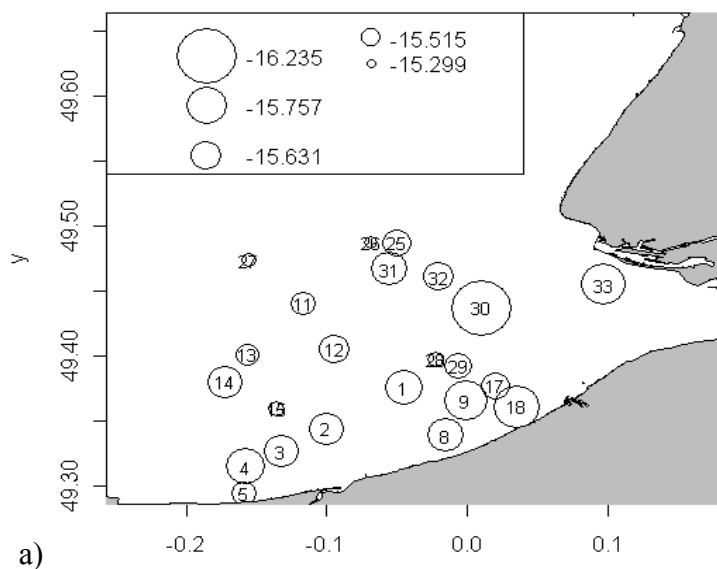
Soles	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Taille	Poids	Age	Solenettes	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Taille	Poids	Age
Taille	0,25**	-0,22*	1	-	-	Taille	0,30***	0,23***	1	-	-
Poids	0,13	-0,25*	0,95	1	-	Poids	0,30***	0,20**	0,95	1	-
Age	0,24*	-0,18	0,78	0,77	1	Age	0,57***	0,55***	0,52	0,47	1

Plies	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	Taille	Poids	Age
Taille	0,27***	-0,61***	1	-	-
Poids	0,29***	-0,65***	0,97	1	-
Age	0,28***	-0,46***	0,91	0,86	1

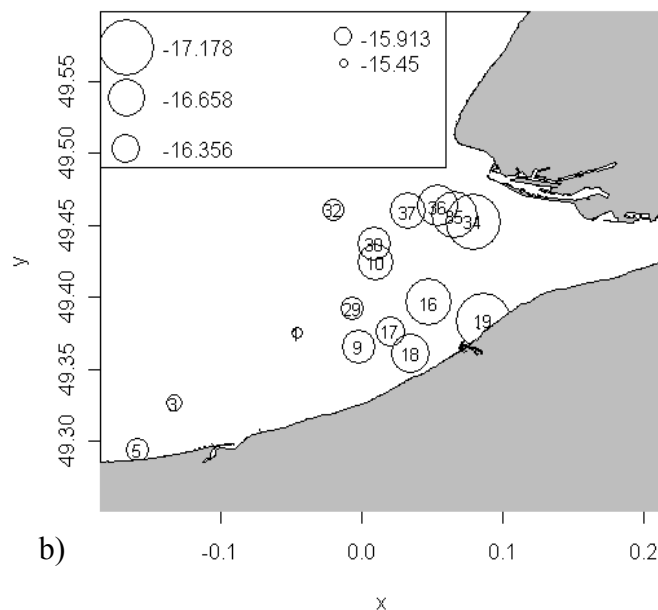
« La signature isotopique d'une espèce présente-elle une structure spatiale dans la baie de Seine ? »

Le but étant de représenter géographiquement les habitats potentiels de poissons via les marqueurs naturels; on cherche à savoir si le marqueur isotope présente une variabilité géographique. Pour cela on peut représenter par des bulles la concentration moyenne des isotopes par station (nombre à l'intérieur de la bulle) et par espèce.

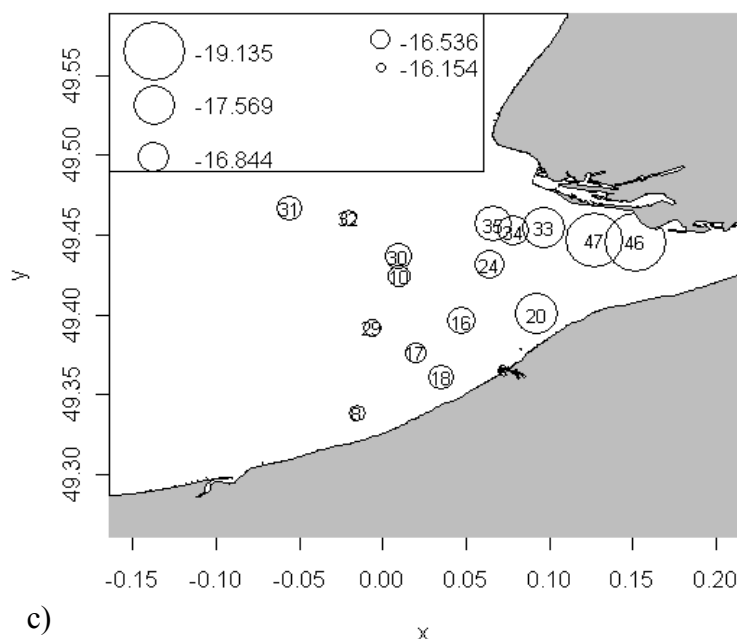
moyenne des $\delta^{13}\text{C}$ par station pour le buglossidium



moyenne des $\delta^{13}\text{C}$ par station pour la plie



moyenne des $\delta^{13}\text{C}$ par station pour la sole

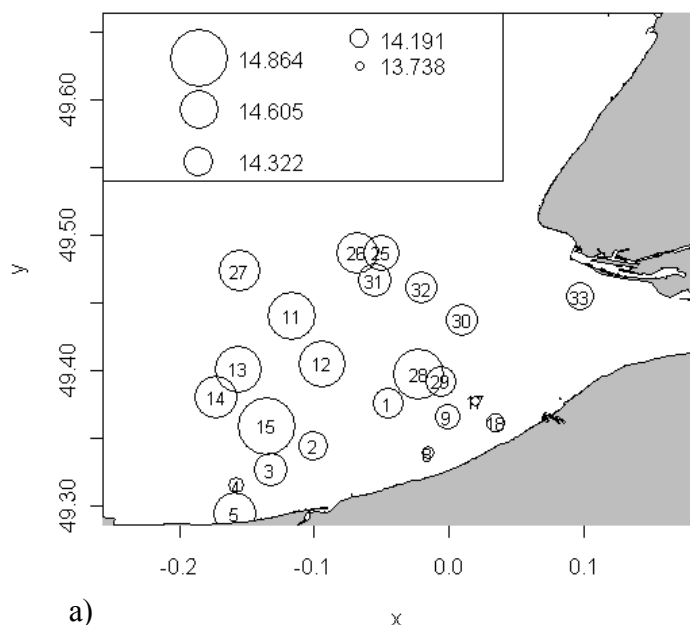


On remarque bien que le $\delta^{13}\text{C}$ est un indicateur de la matière organique d'origine terrestre et/ou marine et donc intervient bien dans la discrimination géographique des stations. En effet, plus on s'éloigne de l'embouchure et plus la concentration en valeur absolue du $\delta^{13}\text{C}$ diminue. Pour chaque espèce, les tests de comparaison de moyennes indiquent qu'il y a bien une différence significative entre les concentrations de $\delta^{13}\text{C}$ des stations.

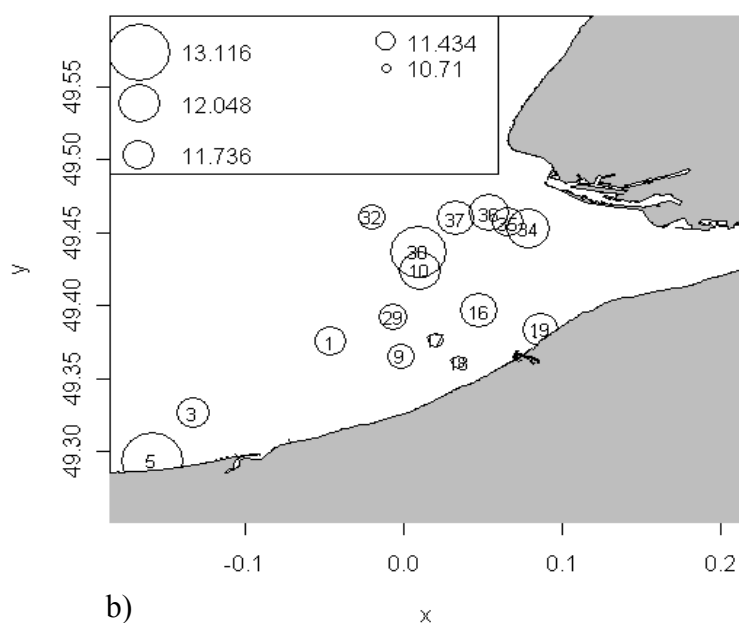
Fig III.2.a.3: Distribution spatiale du $\delta^{13}\text{C}$ moyen pour les trois espèces de poissons plats (a: *Solea solea*, b: *Pleuronectes platessa* et c: *Buglossidium luteum*) suivant les différentes stations échantillonnées en estuaire de Seine en septembre 2008.

Solenettes: test de Kruskal-Wallis, p-valeur proche de 0; **Plies:** test Kruskal-Wallis, p-valeur proche de 0; **Soles:** test Kruskal-Wallis, p-valeur proche de 0).

moyenne des d15N par station pour le buglossidium



moyenne des d15N par station pour la plie



moyenne des d15N par station pour la sole

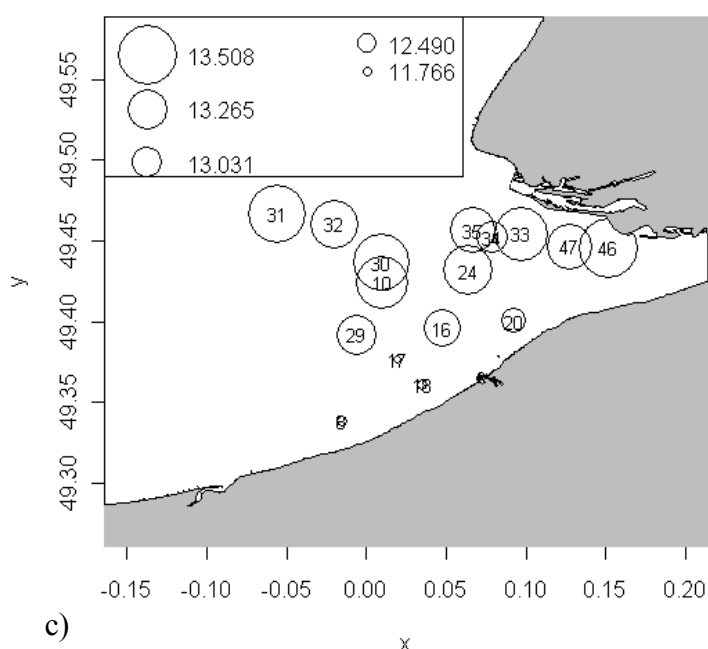


Fig III.2.a.4: Distribution spatiale du $\delta^{15}\text{N}$ moyen pour les trois espèces de poissons plats (a: *Solea solea*, b: *Pleuronectes platessa* et c: *Buglossidium luteum*) suivant les différentes stations échantillonnées en estuaire de Seine en septembre 2008.

On remarque que la différence des concentrations moyennes en d15N des stations est moins linéaire que pour le d13C, à part pour la sole où on remarque un gradient latitudinal. Cependant on observe tout de même une différence entre les stations et ce pour les 3 espèces : solenettes (anova, p-valeur = $2 \cdot 10^{-16}$) ; soles (K-W, p-valeur < 0,01); plies (K-W, p-valeur = $2 \cdot 10^{-16}$).

On constate donc que les isotopes peuvent nous aider à caractériser les habitats potentiels des poissons étant donné que des différences existent entre les stations. La compréhension des relations entre les signatures isotopiques des poissons et les caractéristiques morphologiques (Taille) et géographiques des poissons échantillonnés est faite par la comparaison des groupes d'individus présentant des similarités de signatures isotopiques. Ces groupes sont donc créés par CAH à partir des données isotopiques.

Caractéristiques des groupes formés par CAH sur les données des isotopes

On cherche à savoir s'il existe une différence de signature isotopique, dans les tailles, et la situation géographique entre les différents groupes. Les résultats de ces analyses sont présentés par espèce.

Pour les solenettes

7 groupes avec le nombre de poissons suivant: (26, 29, 40, 30, 31, 17, 23)

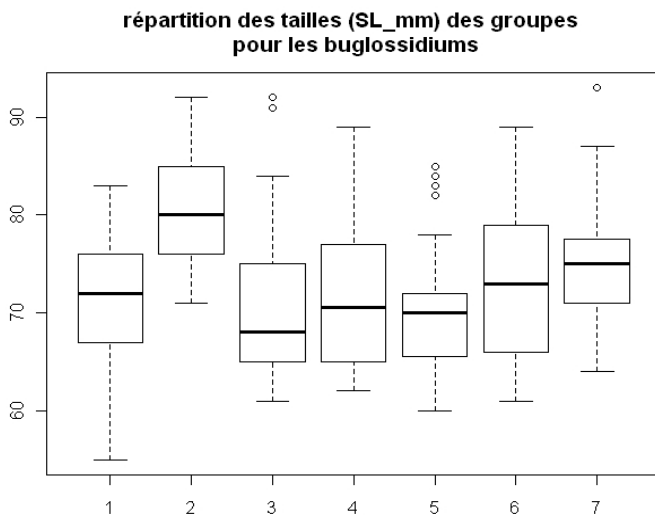


Fig III.2.a.5: Boîtes à moustaches des tailles par groupes pour les solenettes

Les groupes de solenettes ont des tailles non significativement différentes, à part le groupe 2 qui montre une différence significative (K-W, p-valeur <0,001)

signature isotopique moyenne et écarts-types par groupe pour les buglossidiums

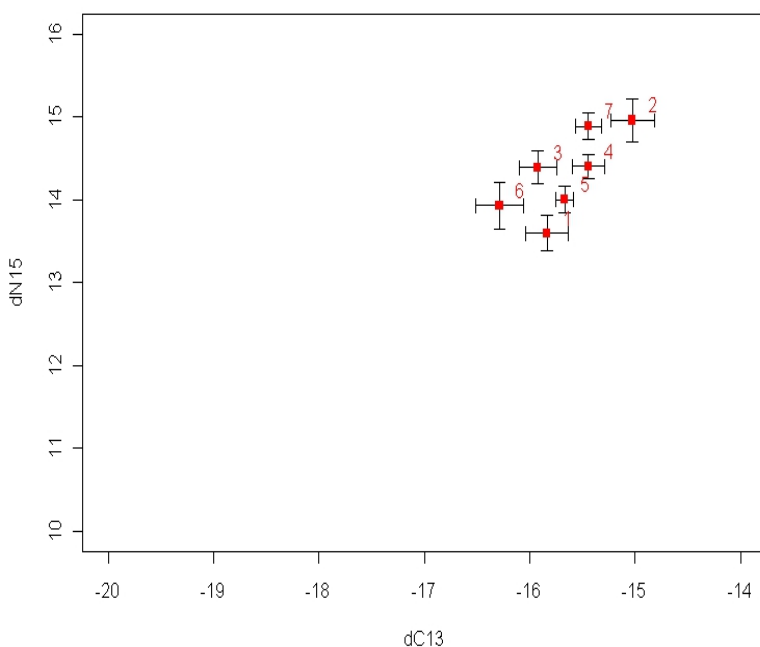


Fig III.2.a.6: Signature isotopique par groupe des solenettes

Les signatures isotopiques des différents groupes sont séparées, ce qui est assez logique étant donné que c'est sur les isotopes que la CAH a eu lieu. On constate que le groupe 2 se trouve le plus enrichi en d15N et le moins appauvri en d13C.

On peut d'ailleurs lier cette information au fait que les poissons de ce groupe sont de taille plus importante que ceux des autres groupes.

La répartition géographique des différents groupes ne présente pas de différences particulières à part pour les groupes 1 et 6 qui semblent plus près de la côte. Il existe des différences significatives entre le groupe 1 et les groupes 2,3 et 4 au niveau latitudinal (test Wilcoxon, $p\text{-val}=0,017$). Il existe des différences significatives entre le groupe 6 et les groupes 2,4 et 7 au niveau longitudinal (test Wilcoxon, $p\text{-val}=0,004$).

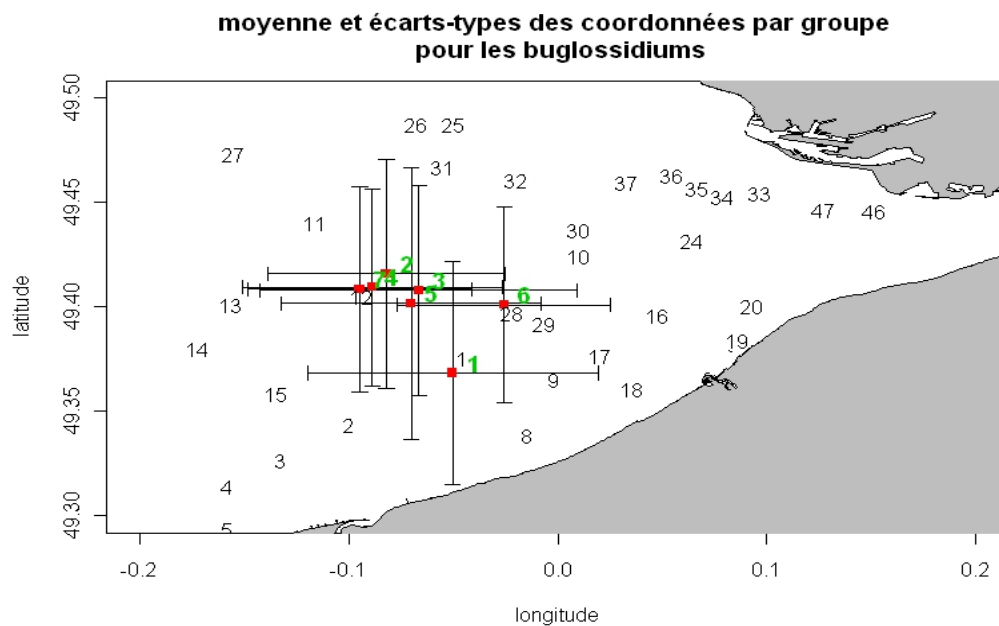


Fig III.2.a.7:Répartition spatiale des groupes de solenettes.

Pour les plies

7 groupes avec le nombre de poissons par groupes (19, 15, 23, 10, 17, 11, 13)

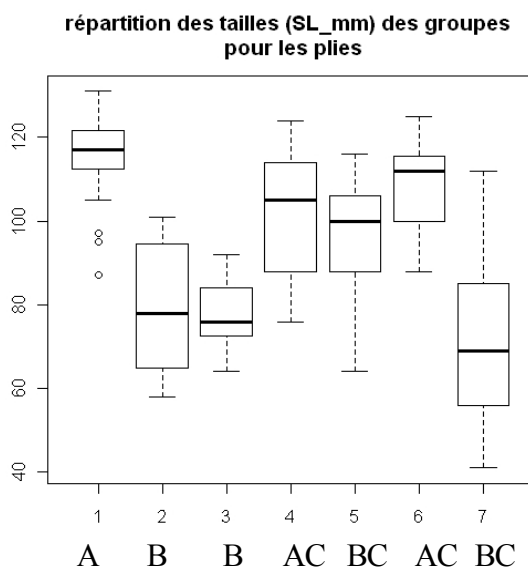


Fig III.2.a.8: Répartition des tailles des groupes de plies

On constate que les individus du groupe 1 sont plus grands que les autres et ceux des groupes 2,3 et 7 plus petits (avec une répartition très large pour le 7).

Différences significatives: voir notation alphabétique au bas de la figure, (Wilcoxon, $p\text{valeur} < 0,05$)

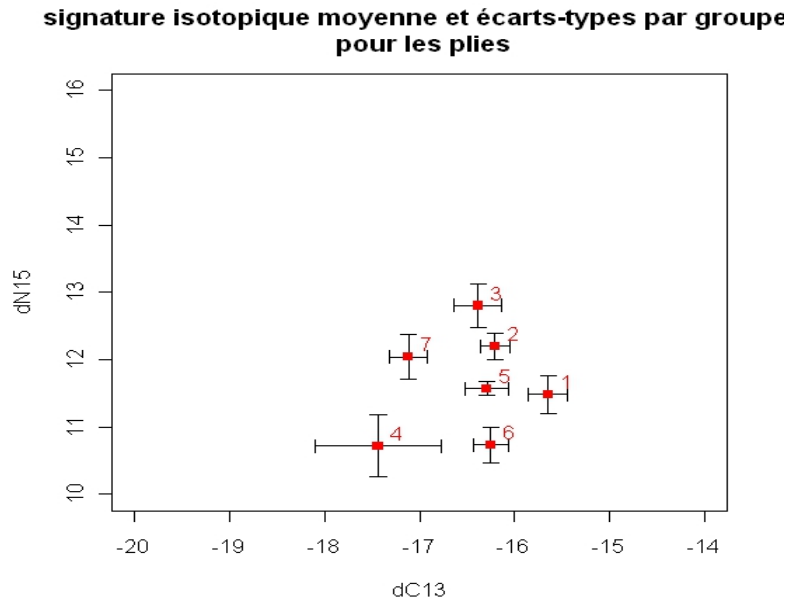


Fig III.2.a.9:Signature isotopique par groupe des plies.

La séparation des différents groupes semble une fois de plus bien nette. Cependant, cette fois-ci, on ne constate pas vraiment de lien entre la signature isotopique et la répartition en taille. Par exemple, le groupe 3 semble être plus enrichi en d15N que le groupe 4 alors que la taille moyenne des poissons y est plus faible. Ce résultat confirme la corrélation négative observée plus-haut (Table III.2.a.1) entre la taille et le dN15 chez la plie.

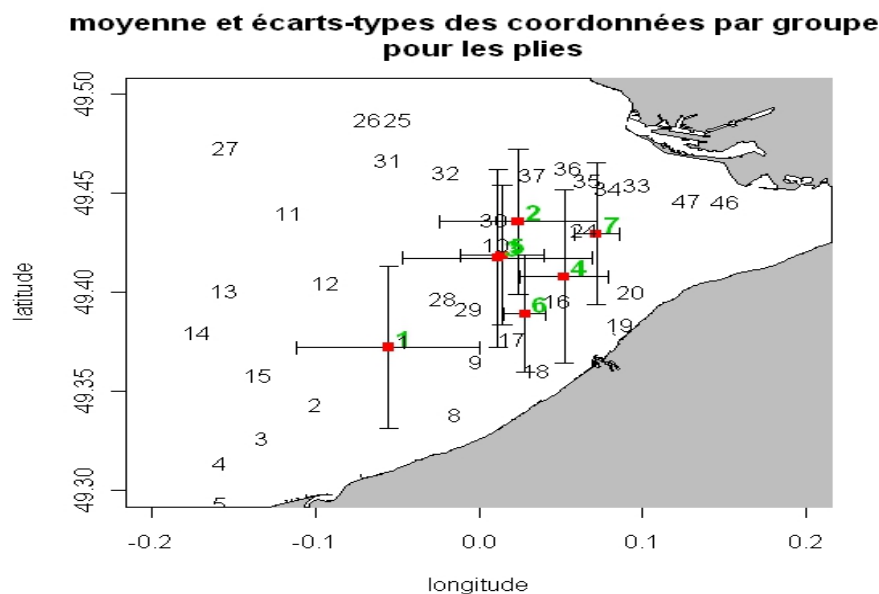
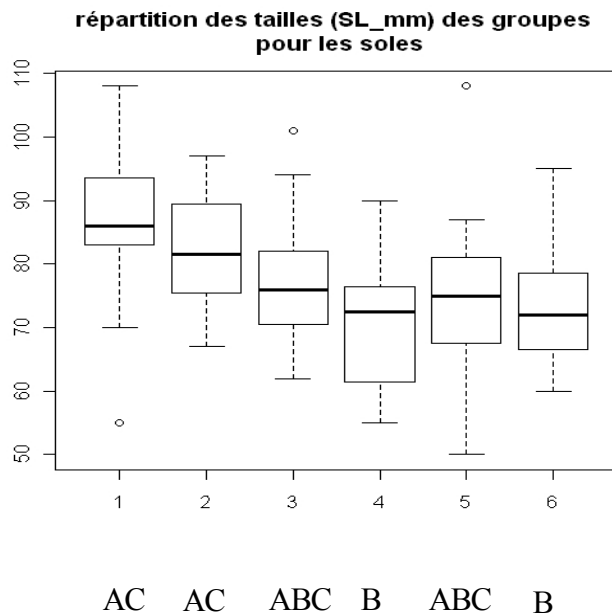


Fig III.2.a.10:Répartition spatiale des groupes de plies.

Le groupe 1 se démarque des autres par le fait qu'il soit plus éloigné de l'embouchure(différence significative avec tous les autres groupes (test Wilcoxon, $p\text{-val} < 0,05$) . Ceci concorde avec le fait que les individus de ce groupe soient plus grands que les individus des autres groupes. Les plies semblent s'éloigner de l'embouchure lorsqu'elles grandissent.

Pour les soles

6 groupes avec le nombre de poissons par groupe : (13, 20, 27, 16, 11, 15)



Dans cette répartition des tailles de soles par groupe, on remarque une certaine décroissance du groupe 1 au groupe 4. Différences significatives : voir notation alphabétique au bas de la figure.

Fig III.2.a.11:Répartition des tailles des groupes de soles

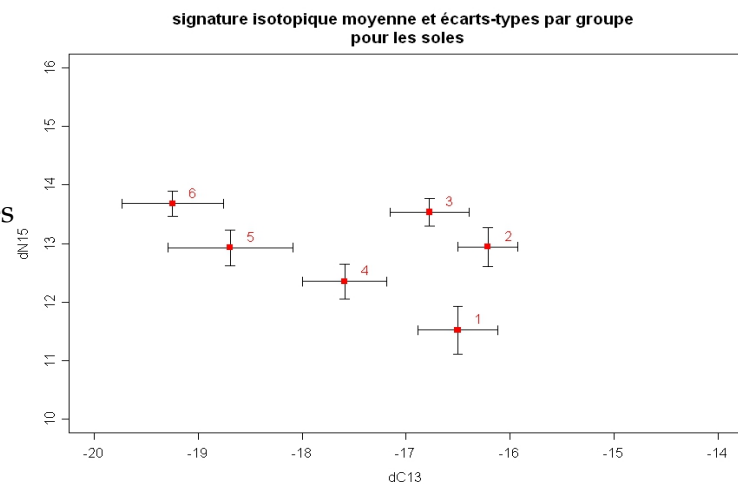


Fig III.2.a.12:Signature isotopique par groupe des soles

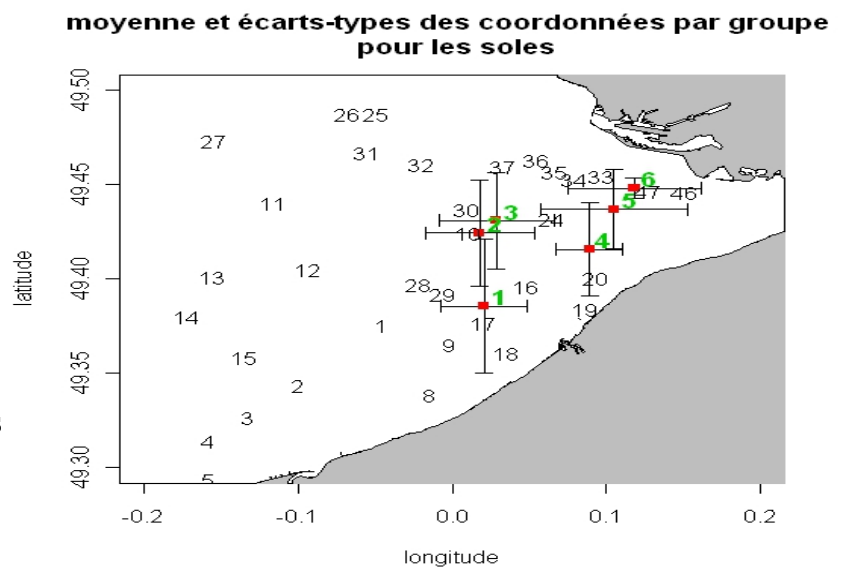


Fig III.2.a.13:Répartition spatiale des groupes de plies.

Lorsqu'on compare le graphique des répartitions spatiales (Fig III.2.a.13) à celui des signatures isotopiques (Fig III.2.a.12), on remarque bien un gradient estuaire-côtier/ large au niveau du $d^{13}C$; plus on va vers le large et plus le $d^{13}C$ augmente (en valeur absolue). On remarque également le gradient latitudinal lié au $d^{15}N$, les groupes qui sont le plus au Nord ont un $d^{15}N$ plus élevé. On peut d'ailleurs voir une certaine symétrie entre les 2 graphiques. Différences significatives entre le groupe 1 et tous les autres groupes; entre les groupes 2, 3 et tous les autres groupes (test de Wilcoxon, p-valeur $<0,05$).

On peut également comparer ce graphique (Fig III.2.a.13) aux répartitions de taille (Fig III.2.a.11). On remarque alors que tout comme les plies, les soles les plus grandes sont situées loin de l'embouchure et semblent suivre un gradient Nord-Est/Sud-Ouest.

b) marqueur otolithes

« Existe-t-il une différence dans la microchimie des otolithes entre plies et soles ? »

Les concentrations des éléments chimiques ont été comparées au sein d'une même espèce. (pour vérifier un effet de la taille, de l'âge et du poids des individus sur ces éléments, voir FIG 4 en annexe).

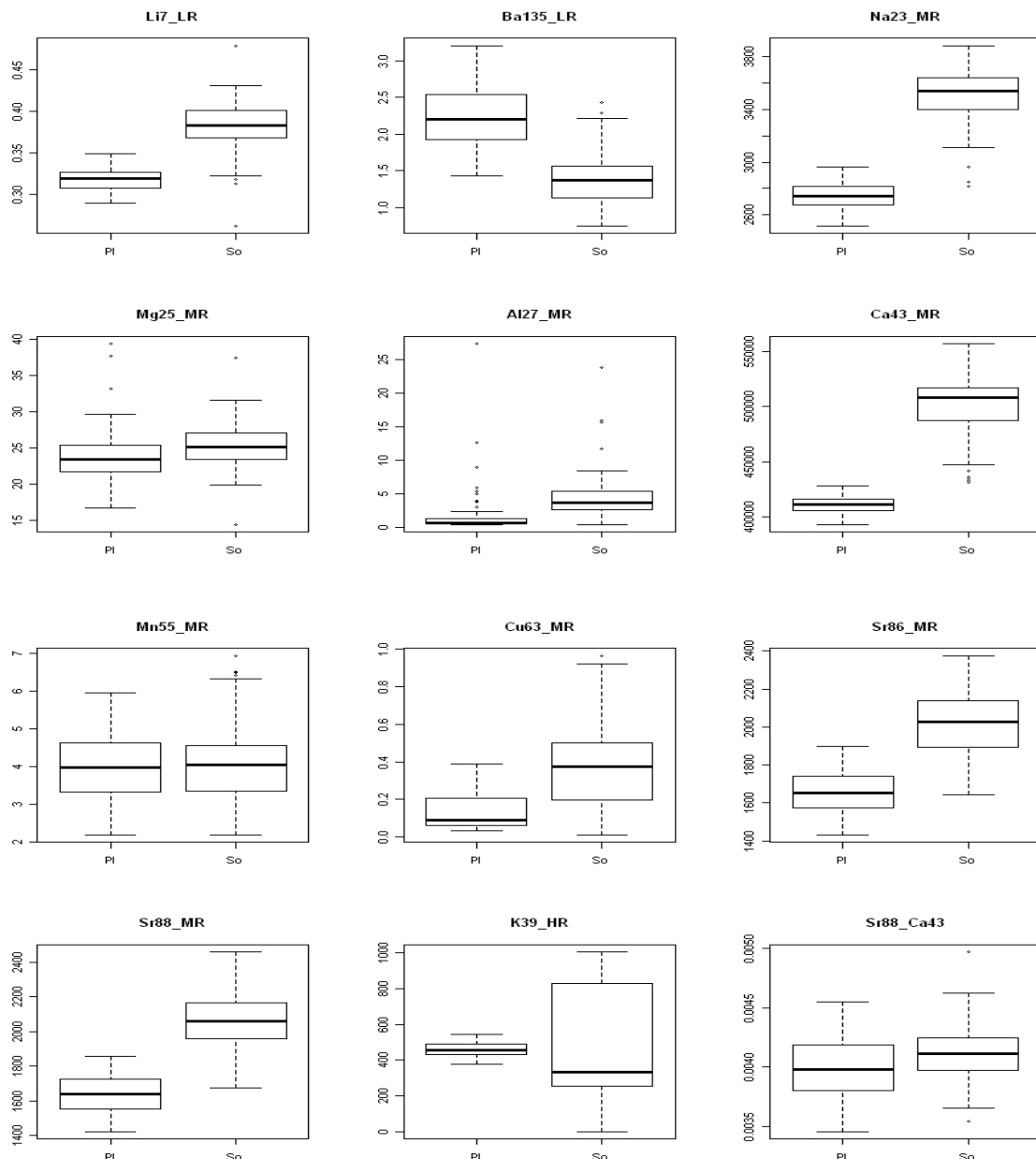


Fig III.2.b.1: BoxPlot de la répartition des concentrations des éléments chimiques par espèce.

Tous les éléments chimiques mesurés dans les otolithes de plies et de soles, à l'exception du Mn55 montrent des différences significatives entre les deux espèces (test de wilcoxon p-valeur > 0,05 pour le Mn55). En effet, les concentrations de Ba135 et K39 sont plus élevées en moyenne chez la plie que chez la sole alors que les concentrations des autres éléments (sauf Mn55) montrent un effet inverse.

« La microchimie des otolithes d'une espèce présente elle une structure spatiale dans la baie de Seine ? »

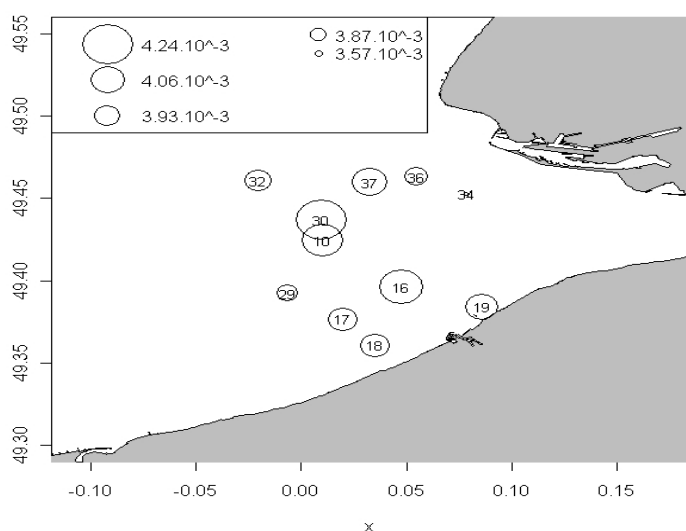
On cherche à savoir, pour chaque élément, s'il existe une différence de concentration entre les stations et s'il y a une structure spatiale qui en ressort.

En ce qui concerne la sole, la majorité des éléments montre des différences inter-stations (K-W, p-valeur<0,05) sauf pour K39_HR (p-valeur=0,40) et pour Cu63_MR (p-valeur=0,42).

En ce qui concerne la plie, on remarque une différence de concentration significative entre les stations pour tous les éléments sauf Li7_LR (p-value = 0,1).

On en déduit que l'utilisation de la microchimie des otolithes, pour caractériser les habitats potentiels des plies et des soles, est pertinente du fait qu'on observe bien une différence spatiale des concentrations. Seuls les éléments chimiques pour lesquels il existe des différences significatives inter-stations ont donc été conservés pour les analyses suivantes. Il est à noter que peu d'éléments chimiques présentent des structures spatiales linéaires, sauf peut-être pour le rapport Sr88/Ca43. Ce dernier, pour la sole, présente une augmentation de la concentration moyenne lorsqu'on s'éloigne de l'estuaire (**Fig III.2.b.2**). Cependant, la majorité des éléments montre des différences spatiales sous forme de patches (structure non linéaire).

moynne des Sr88_Ca43 par station pour la plie



moynne des Sr88_Ca43 par station pour la sole

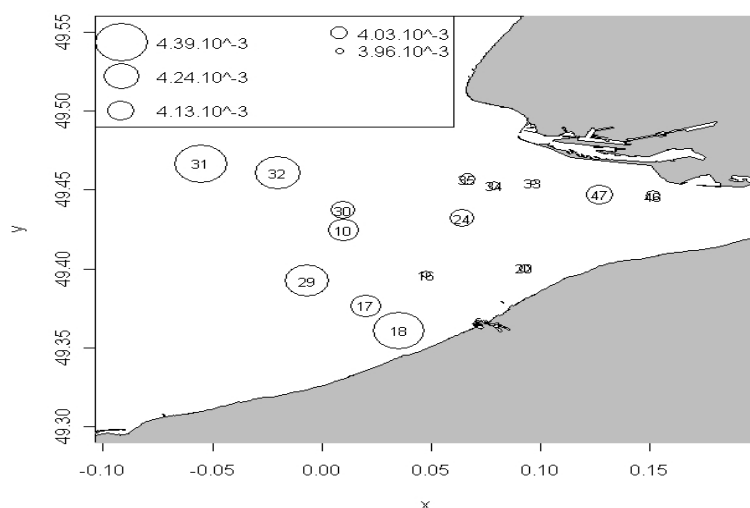


Fig III.2.b.2: Carte des concentrations moyennes (en bulles) de Sr88/Ca43 pour la plie et la sole.

Caractéristiques des groupes formés par CAH sur les données des otolithes

Tout comme pour les isotopes, des groupes basés sur la similarité des signatures chimiques des otolithes ont été formés à l'aide d'une CAH avec la méthode de Ward. La comparaison des caractéristiques de ces groupes (tailles, signatures isotopiques et répartitions spatiales) est maintenant présentée.

Pour les plies

Le nombre de groupes choisis après observation du dendrogramme est de 3 (voir FIG 3 en annexe). Le nombre de poissons par groupe est 40 pour le 1er groupe, 25 pour le second et 12 pour le troisième.

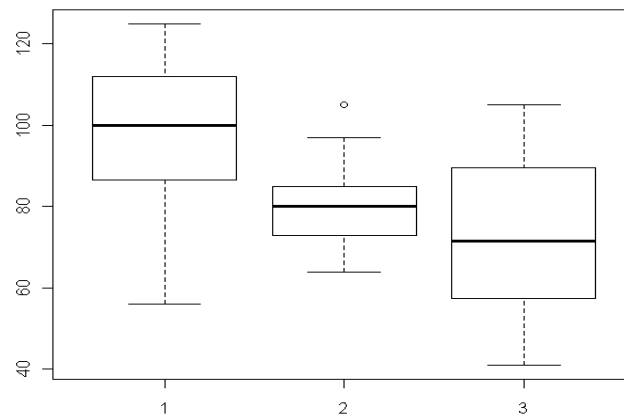


Fig III.2.b.3: Répartition des tailles (mm) des groupes otolithes pour la plie.

Le groupe 1 présente une différence de taille significative avec les deux autres groupes (test de Wilcoxon , $p_{\text{val}} < 0,05$).

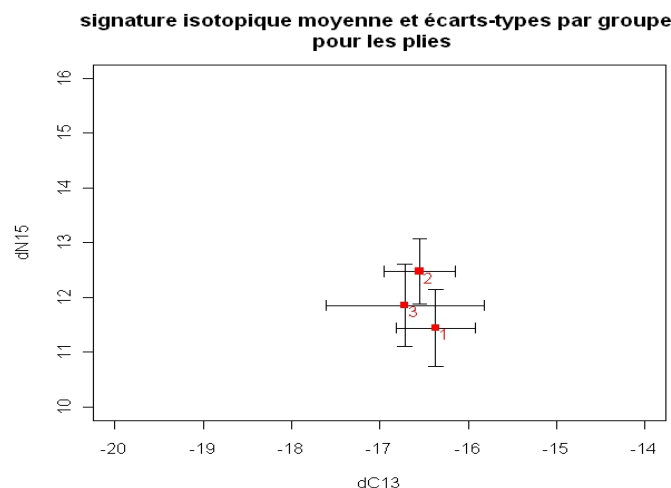


Fig III.2.b.4: Signature isotopique des groupes otolithes pour la plie.

On ne remarque pas de différences significatives entre les groupes pour le d13C (Kruskal Wallis, $\chi^2=5,4$; $df=2$; $p_{\text{valeur}}=0,07$). Par contre, les 3 groupes sont significativement différents en ce qui concerne le d15N (tests de Student 2 à 2 après une anova, $F=10,7$, $df=1$, $p_{\text{valeur}}=0,001$).

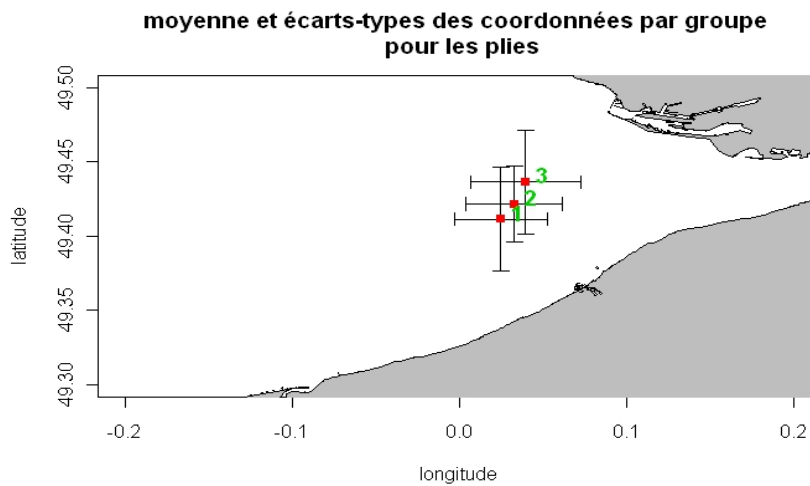


Fig III.2.b.5: Répartition spatiale des groupes otolithes pour la plie.

On remarque qu'il n'y a pas de différences significatives entre les coordonnées géographiques des groupes : pour la longitude (K-W, $\chi^2 = .9133$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.38$) ; pour la latitude (K-W, $\chi^2 = 5.5304$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.06$).

Pour les soles

Le nombre de groupes choisis après observation du dendrogramme est de 3 (voir FIG 3 en annexe). Le nombre de poissons par groupe est 53 pour le premier groupe, 27 pour le second et 18 pour le troisième.

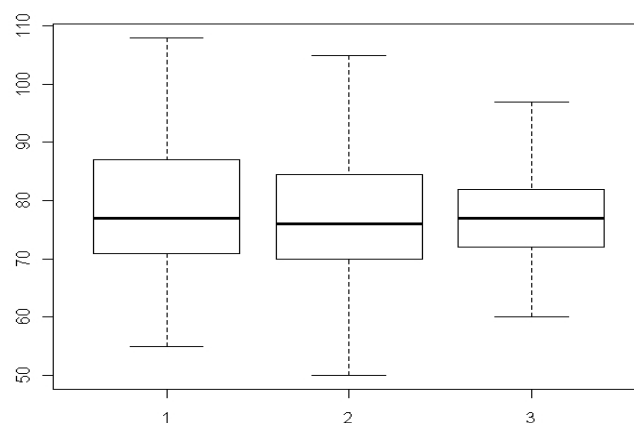


Fig III.2.b.6: Répartition des tailles (mm) des groupes otolithes pour la sole.

Les tailles moyennes des groupes ne présentent pas de différences significatives. (anova, $F=0.59$, $df=1$, $p\text{-value}=0.44$).

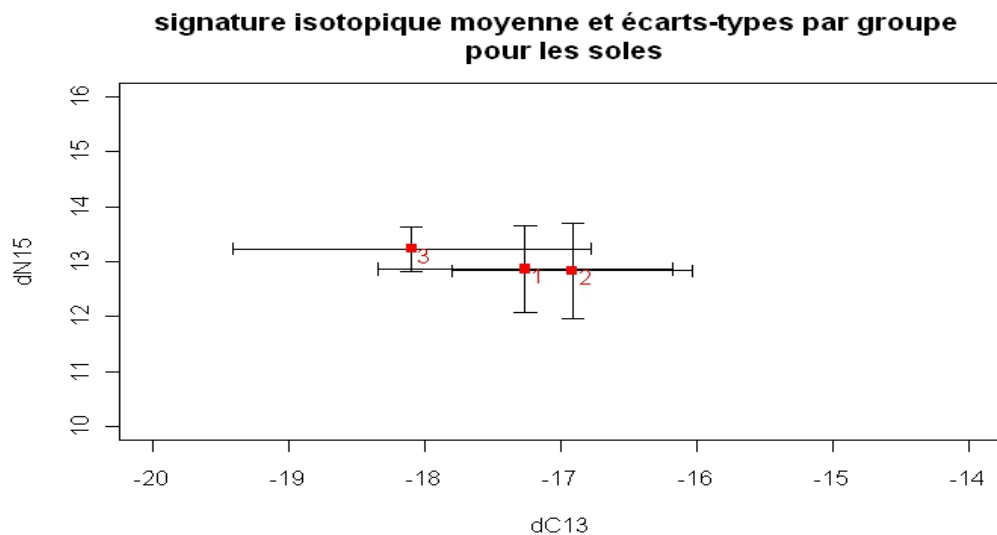


Fig III.2.b.7: Signature isotopique des groupes otolithes pour la plie.

On constate une différence significative, au niveau du d13C entre les groupes 2 et 3 (Wilcoxon, pvalue=0,02). Pour le d15N, les groupes ne sont pas différenciés ($\chi^2 = 2.7053$, df = 2, p-value = 0.26).

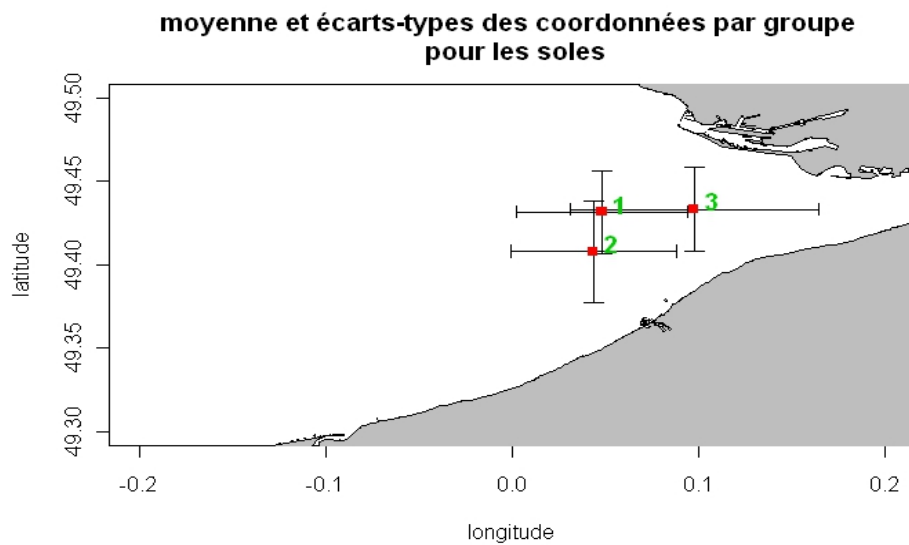


Fig III.2.b.8: Répartition spatiale des groupes otolithes pour la sole.

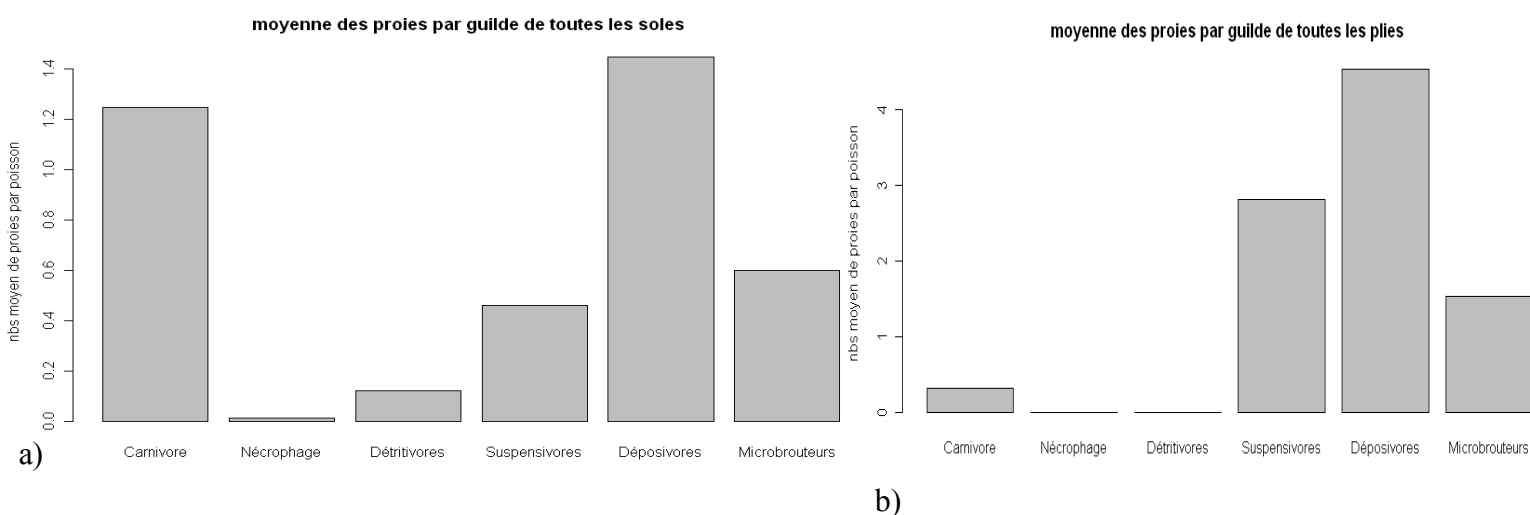
Pour la latitude, le groupe 2 est différent des 2 autres (Wilcoxon, pval<0,03) et pour la longitude, le groupe 3 est différent des 2 autres ((Wilcoxon, pval=0,019).

c) marqueur contenus digestifs

Les différences de régime alimentaire des 3 espèces de poissons (*Buglossidium luteum*, *Solea solea* et *Pleuronectes platessa*) ainsi que les variabilités spatiales sont expliquées par le rapport de stage M2 d'Armonie Tous Rius [TOUS_RIUS]et [bilan_Durieux].

« Le régime alimentaire de trois espèces de poissons plats, *Solea solea*, *Buglossidium luteum* (Soleidés) et *Pleuronectes platessa* (Pleuronectidés), a été étudié afin d'observer le partage des ressources alimentaires entre leurs juvéniles dans les aires de nourriceries de la baie et de l'estuaire de Seine. Ces trois espèces ont une distribution spatiale différente (essentiellement influencée par la bathymétrie*). Elles présentent le même régime alimentaire (annélides polychètes, mollusques et crustacés), mais leurs préférences alimentaires sont différentes. La sole commune, *S. solea*, consomme principalement des polychètes ; la petite sole jaune, *B. luteum*, présente une alimentation diversifiée (polychètes, mollusques et crustacés), tandis que la plie, *P. platessa*, se nourrit essentiellement de mollusques et de polychètes. Cette étude a également démontré une variabilité spatiale du régime alimentaire de ces espèces de poissons plats. Elles ont une alimentation de type opportuniste, adaptant leur alimentation en fonction de la disponibilité des proies qui varie selon la zone étudiée. De plus, leurs rythmes alimentaires sont différents : les deux Soléidés sont particulièrement actifs durant la nuit et le Pleuronectidé durant le jour. Les différences de distributions spatiales, de préférences et de rythmes alimentaires semblent limiter les éventuelles interactions qui peuvent exister entre ces espèces. »

Étant donné qu'on a classé les proies par guildes trophiques (carnivores, nécrophages, détritivores, suspensivores, dépositivores et microbrouteurs), pour compléter ce bilan, on donne le nombre de proies consommées par guildes trophiques, pour l'ensemble des poissons d'une même espèce (voir table 1 en annexe). On trace également la répartition spatiale par guildes trophiques, des proies pour chaque espèce de poisson (Fig III.2.c.1).



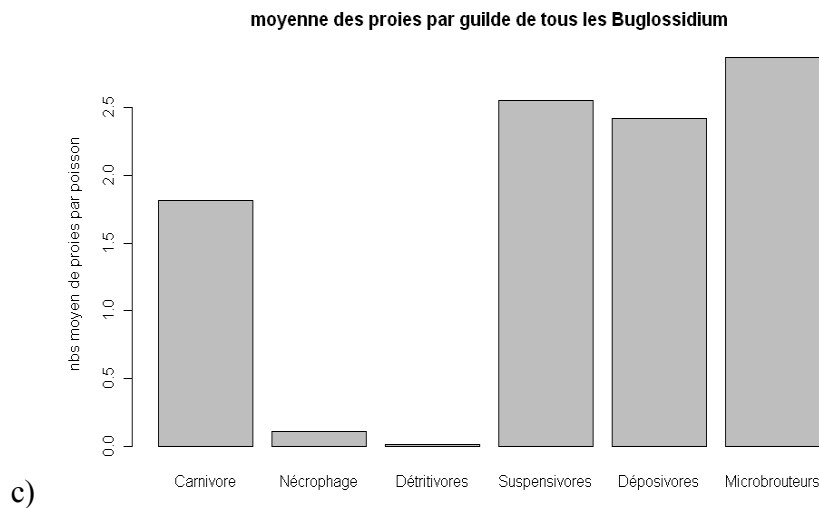


Fig III.2.c.1: Nombre moyen de proies consommées classées en guilde trophique pour chaque espèce (a: solenette, b:plie, c:sole).

Évidemment ces graphiques sont relatifs dans le sens où ils dépendent de l'attribution d'une proie à une guilde. En effet, par rapport à l'ensemble des proies identifiées, il y a beaucoup moins de proies nécrophages ou détritviores par exemple. On remarque cependant que les régimes alimentaires de la plie et de la sole se ressemblent (en termes de proportion) sauf pour ce qui est de la consommation de carnivores où la sole semble en manger d'avantage. La solenette paraît avoir une alimentation plus équilibrée en termes de contribution relative des différentes guildes. Ceci vient probablement du fait que les solenettes sont plus âgées et possèdent donc une « gamme » de proies élargie en comparaison aux juvéniles des deux autres espèces.

Notre but étant toujours de savoir si ce marqueur est pertinent pour représenter spatialement les habitats de nos 3 espèces de poissons, on retient surtout du rapport d'Armonie Tous Rius [TOUS_RIUS] qu'il existe une variabilité inter-espèce et une variabilité spatiale pour les contenus digestifs. On peut d'ailleurs représenter le nombre moyen de proies par station d'une sole pour une guilde trophique (dépositviores ici), pour donner un exemple de variabilité spatiale.

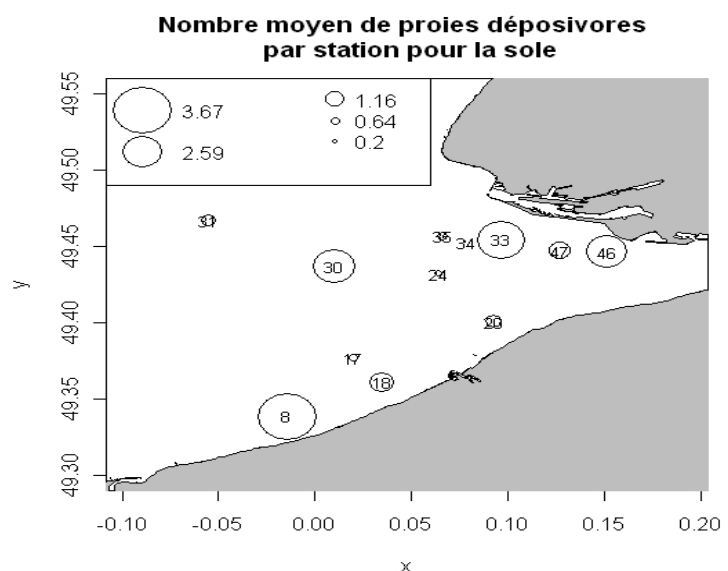


Fig III.2.c.2: Nombre moyen de proies dépositviores par station pour la sole.

Caractéristiques des groupes formés par CAH sur les données des contenus digestifs

Pour les plies

Le nombre de groupes choisis après observation du dendrogramme est de 4 (voir FIG 2 en annexe). Le nombre de poissons par groupe est de 36 pour le premier, 18 pour le deuxième, 26 pour le troisième et 15 pour le quatrième groupe.

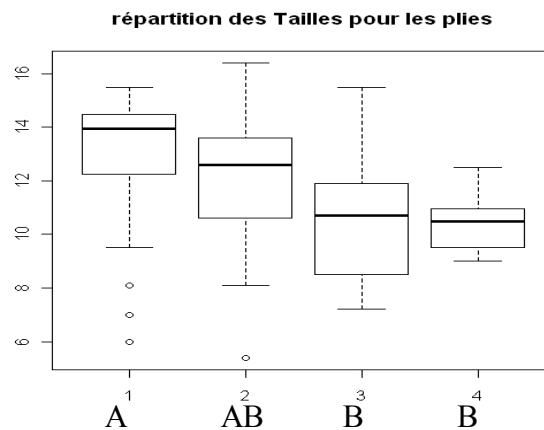


Fig III.2.c.3: Répartition des tailles (cm) des groupes contenus digestifs pour la plie.
Pour les différences significatives: voir la notation alphabétique.

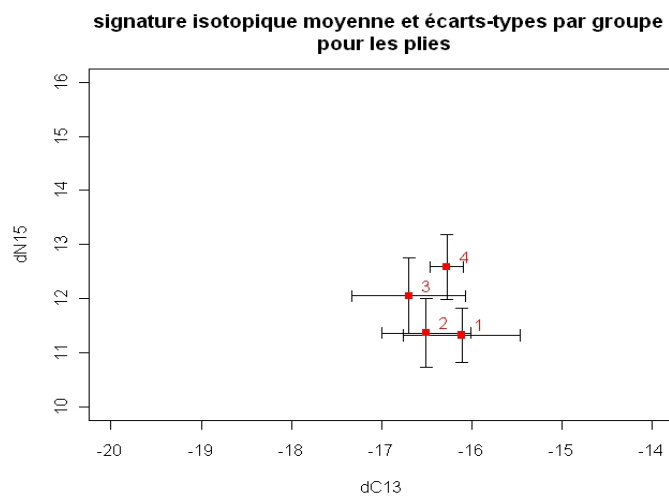


Fig III.2.c.4: Signature isotopique des groupes contenus digestifs pour la plie.

Pour le d13C, il existe une différence significative entre le groupe 1 et les 3 autres groupes (Wilcoxon , pvalue <0,04) et entre les groupes 3 et 4 (Wilcoxon , pvalue =0,02).

Pour le d15N, les groupes sont tous différenciés, sauf les groupes 1 et 2 (Tukey, pval=0,99 pour le couple (1,2)).

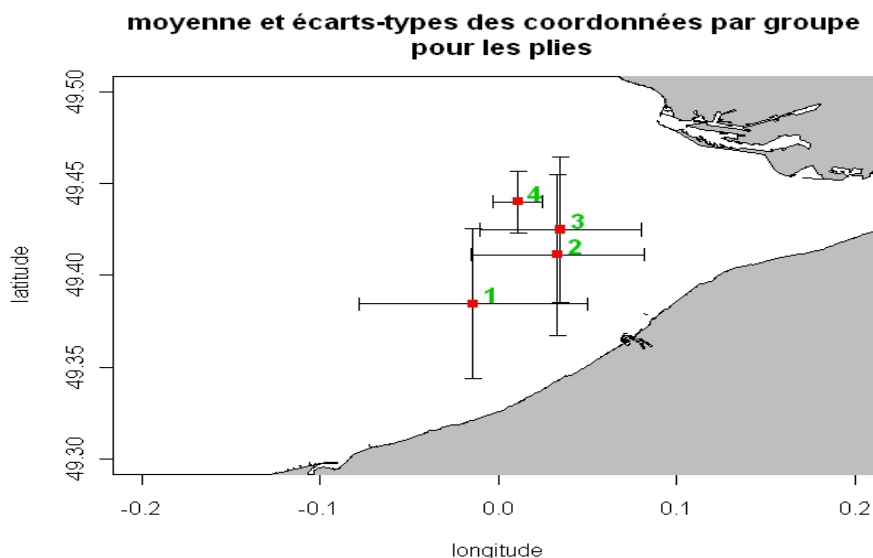


Fig III.2.c.5:Répartition spatiale des groupes contenus digestifs pour la plie.

Pour la longitude, les groupes 1 et 4 sont significativement différents des groupes 2 et 3 (Wilcoxon , $p_{val} < 0,002$).

Pour la latitude, tous les groupes sont significativement différents sauf les groupes 2 et 3. (Wilcoxon , $p_{val} < 0,05$).

On constate que le groupe 1 est le plus au large et correspond au groupe des poissons les plus grands (**Fig III.2.c.3**).

Table III.2.c.1: Répartition en guildes trophiques des contenus digestifs (nombre moyen de proies par poisson) pour la plie.

Groupes plies	Carnivores	Nécrophages	Détritivores	Suspensivores	Déposivores	Microbrouteurs
1	0,028	0,000	0,000	5,194	0,000	0,000
2	0,444	0,000	0,000	3,667	1,722	0,000
3	0,154	0,000	0,000	0,192	12,577	0,154
4	1,200	0,000	0,000	0,667	4,867	9,467

Le tableau II.2.c.1 montre que la séparation entre les groupes est bien faite sur les contenus digestifs. En effet, chaque groupe a une alimentation particulière. Le groupe 1 ne semble manger que des suspensivores. Le groupe 2 se partage entre suspensivores, déposivores et un peu de carnivores. Le groupe 3 se nourrit essentiellement de déposivores et enfin le groupe 4 se distingue par le fait qu'il mange beaucoup plus de microbrouteurs et de carnivores que les autres groupes. Il n'y a que des 0 pour les nécrophages et détritivores car il y a peu de proies rentrant dans ces guildes.

Pour les soles

Le nombre de groupes choisis après observation du dendrogramme est de 4 (voir FIG 2 annexe) et le nombre de poissons par groupe est : 8 pour le premier, 12 pour le second, 30 pour le troisième et 15 pour le quatrième groupe.

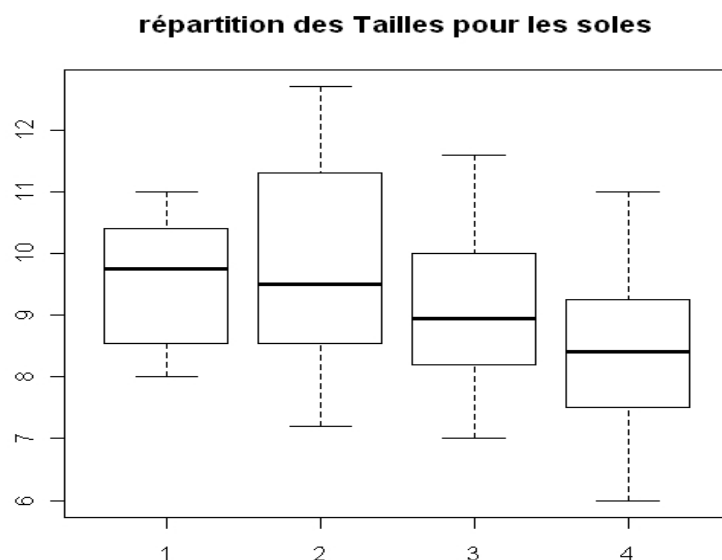


Fig III.2.c.6: Répartition des tailles (cm) des groupes contenus digestifs pour la sole.

On ne constate pas de différences de taille entre les groupes (anova, $F= 2.1674$, $df=3$, $p\text{valeur}= 0.101$).

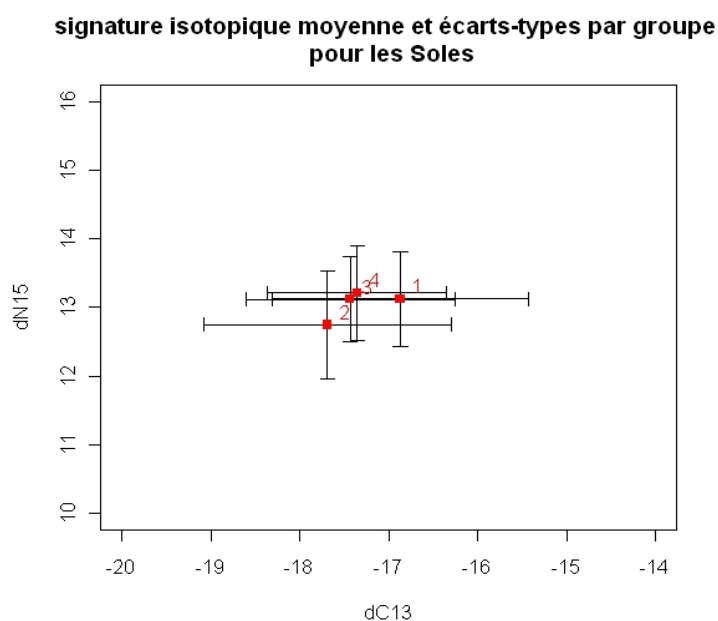


Fig III.2.c.7: Signature isotopique des groupes contenus digestifs pour la sole.

Les groupes ne présentent pas de différences significatives, que ce soit pour le d13C ou le d15N (d13C: K-W, $\chi^2=4.02$, $df= 3$, $p\text{-value} = 0.26$; d15N : K-W, $\chi^2= 3.17$, $df= 3$, $p\text{-value} = 0.37$).

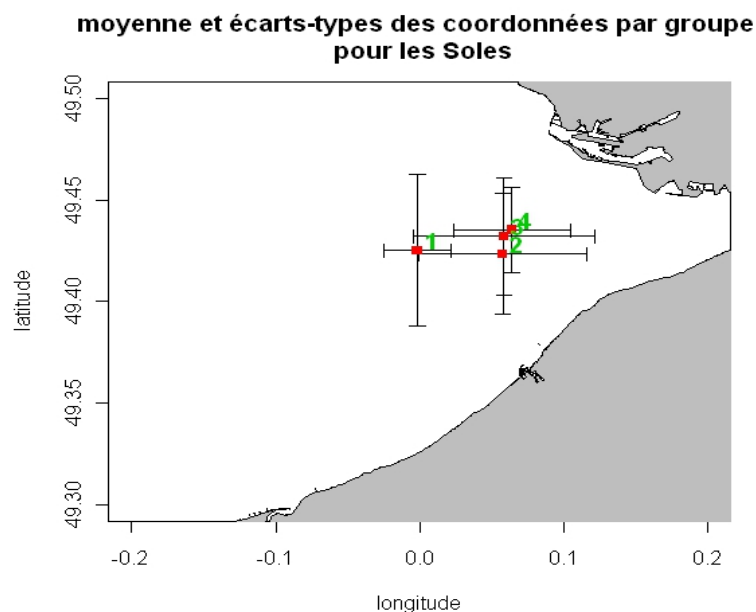


Fig III.2.c.8:Répartition spatiale des groupes contenus digestifs pour la sole.

Même si le graphique porte à penser que le groupe 1 se démarque des autres groupes, on ne constate pas de différence significative au niveau spatial (longitude: $\chi^2= 7.77$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0.051$) (latitude : $\chi^2=2.55$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0.47$) .

Table III.2.c.2: Répartition en guildes trophiques des contenus digestifs (nombre moyen de proies par poisson) pour la sole.

Groupes Soles	Carnivores	Nécrophages	Détritivores	Suspensivores	Déposivores	Microbrouteurs
1	0	0	0	0	0	2,375
2	0	0	0	0	3,083	0,083
3	1,867	0	0,267	1,000	1,900	0,633
4	1,667	0,067	0	0	0	0

Les différences de taille, de signatures isotopiques et les différences spatiales des groupes pour la sole sont encore moins nettes que pour la plie. Par contre, la différenciation sur les contenus digestifs s'est bien faite (logique car on fait une CAH sur ce marqueur). Le groupe 1 ne mange que des microbrouteurs, le groupe 2 ne mange quasiment que des dépositivores, le groupe 3 a une alimentation variée et le groupe 4 ne mange quasiment que des carnivores.

Pour les solenettes

Le nombre de groupes choisis après observation du dendrogramme est de 4 (voir FIG 2 en annexe) et le nombre de poisson par groupe est : 65 pour le premier, 72 pour le second, 27 pour le troisième et 11 pour le quatrième groupe.

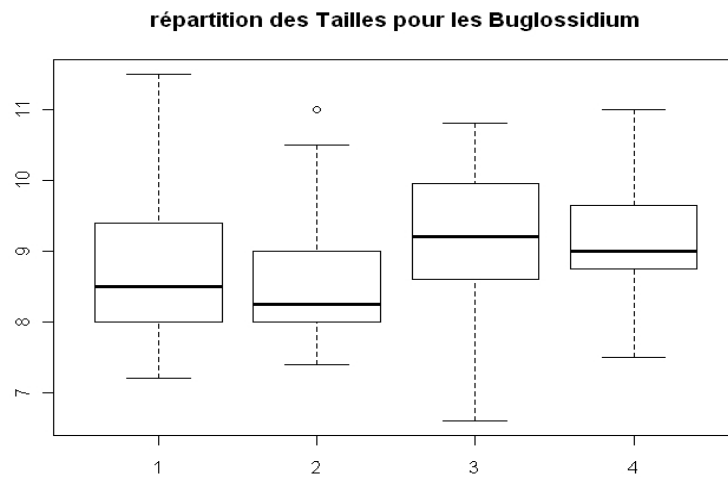


Fig III.2.c.9: Répartition des tailles (cm) et signature isotopique des groupes contenus digestifs pour la solenette.

Il n'y a pas de différence significative entre les tailles de différents groupes, sauf entre les groupes 2 et 3 (Wilcoxon, pval= 0,007).

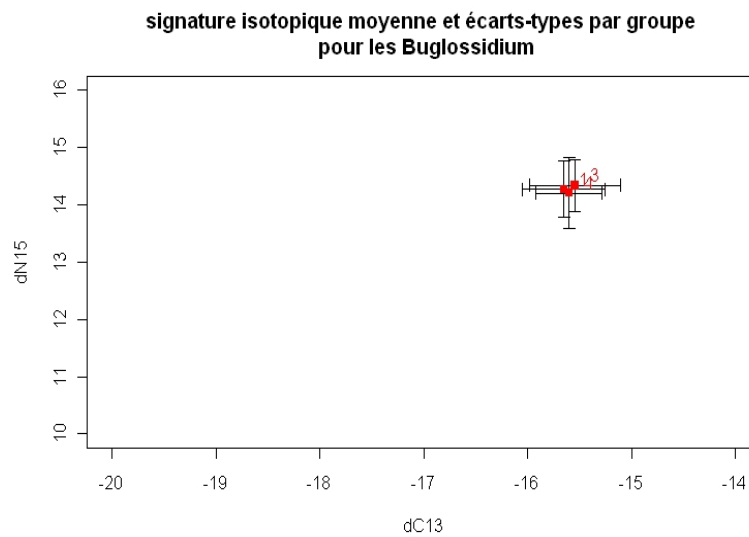


Fig III.2.c.10: Signature isotopique des groupes contenus digestifs pour la solenette.

On ne constate pas de différence dans les signatures isotopiques des groupes (d15N: K-W: $\chi^2=6.68$, df = 3, p-value = 0.08 ; d13C: K-W: $\chi^2=0.93$, df = 3, p-value = 0.82).

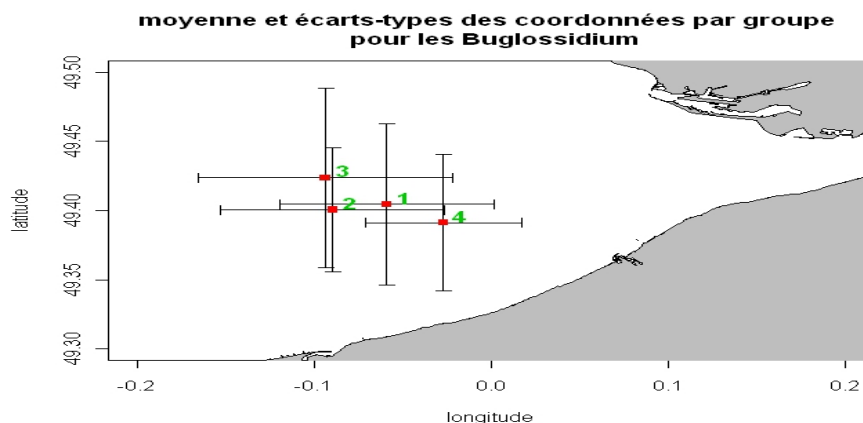


Fig III.2.c.11:Répartition spatiale des groupes contenus digestifs pour la solenette.

Les groupes ne présentent pas de différence significative au niveau latitudinal (K-W : $\chi^2=4.15$, df = 3, p-value = 0.25). Au niveau de la longitude par contre, les groupes qui ne sont pas différents ont la même lettre dans le résumé suivant (Wilcoxon , pval > 0,05):

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
AC	BC	ABC	A

Table III.2.c.3: Répartition en guildes trophiques des contenus digestifs (nombre moyen de proies par poisson) pour la solenette.

Groupes solenette	Carnivores	Nécrophages	Détritivores	Suspensivores	Déposivores	Microbrouteurs
1	3,415	0,262	0	2,769	1,385	0,323
2	1,319	0,028	0,028	2,889	2,222	6,625
3	0,037	0	0	1,444	6,444	0,148
4	0	0	0	1,818	0	0

On constate une séparation moins nette dans l'alimentation des 4 groupes de solenettes par rapport à la séparation des groupes pour les autres espèces.

d) Comparaison des 3 marqueurs

En reprenant chaque question et en comparant les résultats obtenus des 3 marqueurs, on peut analyser quel marqueur est le plus susceptible de répondre aux deux questions « Existe t-il une différence entre les 3 espèces de poissons plats avec ce marqueur? » et « Existe t-il une répartition spatiale du marqueur dans la baie de Seine? ».

Pour répondre à la première question, les marqueurs « microchimie des otolithes » et « concentration isotopique en d15N et d13C » semblent, à niveau égal, pouvoir être utiles pour différencier les espèces (cf **Figure III.2.a.1** et **Fig III.2.b.1**). Par contre, les contenus digestifs sont moins pertinents pour répondre à cette question étant donné que les régimes alimentaires des 3 espèces ne sont pas vraiment différenciés. (cf **Fig III.2.c.1**) .

Pour ce qui est de la répartition spatiale, les 3 marqueurs montrent une différenciation spatiale. En effet, pour tous, on remarque une différence significative entre les stations. Les 3 marqueurs peuvent donc être utilisés pour caractériser spatialement les habitats de chaque espèce.

3) Analyse Multi-couches

a) Résultats obtenus

Le résultat final de cette analyse est la représentation spatiale, à une échelle assez fine, sous formes de cartes de zones d'utilisation ou « d'habitats potentiels » pour chaque espèce. Ce sont en quelque sorte des cartes de présences pondérées pour chacune des espèces (Fig. III,3,1, III,3,2 et III,3,3). Une influence forte correspond au fait qu'il y a plus de 75% des poissons qui ont leur zone de présence pondérée à cet endroit. Les points rouges représentent les stations où au moins un poisson a été analysé. Sont rajoutées, en bleu, les données d'abondance pour pouvoir les comparer aux coefficients des différentes zones. Il est nécessaire de rappeler que ces données d'abondance n'ont pas du tout été utilisées pour créer les zones d'influence/habitats potentiels. Si des données d'abondance (en bleu) ne sont pas associées à des points rouges, cela signifie qu'à cet endroit le ou les poissons pêchés n'ont pas été analysés. Si on observe des plages blanches entre deux zones proches, c'est entièrement dû au fait qu'il n'y a pas de station à cet endroit et que la zone n'a pas pu être échantillonnée. En aucun cas cela correspond à une zone où il n'y aurait pas de poisson. Ces cartes peuvent être comparées à celles de présence absence en annexe (FIG 7).

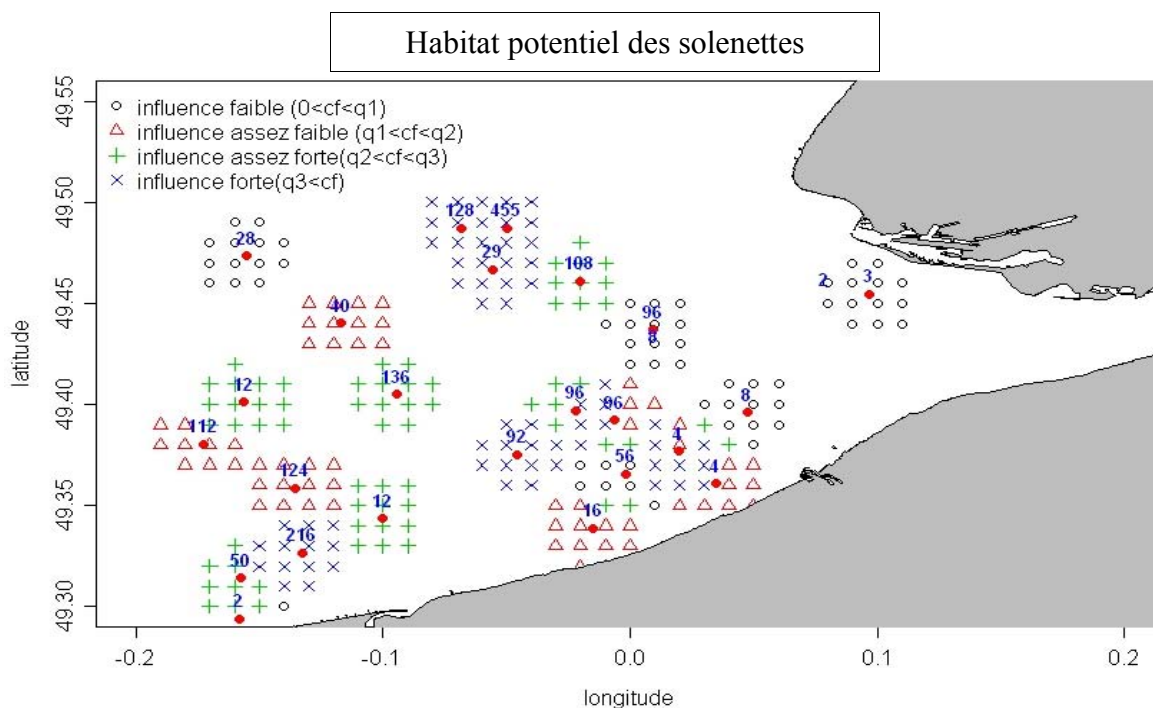


FIG III.3.a.1: Habitats potentiels des solenettes obtenus par analyse Multi-couches.

Pour les solenettes, on constate que les zones avec un fort coefficient sont assez dispersées. On voit ressortir 3 zones où la probabilité d'apparition est au moins assez forte. Si on compare les données d'abondances aux zones d'influence, on constate que les coefficients d'influence attribués à chaque zone correspondent assez bien au nombre de poissons pêchés.

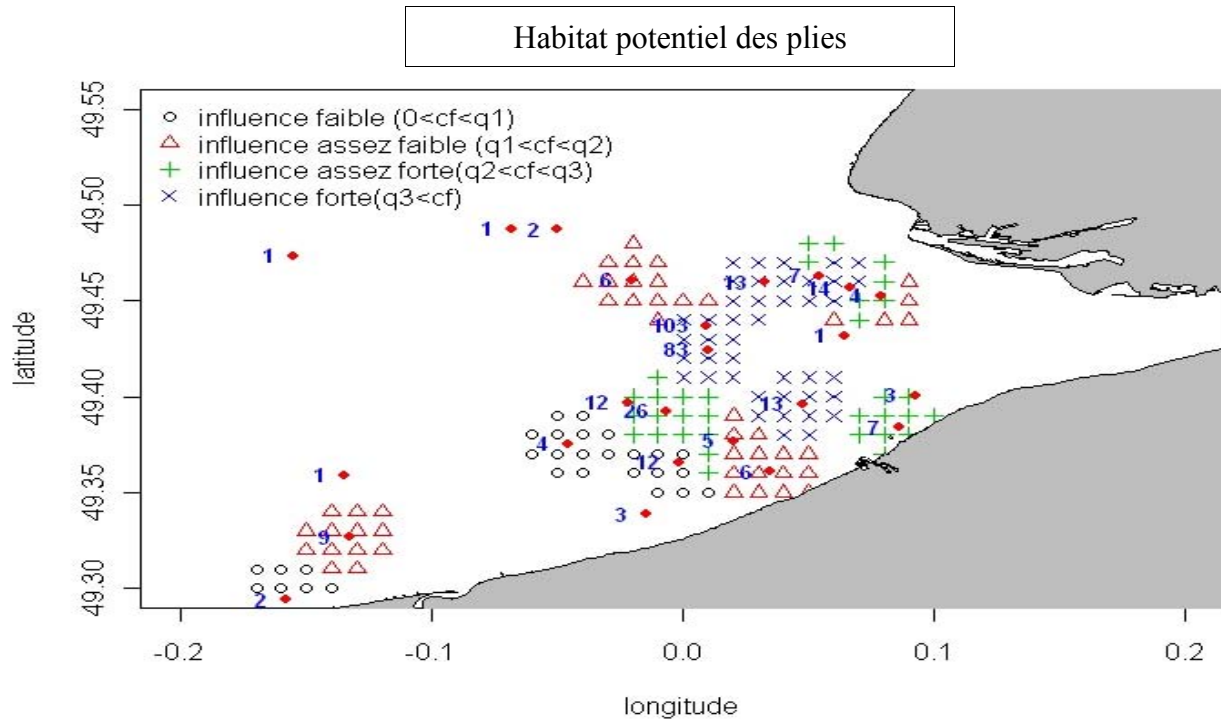


Figure III.3.a.2: Habitats potentiels des plies obtenus par analyse Multi-couches.

On remarque que pour les plies, contrairement aux solenettes, les secteurs de fort coefficient sont centrés sur une seule zone de latitude [49.38° N ; 49.48° N] et de longitude [0° E ; 0,08°E].

Enfin, les soles semblent vivre un peu plus près de l'embouchure que les plies. Cependant on note que soles et plies partagent certaines zones.

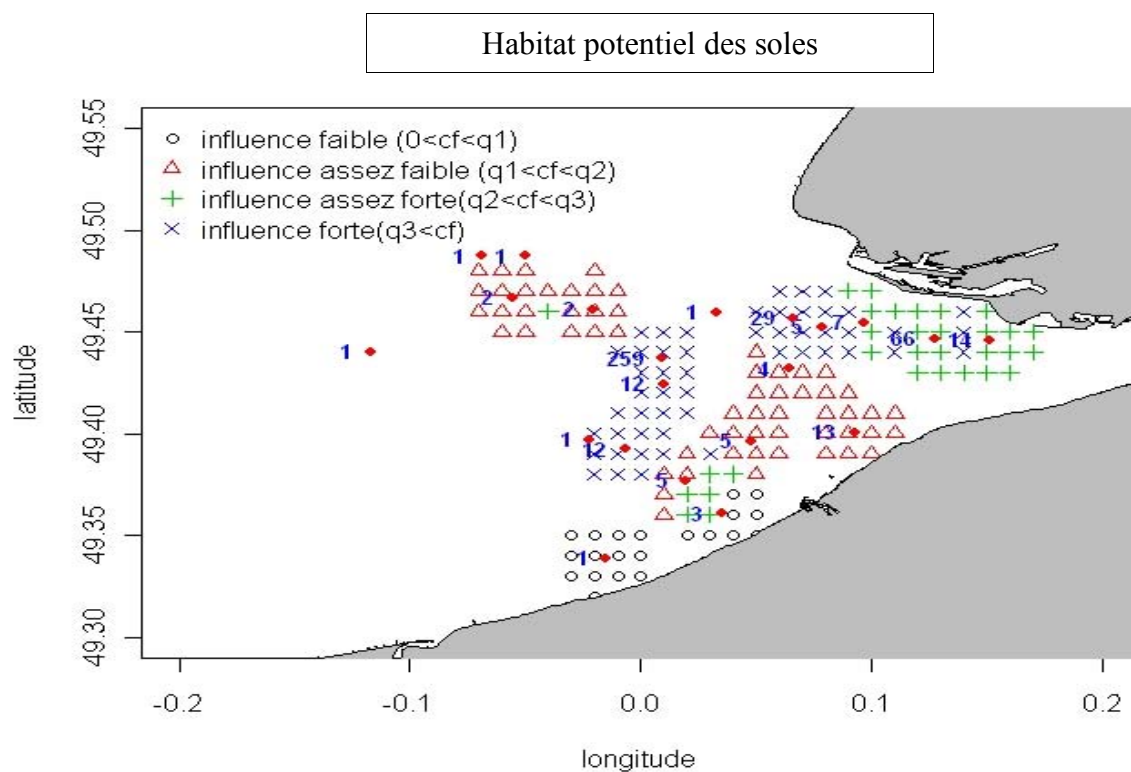


Figure III.3.a.3: Habitats potentiels des soles obtenus par analyse Multi-couches.

b) Robustesse de la méthode

Robustesse au seuil de coupure

Étant donné que le coefficient d'influence/présence d'une cellule dépend du nombre de groupes choisis dans les CAH (tous marqueurs confondus) pour une espèce donnée, il est intéressant de comparer les cartes créées à partir de groupements différents de ceux initialement choisis (cf. § II.3) et qui sont, pour rappel:

- 7 groupes isotopes, 4 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les plies;
- 6 groupes isotopes, 4 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les soles;
- 7 groupes isotopes et 4 groupes contenus digestifs pour les solenettes.

On ne présente que le groupement alternatif, lorsqu'on ne modifie qu'un seul seuil de coupure (pour le marqueur isotopes) pour justifier la partie hiérarchique (voir plus loin). Cependant, la robustesse de la méthode à des groupements différents pour les 3 marqueurs a été également testée (FIG 8 en annexe) .

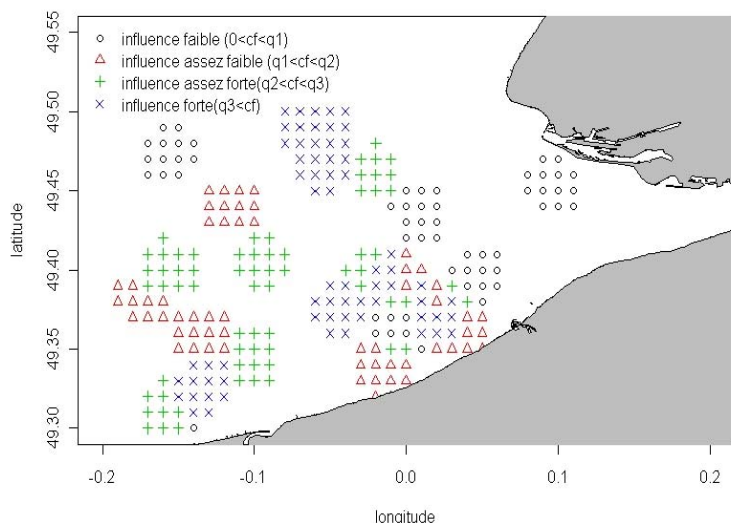
Le groupement alternatif sur les groupes isotopes est le suivant:

- 3 groupes isotopes pour les plies;
- 3 groupes isotopes pour les soles;
- 4 groupes isotopes pour les solenettes

On obtient les cartes suivantes avec, à gauche, les cartes issues du premier groupement et, à droite, les cartes obtenues après modification des groupements (Fig. III.3.b.1).

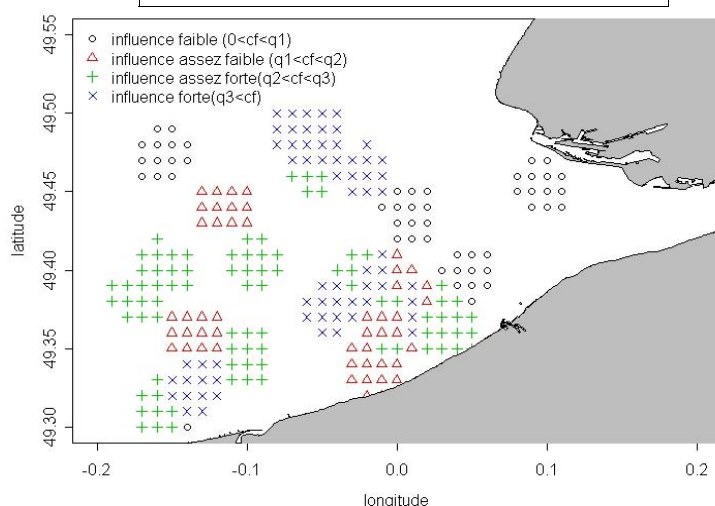
Groupement initial

Habitat potentiel des solenettes



Groupement alternatif

Habitat potentiel des solenettes



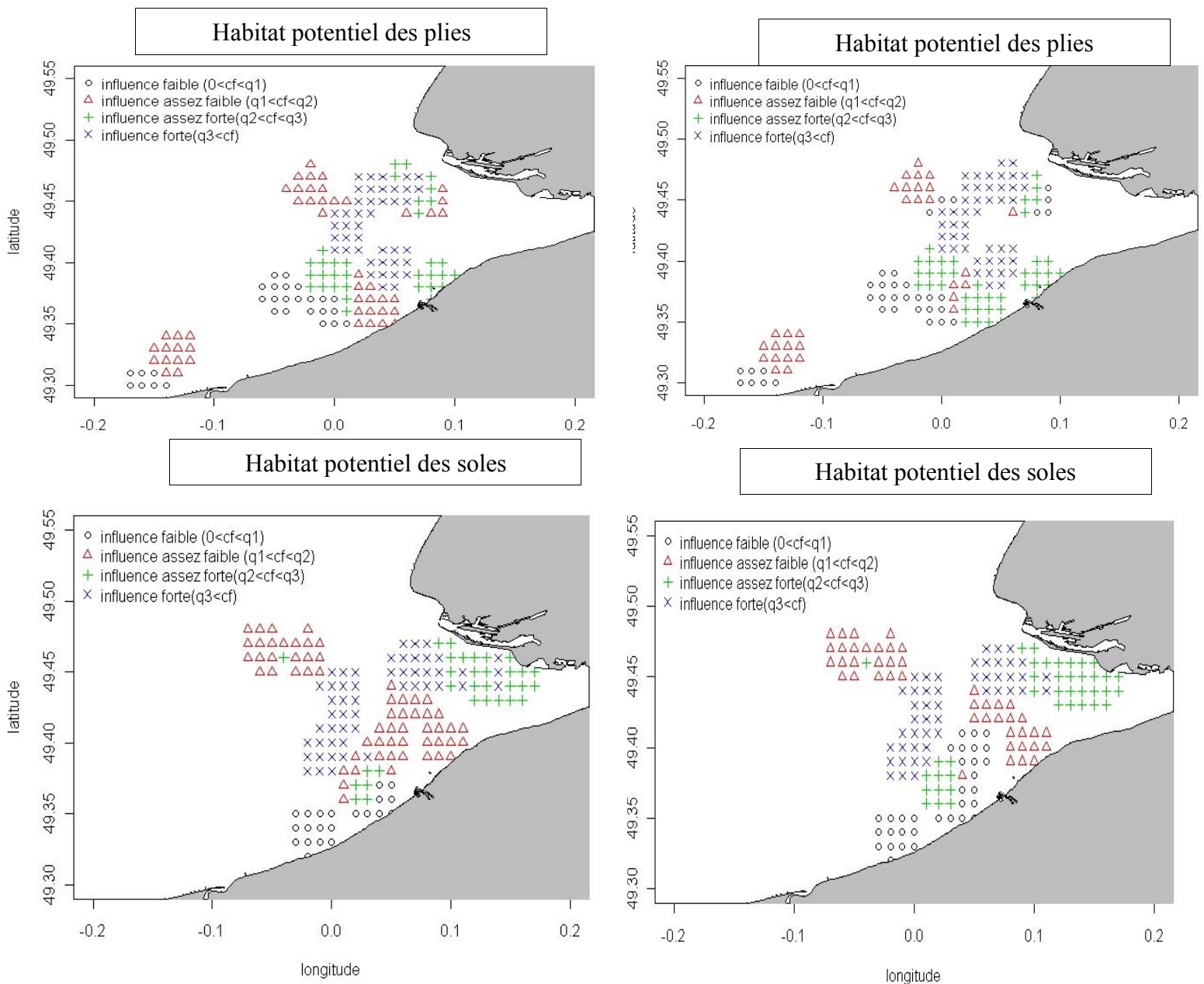


FIG III.3.b.1 : Cartes d'habitats potentiels issues de 2 groupements différents (à gauche: groupement initial, à droite: autre groupement).

On remarque que, pour chaque espèce, les zones d'influence sont sensiblement les mêmes pour les deux seuils de coupure, surtout pour les zones avec un coefficient de présence fort. La corrélation entre les quartiles des cellules des 2 groupements (en ne prenant en compte que les cellules non vides) est supérieure à 90% (solenettes: $\text{cor}=0,93$, $t=39,9$, $\text{df}=247$, $\text{pvaleur}< 2.10^{-16}$; soles: $\text{cor}=0,95$, $t=37,8$, $\text{df}=247$, $\text{pvaleur}< 2.10^{-16}$; plies $\text{cor}=0,93$, $t=31,6$, $\text{df}=151$, $\text{pvaleur}< 2.10^{-16}$).

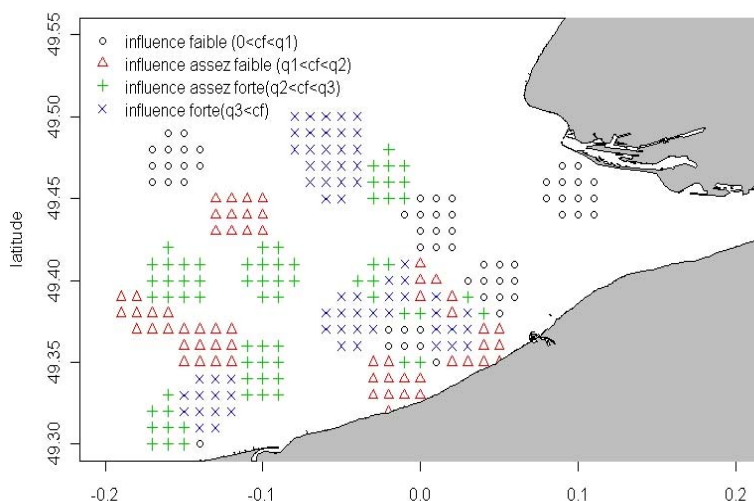
Ceci montre que la méthode est assez robuste à une modification dans le choix du seuil de coupure de l'arbre pour la définition des groupements.

Robustesse à la distance limite

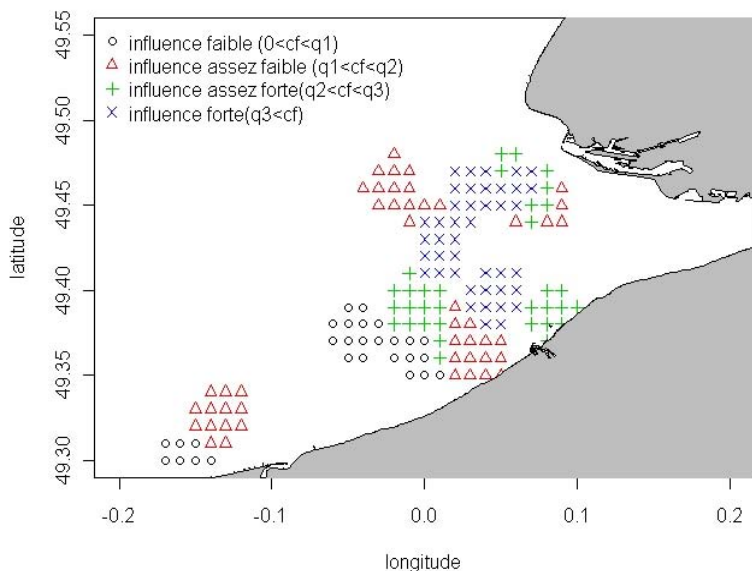
On regarde également si la méthode est résistante à un changement de dlim (distance limite dans la sélection de cellules autour de la station). On compare les cartes précédemment créées avec une dlim fixée à 2 km aux cartes obtenues avec une dlim fixée à 1,5 km (Fig. III.3.b.2).

Cartes pour avec dlim=2km

Potentiel d'influence des solenettes

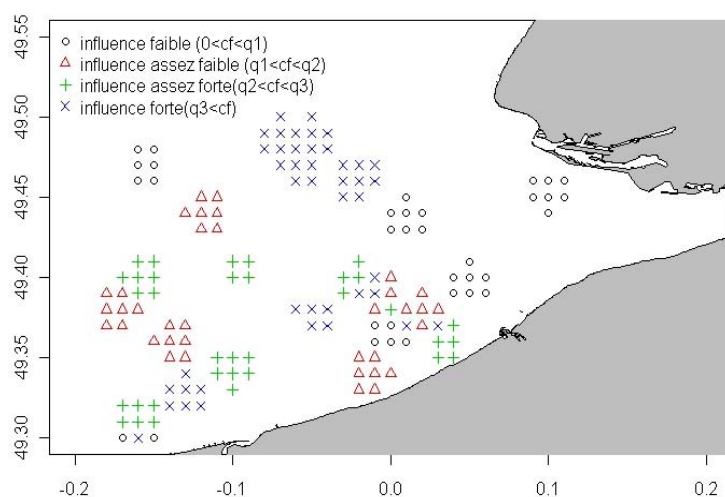


Habitat potentiel des plies

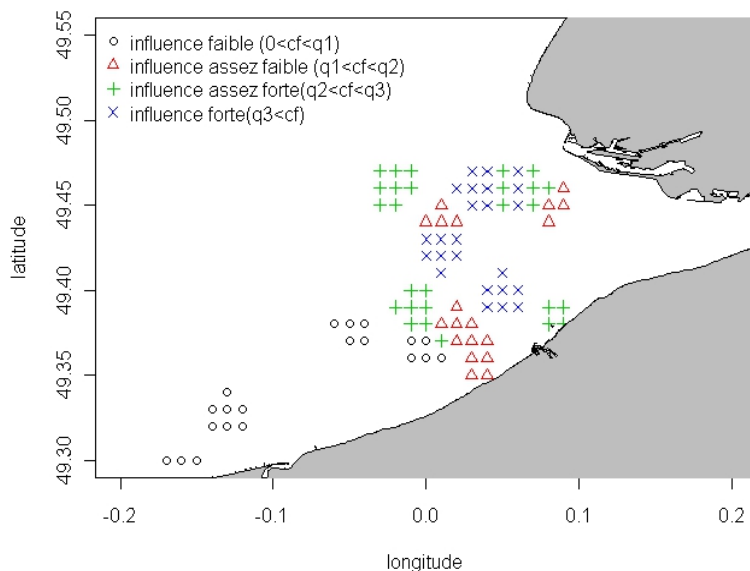


Cartes pour avec dlim=1,5km

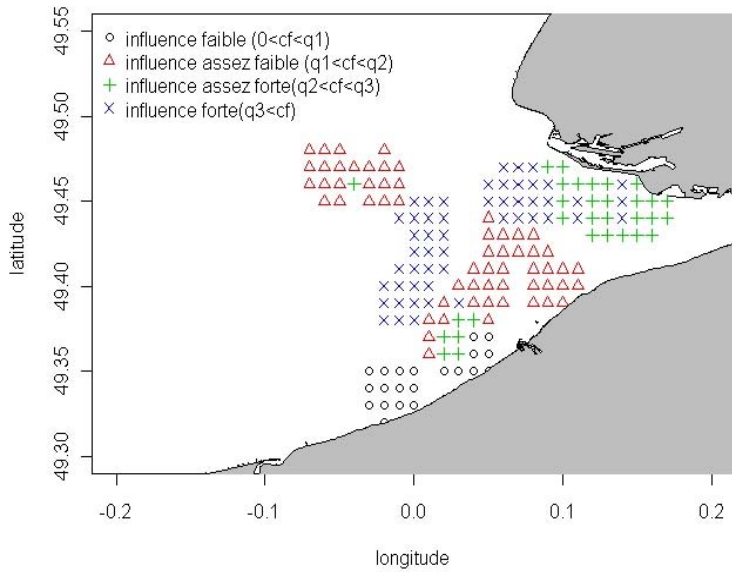
Potentiel d'influence des solenettes



Habitat potentiel des plies



Habitat potentiel des soles



Habitat potentiel des soles

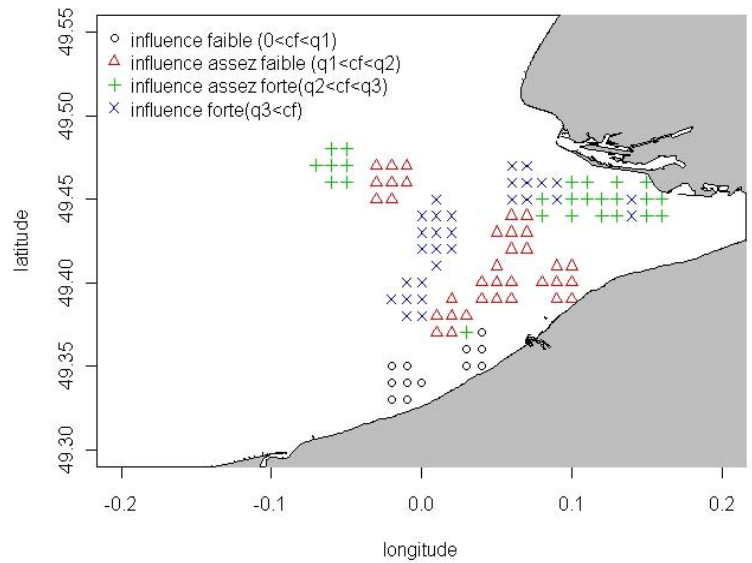


FIG III.3.b.2 :Cartes d'habitats potentiels pour les distances limites de 1,5km (à droite) et 2km (à gauche)

On constate, là encore, que pour chaque espèce, les zones d'influence restent quasiment les mêmes. Les corrélations sont calculées pour chaque espèce, entre les cellules des deux cartes (toutes cellules comprises). On teste leur significativité avec la méthode de Spearman. On obtient: solenettes: $\text{cor}=0,73$, $t=35,7$ $\text{df}=1116$ $\text{p-valeur}< 2.10^{-16}$, soles : $\text{cor}=0,77$, $t=39,9$ $\text{df}=1116$ $\text{p-valeur}< 2.10^{-16}$, plies : $\text{cor}=0,78$ $t=41,4$ $\text{df}=1116$ $\text{p-valeur}< 2.10^{-16}$. On constate surtout que les zones d'habitat potentiel sont moins étendues pour les graphiques de droite créés avec une dlim plus faible. Ainsi la méthode Multi-couches semble également solide au changement de dlim.

On peut donc conclure qu'il existe une certaine stabilité et robustesse dans l'approche Multi-couches vis-à-vis du choix du seuil de coupure définissant le nombre de groupes et vis-à-vis de la zone d'influence du chalut (i.e. distance limite). Les résultats montrent en effet que ces deux paramètres n'ont qu'une influence limitée sur les résultats obtenus.

Robustesse au nombre de poissons analysés par station.

La corrélation des coefficients de présence avec le nombre de poissons analysés par station montre qu'il existe un lien entre les deux variables. Les corrélations et les tests de significativité associés sont les suivants:

solenette: $\text{cor}= 0,466$; $t=3,07$ $\text{df}=34$ $\text{p-valeur}=0,004$,

sole: $\text{cor}=0,628$; $t=4,03$ $\text{df}=25$ $\text{p-valeur}= 4.5^{-4}$

plie: $\text{cor}=0,581$; $t=3,42$ $\text{df}=23$ $\text{p-valeur}=0,002$

nombre de poissons par station (solenette: $8,17 \pm 2,82$; plie: $7,45 \pm 3,20$; sole: $7,00 \pm 3,39$).

4) Analyse Multi-tables

Dans cette approche nous nous intéressons aux liens statistiques entre les marqueurs (coefficient RV, voir description dans les Méthodes), à la contribution des variables à la structure commune des trois marqueurs et à l'identification de groupes d'individus basée sur la structure commune des trois marqueurs.

Tel que mentionné dans la section des Méthodes, deux analyses permettent de répondre à ces questions et sont donc approfondies: STATIS et MCOA. STATIS contrairement à la MCOA construit son compromis (i.e. structure commune) avant d'en faire l'analyse. Une comparaison des résultats des deux méthodes est présentée dans la section Discussion.

a) Méthode STATIS

On commence par représenter les coefficients RV pour voir quels sont les tableaux les plus similaires.

Table III.4.a.1: Coefficients de corrélation vectorielle et des p-valeurs du test de Monte-Carlo entre les différents tableaux/marqueurs. ns : non significatif ; * : significatif à 0.05 ; ** : significative à 0.01 ; *** : significatif à <0.001.

Soles	Contenu Digestif	isotope	otolithes
Contenu Digestif	1,00	0,06	0,14
isotope	RV=0,06 ns	1,00	0,13
otolithes	RV=0,14 **	RV=0,13 **	1,00

Solenettes	Contenus Digestifs	isotope
Contenu Digestif	1,00	0,02
isotope	RV=0,02 ns	1,00

Plies	Contenu Digestif	isotope	otolithes
Contenu Digestif	1,00	0,32	0,23
isotope	RV=0,32 ***	1,00	0,24
otolithes	RV=0,23 ***	RV=0,24 ***	1,00

Les coefficients RV (Table III.4.a.1) et leur test de Monte-Carlo associé nous indiquent que certains marqueurs/tableaux n'ont aucun lien qui ne serait dû à autre chose qu'au hasard. Notamment pour la solenette et la sole il n'y a pas de liens entre le tableau des contenus digestifs et celui des isotopes. Pour la sole, bien que significatifs les coefficients RV entre isotope et otolithes et entre contenus digestifs et otolithes sont plus faibles (respectivement 0,13 et 0,14) que ceux de la plie (entre 0,23 et 0,32). De ces différents tableaux, on en déduit

qu'il n'est pas pertinent d'étudier les liens entre les différents marqueurs pour la solenette et qu'à choisir, il est plus intéressant de les étudier pour la plie que pour la sole étant donné les seuils de significativités.

On a appliqué la méthode STATIS sur les 3 tableaux/marqueurs pour chaque espèce mais l'analyse n'est présentée ici que pour la plie. On commence par regarder le poids α_i et le \cos^2 de chaque tableau, pour chaque espèce.

Table III.4.a.2: Poids et \cos^2 pour chaque tableau et pour chaque espèce.

Tableau	Plies		Soles		Solenettes	
	poids	\cos^2	poids	\cos^2	poids	\cos^2
Cont. digest.	0,597	0,673	0,543	0,233	0,707	0,286
Isotope	0,602	0,782	0,528	0,612	0,707	0,834
Otolithes	0,530	0,456	0,653	0,675		

Pour la plie, on donne plus de poids au tableau isotope, ce qui est logique étant donné que ses coefficients RV avec les 2 autres tableaux sont les plus forts. Les liens « isotopes »/« Contenus digestifs » ($RV=0,32$) et « isotopes »/« otolithes » ($RV=0,25$) étant plus forts que le lien « Contenus digestifs » /« otolithes » ($RV=0,21$) , il est normal de privilégier le tableau isotope.

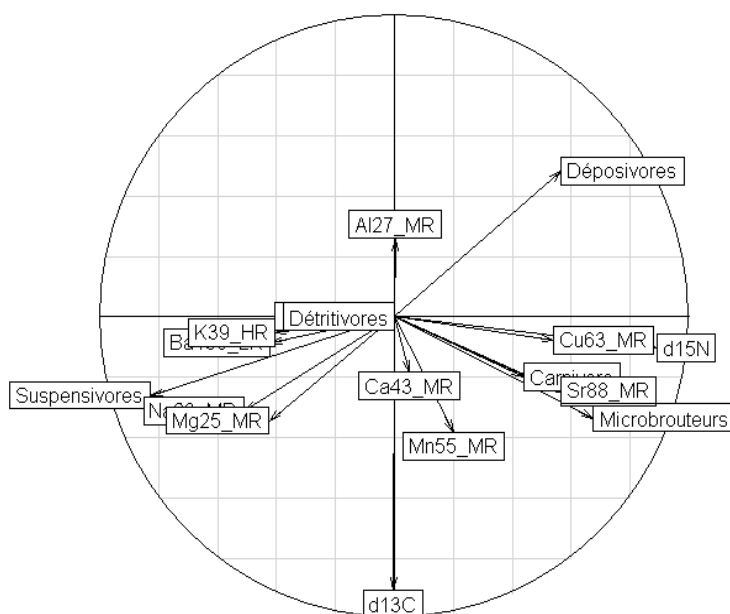
Il est intéressant de regarder les inerties que fournissent chaque dimension dans l'analyse. L'inertie de la première dimension est de 0,31 et celle de la de la seconde dimension est de 0,18.

Ainsi avec les 2 premiers axes de l'analyse, quasiment 50 % de l'inertie totale est restituée.

Pour regarder la contribution de chaque tableau plus en détail, on peut regarder le cercle de corrélation (corrélation des variables de chaque tableau avec chaque axe de l'analyse). On peut savoir ainsi par quelles variables, chaque axe de l'analyse peut se définir.

FIG III.4.a.1: Cercle de corrélation pour l'analyse STATIS sur les plies.

On constate, là encore, que la première dimension de l'analyse (axe horizontal) est définie par le d15N tandis que la deuxième dimension l'est par le d13C (corrélation négative). En ce qui concerne le tableau des contenus digestifs, les variables les plus corrélées avec le premier et/ou le second axes de l'analyse sont « Suspensivores », « Dépositivores », « Microbrouteurs » et moins fortement « Carnivores »; « Détritivores » et « Nécrophages » n'étant pas du tout corrélés avec les deux axes.



On remarque également que les dépositivores sont opposés aux suspensivores (surtout sur le 1er axe).

Enfin les éléments chimiques des otolithes sont moyennement corrélés avec l'axe 1 sur lequel ils sont assez bien dispersés. Les corrélations sont par contre faibles (et négatives sauf pour Al27) avec l'axe 2.

On représente ensuite les coordonnées de chaque individu sur les deux axes de l'analyse (FIG III.4.a.2). On constate que les individus présentent une assez forte variabilité au niveau de la dimension 1 qui est surtout représentée par le d15N dans l'espace des variables. La variabilité est moins forte pour la dimension 2, représentée surtout par le d13C, sauf pour l'individu 246 qui se démarque fortement des autres sur cette dimension. En effet lorsqu'on regarde les résultats pour l'individu 246 (plie_16_9) on remarque que son d13C est de -19,05, ce qui est le minimum et surtout un « outlier » de cette variable (cf Figure III.2.a.1).

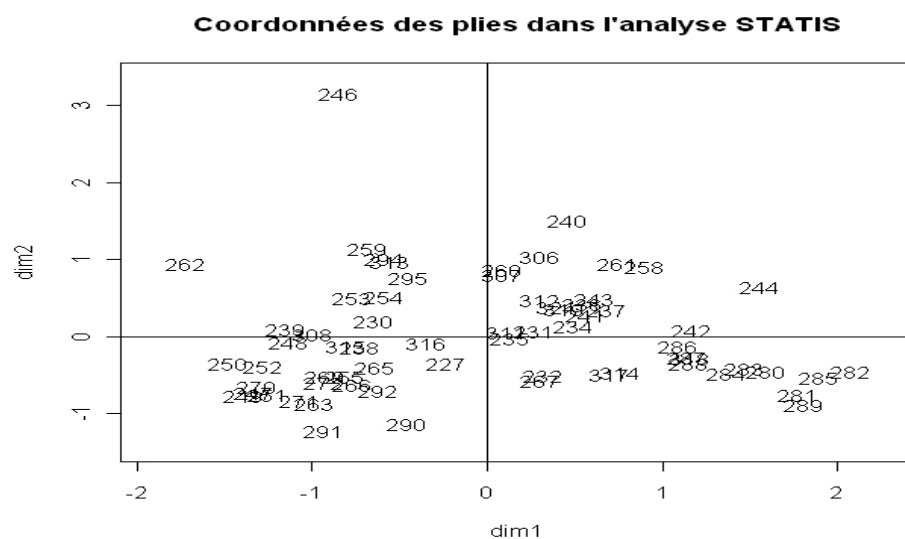


FIG III.4.a.2: Représentation des individus dans les 2 premières dimensions de l'analyse STATIS.

On crée ensuite des groupes à partir des coordonnées des individus sur les 2 premiers axes de l'analyse et on représente ce groupement par des ellipses dans l'espace des individus. On choisit de séparer les individus en 4 groupes.

FIG III.4.a.3: Dendrogramme obtenu par CAH sur les coordonnées des individus dans l'analyse STATIS

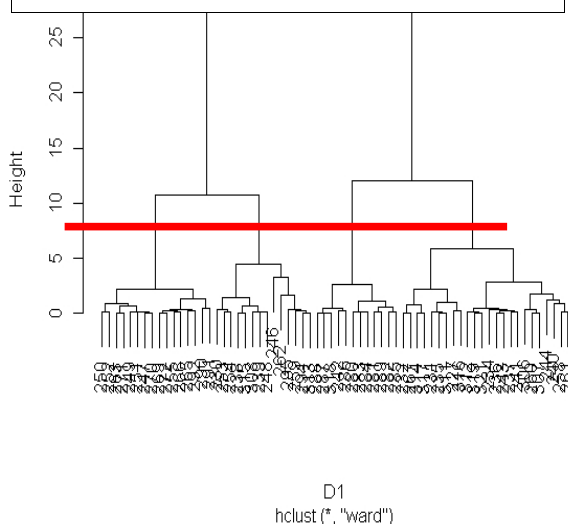
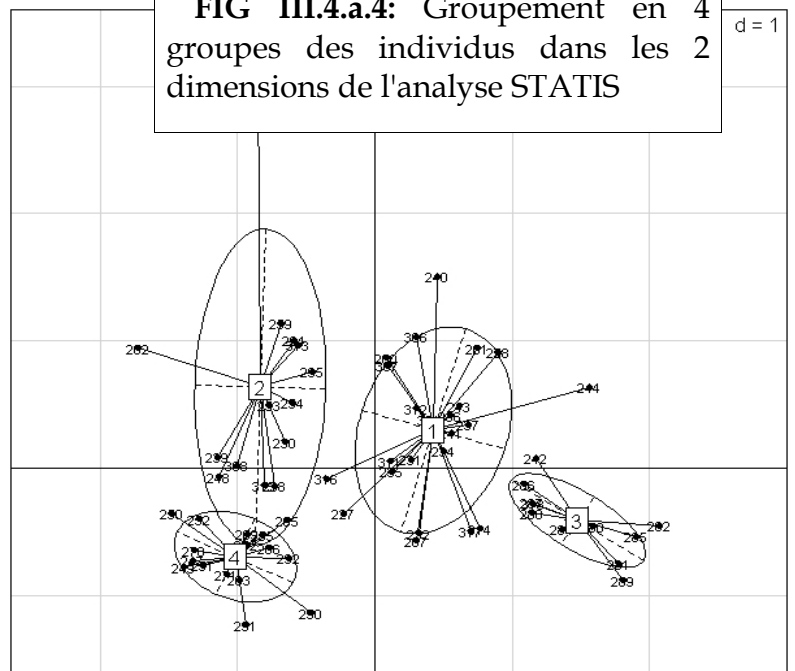


FIG III.4.a.4: Groupement en 4 groupes des individus dans les 2 dimensions de l'analyse STATIS



On remarque bien dans l'arbre (Fig III.4.a.3) que la plie 246 se démarque bien des autres, ce qui est logique étant donné la remarque sur la figure Fig III.4.a.2.

Le nombre de poissons par groupe est le suivant : 24 pour le premier groupe, 14 pour le second, 12 pour le groupe 3 et 16 pour le groupe 4.

On regarde ensuite les différences qu'il peut y avoir entre ces 4 groupes au niveau des marqueurs.

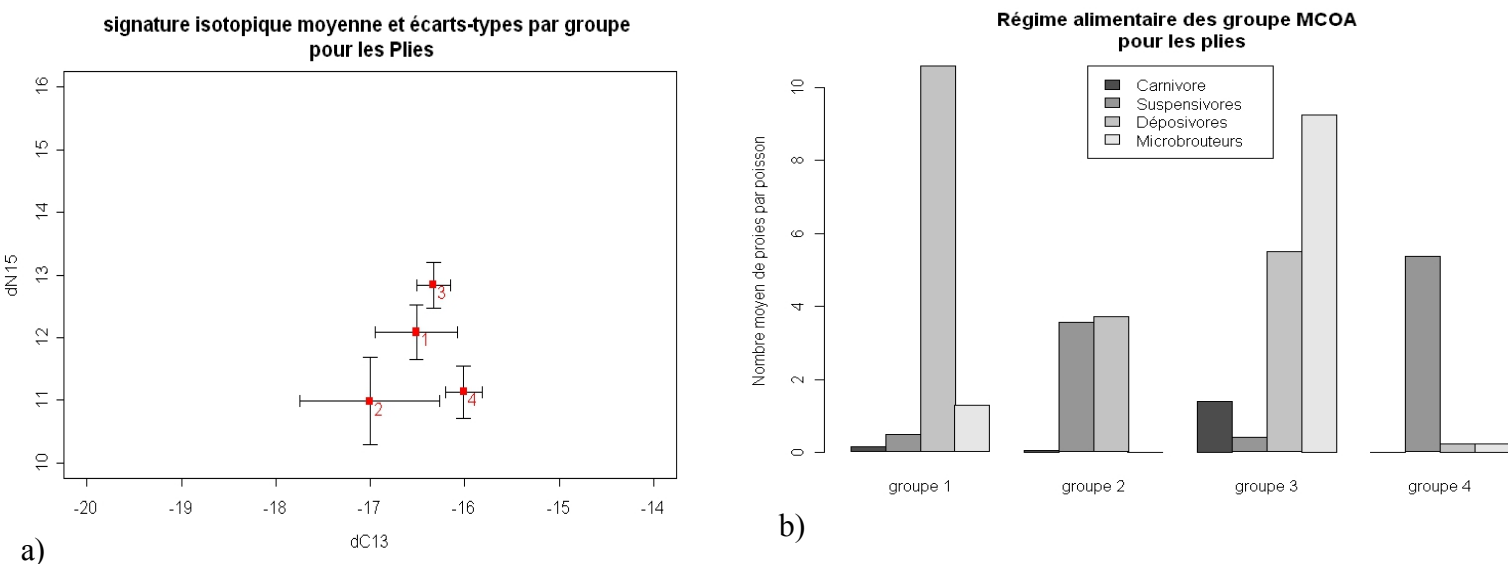


FIG III.4.a.5 : Différenciation entre les signatures isotopiques a) et les régimes alimentaires b) des groupes formés sur les coordonnées des individus dans l'analyse STATIS sur les plies.

En ce qui concerne les signatures isotopiques, la séparation des groupes est assez nette mais la différence est un peu plus forte au niveau du d15N (d13C : K-W, $\chi^2=34.9$, $df = 3$, $p\text{-valeur} = 1.26e-07$ / d15N : Anova, $F=44.5$, $p\text{-valeur}=1.8e-15$). Ceci s'explique par le fait que les individus sont essentiellement répartis sur la première dimension (Fig III.4.c.3) et que celle-ci est principalement définie par le d15N (Fig III.4.c.2). De plus, la séparation des groupes est surtout visible sur la première dimension (Fig III.4.c.6). Pour ce qui est des contenus digestifs, les différences sont visibles en terme de régime alimentaire. Le groupe 1 semble manger essentiellement des proies dépositivores, le groupe 2 mange plutôt des proies suspensivores et dépositivores, le groupe 3 s'oriente vers des microbrouteurs, des dépositivores et des carnivores et le groupe 4 ne semble manger que des suspensivores.

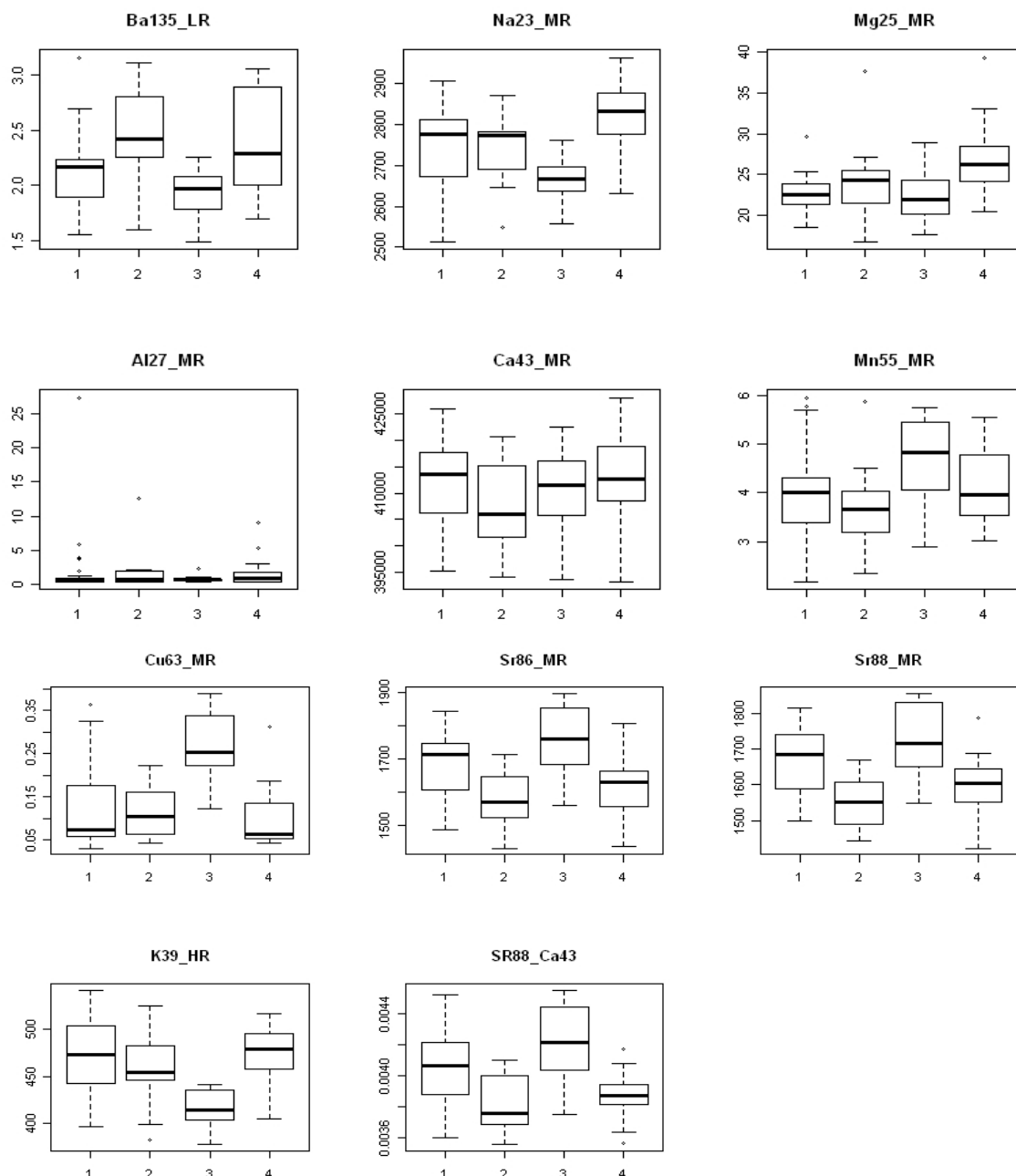


FIG III.4.a.6 : Différenciation dans la microchimie des otolithes entre les groupes formés sur les coordonnées des individus dans l'analyse STATIS sur les plies.

En s'intéressant aux différences des éléments chimiques du marqueur otolithes, entre les groupes, on constate qu'elles sont peu voire pas significatives.

On remarque que le groupe 3 se démarque souvent des 3 autres (Na23, Mn55, Cu63, K39) ou est proche du groupe 1 (Ba135, Sr86, Sr88, Sr88/Ca43). Les groupes semblent similaires pour certains éléments (Al27, Ca43). Enfin les groupes 2 et 4 ont souvent les mêmes répartitions (Ba135, Al27, Ca43, Cu63, Sr86, Sr88, K39, Sr88/Ca43).

Les différenciations au niveau de la répartition géographique nous permettent d'étudier un peu plus les différences entre les groupes créées suite à l'analyse STATIS. On représente les zones de présence de chaque groupe avec le nombre de poissons du groupe à chaque station (nombre en bleu).

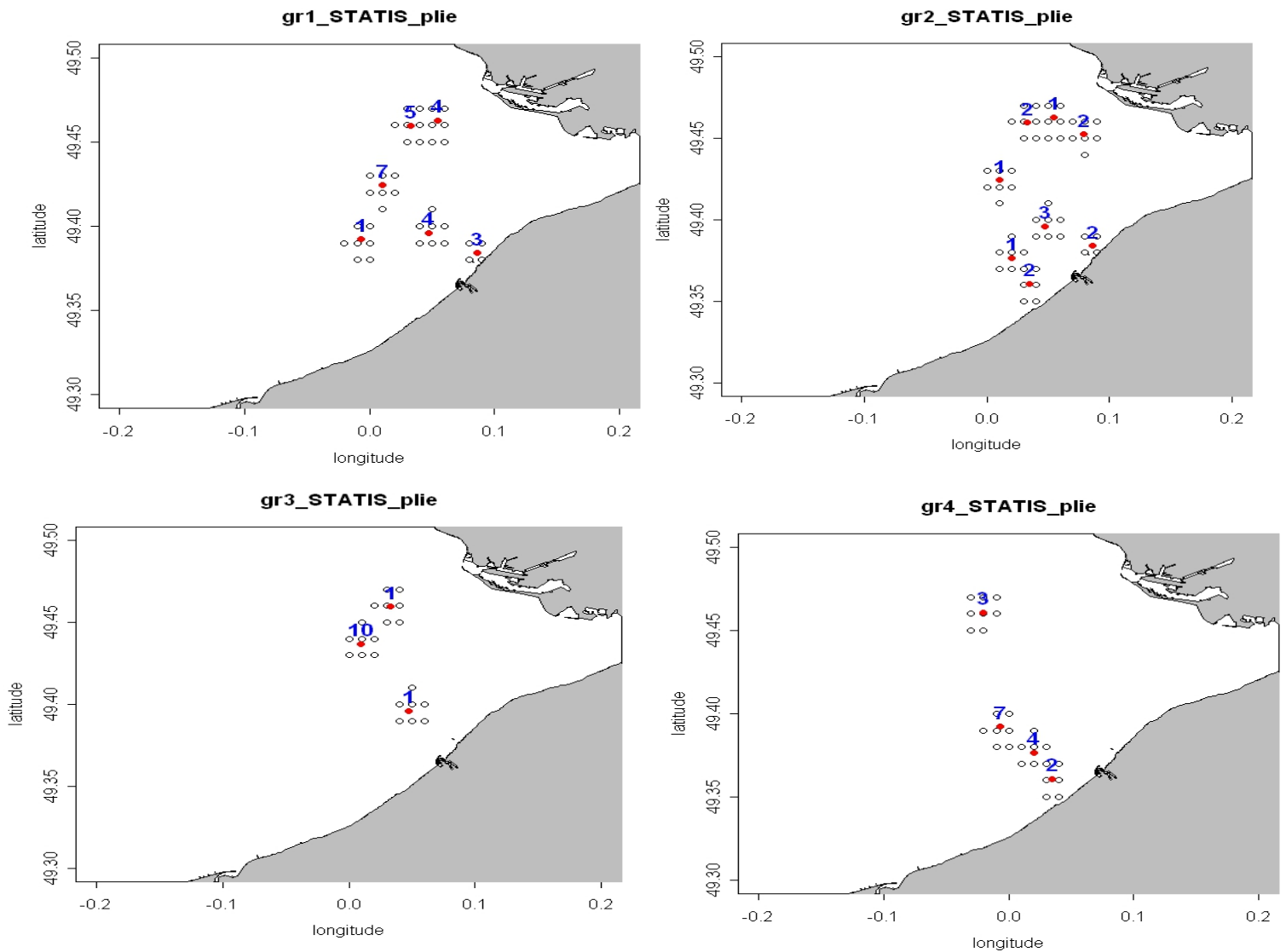


FIG III.4.c.7: Représentation spatiale des groupes formés par CAH sur les coordonnées des individus après l'analyse STATIS sur les plies.

b) Méthode MCOA (analyse de co-inertie multiple)

Une MCOA est effectuée sur les 3 marqueurs/tableaux pour chaque espèce mais seul les résultats des plies sont ici présentées et analysés. Le nombre d'axes dans cette analyse est réduit à 2 étant donné que le tableau des isotopes ne compte que 2 variables (d13C et d15N).

On donne le tableau des coefficients cov^2 , calculés pour chaque tableau/marqueur dans les 2 dimensions de l'analyse (Table III.4.b.1). On voit ainsi quel marqueur est le plus utilisé dans la création de chaque axe.

Table III.4.b.1 : Cov² pour chaque tableau et pour chaque espèce avec les deux premières dimensions de la structure commune.

	Plies		Soles		Solenettes	
Tableau marqueur	cov ² /dim1	cov ² /dim2	cov ² /dim1	cov ² /dim2	cov ² /dim1	cov ² /dim2
Cont. digest.	0,421	0,101	0,031	0,056	0.008	0.128
Isotope	0,422	0,439	0,467	0,379	0,766	0,149
Otolithes	0,162	0,049	0,186	0,054		

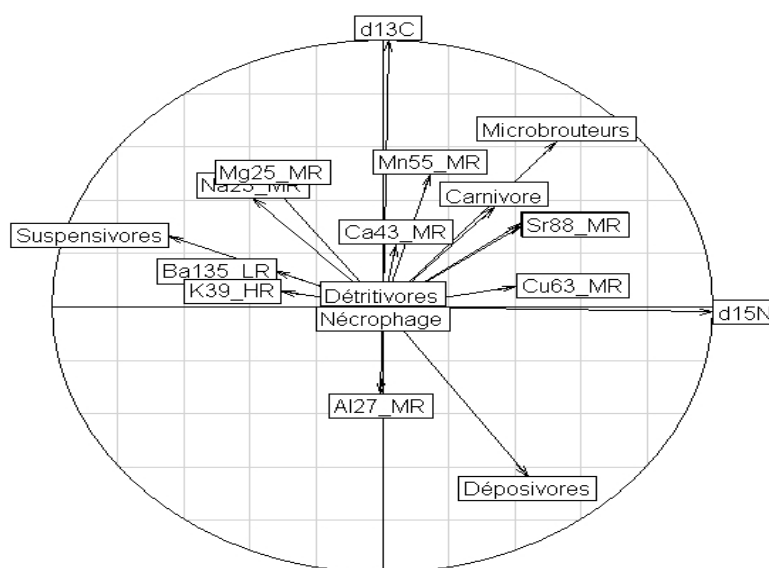
Pour les plies, on constate que le tableau des isotopes participe le plus à la structure commune car son cov² est fort pour l'axe 1 et 2 de la MCOA. Les contenus digestifs (CS) participent de la même manière que les isotopes pour l'axe 1 mais beaucoup moins pour l'axe 2. Enfin le tableau des otolithes participe très peu à l'axe 1 et pas du tout à l'axe 2.

On peut lier ces résultats aux coefficients RV calculés plus haut (Table III.4.a.1). En effet on remarque, pour la plie, que le tableau isotopes a les coefficients RV les plus forts: 0,32 avec les contenus digestifs et 0,24 avec les otolithes. Le tableau des contenus digestifs et celui des otolithes sont liés avec un RV de 0,23. Si on résume, le tableau des isotopes est le tableau le plus lié aux deux autres, ensuite c'est celui des contenus digestifs et enfin celui des otolithes.

Il est intéressant de regarder également les inerties de chaque dimension dans l'analyse. L'inertie de la première dimension est de 0.46 et de 0.27 pour la seconde. Ainsi 73% de l'inertie totale est représentée par les deux premiers axes de l'analyse. Il serait de toute façon non pertinent de prendre plus de 2 axes étant donné que le tableau des isotopes comporte que 2 variables.

Pour regarder la contribution de chaque tableau plus en détail, on peut regarder le cercle de corrélation (corrélation des variables de chaque tableau avec chaque axe de l'analyse). On peut savoir ainsi par quelles variables chaque axe de l'analyse peut se définir.

FIG III.4.b.1: Cercle de corrélation pour la MCOA sur les plies.



On constate que l'axe 1 (horizontal) est vraiment bien défini par le d15N et l'axe 2 (vertical) par le d13C. Ceci est logique étant donné que ce sont les variables du tableau isotopes qui contribuent le plus à la co-structure. On remarque également que les variables des contenus digestifs définissent assez bien l'axe 1 (bien répartis horizontalement) mais peu l'axe 2 (à part pour Dépositores qui se démarque des autres). Les corrélations sont surtout fortes pour Suspensivores, Microbrouteurs et Dépositores. On note quand même que Détritivores et Nécrophages sont deux variables qui semblent avoir une corrélation nulle avec les deux axes. Ceci vient sûrement du fait qu'on a très peu de proies détritivores ou nécrophages. Enfin, on s'aperçoit que les variables du tableau des otolithes ont des corrélations assez faibles avec l'axe 1 (en positif et en négatif) et avec l'axe 2 (toutes positives sauf pour Al27).

Toutes ces remarques vont dans le même sens que celles faites pour les coefficients cov^2 et permettent de mieux comprendre les liens entre les variables.

On s'intéresse à présent à l'espace des individus. On représente les coordonnées de chaque individu sur les deux axes de la MCOA.

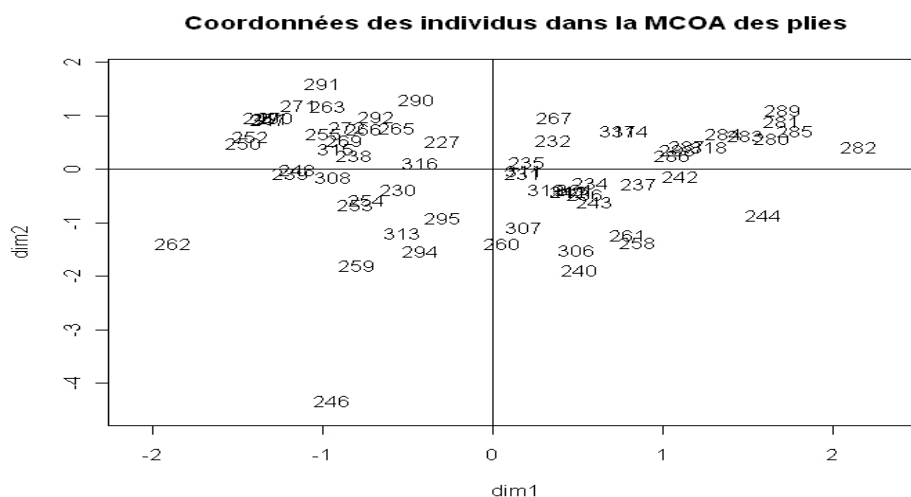


FIG III.4.b.2: Représentation de l'espace des individus dans l'analyse MCOA des plies.

On retrouve quasiment le même graphique qu'avec STATIS, à une symétrie axiale près (d'axe la dimension 1).

Le but étant de caractériser spatialement les habitats, on cherche à créer des cartes pour représenter la variabilité des individus sur les coordonnées dans les 2 dimensions de l'analyse. Pour cela, on crée des groupes pour rassembler les individus qui sont proches sur la figure III.4.b.2. L'arbre obtenu par CAH sur les coordonnées est le suivant:

On décide de couper l'arbre en 3 groupes. Il est alors possible de représenter ce groupement par des ellipses dans l'espace des individus. Le nombre de poissons par groupe est le suivant: 33 pour le groupe 1, 15 pour le groupe 2 et 18 pour le groupe 3.

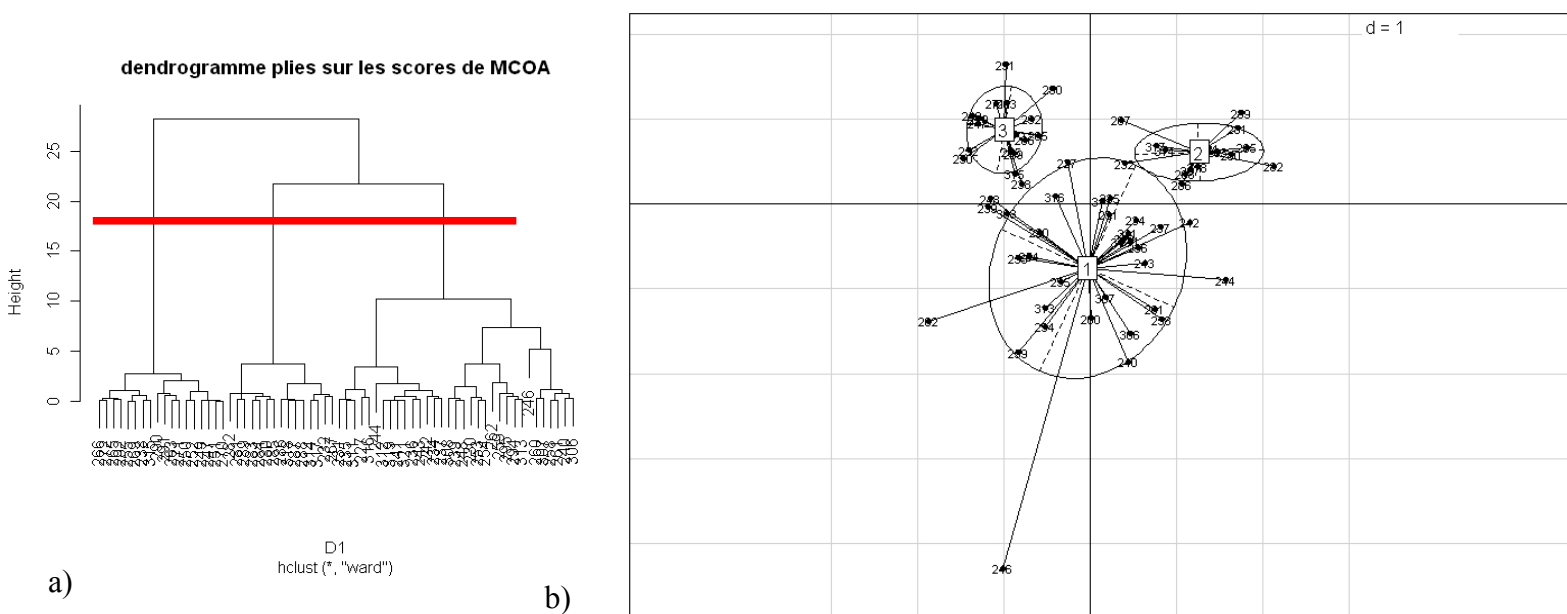


FIG III.4.b.3: MCOA sur les plies: a) Arbre obtenu par CAH sur les coordonnées des plies dans l'analyse MCOA sur les 3 marqueurs et b) groupement des individus dans les 2 dimensions. On constate que les groupes sont assez bien séparés. Le fait que les ellipses 2 et 3 se coupent est trompeur car en fait il n'y a pas d'individus du groupe 2 dans l'ellipse du groupe 3. Il est intéressant, maintenant, de regarder si ces individus sont bien séparés au niveau des 3 marqueurs, ce qui devrait être le cas étant donné qu'on prend en compte les 3 marqueurs pour faire l'analyse.

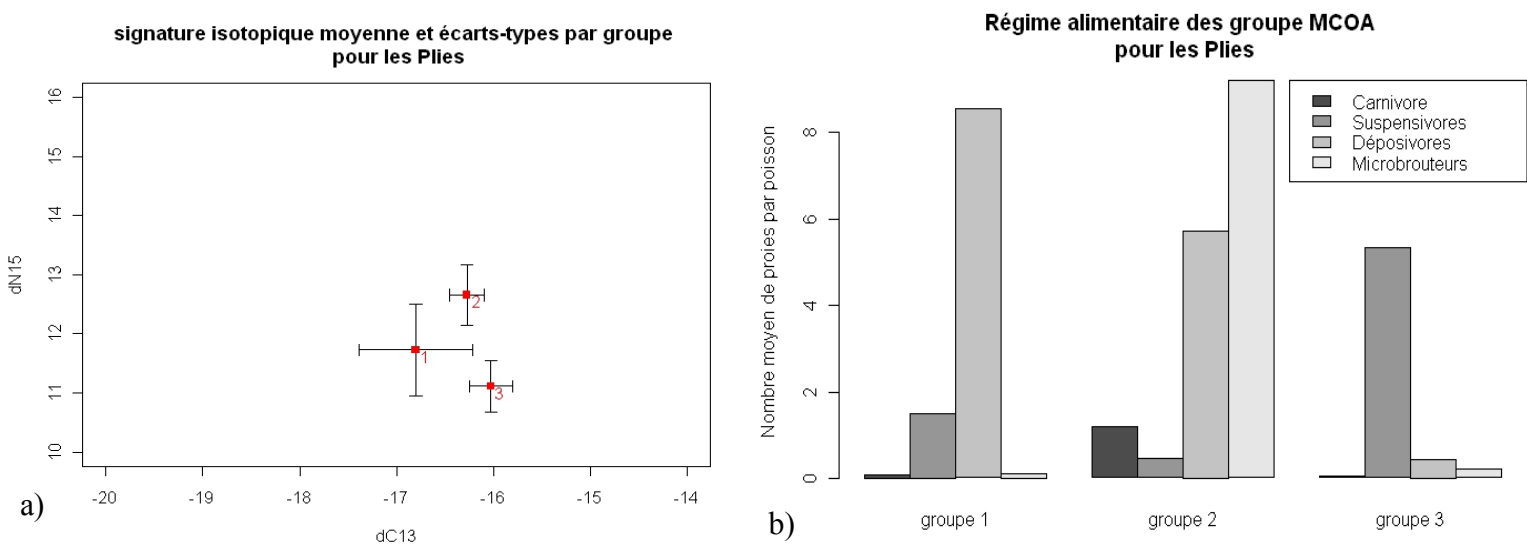


FIG III.4.b.4 : Différenciation entre les signatures isotopiques a) et les régimes alimentaires b) des groupes formés sur les coordonnées des individus dans la MCOA sur les plies (On ne représente pas les proies détritivores et nécrophages dans les régimes alimentaires car aucune des plies sélectionnées n'en a mangé).

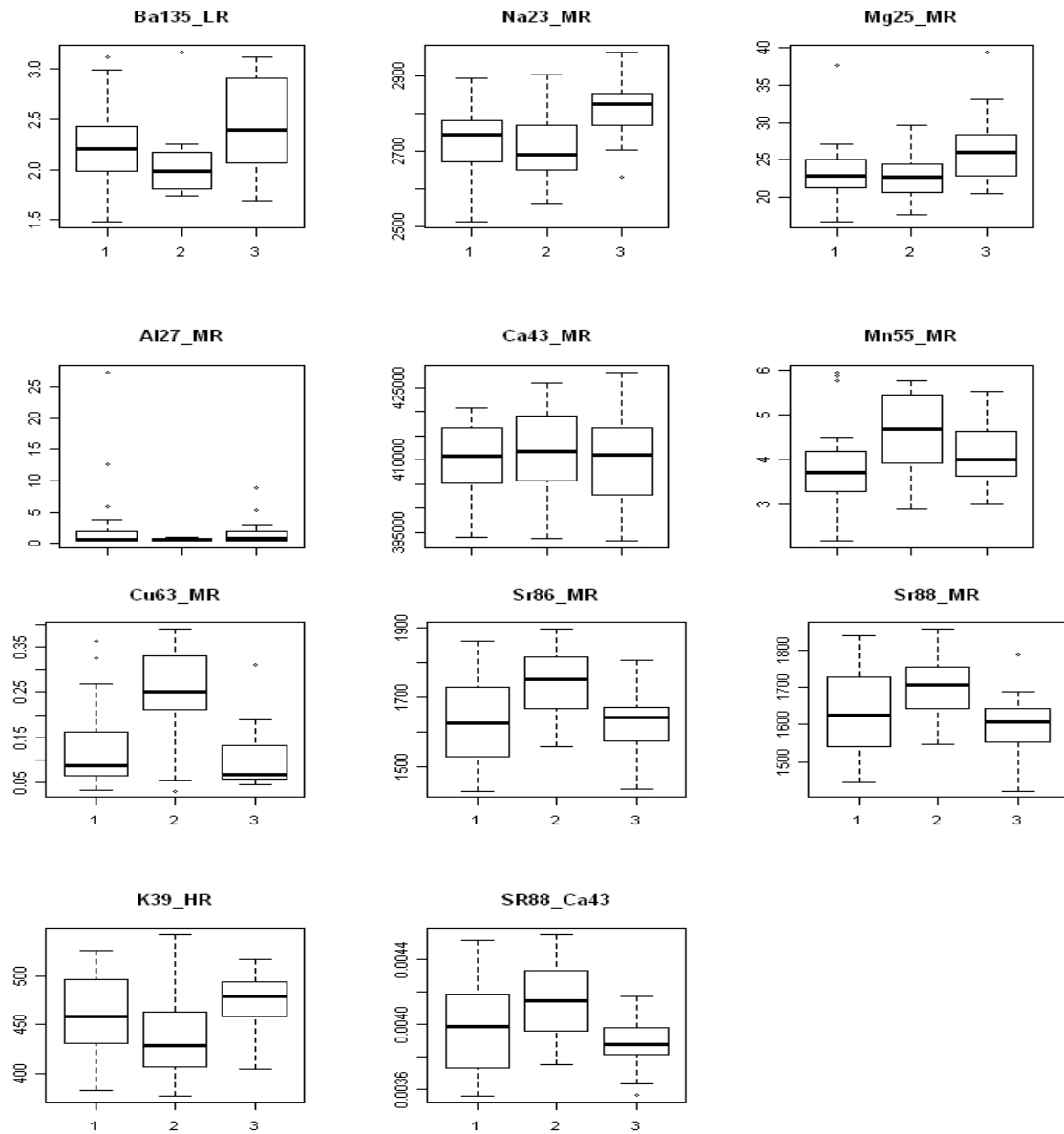


FIG III.4.b.5 : Différenciation dans la microchimie des otolithes entre les groupes formés sur les coordonnées des individus dans la MCOA sur les plies.

On constate que la séparation s'est bien faite pour les signatures isotopiques, surtout au niveau du $d_{15}N$; ce qui va dans le sens du caractère plus discriminant du $d_{15}N$ par rapport au $d_{13}C$ évoqué à propos de la figure III.4.b.3. La séparation est également nette en ce qui concerne les régimes alimentaires: le groupe 3 semble manger plus de suspensivores, le groupe 1 de dépositivores et le groupe 2 mange surtout des microbrouteurs et des carnivores. Par contre, pour ce qui est des otolithes, il y a peu d'éléments où la différenciation entre les groupes est bien faite, certains éléments ont même quasiment les mêmes répartitions (Ca43) (Fig. III.4.b.5).

Le fait que la différenciation des groupes soit plus nette pour les signatures isotopiques et pour les régimes alimentaires que pour les otolithes s'explique par la participation de chaque tableau à la structure commune (Table III.4.b.1) et par les corrélations entre les variables des 3 tableaux et les 2 axes de l'analyse (Fig. III.4.b.1) . Comme le tableau des otolithes participe très peu à la création du premier axe et quasiment pas au deuxième, il est normal que l'analyse de groupement prenne beaucoup moins en compte ce tableau.

On regarde à présent la différenciation en termes de disposition spatiale de chaque groupe (Fig III.4.b.6). On constate d'abord que les groupes ne sont pas les mêmes que ceux formés par STATIS, à part le groupe 2 MCOA qui semble correspondre au niveau spatial au groupe 3 de STATIS. La zone de présence de ce groupe est d'ailleurs assez restreinte.

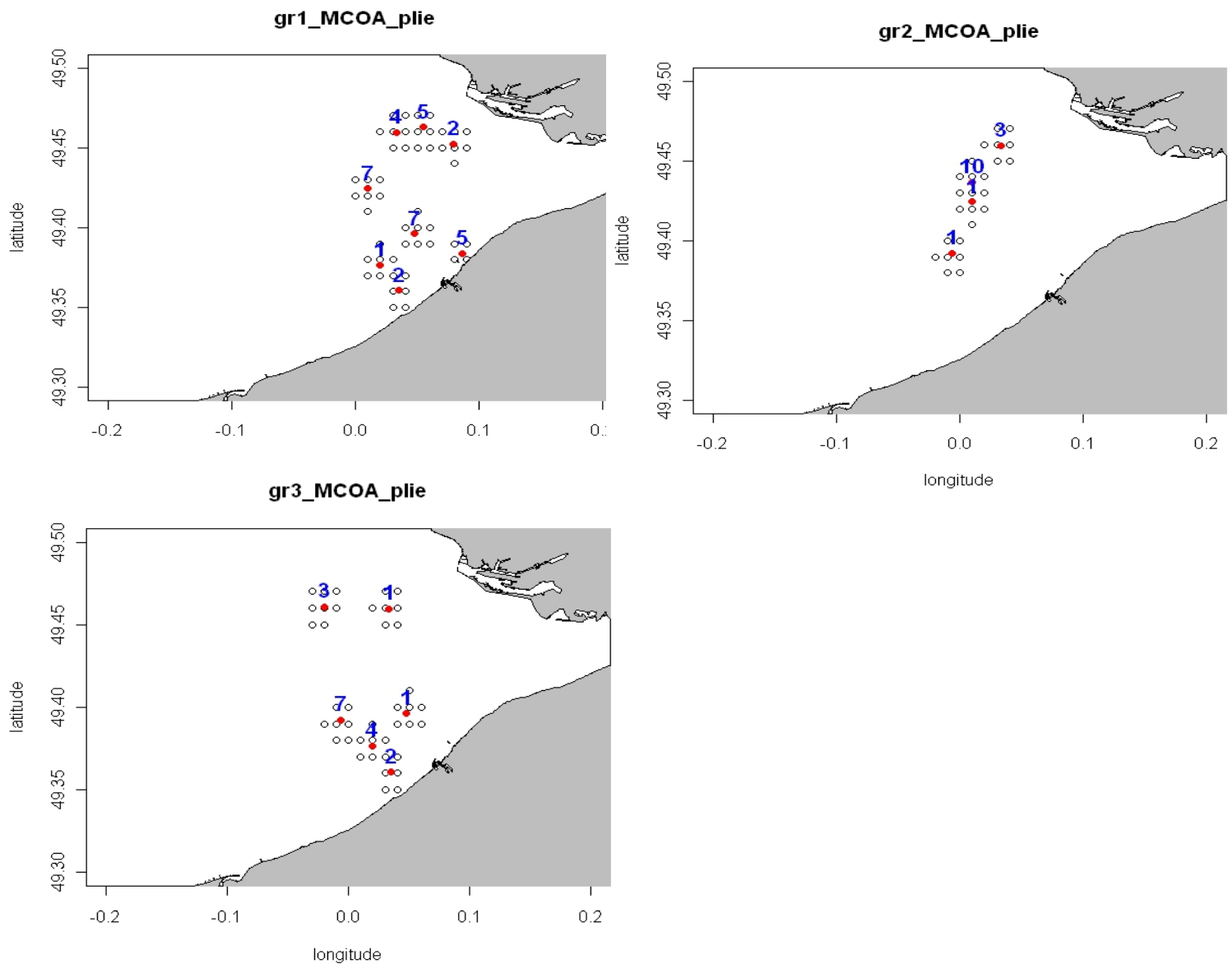


FIG III.4.b.6 : Répartition spatiale des groupes pour les plies . On représente les zones de présence de chaque groupe avec le nombre de poissons du groupe à chaque station (nombre en bleu).

5) Analyse Hiérarchique

Avec cette méthode, on cherche à savoir s'il existe des différences de moyenne au niveau de l'abondance entre les groupes formés par CAH sur les isotopes, ainsi qu'entre les sous-groupes formés par CAH sur les contenus digestifs à l'intérieur d'un groupe isotope.

On commence donc par former les groupes isotopes. Les dendrogrammes obtenus par CAH sont présentés sur la figure 9 en annexe et les nombres de groupes pour chaque espèce sont les suivants: 4 pour les solenettes, 3 pour les plies, 3 pour les soles. Les nombres de groupes sont différents de ceux choisis pour l'analyse multi-couches car, pour le hiérarchique, il est nécessaire de prendre suffisamment d'individus dans un groupe pour pouvoir faire des sous-groupes. Cependant, le fait de prendre des groupements différents ne modifie pas significativement le résultat des analyses multi-couches (cf les analyses de sensibilité au seuil de coupure **III.3.b**). On pourra donc faire un lien entre la méthode multi-couches et la méthode hiérarchique, même si les groupements sont différents.

Ensuite dans chaque groupe isotope, on obtient les nombres de sous-groupes contenus digestifs suivants (on met entre parenthèse le nombre de poissons par sous groupes).

Table III.5.1: Nombres de sous-groupes contenus digestifs (entre parenthèse le nombre de poissons par sous groupes).

Nbs groupes	Solenettes	Soles	Plies
Groupe 1	4 (31,8,6,6)	2 (6,8)	2 (29,16)
Groupe 2	3 (13,22,14)	3 (9,15,7)	2 (14,16)
Groupe 3	4 (16,13,12,7)	3 (5,6,9)	2 (10,10)
Groupe 4	3 (10,5,11)		

Pour chaque poisson, on a ainsi le numéro du groupe isotope et le numéro du sous groupe contenus digestifs dans lesquelles il se trouve.

On observe que les sous-groupes contenus digestifs, du même groupe isotopes, se ressemblent en terme de signature isotopique (voir un exemple en FIG 10 en annexe). En effet, les individus de ces sous-groupes ont d'abord été regroupé par ce marqueur et font tous partie du même groupe isotope. Par contre, les sous-groupes sont différenciés au niveau des contenus digestifs. On peut représenter les caractéristiques de chaque groupe et sous-groupes sur les graphiques suivants.

Caractérisation des groupes d'isotopes et des sous-groupes de contenus digestifs par espèce.

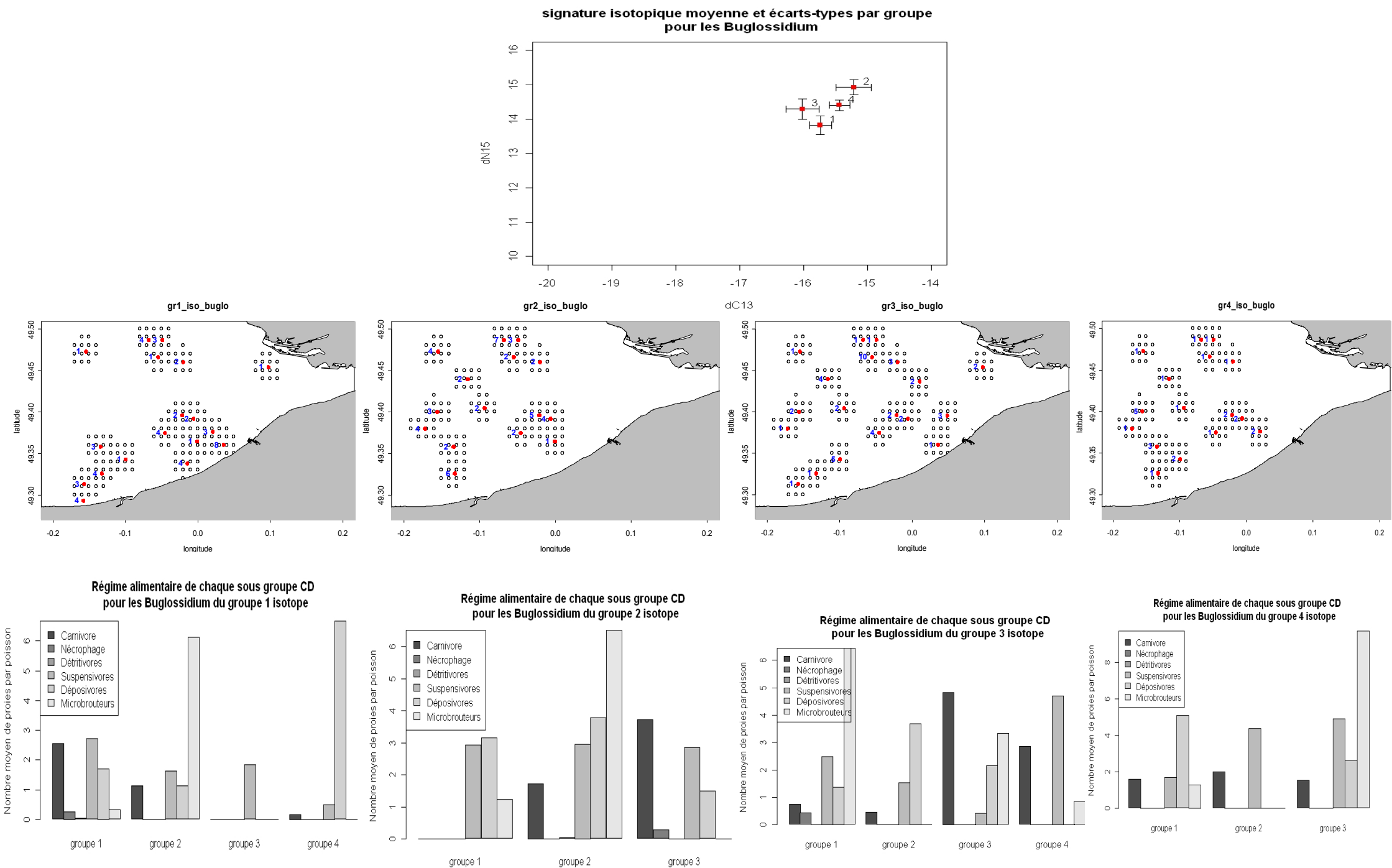


FIG III.5.1: Résumé des différences entre groupes isotopes et de leurs sous-groupes contenus digestifs respectifs pour la solenette. Les numéros en bleu sur les cartes donnent le nombre de poissons du groupe considéré à chaque station.

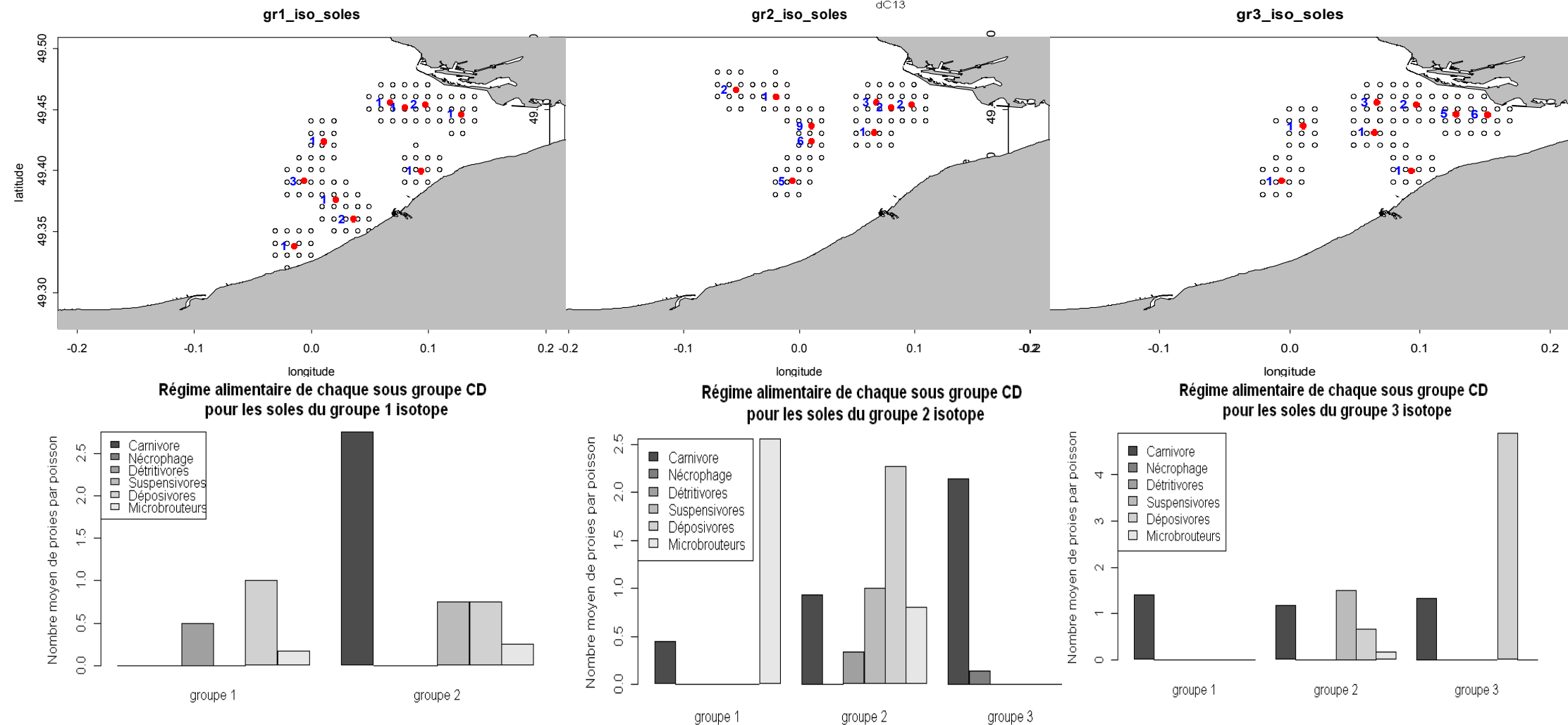
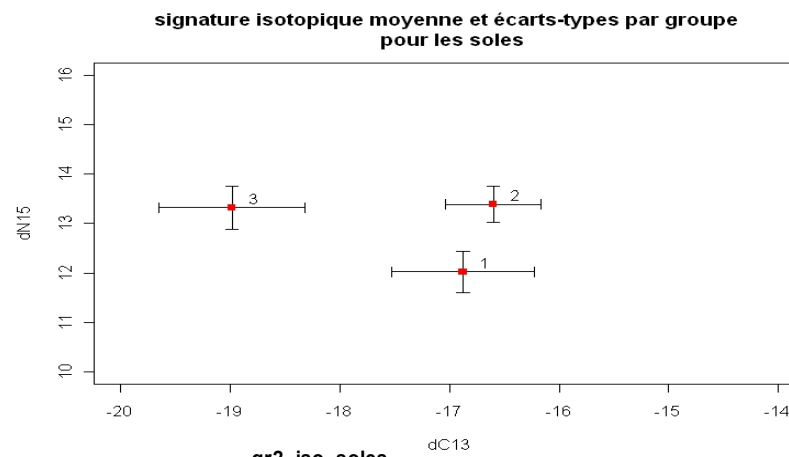
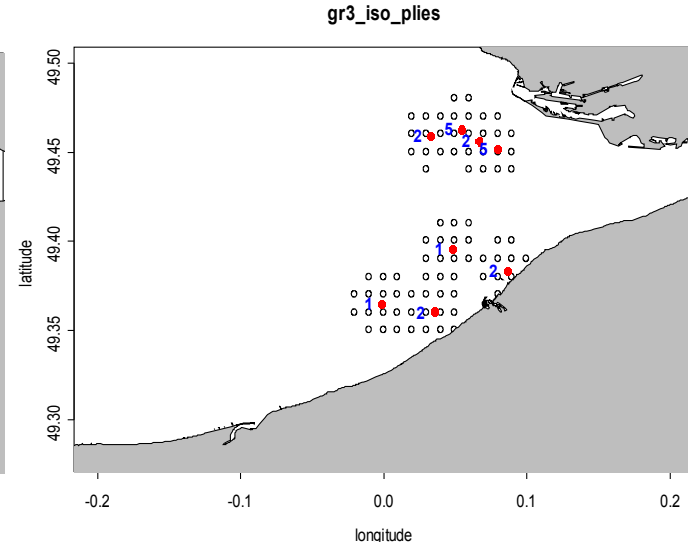
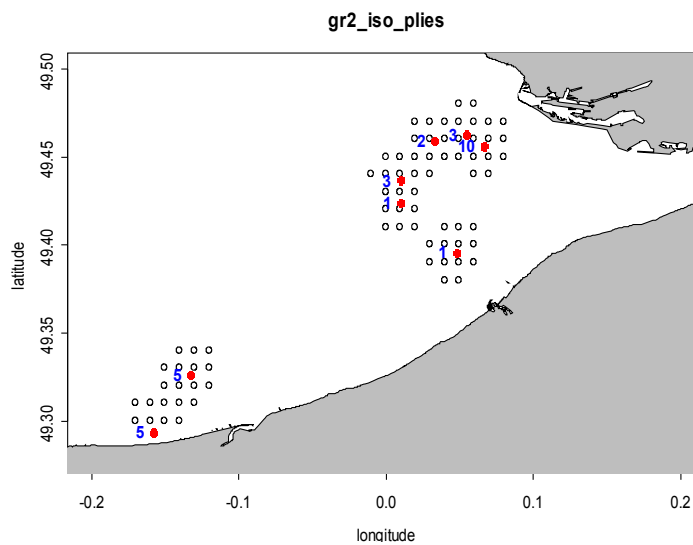
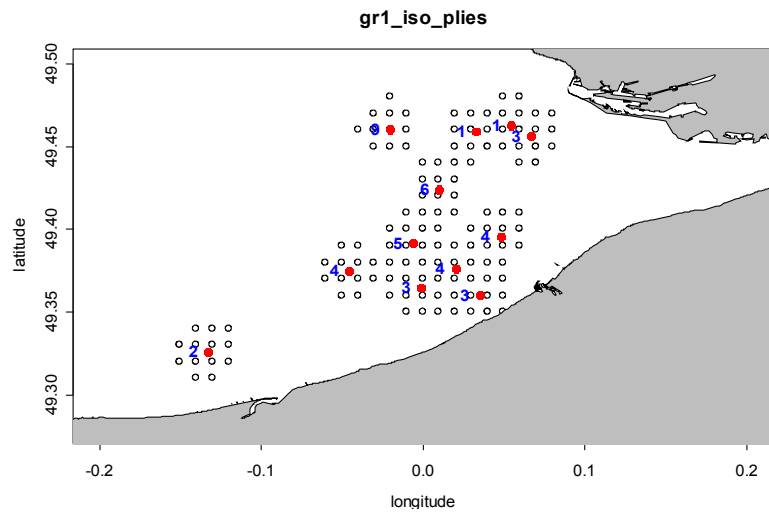
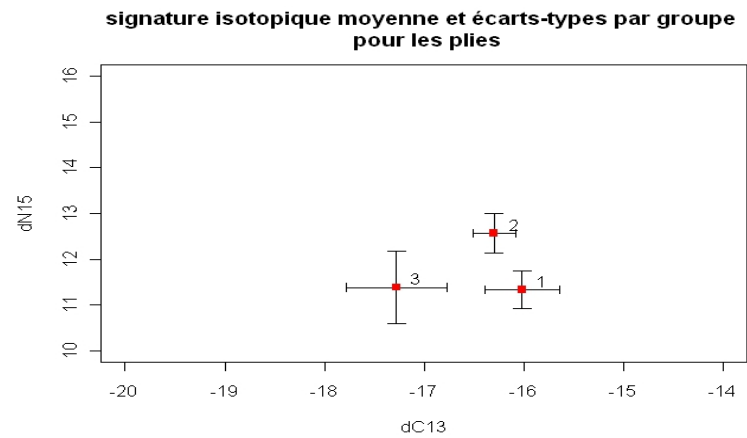


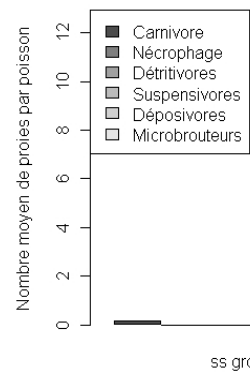
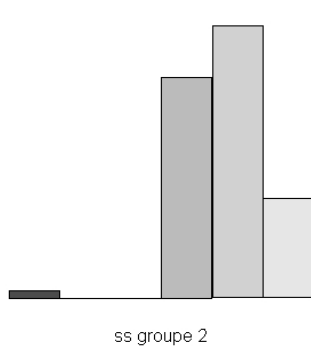
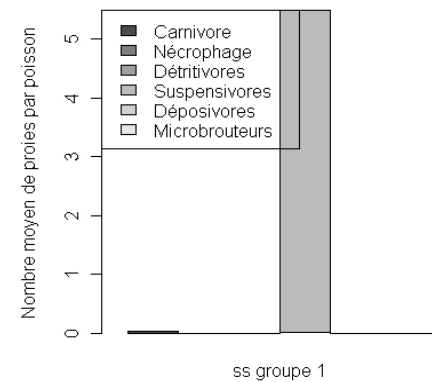
FIG III.5.2: Résumé des différences entre groupes isotopes et de leurs sous-groupes contenus digestifs respectifs pour la sole. Les numéros en bleu sur les cartes donnent le nombre de poissons du groupe considéré à chaque station.



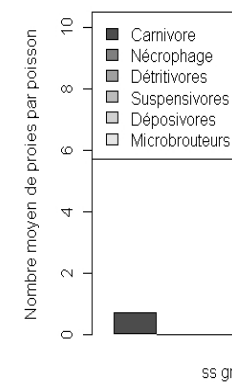
Régime alimentaire de chaque sous groupe CD pour les plies du groupe 1 isotope

Régime alimentaire de chaque sous groupe CD pour les plies du groupe 2 isotope

Régime alimentaire de chaque sous groupe CD pour les plies du groupe 3 isotope



ss groupe 2



ss groupe 2

FIG III.5.3: Résumé des différences entre groupes isotopes et de leurs sous-groupes contenus digestifs respectifs pour la plie. Les numéros en bleu sur les cartes donnent le nombre de poissons du groupe considéré à chaque station.

Pour les solenettes

Les 4 groupes isotopiques sont bien séparés en termes de signature isotopique (logique car c'est sur quoi la CAH est effectuée). Ils sont tous distincts au niveau du $\delta^{13}\text{C}$ (Tukey, $p\text{-valeur} < 5.10^{-4}$). Ils sont également tous distincts au niveau du $\delta^{15}\text{N}$, sauf pour les groupes 3 et 4 où il n'y a pas de différence significative (Tukey, $p\text{-valeur}=0,29$).

La dispersion spatiale des 4 groupes est assez forte. Chaque groupe est en effet présent sur quasiment toutes les stations où des solenettes sont pêchées.

Pour les soles

En ce qui concerne les signatures isotopiques des 3 groupes, le groupe 3 se démarque des 2 autres en terme de $\delta^{13}\text{C}$ (Wilcoxon, $p\text{-valeur}= 4,3.10^{-9}$ entre les groupes 1 et 3 et $p\text{-valeur}= 7,7.10^{-4}$ entre les groupes 2 et 3). Il n'y a pas de différence significative entre les groupes 1 et 2 (Wilcoxon, $p\text{-valeur}=0,43$). De plus, le groupe 1 se démarque des deux autres en termes de $\delta^{15}\text{N}$ (Wilcoxon, $p\text{-valeur}= 1,6.10^{-9}$ entre les groupes 1 et 2 et $p\text{-valeur}= 5,2.10^{-8}$ entre les groupes 1 et 3); tandis qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes 2 et 3 (Wilcoxon, $p\text{-valeur}=1$).

On note également des différences au niveau des zones de présence. Le groupe 1 se trouve un peu plus au Sud, le groupe 2 au large (à l'Ouest) et le groupe 3 à l'embouchure (à l'Est).

Pour les plies

Le groupe 3 se démarque au niveau du $\delta^{13}\text{C}$ (Wilcoxon, $p\text{-valeur}= 1,3.10^{-8}$ entre les groupes 2 et 3 et $p\text{-valeur}= 2.10^{-16}$ entre les groupes 1 et 3). Les groupes 1 et 2 sont également différenciés, mais moins fortement (Wilcoxon, $p\text{-valeur}=0,004$).

Le groupe 2 se démarque au niveau du $\delta^{15}\text{N}$ (Wilcoxon, $p\text{-valeur}= 2,1.10^{-7}$ entre les groupes 2 et 3 et $p\text{-valeur}= 2.10^{-16}$ entre les groupes 1 et 2). Les groupes 1 et 3, par contre, ne présentent pas de différence significative (Wilcoxon, $p\text{-valeur}=1$).

Les zones de présence des 3 groupes se ressemblent. On peut cependant noter quelques différences. La plupart des poissons du groupe 1 se trouvent au centre de la baie, le groupe 3 est plus présent au Nord et le groupe 2 est séparé entre un groupe au Nord-Est et un groupe au Sud-Ouest.

Pour ce qui est des régimes alimentaires de chacune des 3 espèces, dans chaque groupe isotope, les sous-groupes contenus digestifs sont bien différenciés. On constate, la plupart du temps, que chaque sous groupe se différencie des autres par une guildes trophique préférentielle.

Description des abondances par groupe d'isotopes et sous-groupe de contenus digestifs par espèce.

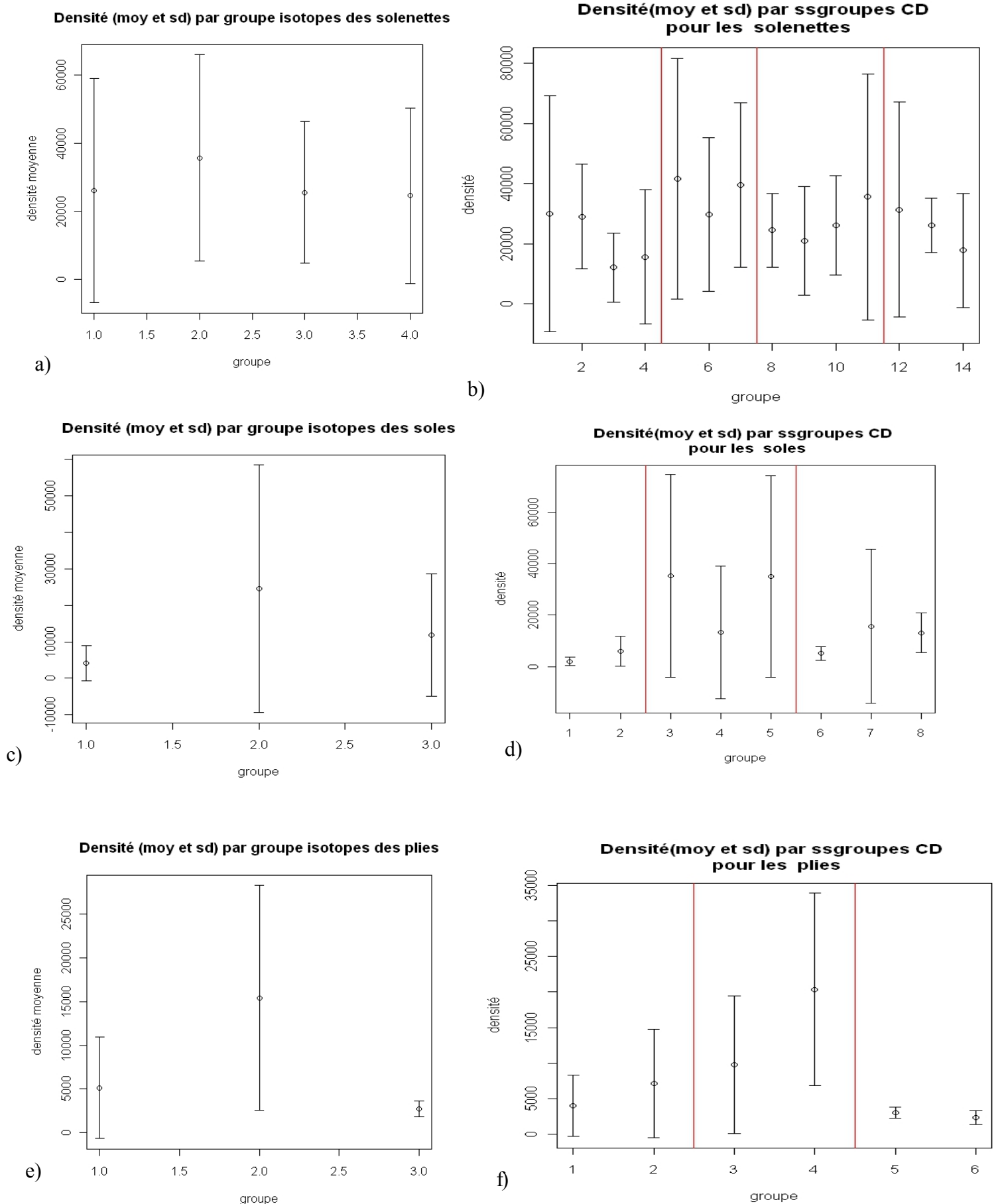


FIG III.5.2 : Différences d'abondance entre groupes et sous-groupes des solenettes (a et b), des soles (c et d) et des plies (e et f).

Les tests de Kruskal-Wallis donnent les résultats suivants:

Pour la sole, il n'y a pas de différence significative (KW, $\chi^2=4.5$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.10$) entre les groupes isotopes. On observe une différence significative ($p\text{val}=0,03$) entre les sous-groupes contenus digestifs du groupe isotopes 1. Par contre, pour les groupes isotopes 2 et 3, il n'y a pas de différence significative entre les sous-groupes ($p\text{val}=0,81$ pour le groupe 2 et $p\text{val}=0,11$ pour le groupe 3).

Pour la solenette, les moyennes des densités entre les groupes isotopes sont significativement différentes ($\chi^2=11.41$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0.01$) mais il n'y a pas de différence significative entre les sous groupes contenus digestifs et ceci pour les 4 groupes isotopes ($p\text{val}>0,16$ pour les 4 groupes).

Pour la plie, on observe une forte différence entre les 3 groupes isotopes (K-W, $\chi^2=18.51$, $df = 2$, $p\text{-value} = 9.57\text{e-}05$), des différences entre les sous groupes des groupes isotopes 1 et 2 ($p\text{val}=0,03$ pour le groupe 1 et $p\text{val}=0,01$ pour le groupe 2). Par contre, dans le groupe 3 isotope, il n'y a pas de différence de densité entre les sous-groupes ($p\text{val}=0,12$).

En reprenant ces résultats, on constate que les différences de moyenne de densité entre les groupes isotopes sont beaucoup plus nettes (pvaleurs plus faibles) que celles des sous-groupes contenus digestifs pour la plie et la solenette. Pour la sole, il semble ne pas y avoir d'effet groupes isotopes ni d'effet sous-groupes contenus digestifs (sauf pour les sous-groupes du groupe isotope 1 mais la $p\text{-valeur}=0,03$ n'est pas très significative).

IV) Conclusions et perspectives

Le couplage des 3 marqueurs (contenus digestifs, isotopes et microchimie des otolithes) par les 3 analyses statistiques (analyse multi-couche, multi-tables et hiérarchique) permet de comprendre d'avantage les liens entre ces marqueurs. Nous utilisons leurs temps d'intégration respectif pour une caractérisation spatiale des habitats potentiels des poissons dans le but de répondre à la question: « où a vécu le poisson depuis quelques mois ? » sous l'hypothèse que le poisson choisit l'habitat optimal pour répondre à ses besoins. Cette approche peut donc être un plus, voire même un complément par rapport aux données de présence/absence ou d'abondance des espèces qui, elles, ne nous donnent qu'une information instantanée sur les habitats des poissons.

I) Conclusion biologique

Analyses uni-marqueur

Les résultats des analyses individuelles de chaque marqueur (cf § III.2) indiquent qu'il existe une variabilité spatiale et inter-espèce pour chaque marqueur. Tout d'abord en ce qui concerne la variabilité spatiale, on constate qu'il existe une répartition linéaire pour les isotopes, le $\delta^{13}\text{C}$ présente un net gradient embouchure/large tandis que le $\delta^{15}\text{N}$ présente

, moins clairement, un gradient Nord/Sud (surtout pour la sole, Fig III.2.a.4). La microchimie des otolithes et les contenus digestifs ne présentent pas de gradient spatial linéaire (sauf pour le rapport Sr88/Ca43, Fig III.2.b.2), cependant on constate quand même, pour chaque marqueur, des différences entre les stations sous formes de patches (structures spatiales non linéaires). Ainsi l'utilisation des 3 marqueurs est pertinente pour la caractérisation géographique des habitats de chaque espèce.

Ensuite, lorsqu'on regarde la différence inter-espèce, on peut constater que pour chaque marqueur, des différences existent entre les espèces. Ceci est très net pour les isotopes et plus particulièrement pour le d15N (Fig III.2.a.2). En effet on remarque que les solenettes ont un enrichissement en d15N plus important que les deux autres espèces, la séparation entre plies et soles est moins évidente même si on constate que l'enrichissement en d15N est plus fort pour la sole. Cette différence entre les espèces est également bien visible pour la plupart des éléments chimiques des otolithes (Fig III.2.b.1) lorsqu'on compare les soles et les plies. Enfin la différence dans le régime alimentaire des 3 espèces est moins évidente étant donné que les proies sont réparties en guildes trophiques (Fig III.2.c.1). La différenciation des espèces de poissons, d'après les proies ingérées classées en taxons, est présentée dans le mémoire d'Armonie Tous Rius [TOUS_RIUS]

Les analyses des groupements par espèce et par marqueur nous permettent de mettre en évidence les liens entre les variables morphologiques et les coordonnées (longitude et latitude) moyennes de chaque groupe d'individus. On constate ainsi que les groupes qui sont formés de poissons de petites tailles sont la plupart du temps au niveau de l'embouchure de l'estuaire, tandis que les plus gros sont au large. Ceci est logique d'un point de vue biologique car les poissons de petites tailles préfèrent les habitats près des estuaires qui sont peu profonds et très riches en apports terrigènes* (e.g. signature du dC13). Ces conditions leur procurent nourriture et protection contre les grands prédateurs. En grandissant, ils migrent plutôt vers le large. En analysant les différences de signatures isotopiques et répartition géographique entre les groupes créés à partir des isotopes, on constate là encore des gradients spatiaux pour chaque isotope (surtout pour la sole Fig III.2.a.12).

Analyse des cartes d'habitat potentiel obtenues par l'approche Multi-couches

Les cartes d'habitat potentiel pour chaque espèce, ont été créées à partir des groupements réalisés sur les 3 marqueurs et reprennent ainsi leurs temps d'intégration respectifs. Ces cartes permettent ainsi de répondre, en quelque sorte à la question « où le poisson a vécu depuis quelques mois? ».

La carte pour les solenettes (Fig III.3.a.1) nous montre tout d'abord que cette espèce vit beaucoup plus au large que les 2 autres espèces (longitude négative); sa zone de vie n'est donc pas la même que pour les soles ou les plies. Par contre, ces deux espèces (soles et plies) cohabitent dans la même zone géographique de latitude [49.38° N ; 49.48° N] et de longitude [0° E ; 0,08°E], les soles étant un peu plus proche de l'embouchure que les plies.

En comparant ces cartes aux cartes d'abondances (nombre en bleu sur les cartes) ou aux cartes de présence/absence, on remarque que le coefficient de présence autour d'une station n'est pas vraiment lié à l'abondance observée à cette station. En effet, les corrélations entre ces deux variables pour chaque espèce, avec les tests de significativité

associés sont les suivants:

solenettes : cor=0,484 t=3,36 df=37 p-valeur=0,002

plies : cor=0,289 t=1,59 df=28 p-valeur= 0,122

soles : cor=0,265 t=1,45 df=28 p-valeur=0,158

On peut donc penser que cette approche devrait permettre d'apporter une information complémentaire à celle issue des cartes d'abondances.

Analyse des résultats de l'approche hiérarchique et lien avec le Multi-couches

Les résultats de l'approche hiérarchique nous indiquent que les groupes de poissons, de la même espèce (plie ou solenette), ayant des signatures isotopiques différentes, n'auront pas les mêmes densités alors que pour des groupes ayant les mêmes signatures isotopiques mais pas les mêmes régimes alimentaires, les densités sont les mêmes. Ce résultat confirme dans un sens les résultats multi-couches et la hiérarchie du temps d'intégration des marqueurs. En effet, les isotopes intègrent les signatures des proies consommées sur une échelle temporelle de près de 2 mois et c'est donc à ce niveau que les abondances se distinguent géographiquement (ie groupes d'individus). Il y a donc une sélection géographique d'une zone avec des conditions environnementales et des proies préférentielles. Ce dernier point reste cependant à valider par des analyses avec variables environnementales (voir perspectives). A l'intérieur de ces zones définies par les signatures isotopiques, le marqueur des contenus digestifs indique une seconde sélection « ponctuelle » sur différents groupes de proies. Une similarité en terme d'abondance à ce niveau peut suggérer qu'il n'y a pas de compétition pour la nourriture à cette échelle spatiale (c.à.d. suffisamment de proies et de variétés différentes pour l'ensemble des individus).

2) Conclusion méthodologique

Chaque approche statistique (multi-couches, multi-tables et hiérarchique) permet d'apporter des informations différentes. Ainsi, il ne faut pas les voir comme des méthodes concurrentes mais plutôt comme des méthodes complémentaires.

Appréciation de l'approche multi-couches

Cette approche qui n'utilise, au final, que l'analyse de groupements comme outil statistique, présente l'avantage d'utiliser toute l'information de chaque tableau. Elle permet surtout de créer les cartes d'habitats potentiels pour chaque espèce. Elle met au même niveau chaque marqueur, c'est à dire qu'on ne privilégie pas l'information d'un marqueur par rapport à un autre. Ceci peut être vu comme un avantage mais également comme un inconvénient dans le sens où on aimerait peut être privilégier le marqueur qui fait ressortir le plus de variabilité spatiale ou celui qui prend en compte une échelle de temps plus important (otolithes). Cette méthode est robuste à un changement au seuil de coupure (sur le dendrogramme de la CAH) et à la distance limite (dlim) (§ III.3.b). Les corrélations entre le nombre de poissons analysés et le coefficient de présence par station sont, pour chaque espèce significative (corrélations de 0,466 pour la solenette, 0,628 pour la sole et 0,581 pour la plie). Les coefficients de présence qu'on attribue à chaque cellule autour d'une station dépendent donc, en partie, du nombre de poissons analysés par station. Pour remédier à cette corrélation qui peut être un problème, il faudrait envisager d'analyser,

quand c'est possible, le même nombre de poissons par station ou alors d'utiliser le même nombre de poissons à chaque station pour effectuer les analyses. On pourrait également normaliser le coefficient des cellules autour d'une station par le nombre de poisson à cette station. De cette manière, on peut espérer qu'aucune station ne verrait son coefficient « artificiellement » augmenté (voir § perspectives).

En ce qui concerne les désavantages de cette méthode, on note qu'elle a l'inconvénient de ne pas prendre en compte les éventuelles corrélations (i.e. relations écologiques) qu'il peut exister entre les 3 marqueurs.

Appréciation de l'approche multi-tables

Les deux méthodes présentées ici, MCOA et STATIS, ont un même objectif : la recherche de la partie commune aux analyses par marqueur séparé. L'avantage de ces approches est qu'elles permettent d'analyser les liens/corrélations qu'il peut y avoir entre les 3 marqueurs et de faire une analyse globale des données.

L'inconvénient de cette méthode est que l'on peut perdre de l'information (en terme d'inertie). En effet toute l'information de chaque tableau ne peut pas être prise en compte lors de l'analyse (sélection des deux premiers axes principaux). De plus, on ne prend pas en compte le facteur d'échelle temporelle relatif à l'information donnée par les différents marqueurs. Chaque marqueur est au même niveau dans l'analyse alors que dans certains cas il serait préférable que cette information de hiérarchie spatio-temporelle soit prise en compte.

Les résultats des 2 méthodes sur les données des plies semblent correspondre. Tout d'abord en ce qui concerne les groupes créés à partir des coordonnées des individus dans chaque analyse, en comparant les différences des groupes MCOA avec celles des groupes créés suite à la méthode STATIS, on peut constater que le groupe 2 de la MCOA et le groupe 3 de STATIS ont une concentration moyenne en d15N plus forte que les autres groupes (niveau trophique plus élevé) et qu'ils mangent plus de carnivores et de microbrouteurs que les autres groupes. Le groupe 1 de la MCOA semble correspondre, au niveau de ces 2 marqueurs (isotopes et contenus digestifs), au groupe 1 de STATIS. Ce groupe se trouve au milieu des autres groupes au niveau trophique (d15N) et se nourrit essentiellement de dépositivores. Enfin le groupe 3 de la MCOA correspond à peu près aux groupes 2 et 4 (réunis) de STATIS. La moyenne en d15N de ce groupe est la moins élevée (niveau trophique le plus faible) et il semble se nourrir principalement de suspensivores. Cependant, les représentations spatiales de chaque groupe issus des 2 analyses nous montrent que les groupes formés par STATIS et par MCOA ne sont pas les mêmes.

Par contre, toujours pour montrer les ressemblances des 2 analyses dans les résultats des plies, un poids plus fort est donné au tableau des isotopes dans les 2 analyses (Table III.4.a.2 et Table III.4.b.1). On le voit avec STATIS en regardant le poids du tableau des isotopes (0,602) très proche de celui des contenus digestifs (0,597) mais assez loin de celui des otolithes (0,530). Ces résultats découlent directement des RV entre les tableaux (Table III.4.a.1) étant donné que le poids de chaque tableau dans l'analyse STATIS est calculé à partir de la matrice des RV. Dans l'analyse MCOA, on constate la même chose, les cov^2 (1ère et 2e dimension) sont également plus forts pour le tableau des isotopes, vient ensuite celui des contenus digestifs, tandis que les cov^2 du tableau des otolithes sont beaucoup

plus faibles. On peut donc penser qu'il existe un lien entre les cov^2 dans l'analyse MCOA et les RV entre chaque tableau. Cependant ce raisonnement n'est pas vrai pour la sole. En effet, le tableau des isotopes a des RV plus faibles que les autres tableaux et donc un poids moins fort que les 2 autres tableaux dans l'analyse STATIS. Par contre, c'est celui qui est le plus utilisé dans la structure commune de la MCOA. Le cov^2 n'est donc pas lié au RV et il semblerait que l'analyse MCOA privilégie les tableaux ayant le moins de variables tandis que STATIS donne plus de poids à un tableau proche du compromis.

Quelle que soit l'analyse utilisée (STATIS ou MCOA), le cercle des corrélations (FIG III.4.a.1 et FIG III.4.b.1) et les coordonnées des individus (FIG III.4.a.2 et FIG III.4.b.2) sont sensiblement les mêmes, à une symétrie axiale près (dimension 1). On peut, grâce au cercle de corrélation voir l'importance des liens entre chaque variable et les 2 dimensions des analyses pour savoir quelles variables (des 3 tableaux) sont les plus proches dans le plan de l'analyse. Ainsi, on constate que « carnivores » et « microbrouleurs » sont liés de la même manière à la structure commune mais que « carnivores » a des corrélations moins fortes. On constate surtout que le $d15N$ et le $d13C$ définissent à eux seuls le plan ($d15N$ pour la dimension 1 et $d13C$ pour la dimension 2). Ce qui est logique car, dans notre cas, comme il n'y a que 2 variables dans le tableau des isotopes et que l'on prend 2 dimensions dans chaque analyse, on garde l'ensemble de l'inertie du tableau des isotopes. Il faudrait donc, peut être, dans le tableau des otolithes et celui des contenus digestifs, réduire le nombre de variables par tableau en ne prenant que celles qui sont le plus corrélées aux deux premières dimensions et n'en choisir qu'une seule lorsque deux variables sont corrélées de la même manière. On pourrait enlever par exemple, dans le tableau des contenus digestifs les détritivores, les nécrophages qui ont des corrélations quasi nulles et les carnivores qui sont corrélés de la même manière que les microbrouleurs mais avec des corrélations moins fortes. Dans le tableau des otolithes, on pourrait supprimer les variables « $Mg25$ » (proche du $Na23$ mais moins discriminant dans la variabilité inter-espèce), le $Ca43$ (corrélé de la même manière que $Mn55$ mais moins fortement), le « $K39$ » (corrélé de la même manière que $Ba135$ mais moins fortement).

Appréciation de l'approche hiérarchique

Cette approche nous permet de voir s'il existe des différences de densité entre les groupes formés par CAH sur les isotopes, ainsi qu'entre les groupes formés par CAH sur les contenus digestifs à l'intérieur d'un groupe isotope.

L'approche hiérarchique est quelque peu limitée du fait qu'on ne possède pas de variable réponse pertinentes à l'échelle du poisson (la densité est donnée pour une station). De plus, le faible effectif de poissons par sous-groupe contenus digestifs (5 ou 6 individus parfois) diminue la puissance des tests statistiques.

Complémentarité des 3 approches

De plus, l'analyse des 3 approches suggère qu'elles sont complémentaires. En effet, tandis que l'approche multi-couches nous permet surtout de créer les cartes d'habitats potentiels, l'analyse multi-tableaux nous aide à mieux comprendre les liens entre les variables des différents tableaux et enfin l'approche hiérarchique nous permet de tester l'effet, sur la densité, des groupes de poissons différenciés en terme de signatures isotopiques ou de contenus digestifs.

3) Perspectives

Relations environnementales.

Les résultats obtenus durant cette étude, en particulier les cartes d'habitat potentiel, pourront être mis en relation avec les données environnementales obtenues pendant la campagne Colmatage 2008 sur la baie de Seine (salinité, bathymétrie, température, sédiments, etc.). Une comparaison entre les cartes d'abondances, les cartes d'habitats potentiels, les résultats du stage d'Armonie Tous Rius [TOUS_RIUS] et les cartes des proies benthiques* est aussi envisageable.

Variabilité de la croissance.

On pourrait également comparer les cartes d'habitats potentiels, pour les juvéniles de plies et soles, aux données de croissance pour savoir, par exemple, si les zones avec un coefficient de présence fort coïncident avec les zones où la croissance des poissons est la plus forte.

Groupement des proies des contenus digestifs.

Pour ce qui est de la méthode, certains choix pourraient être modifiés. Tout d'abord en ce qui concerne le groupement des proies, le choix de les grouper par guildes trophiques vient du fait que la nourriture de la proie a un effet sur la concentration en $\delta^{15}\text{N}$ de la proie et ainsi a un effet sur la concentration en $\delta^{15}\text{N}$ du poisson. Il est donc assez pertinent de grouper les proies en fonction de ce qu'elles mangent, cependant d'autres groupements pourraient être envisagés (taxinomie, position par rapport au sédiment, etc ...).

Recommandations

Pour ce qui est de l'analyse multi-couches, nous avons montré que la méthode était relativement robuste à la distance utilisée comme aire d'influence autour d'une station et au seuil de coupure pour former les groupes d'individus.

On a également remarqué qu'il existait une corrélation entre le nombre de poissons analysés par station et le coefficient de présence, il serait donc intéressant de tester la robustesse de cette méthode en faisant varier le nombre de poissons analysés par station.

Pour l'approche multi-tables, d'autres analyses de couplage de tableaux pourraient être envisagées (lorsqu'on a uniquement 2 marqueurs: analyse des corrélations canoniques ACC, analyse des redondances RDA; lorsqu'on a 3 marqueurs: analyse factorielle multiple (AFMULT), analyse procrustéenne).

Bibliographie

bilan_Durieux: Eric Durieux, "Organisation spatiale et fonctionnelle de la mosaïque d'habitats pour les poissons benthodémersaux de l'estuaire de Seine", 2010

Calinski & Harabasz: T. Calinski and J. Harabasz, A dendrite method for clusteranalysis, Communications in Statistics - Theory and Methods3, 1974

Campana SE, Thorrold SR,2001: Campana SE, Thorrold SR, Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations?, 2001

Ch,Lavit: Ch,Lavit, Analyse conjointe de tableaux quantitatifs., 1988

Chessel & Hanafi: Chessel, D. and Hanafi, M., Analyses de la co-inertie de K nuages de points, Revue de Statistique Appliquée, 1996

Chessel et al.: Chessel, D., Thioulouse, J. & Hanafi, M., "STATIS et valeurs typologiques desgroupes faunistiques. Documentation de la programmathèque ADE-4 "Analysesmultivariées et expression graphique des données environnementales", 1997

Ciancio et al, 2008: Ciancio JE, Pascual MA, Botto F, Amaya-Santi M, O'Neal S, Riva Rossi C, Iribarne O , Stable isotope profiles of partially migratory salmonid populations in Atlantic rivers of Patagonia, 2008

De Niro and Epstein, 1981: De Niro and Epstein, Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals, 1981

Durieux et al. 2010: Durieux E, Bégout M-L, Pinet P, Sasal P, Digenean metacercariae parasites as natural tags of habitat use by 0-group common sole *Solea solea* in nearshore coastal areas: a case study in the embayed system of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France)., 2010

Elsdon et al. 2008: Elsdon TS, Wells BK, Campana SE, Gillanders BM, Jones CM, Limburg KE, Secor DH, ThorroldSR, Walther BD, Otolith chemistry to describe movements and life-history parameters of fishes: hypotheses, assumptions, limitations and inferences. Oceanography and Marine Biology, 2008

Hartigan: John A. Hartigan, Clustering algorithms, 1975

Harvey et al., 2000: James T. Harvey Thomas R. Loughlin Michael A. Perez Dion S. Oxman, Relationship between Fish Size and Otolith Length for 63 Species of Fishes from the Eastern North Pacific Ocean, 2000

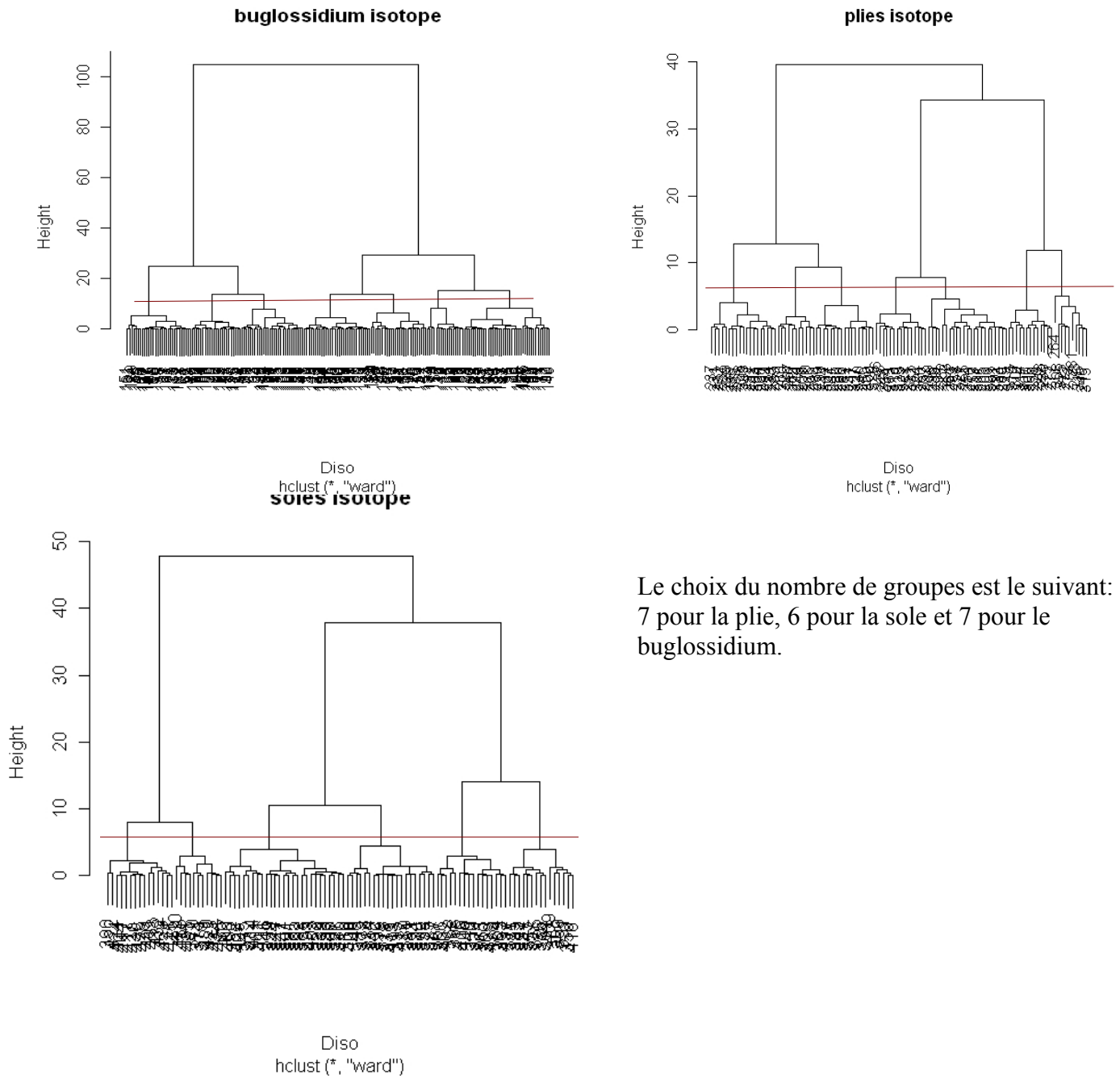
Heo et Gabriel 1997: Heo M. & Gabriel K.R, Communications in statistics. Simulation and computation, 1997

Hesslein et al., 1993: Hesslein R.H., Hallard K.A. & Ramlal P, Replacement of sulfur, carbon and nitrogen in tissue of growing Broad whitefish (*Coregonus nasus*) in response to a change in diet traced by $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993

Larousse: , dictionnaire en ligne Larousse,

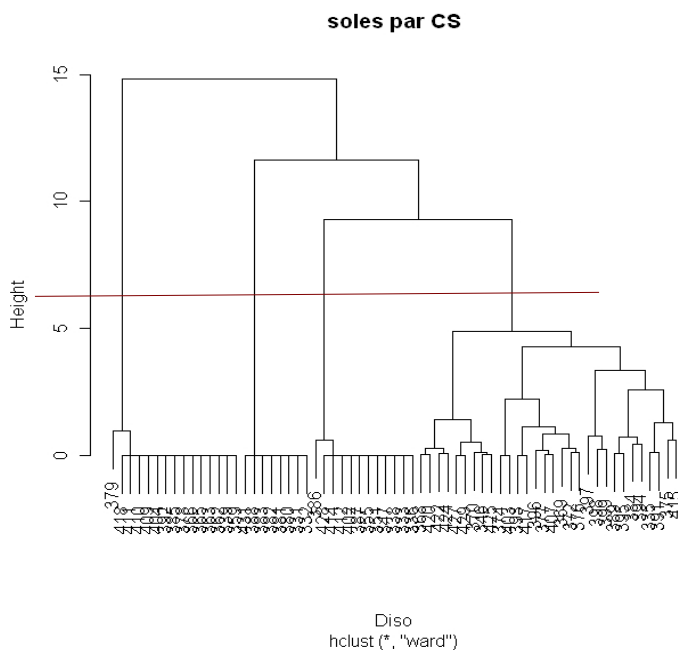
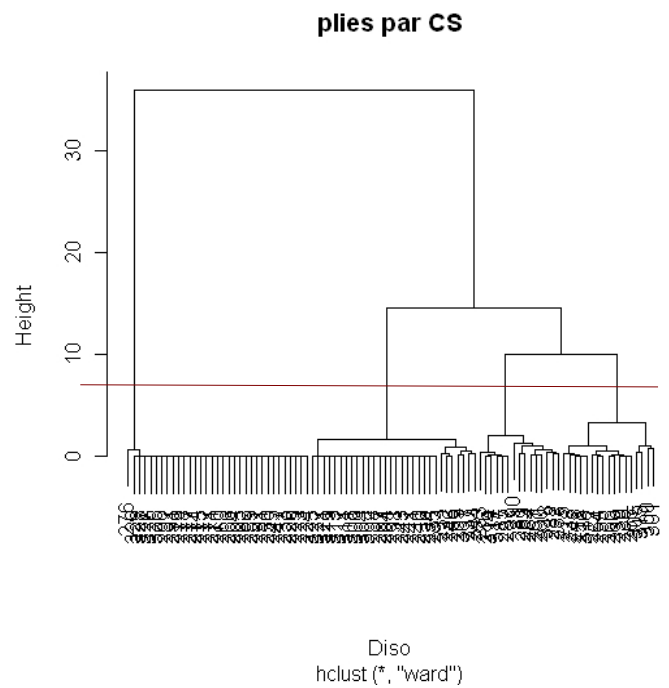
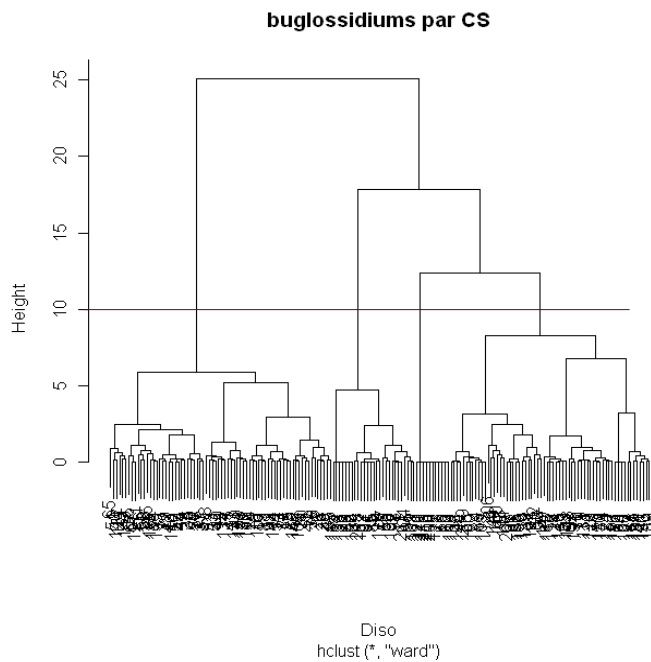
- Lebart et al: L.Lebart A.Morineau M.Piron, Statistiques exploratoire multidimensionnelle, 1997
- Legendre & Gallagher 2001: Legendre & Gallagher, Ecologically meaningful transformations for ordination of species data, 2001
- Legendre& Legendre 1998: Pierre Legendre & Louis Legendre, Numérical Ecology second English Edition, 1998
- Maruyama et al., 2001: Maruyama A., Yamada Y., Rusuwa B. & Yuma M, Change in stable nitrogen isotope ratio in the muscle tissue of a migratory goby, *Rhinogobius* sp., in a natural setting. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001
- Minagawa et Wada, 1984: MINAGAWA M, WADA E, STEPWISE ENRICHMENT OF N-15 ALONG FOOD-CHAINS - FURTHER EVIDENCE AND THE RELATION BETWEEN DELTA-N-15 AND ANIMAL AGE, 1984
- P. Bady et al: Pierre Bady , Sylvain Dolédec, Bernard Dumont, Jean-François Fruget, Multiple co-inertia analysis: a tool for assessing synchrony in the temporal variability of aquatic communities, 2003
- Panfili et al., 2002: Panfili, J., Pontual, H. (de)., Troadec, H. & Wright, P.J., (Eds.) , Manuel de scérochronologie des poissons. Coédition Ifremer, 2002
- Radtke et al., 1998: R.L. Radtke, J.B. Dempson, J. Ruzicka, R.L. Radtke, J.B. Dempson, J. Ruzicka, Microprobe analyses of anadromous Arctic charr, *Salvelinus alpinus*, otoliths to infer life history migration events, 1998
- Seine-Aval1: Loïc Guézennec, LA.Romana,R.Goujon, R.Meyer, Seine-Aval tome 1 : un estuaire et ses problèmes , 1999
- Seine-Aval13: Alain Abarnou, Programme Seine Aval: tome 13- Les contaminants organiques , 2000
- Seine-Aval14: Thierry Burgeot; , Programme Seine Aval: tome 14- Des organisme sous stress, 1999
- Seine-Ava l3: coordinateur :patrick Lesueur, Programme Seine Aval: tome 3- Sables, chenaux, vasières,
- TOUS_RIUS: TOUS RIUS Armonie, "La répartition des ressources alimentaires entre lesjuvéniles de poissons plats (Pleuronectiformes) de l'estuaire de Seine :Etude par analyse des contenus stomacaux", 2010
- Vander Zanden et Rasmussen, 2001: Vander Zanden et Rasmussen, Variation in delta N-15 and delta C-13 trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies, 2001

Annexes



Le choix du nombre de groupes est le suivant:
7 pour la plie, 6 pour la sole et 7 pour le
buglossidium.

FIG.1: Dendrogramme par la méthode de Ward à partir des données isotopiques.



Le choix du nombre de groupes est le suivant:
4 pour chaque espèce.

FIG.2: Dendrogramme par la méthode de Ward à partir des données de contenus digestifs.

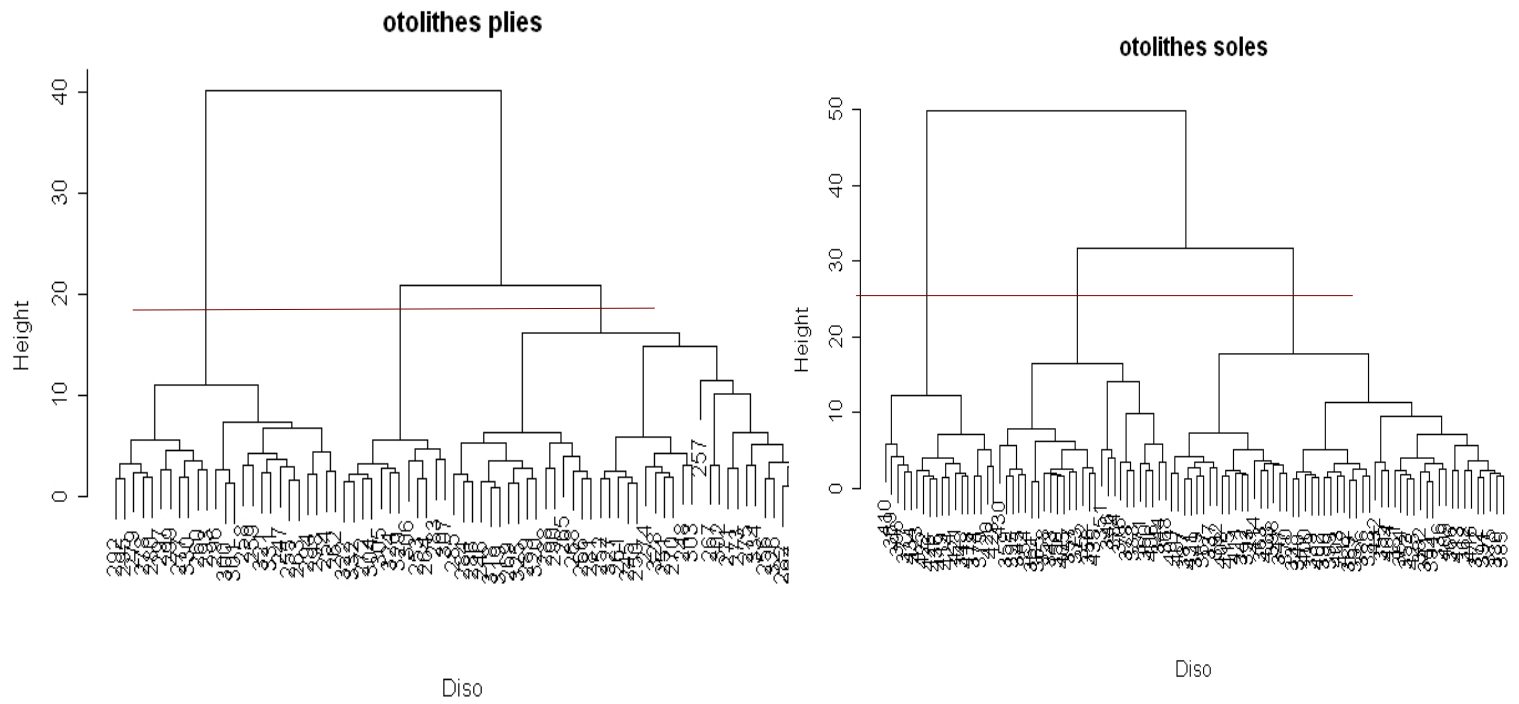


FIG.3: Dendrogramme par la méthode de Ward à partir des données des otolithes.

On a choisi 3 groupes pour les deux espèces.

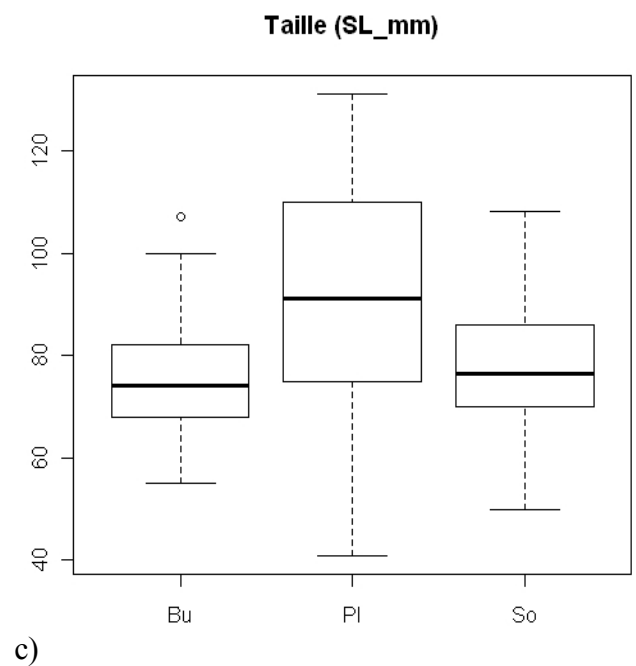
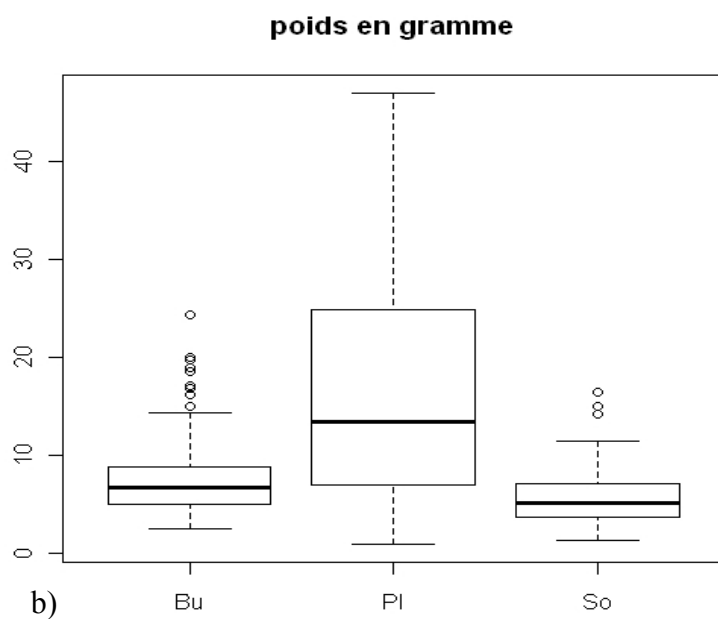
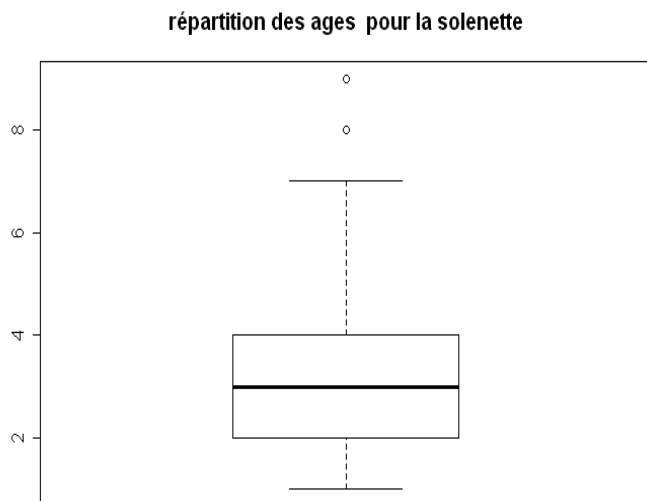
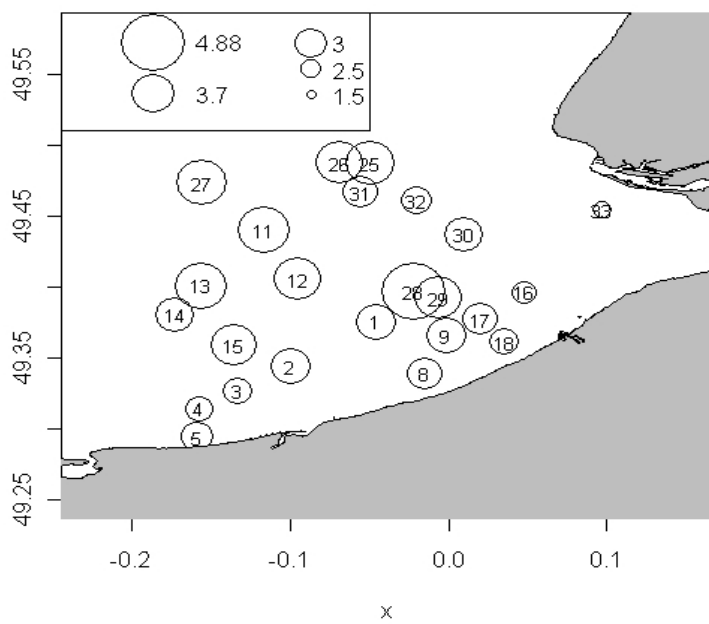
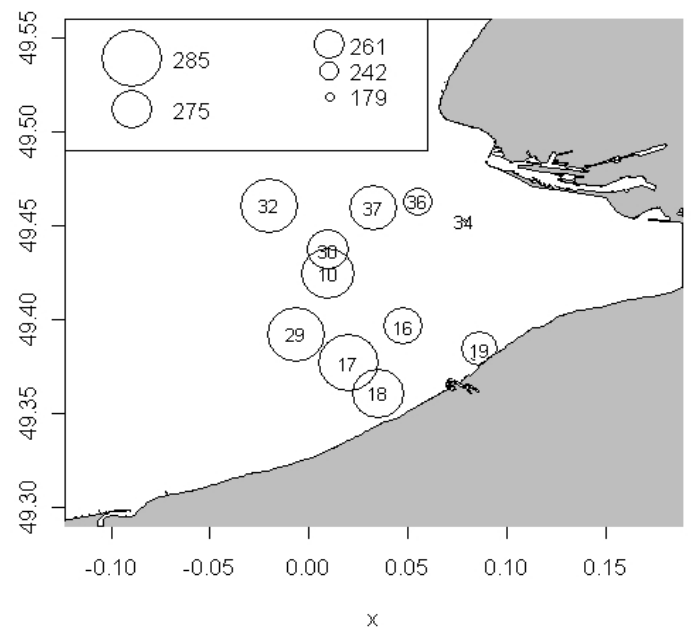


FIG.4: Répartition des caractéristiques physiques (a:age,b: poids, c:taille) par espèce.

Moyenne des ages en année par station pour le Buglossidium



Moyenne des ages en jours par station pour la plie



Moyenne des ages en jours par station pour la sole

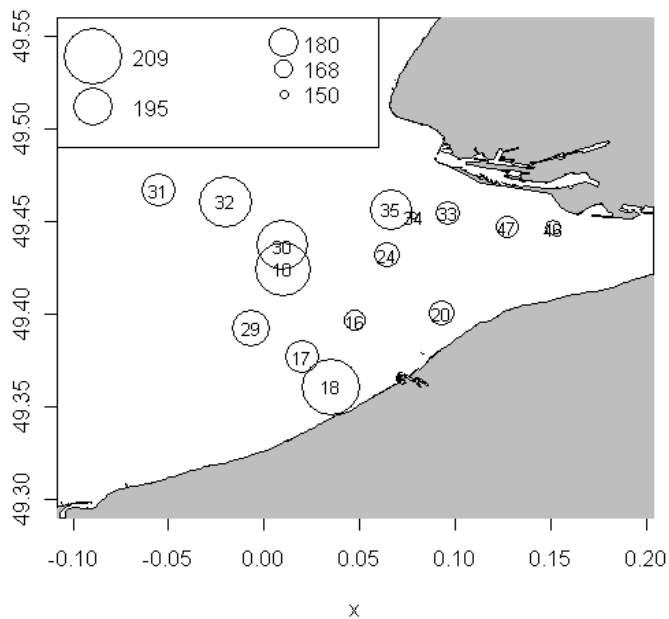
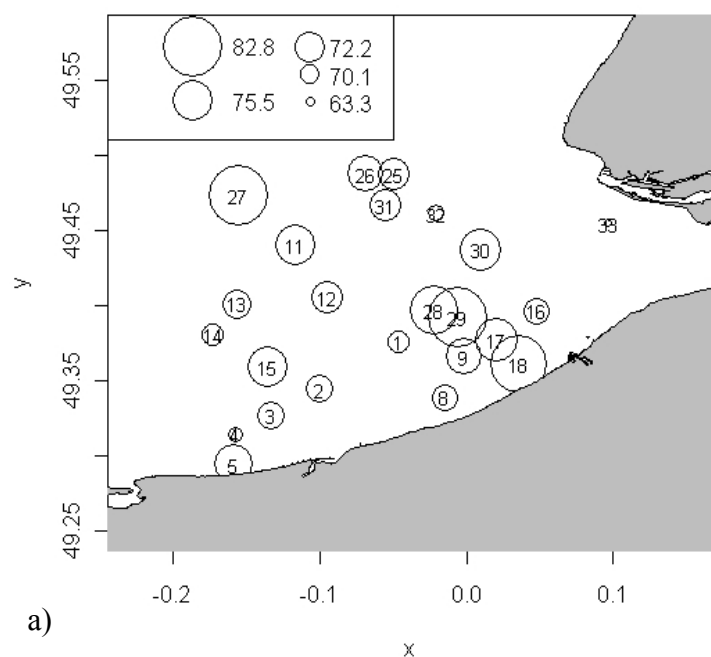
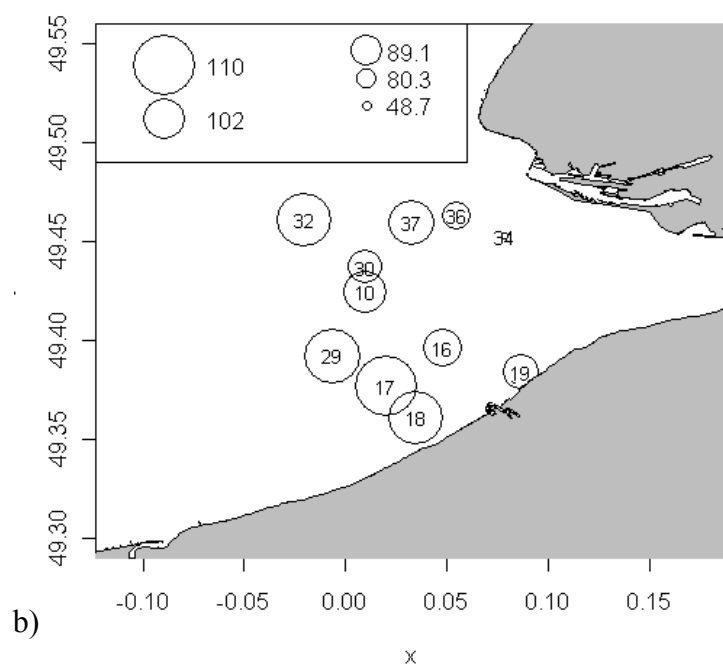


FIG.5: Répartition spatiale des âges par espèce (a: solenette, b: plie c: sole), les numéros des stations sont inscrits dans les cercles.

Moyenne des Tailles (SL_mm) par station pour le Buglossidium



Moyenne des Tailles par station pour la plie



Moyenne des Tailles (SL_mm) par station pour la sole

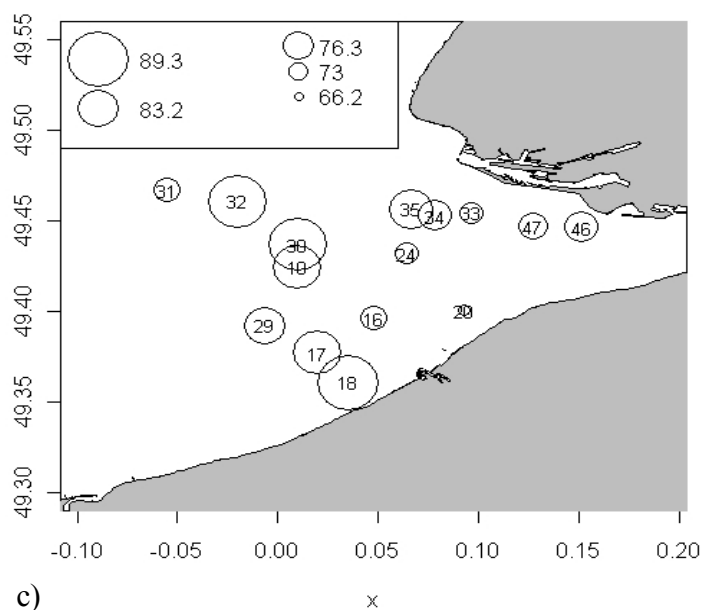


FIG.6: Répartition spatiale des tailles par espèce (a: solenette, b: plie c: sole). Les numéros des stations sont inscrits dans les cercles.

Table 1: Répartition des nombres de proies consommées pour chaque espèce pour l'ensemble des poissons analysés.

Proie	Somme des proies consommées par la sole	Somme des proies consommées par la plie	Somme des proies consommées par Buglossidium	Guilde trophique
<i>Caprellidae.sp</i>	0	0	70	Carnivore
<i>Glycera.spp</i>	3	1	4	Carnivore
<i>Marphysa.belii</i>	0	0	2	Carnivore
<i>Anoplodactylus.petiolatus</i>	0	0	2	Carnivore
<i>Crangonidae.spp</i>	1	0	156	Carnivore
<i>Nephtys.homborgii</i>	7	2	2	Carnivore
<i>Carcinus.maenas</i>	0	0	5	Carnivore
<i>Crangon.crangon</i>	36	0	14	Carnivore
<i>Nemertes.spp</i>	0	6	1	Carnivore
<i>Nephtys.spp</i>	7	1	12	Carnivore
<i>Ebalia.tumefacta</i>	0	0	1	Carnivore
<i>Nereidae.spp</i>	7	0	4	Carnivore
<i>Gammaridae.sp</i>	9	2	2	Carnivore
<i>Orchomene.nana</i>	5	0	14	Carnivore
<i>Euspira.pulchella</i>	0	0	12	Carnivore
<i>Hydraire</i>	1	1	3	Carnivore
<i>Idotea.spp</i>	1	0	1	Carnivore
<i>Philocheras.bispinosus</i>	2	1	49	Carnivore
<i>Phtysica.marina</i>	2	17	5	Carnivore
<i>Nassarius.reticulatus</i>	0	0	14	Nécrophage
<i>Nassarius.spp</i>	1	0	5	Nécrophage
<i>Perioculodes.longimanus</i>	1	0	1	Détritivores
<i>Monoculodes.spp</i>	7	0	1	Détritivores
<i>Ampelisca.spinipes</i>	10	0	16	Suspensivores
<i>Ischyroceridae.spp</i>	1	0	0	Suspensivores
<i>Siphon.de.bivalve</i>	0	10	0	Suspensivores
<i>Macoma.balthica</i>	0	1	3	Suspensivores
<i>Ampelisca.brevicornis</i>	8	1	167	Suspensivores
<i>Stenelais.boa</i>	0	0	23	Suspensivores
<i>Ensis.spp</i>	0	43	0	Suspensivores
<i>Ampelisca.tenuicornis</i>	0	0	92	Suspensivores
<i>larve</i>	0	0	6	Suspensivores
<i>Cardium.echinatum</i>	0	0	4	Suspensivores
<i>Phaxas.pellucidus</i>	1	200	48	Suspensivores
<i>Cerastoderma.edule</i>	0	0	1	Suspensivores
<i>Cumacés.spp</i>	0	2	59	Suspensivores
<i>Spisula.subtruncata</i>	0	0	4	Suspensivores
<i>Nucula.nitidosa</i>	0	0	1	Suspensivores
<i>Nucula.nucleus</i>	0	1	0	Suspensivores
<i>Megaluropus.agilis</i>	1	0	76	Suspensivores
<i>Thracia.sp</i>	0	1	3	Suspensivores

<i>Mysella.bidentata</i>	0	0	1	Suspensivores
<i>Abra.alba</i>	14	45	108	Déposivores
<i>Melita.palmata</i>	0	0	3	Déposivores
<i>Bathyporeia.sp</i>	0	0	29	Déposivores
<i>Lanice.conchilega</i>	0	1	0	Déposivores
<i>Ampharete.balthica</i>	1	0	0	Déposivores
<i>Leucothoe.incisa</i>	0	0	32	Déposivores
<i>Magelona.mirabilis</i>	0	1	0	Déposivores
<i>Bodotria.spp</i>	0	1	16	Déposivores
<i>Eunereis.longissima</i>	8	0	1	Déposivores
<i>Pontocrates.altamarinus</i>	0	1	1	Déposivores
<i>Owenia.fusiformis</i>	15	250	36	Déposivores
<i>Gastrosaccus.spinifer</i>	2	0	131	Déposivores
<i>Pectinaria.koreni</i>	23	31	10	Déposivores
<i>Corophium.volutator</i>	5	0	1	Déposivores
<i>Urothoe.elegans</i>	0	0	18	Déposivores
<i>Echinocyamus.pusillus</i>	0	0	1	Déposivores
<i>Leucothoe.spinicarpa</i>	0	0	2	Déposivores
<i>Diastylis.spp</i>	9	8	82	Déposivores
<i>ostracode</i>	0	0	52	Déposivores
<i>Pseudocuma.spp</i>	0	0	6	Déposivores
<i>Magelona.spp</i>	1	91	3	Déposivores
<i>Leucothoe.spp</i>	0	0	9	Déposivores
<i>Pectinaria.sp</i>	6	3	1	Déposivores
<i>Spionidae.spp</i>	0	0	1	Déposivores
<i>Leucothoe.lilljeborgi</i>	0	0	7	Déposivores
<i>Tellina.fabula</i>	0	8	0	Déposivores
<i>Pygospio.elegans</i>	19	0	0	Déposivores
<i>Pariambus.typicus</i>	39	146	80	Microbrouteurs
<i>copépodes.harpacticoides</i>	0	0	438	Microbrouteurs

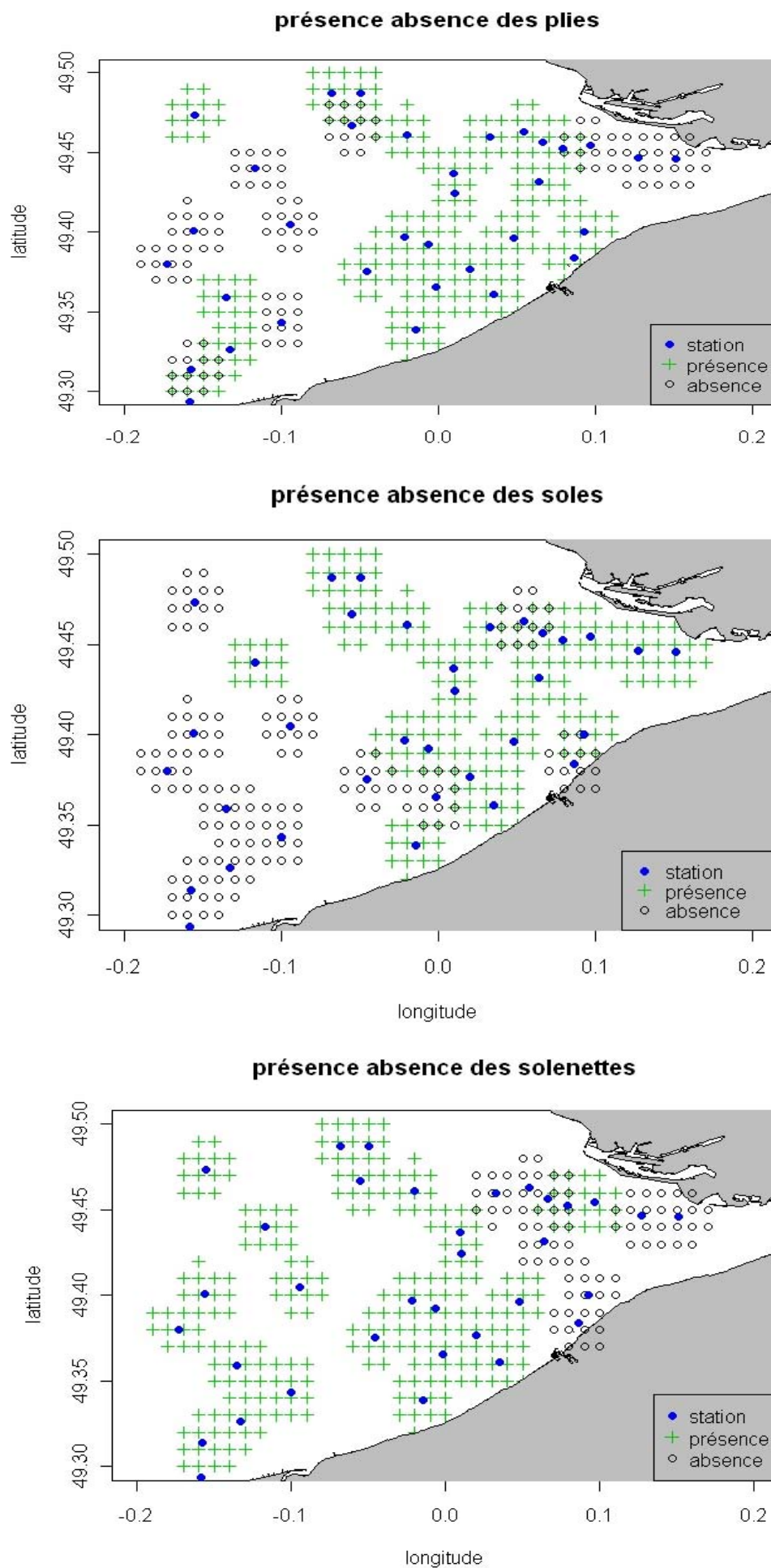


FIG 7: Cartes de présence absences pour chaque espèce.

Groupement initial:

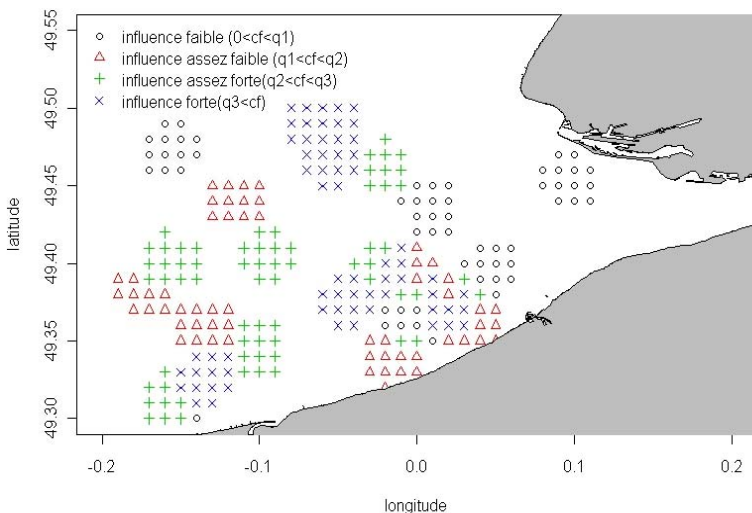
- 7 groupes isotopes, 3 groupes otolithes, 4 groupes contenus digestifs pour les plies.
- 6 groupes isotopes, 3 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les soles;
- 7groupes isotopes et 4 groupes contenus digestifs pour les solenettes.

groupement alternatif :

- 5 groupes isotopes, 4 groupes otolithes et 3groupes contenus digestifs pour les plies;
- 4groupes isotopes, 5 groupes otolithes et 4 groupes contenus digestifs pour les soles;
- 4 groupes isotopes et 6 groupes contenus digestifs pour les solenettes.

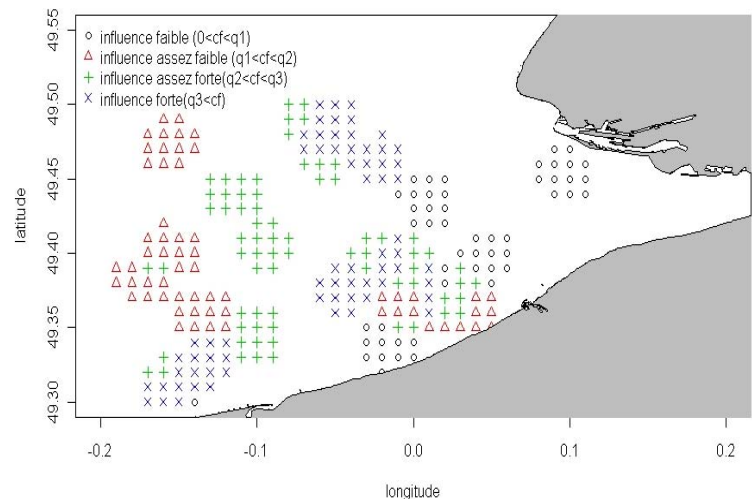
Groupement initial

aire d'influence des Buglossidium

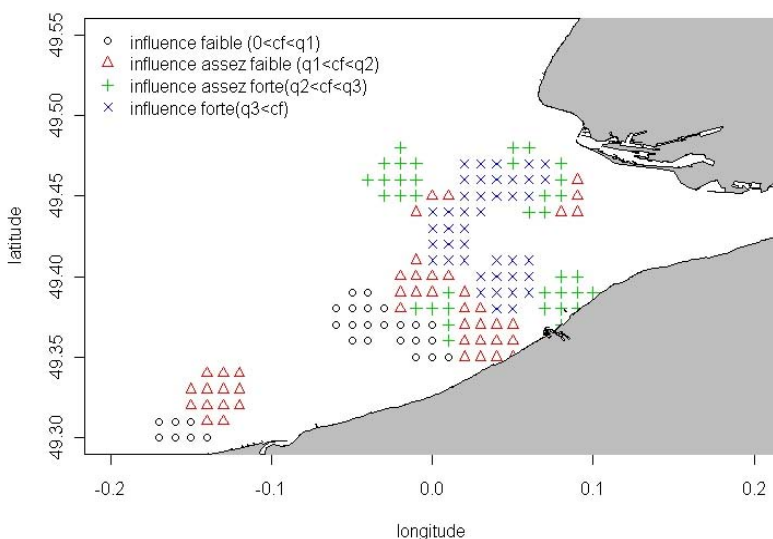


Groupement alternatif

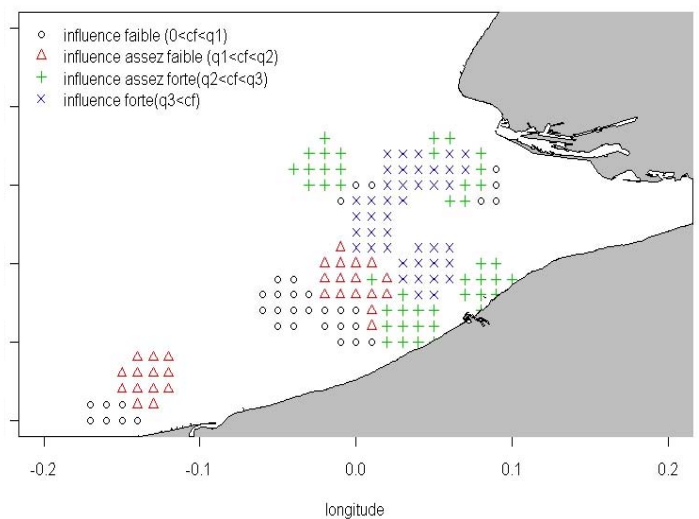
aire d'influence des Buglossidium



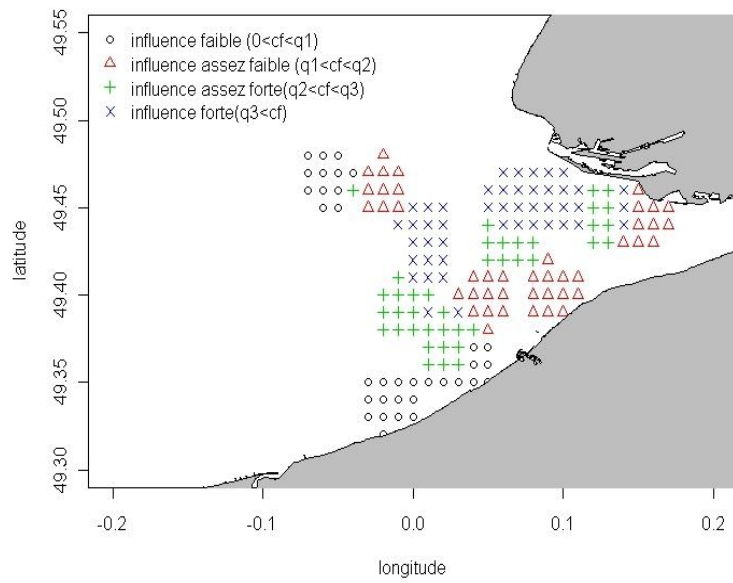
aire d'influence des Plies



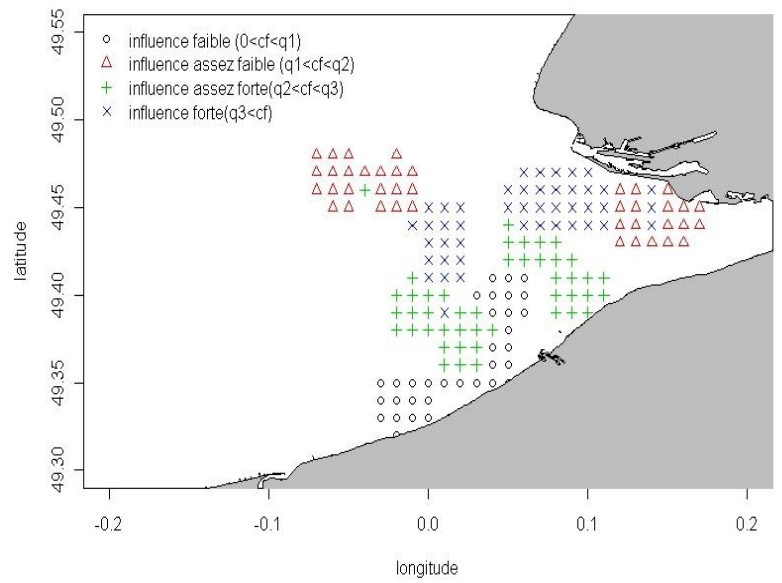
aire d'influence des Plies



aire d'influence des Soles

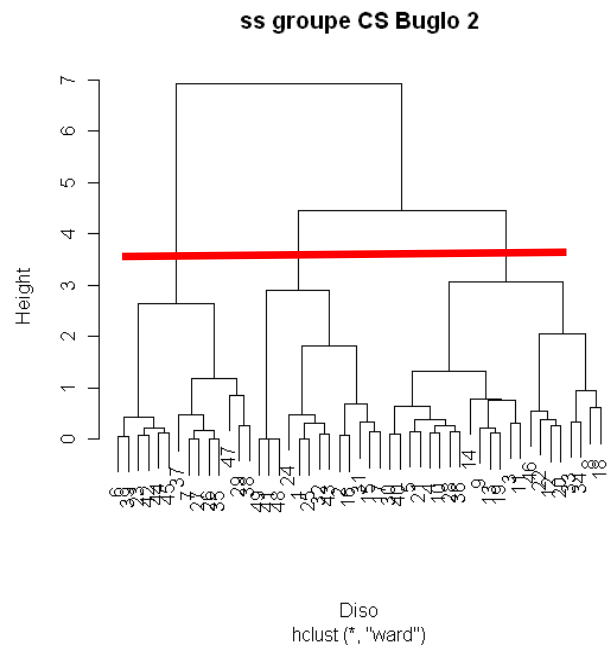
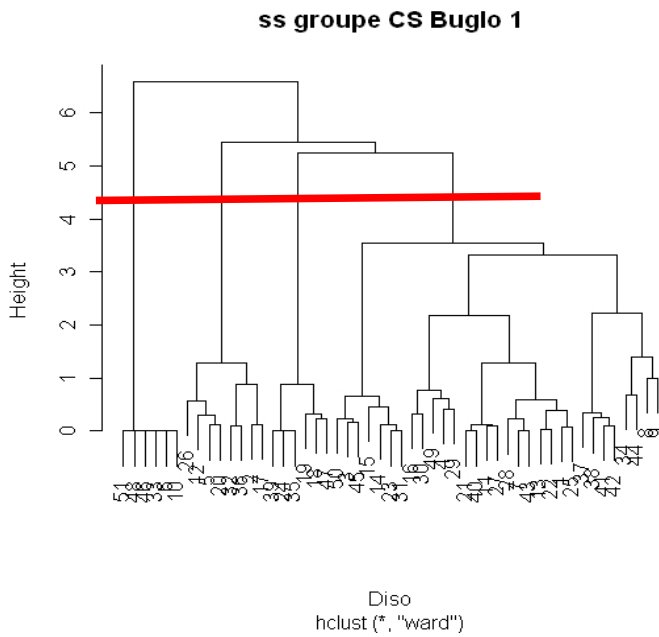


aire d'influence des soles



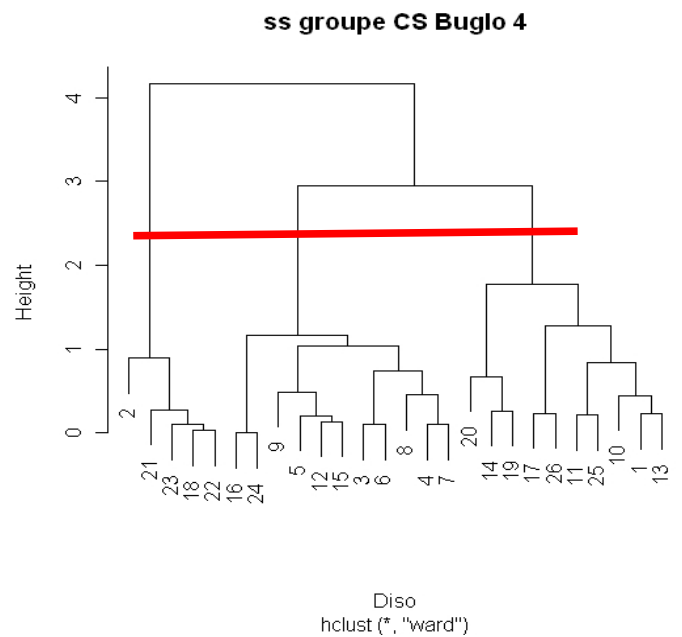
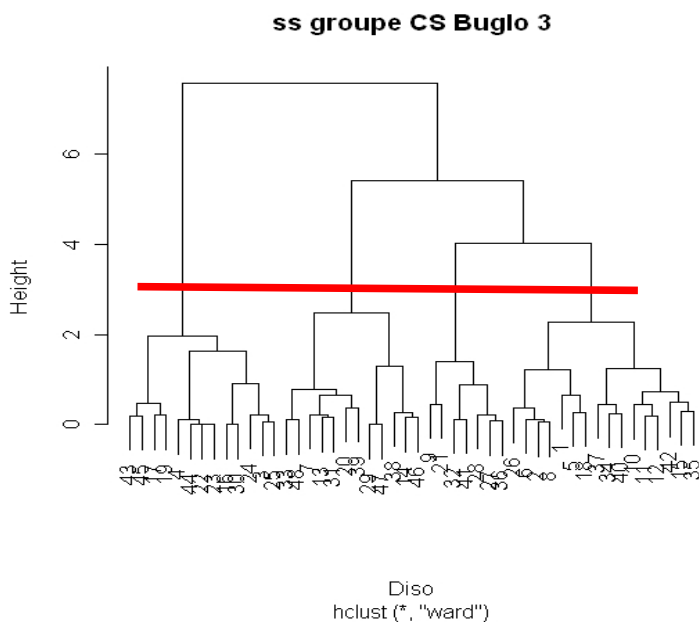
Analyse hiérarchique

FIG.9 Dendrogrammes de chaque espèce obtenu par CAH sur les contenus digestifs pour chaque groupe isotope. (Analyse hiérarchique)

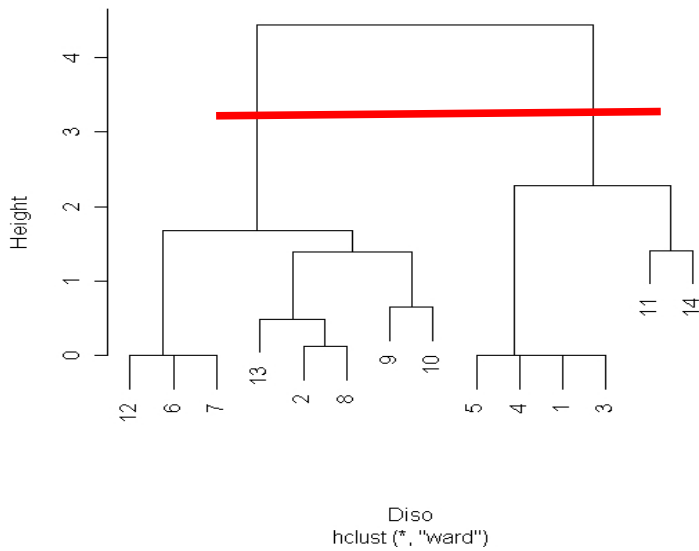


Les nombres de groupes pour le Buglossidium sont les suivants:

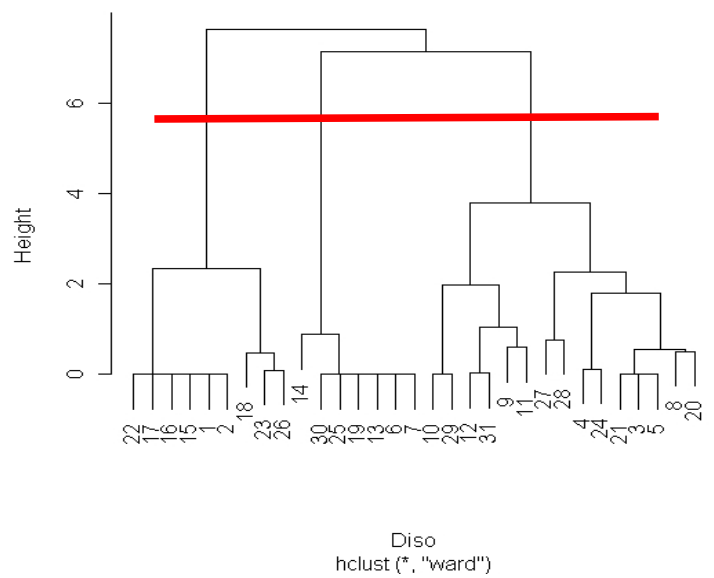
- 4 pour le groupe 1
- 3 pour le groupe 2
- 4 pour le groupe 3
- 3 pour le groupe 4



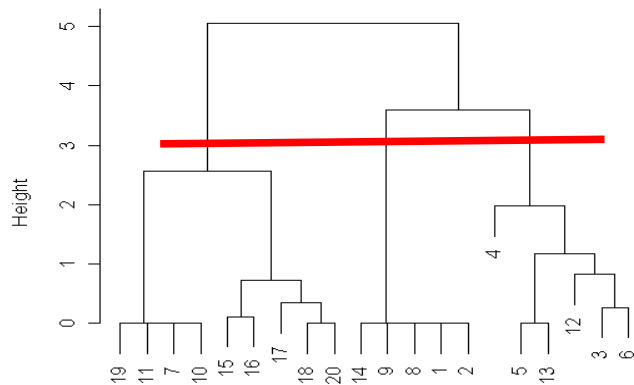
ss groupe CS soles 1



ss groupe CS soles2



ss groupe CS soles 3



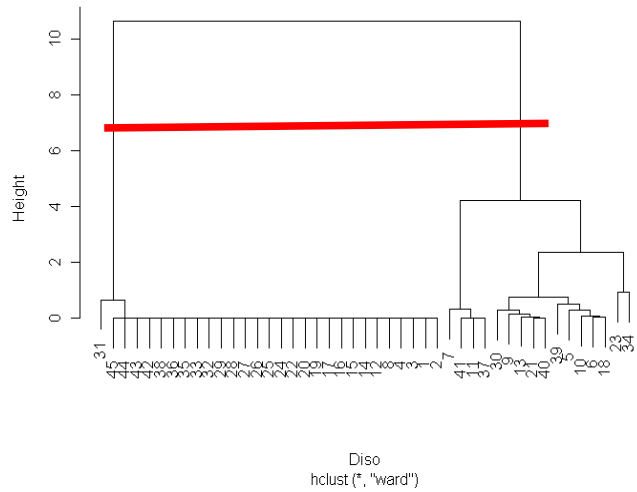
Les nombres de groupes pour la sole sont les suivants:

2 pour le groupe 1

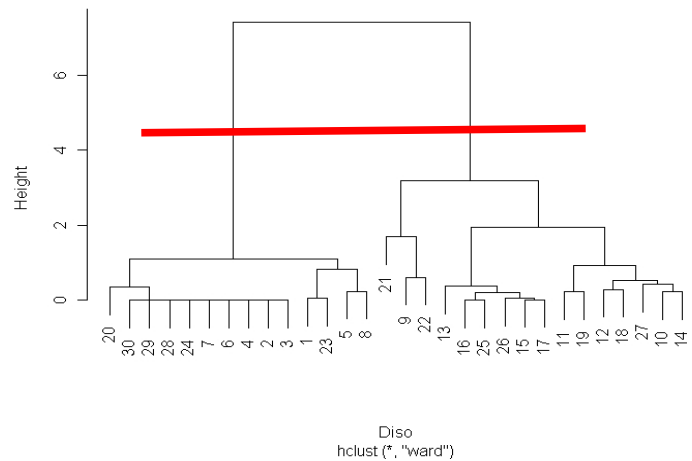
3 pour le groupe 2

3 pour le groupe 3

ss groupe CS plie1



ss groupe CS plie 2

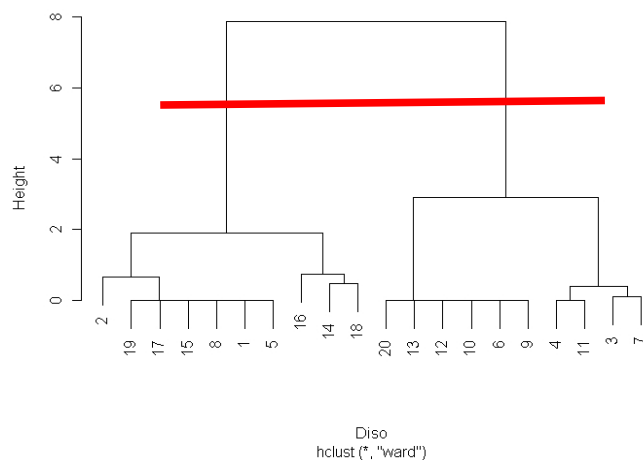


Les nombres de groupes pour la plie sont les suivants:

2 pour le groupe 1

2 pour le groupe 2

2 pour le groupe 3



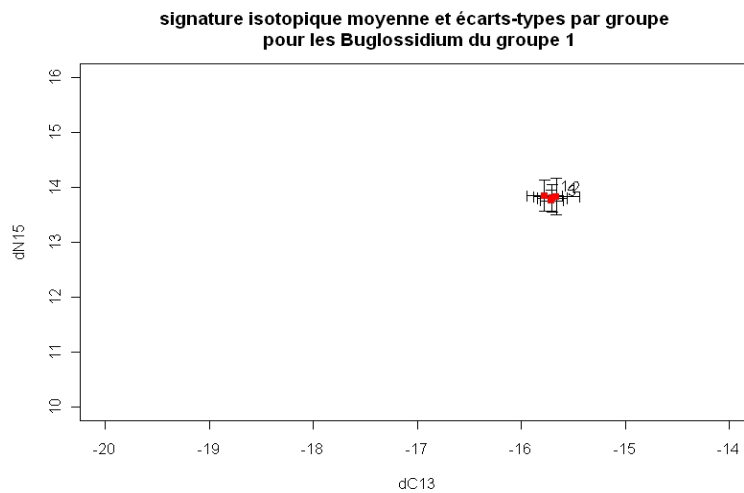


FIG. 10: Graphique des moyennes et écarts types des signatures isotopiques de chaque sous groupe du groupe1 Buglossidium.

Lexique

Anthropique: Relatif à l'homme, causé par l'homme [Seine-Aval1].

Benne : La benne à sédiments de type "Van Veen" est un "caisson mobile en acier inoxydable servant au prélèvement des sédiments et des organismes benthiques associés. Elle est suffisamment lourde pour pénétrer de quelques centimètres les fonds à sédiments meubles.



Benthique: Se dit des espèces vivant sur le fond.[Seine-Aval13]

Bathymétrie : Équivalent sous marin de la topographie, c'est à dire description du relief immergé grâce aux mesures de profondeurs.[Seine-Aval3]

Chaîne trophique / Réseau trophique : Ensemble de végétaux et d'animaux qui se nourrissent les uns des autres. À la base se trouvent les végétaux qui sont mangés par les animaux herbivores qui sont à leur tour la proie des carnivores.[Seine-Aval14]

Densité : Abondance d'une espèce à une station divisée par la surface chalutée.

Endiguement: Action de contenir l'eau grâce à des digues [Larousse]

Intertidale: Dans un régime de mers à marées, zone comprise entre la plus haute mer et la plus basse mer (zone de balancement des marées) [Seine-Aval3]

Nourricerie: Zone marine proche du rivage et peu profonde où les très jeunes poissons se nourrissent et se développent avant de s'éloigner vers le large. [Seine-Aval1]

Subtidale : Zone située au-dessous de la zone de balancement des marées et ne se découvrant jamais à marée basse.[Seine-Aval3]

Terrigène: Se dit des éléments d'origine continentale intervenant dans la sédimentation marine [Larousse]

Trait de chalut: Action à partir du moment où le chalut est au fond de l'eau jusqu'à ce qu'il soit à bord du bateau. Le trait couvre donc une certaine distance pour un certains temps.

Éléments chimiques utilisés dans la microchimie des otolithes

Al: Aluminium

Ba: Barium

Ca: Calcium

Cd: Cadmium

Cu: Cuivre

K: Potassium

Li: Lithium

Mg: Magnésium

Mn:Manganèse

Na: Sodium

Sr: Strontium

RÉSUMÉ

En s'appuyant sur des données récemment collectées (2008) sur la nourricerie de l'estuaire de la Seine, le stage avait pour but de contribuer au développement d'une méthodologie permettant de combiner des marqueurs naturels caractérisant l'utilisation spatio-temporelle des habitats des juvéniles de trois espèces de poissons plats (*Solea solea*, *Pleuronectes platessa* et *Buglossidium luteum*). La méthodologie proposée s'appuie sur l'utilisation de marqueurs naturels (microchimie des otolithes, contenus digestifs, isotopes stables $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$). Ces marqueurs consistent en des caractéristiques micro-chimiques et biologiques des organismes acquises au cours du temps et spécifiques de zones géographiques délimitées. Trois approches statistiques (Analyse Multi-couches, Analyse Multi-tables, Analyse hiérarchique) permettant de combiner les différents marqueurs ont été utilisées. L'approche Multi-couches, permet de cartographier les habitats « potentiels » de chaque espèce. Elle nous informe que les solenettes ne partagent pas les mêmes zones d'habitats potentiels que les soles et les plies qui, elles, sont plus en concurrence. Ensuite, l'approche Multi-tables nous permet de mieux comprendre les liens entre les marqueurs et de s'apercevoir que le marqueur isotope est le plus pertinent/important pour répondre à notre question. Enfin, l'approche hiérarchique tient compte du temps d'intégration du marqueur isotope (environ 2 mois) et celui des contenus digestif (quelques heures), qui est donc inclus dans le premier. Elle montre que la signature isotopique d'un groupe de poissons a un effet sur sa densité contrairement à son régime alimentaire. Ce stage a montré que les trois approches sont complémentaires et robustes aux différents choix méthodologiques, notamment en ce qui concerne l'approche multi-couches. En perspective, une comparaison entre les résultats obtenus et les données environnementales ainsi qu'avec les données de croissance pourra être étudiée pour étayer d'avantage l'interprétation biologique des résultats issus de cette méthodologie

ABSTRACT

Relying on data recently collected (2008) in the coastal nursery of the Bay of Seine, this study aimed to contribute to the development of a methodology assessing the spatial habitat of three flatfish species (*Buglossidium luteum*, *Solea solea* and *Pleuronectes platessa*) by combining multiple biological markers (gut contents, otolith microchemistry, and stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)). The methodology is based on three statistical approaches (multi-layers, multi-tables, hierarchical analyses). Multi-layers approach, allowed to create geographic maps assigning the « potential » habitats for each species. These maps suggested that *Buglossidium luteum* does not share the same potential habitats that *Solea solea* or *Pleuronectes platessa*, whereas the two others display great similarity in their habitat range, thereby suggesting some ecological competition between the two species. Multi-tables approach was used to understand the links between the three markers. Results indicate that the isotope markers are the most relevant/important marker in the present study. Hierarchical analysis considered the biological integration time of the gut contents (few hours) nested in the biological integration time of the isotopes (nearly 2 months). By doing so, it showed that the isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) of a group of fish has an effect on the density of that group, while his gut contents does not. This study showed that the three approaches are complementarity to each other and robust to different methodological choices, notably regarding the choices that had to be made to develop the multi-layers approach. Future developments include comparisons between the results and environmental data as well as growth data in order to strengthen the biological interpretation of these results. .