

OBSERVATOIRE « HOMMES-MILIEUX »
Littoral méditerranéen



Influence des apports anthropiques sur les flux de carbone et de contaminants dans les réseaux trophiques de poissons de l'écosystème à *Posidonia oceanica*

dans le cadre d'une bourse de doctorat de la région PACA attribuée à : **MELANIE OURGAUD**
avec la participation financière de la ville de Marseille et l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse

Rapport final

Mars 2014

Responsables scientifiques

Mireille HARMELIN-VIVIEN et Sandrine RUITTON

Institut Méditerranéen d'Océanologie,
Aix-Marseille Université, Campus de Luminy,
UMR MIO CNRS 110, Case 901, 13288 Marseille Cedex 09

mireille.harmelin@univ-amu.fr, sandrine.ruitton@univ-amu.fr,

melanie.ourgaud@univ-amu.fr

Sommaire

Sommaire	2
Résumé succinct du projet	3
Glossaire	4
1. Informations générales concernant le projet	5
2. Contexte problématique initial	6
3. Méthodologie.....	8
4. Résultats	13
5. Discussion.....	19
Conclusion.....	21
Références bibliographiques.....	22



Résumé du projet

Comme beaucoup de zones de transition, les aires marines côtières revêtent une importance cruciale dans le fonctionnement des écosystèmes marins. L'impact des grandes agglomérations urbaines sur le milieu marin côtier est l'un des grands problèmes environnementaux actuels, particulièrement en Méditerranée. Les grandes villes peuvent avoir des effets divers sur le milieu marin selon le type de perturbations engendrées, que ce soit le rejet en mer des eaux des stations d'épuration, les activités industrielles ou simplement les activités liées à la fréquentation humaine et à l'urbanisation. Comprendre le fonctionnement et le statut de tels écosystèmes côtiers s'avère donc complexe, notamment dans la baie de Marseille, deuxième agglomération française, où les influences anthropiques s'ajoutent aux fluctuations naturelles. L'herbier de posidonie *Posidonia oceanica* constitue l'un des écosystèmes côtiers les plus remarquables en Méditerranée et qui bénéficie d'un statut de protection particulier. Les apports anthropiques, peuvent influencer de plusieurs manières les peuplements de poissons qui y vivent : (1) structure du peuplement, (2) organisation trophique, (3) niveau de contamination des poissons. Ces modifications peuvent avoir des conséquences sur les pêcheries côtières, artisanales et récréatives, ainsi que sur la santé humaine. Pour répondre à cette problématique, deux approches méthodologiques sont utilisées sur les poissons des herbiers de posidonie, l'analyse des isotopes stables et celle des contaminants. D'une part, l'utilisation simultanée des ratios isotopiques du carbone (C) et de l'azote (N) constitue un indicateur du niveau trophique ($\delta^{15}\text{N}$) des espèces et de l'origine de la matière organique ($\delta^{13}\text{C}$). D'autre part, le dosage de contaminants (éléments traces) dans les chairs de poissons permet d'estimer l'importance des sources de carbone d'origine continentale, le transfert possible et la bioaccumulation de ces éléments traces jusqu'aux espèces exploitées. A l'heure actuelle, aucune autre étude de ce type n'a été menée sur les poissons des herbiers de posidonie en Méditerranée.

Mots clés : écologie marine, contaminants, réseaux trophiques, herbier à *Posidonia oceanica*, poissons osseux : téléostéens

Glossaire :

Bioamplification (= biomagnification) : transfert de contaminants par voie trophique, c'est-à-dire par l'alimentation. Les concentrations de substances chimiques dans l'organisme croissent à chaque niveau trophique.

Ecosystème : c'est l'ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants (ou biocénose) et son environnement biologique, géologique, hydrologique, climatique, etc. (le biotope).

Eléments traces : on appelle en général « métaux lourds » les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g.cm^{-3} (Holleman, 1995). La classification en métaux lourds est souvent discutée car certains métaux ne sont pas particulièrement « lourds » (cas du zinc) et certains éléments ne sont pas tous des métaux (cas de l'arsenic). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation « métaux lourds », l'appellation « éléments en traces métalliques » (ETM) ou par extension « éléments traces » ou « métaux traces » (Chiffolleau, 2001).

Isotopes stables : deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent. Les isotopes stables sont des isotopes qui ne se modifient pas dans le temps. Ils fournissent une mesure qui intègre l'alimentation des individus sur des périodes de temps relativement longues (semaines - mois) et qui est représentative de la nourriture réellement assimilée par les consommateurs. Les isotopes stables du carbone (C) et de l'azote (N) sont d'excellents marqueurs naturels. Ils sont utilisés pour identifier les sources de matière organique et suivre leur devenir au sein du réseau trophique, des sources vers les échelons supérieurs.

Lyophilisation : elle consiste à ôter l'eau d'un produit, à l'aide de la surgélation puis d'une évaporation sous vide de la glace sans la faire fondre.

Réseau trophique : il correspond à un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent.

Téléostéen : terme qui a une valeur systématique pour désigner les poissons osseux. Le terme de « poisson » est utilisé dans ce document pour désigner le groupe monophylétique des téléostéens (teleostei).

Trophique : terme qui se rapporte à ce qui est relatif à la nutrition. Par exemple, les relations trophiques qui unissent les prédateurs et leurs proies dans un écosystème.

Le terme « poisson » est utilisé ici dans son sens usuel mais n'a pas de valeur systématique. Dans ce rapport il représente les Téléostéens.

Informations générales concernant le projet

Responsables scientifiques

Sandrine Ruitton et Mireille Harmelin -Vivien
Institut Méditerranéen d'Océanologie,
Aix-Marseille Université, Campus de Luminy,
UMR MIO CNRS 110, Case 901,13288 Marseille Cedex 09
04 91 82 93 24
sandrine.ruitton@univ-amu.fr et mireille.harmelin@univ-amu.fr

Nom-Prénom	Fonctions et laboratoire	Spécialité
Richard Sempéré	<u>Directeur</u> du MIO	Océanographie
Mireille Harmelin-Vivien	DR - CNRS, MIO	Biologie et écologie marine
Sandrine Ruitton	MC, MIO	Biologie et écologie marine
Mélanie Ourgaud	Doctorante	Biologie et écologie marine

Temporalité

Date de début des travaux : mars 2013

Date de fin des travaux pour la rédaction du rapport : mars 2014

Poursuite de l'étude en cours : **Oui** / ~~Non~~

Demande de soutien financier à l'OHM pour l'année 2014 : ~~Oui~~ / **Non**

1. Contexte et problématique

Etat de l'art et questions associées

Les apports anthropiques, en fonction de leur nature et de leur intensité, peuvent influencer les poissons de l'herbier de posidonie soit (1) dans l'organisation trophique soit (2) sur le niveau de contamination des poissons (Dierking *et al.*, 2009 ; Harmelin-Vivien *et al.*, 2009). Ces modifications peuvent avoir des conséquences sur l'économie locale (pêches côtières, artisanales et récréatives), ainsi que sur la santé humaine.

Contexte local et intérêt du traitement de la question dans le cadre de l'OHM « Littoral méditerranéen »

En Méditerranée, l'herbier de posidonie constitue l'un des écosystèmes côtiers les mieux représentés. Il bénéficie d'un statut de protection particulier. En région Provence-Alpes-Côte-D'azur, l'herbier de posidonie est l'habitat prioritaire Natura 2000 le plus présent. Il abrite un peuplement de poissons diversifié, sert de nurserie à de nombreuses espèces et a fait antérieurement l'objet de plusieurs études qui permettent de disposer de bases de références précieuses (Harmelin-Vivien, 1983 ; Harmelin-Vivien, 1984 ; Harmelin-Vivien *et al.*, 1989 ; Khoury, 1984).

L'écosystème herbier de posidonie de par sa complexité architecturale se structure en divers compartiments :

Le compartiment des producteurs primaires se compose outre de la posidonie *Posidonia oceanica*, de nombreux macrophytes fixés sur ses feuilles et ses rhizomes (Figure 1).

Le compartiment des consommateurs primaires comporte de nombreux invertébrés sessiles et vagiles : des **crustacés** : crevettes, crabes, bernard l'hermite ; des mollusques : gastéropodes, bivalves et céphalopodes ; des échinodermes : oursins, holothuries, étoiles de mer, ophiures et des annélides.

Le compartiment des poissons téléostéens - consommateurs secondaires comprend plusieurs catégories :

- Les **herbivores** : la saupe *Sarpa salpa* ;
- Les microcarnivores ou **zooplanctonophages** : la castagnole (*Chromis chromis*) et la mendole (*Spicara smaris*) ;
- Les **mésocarnivores de type 1** : les labres (*Coris julis*) et les crénilabres (*Symphodus* spp.) qui se nourrissent de mollusques principalement ;
- Les **mésocarnivores de type 2** : les sars (*Diplodus annularis* et *D. vulgaris*), les syngnathes, etc. qui se nourrissent de diverses proies benthiques ;
- Les **macrocarnivores** qui capturent de gros crustacés, mollusques céphalopodes (poules) et poissons. Ce sont les rascasses (*Scorpaena porcus*), les serrans (*Serranus cabrilla* et *S. scriba*) et le labre *Labrus viridis*.

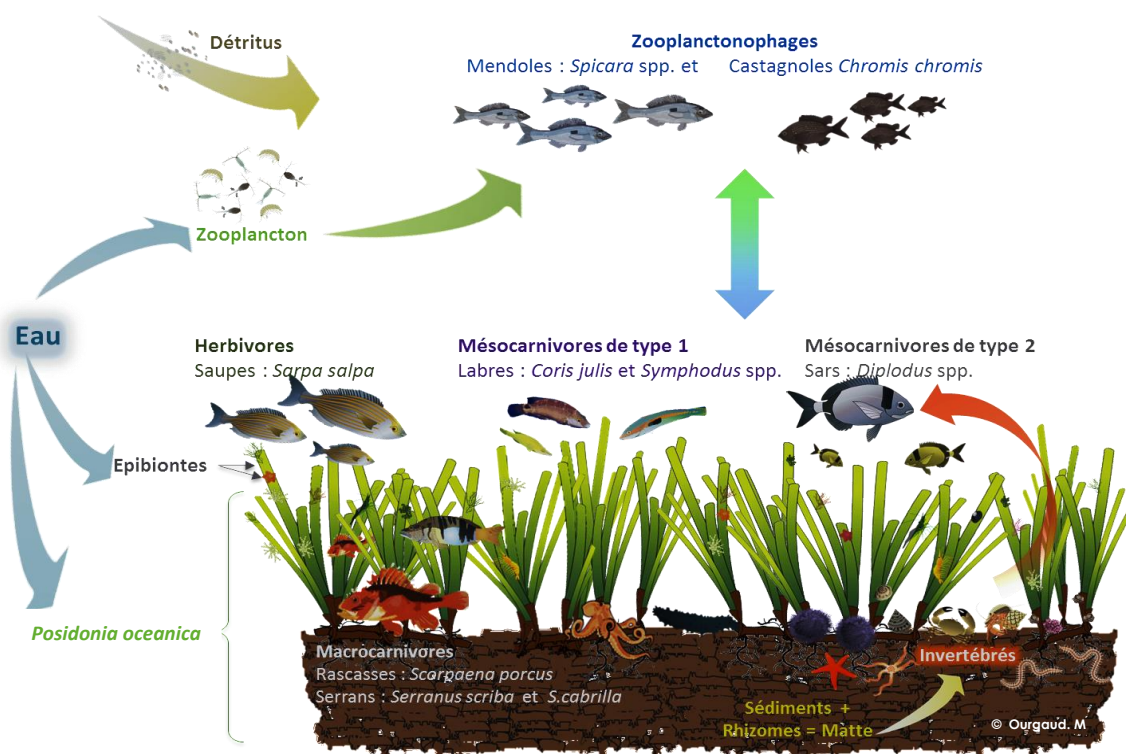


Figure 1 : Le peuplement de l'écosystème herbier de posidonie et ses divers compartiments.

Hypothèses

Deux volets seront abordés dans ce travail :

Les sites sont soumis à des types et des niveaux de perturbation différents (influence anthropique), nous pourrions mettre en évidence : (1) les modifications de la structure trophique du peuplement de poissons en fonction des sources et des niveaux de pression anthropique et (2) l'existence de différents niveaux de contamination des poissons par les éléments traces et leur bioaccumulation en fonction de la taille des individus.

Il est donc raisonnable d'émettre l'**hypothèse** que les poissons des herbiers de posidonie sont influencés par les apports organiques de nos côtes. Les acquis déjà obtenus par notre unité de recherche sur ces poissons, ainsi que le fort intérêt porté par les pêcheurs locaux, **justifient un projet de recherche** qui pourrait permettre, *in fine*, de mieux appréhender le devenir des contaminants (ici les éléments traces) dans les chairs des espèces de poissons de l'herbier de posidonie en Méditerranée française. Ces connaissances auront une portée qui dépassera le simple intérêt scientifique pour celui, plus large, d'une **meilleure connaissance** et d'une **meilleure gestion des ressources** constituées pour la plupart par des **espèces à forte valeur commerciale**. Elles constitueront également une **base de référence** sur les concentrations en différents **contaminants** dans ces organismes.

Notre équipe possède par ailleurs une bonne expérience dans l'utilisation des isotopes stables (carbone et azote) dans le cadre de la reconstitution des réseaux trophiques.

Egalement, certains isotopes stables (carbone et oxygène) peuvent être aussi de très bons traceurs des conditions de vie rencontrées par les individus, et peuvent maintenant être détectés de façon fiable grâce aux avancées techniques dans les analyses des otolithes¹. Ce dernier point peut constituer pour notre équipe une des nombreuses continuités possibles à ce travail.

2. Méthodologie

2.1. Terrains étudiés

Quatre sites ont été échantillonnés : trois dans la baie de Marseille soumis à différentes influences anthropiques et un site de référence, moins perturbé, situé aux Salins d'Hyères dans le Var (Figure 2).



Figure 2 : Sites d'étude (en blanc) choisis en fonction de différentes influences et le site de référence dans le Var.

Les campagnes de prélèvements se sont déroulées en hiver et en été 2012, de jour et de nuit. Le plan d'échantillonnage a été conçu de manière à prendre en compte les variabilités temporelles des différentes espèces de poissons dans le but d'en échantillonner le plus grand nombre. Chaque poisson a été pesé, mesuré puis disséqué, afin de récupérer différents échantillons spécifiques à chaque analyse. Le muscle dorsal situé sous la nageoire dorsale pour l'analyse des isotopes stables et tout le muscle restant à l'exception de la zone ventrale pour les analyses de contaminants ont été prélevés. Les dissections du muscle ont été effectuées de manière à éliminer les arêtes et la peau, le plus éloigné possible des organes vitaux, pour éviter ainsi tout risque de biais dans les dosages

¹ Otolithe : concrétion minérale, principalement calcaire, présente dans l'oreille interne des poissons.

chimiques des chairs. Les prélèvements effectués en vue des analyses ont été stockés au congélateur à une température de -20°C avant lyophilisation et broyage. Nous utilisons un mortier et un pilon en agate pour les échantillons isotopiques et un broyeur à billes d'agate pour les échantillons en éléments traces. Le matériel de dissection est systématiquement nettoyé à l'acide chlorhydrique 10 % puis rincé à l'eau milliQ et séché à l'étuve entre deux échantillons. Les dissections sont effectuées sur une plaque de verre également nettoyée soigneusement entre chaque dissection avec de l'acide chlorhydrique 10 % puis rincée à l'eau milliQ. Ce mode opératoire long et minutieux est opéré afin d'éviter toute contamination possible lors des différents prélèvements. L'ensemble de l'échantillonnage a été réalisé durant l'année 2012 et a nécessité 17 sorties en mer à bord du navire « l'Armandia » de l'OSU Pythéas ou le navire « Les deux frères » de monsieur Jean Canale, pêcheur professionnel aux Salins d'Hyères.

2.2. Données collectées et/ou créées

Il est très important de préciser que le soutien apporté par l'OHM « Littoral méditerranéen » nous a permis de financer une partie des analyses en isotopes stables et la totalité des analyses en éléments traces qui font l'objet de ce présent rapport.

Les paramètres (bio)chimiques mesurés dans les tissus représentent des traceurs écologiques puisqu'ils permettent d'apporter des informations sur le régime alimentaire des consommateurs, et sur leurs interactions avec les autres compartiments de l'écosystème. En fait, les « signatures isotopiques » ou encore les concentrations en contaminants métalliques sont utilisées comme traceurs écologiques des organismes sur la base du postulat : « je suis ce que je mange » (e.g. Kohn, 1999). Ils reflètent en effet, *a priori*, les habitudes et les préférences alimentaires, et/ou la zone d'alimentation, et/ou encore la position trophique des organismes étudiés.

Dans le contexte décrit précédemment, nous retiendrons ici que les différents traceurs écologiques généralement utilisés peuvent donc permettre d'une part, de tester des hypothèses fondamentales quant à la modification de la structure et du fonctionnement des réseaux trophiques entre les différents herbiers ; et d'autre part, de fournir des informations sur les différents niveaux de contamination par les éléments traces en lien avec les divers impacts anthropiques.

Au total, des analyses isotopiques et d'éléments traces ont été réalisées sur 16 espèces de poissons présentes dans les quatre sites étudiés afin de comparer leur position trophique et leurs concentrations en contaminants (Tableau I).

Tableau I : Nombre d'individus analysés pour les isotopes stables et les éléments traces pour chacune des 16 espèces de poissons.

Familles	Espèces	Catégories trophiques	Nombre d'individus analysés	
			Isotopes stables	Eléments traces
Syngnathidae	<i>Nerophis maculatus</i>	Mésocarnivore 2	4	-
Syngnathidae	<i>Syngnathus acus</i>	Mésocarnivore 2	27	-
Syngnathidae	<i>Syngnathus typhle</i>	Mésocarnivore 2	4	-
Scorpaenidae	<i>Scorpaena porcus</i>	Macrocarvivores	47	18
Scorpaenidae	<i>Scorpaena scrofa</i>	Macrocarvivores	-	2
Serranidae	<i>Serranus cabrilla</i>	Macrocarvivores	31	9
Serranidae	<i>Serranus scriba</i>	Macrocarvivores	27	8
Sparidae	<i>Diplodus annularis</i>	Mésocarnivore 2	13	7
Sparidae	<i>Diplodus vulgaris</i>	Mésocarnivore 2	18	6
Centranchidae	<i>Spicara smaris</i>	Zooplanktonophage	47	9
Pomacentridae	<i>Chromis chromis</i>	Zooplanktonophage	15	8
Labridae	<i>Coris julis</i>	Mésocarnivore 1	34	11
Labridae	<i>Labrus viridis</i>	Mésocarnivore 1	8	7
Labridae	<i>Symphodus cinereus</i>	Mésocarnivore 1	41	12
Labridae	<i>Symphodus doderleini</i>	Mésocarnivore 1	27	9
Labridae	<i>Symphodus ocellatus</i>	Mésocarnivore 1	24	9
Labridae	<i>Symphodus rostratus</i>	Mésocarnivore 1	30	13

L'outil isotope stable

L'étude des relations trophiques dans les milieux naturels repose sur l'utilisation des abondances naturelles en isotopes stables. Une fois fixée dans la matière organique, la proportion en isotopes ne subit de faibles variations qu'au cours des processus de dégradation et de transfert au sein des chaînes alimentaires (Ostrom et Fry 1993). En effet, les isotopes stables constituent des indicateurs du niveau trophique ($\delta^{15}\text{N}$) et de l'origine de la matière organique ($\delta^{13}\text{C}$). Le couplage des isotopes stables du carbone et de l'azote permet un suivi plus efficace du devenir de la matière organique dans les réseaux trophiques (Fry *et al.*, 1984 ; Vander Zanden *et al.*, 1999 ; Vander Zanden et Rasmussen, 2001 ; Smit *et al.*, 2006) et permet une séparation bidimensionnelle de chaque source de matière organique. Dans le milieu environnant, la principale source naturelle de variabilité de la composition isotopique se situe à la base des réseaux trophiques, au niveau des producteurs primaires (Lajtha et Marshall, 1994). La représentation graphique des signatures isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de $\delta^{13}\text{C}$ des différents composants d'un réseau trophique illustre la relation positive existant entre la proie et le consommateur du fait de l'enrichissement trophique en isotopes lourds (Figure 3).

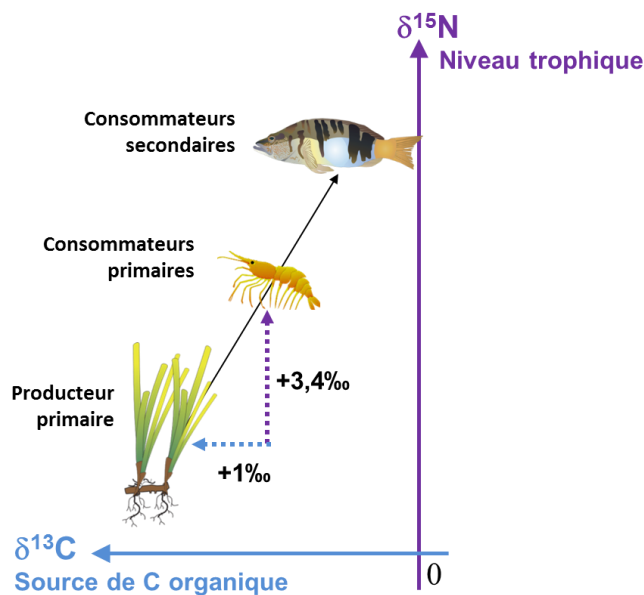


Figure 3 : Représentation d'un réseau trophique théorique basé sur l'utilisation d'une source de matière organique unique, producteur primaire = posidonie, consommateurs primaires = herbivores, consommateurs secondaires = carnivores (modifié d'après Darnaude, 2003).

Ce schéma trophique est vérifié dans de nombreux réseaux trophiques terrestres et marins quels que soient la latitude, le substrat ou la profondeur (Harrigan *et al.*, 1989). Un enrichissement en isotope lourd de l'azote se produit à chaque passage vers un niveau trophique supérieur. Chez les poissons, la composition du régime alimentaire varie et dépend essentiellement de l'abondance des différentes proies dans le milieu et des préférences alimentaires et de leur stade ontogénique (Darnaude, 2003, Bănar, 2008). L'analyse des compositions isotopiques des échantillons fournit une mesure qui intègre l'alimentation des individus sur des périodes de temps relativement longues (semaines - mois) et est représentative de la nourriture réellement assimilée par les consommateurs.

Les isotopes d'un même élément présentent par des variations de masse des propriétés physico-chimiques différentes. Ainsi au cours des réactions physiques, chimiques ou biologiques, il se produit un fractionnement isotopique principalement dû aux différences de masse et qui induit une modification des vitesses de ces réactions. Il en résulte des différences de composition isotopique entre réactifs et produits formés (Owens, 1987). Les variations d'abondances isotopiques naturelles résultent de ce phénomène. Ainsi, on estime que la composition isotopique des muscles d'un animal reflète la composition isotopique de sa nourriture avec un enrichissement (fractionnement) moyen en $\delta^{13}\text{C}$ de 1 ‰ et au maximum de 2 ‰ (De Niro et Epstein, 1978 ; Post, 2002) et de $3,4 \text{ ‰} \pm 1,1 \text{ ‰}$ (De Niro et Epstein, 1978 ; Minagawa et Wada, 1984 ; Post, 2002).

Pour les trois sites proches de l'agglomération de Marseille, soumis à des apports anthropiques différents, les résultats des dosages isotopiques (hiver 2012) dans les chairs de poissons nous ont été retournés. Pour l'instant, cela **représente 397 signatures isotopiques en carbone et en azote**. Ces résultats sont préliminaires et seront prochainement étudiés de manière plus approfondie par l'étude globale des différents

compartiments (eau, sédiment, posidonie, invertébrés et poissons) qui composent cet écosystème et ce aux deux saisons.

Les contaminants chimiques : les éléments traces

Les éléments traces sont émis dans l'environnement à partir de sources naturelles ou anthropiques (e.g. volcanisme ou incinération des déchets pour le Hg, exploitation des minerais de zinc, etc.). Ils atteignent les eaux marines par voie fluviale ou par déposition atmosphérique ; l'atmosphère restant l'un des vecteurs le plus important (Cossa *et al.*, 1990, Lassus et Cossa, 1989, Neff, 2002). Le transfert par voie trophique est ensuite, la principale voie pour l'incorporation des métaux par les organismes supérieurs, dans lesquels ils s'accumulent fortement en particulier dans les plus hauts niveaux trophiques (Cossa *et al.*, 1990, Koyama *et al.*, 2000, Lahaye *et al.*, 2005). L'évaluation de la bioamplification des métaux dans les réseaux trophiques marins est souvent ambiguë. Les concentrations en métaux mesurées chez les organismes sont en fait le résultat de ce qui est entré dans l'organisme et/ou dans le tissu analysé, moins ce qui a été éliminé *via* les processus de régulation mis en place chez ces organismes au cours de l'évolution, pour contrecarrer par exemple la toxicité de certains métaux. L'accumulation d'un métal par un organisme et son transfert dans les réseaux trophiques dépend également de sa biodisponibilité dans les environnements biotique et abiotique de l'organisme (Gray, 2002, Neff, 2002).

Dans ce travail, neuf éléments traces ont été étudiés : **l'arsenic (As), le baryum (Ba), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le zinc (Zn) et le mercure (Hg)** dans les poissons des herbiers de posidonie. Au total **128 analyses ont été réalisées**. Ces premiers résultats concernent uniquement les poissons des quatre sites choisis. Les dosages des concentrations en métaux dans les autres compartiments sont en cours d'analyse.

Les analyses des isotopes stables et des éléments traces sont effectuées par le laboratoire LIENSs de La Rochelle avec qui nous travaillons en étroite collaboration depuis de nombreuses années.

2.3. Démarche de traitement et d'analyse

Plusieurs types d'analyses statistiques ont été effectués sur les deux types de paramètres obtenus, ratios isotopiques et concentrations en éléments traces, à l'aide des logiciels R, Statistica (version 9 © Statsoft) et Primer 6 (version 6.1.13).

Les moyennes et les erreurs standards ont été calculées pour les signatures isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des différents échantillons analysés. Des classifications ascendantes hiérarchiques sont effectuées sur les signatures isotopiques moyennes des différents groupes de poissons. Pour chaque espèce, la normalité et l'homoscédasticité des variances des données sont testées respectivement par les tests de Kolmogorov-Smirnov et de Levène. Des analyses de variance ANOVA et de covariance ANCOVA à un facteur sont effectuées afin de mettre en évidence l'influence du facteur « site » sur les signatures en isotopes stables des poissons étudiés indépendamment des différences possibles de

taille des individus entre échantillons. Des régressions linéaires sont réalisées pour les signatures en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de la longueur totale (taille) des poissons. Dans le cas où les régressions sont significatives, des analyses de covariance ANCOVA ont été utilisées dans le but de tester l'influence du site en éliminant l'effet de la longueur totale sur les signatures isotopiques. Lorsque les régressions linéaires ne sont pas significatives, des analyses de variance ANOVA sont réalisées pour tester l'influence de ce facteur. Les moyennes montrant un effet significatif après ANOVA ou ANCOVA, sont comparées avec le test *a posteriori* de Student-Newman-Keuls.

En ce qui concerne les neuf éléments traces, une normalisation² préalable des variables a été requise avant de réaliser les analyses en composantes principales (ACP) et les classifications hiérarchiques (cluster) sous Primer. Des analyses de variance par permutation (PERMANOVA³) sont réalisées par la suite afin de tester l'effet du site ou de l'espèce (Permanova +version 1.0.3 © Primer).

3. Résultats

Au cours des campagnes d'échantillonnage, plus de 4 000 poissons ont été prélevés, soit au total 54 espèces et 22 familles. Les 16 espèces sélectionnées et analysées dans cette étude sont des espèces présentes, pour la majorité, dans les quatre sites : la rascasse *Scorpaena porcus*, les serrans *Serranus cabrilla* et *S. scriba*, les sars *Diplodus annularis* et *D. vulgaris*, la mendole *Spicara smaris*, la castagnole *Chromis chromis*, les syngnathes *Nerophis maculatus*, *Syngnathus acus* et *S. typhle*, la girelle *Coris julis*, le labre *Labrus viridis* et les crénilabres *Symphodus cinereus*, *S. doderleini*, *S. ocellatus*, *S. rostratus*. Les individus sélectionnés pour les analyses ont été choisis afin de représenter au mieux les différentes classes de taille des individus récoltés. Quelques espèces, comme *S. cabrilla*, *C. chromis*, *N. maculatus*, *S. typhle*, *L. viridis*, *S. ocellatus* n'étaient pas systématiquement présentes dans les quatre sites aux deux saisons choisies.

3.1. Variations des signatures isotopiques selon les espèces et la longueur totale des individus

Une analyse par classification ascendante hiérarchique a permis de séparer les espèces en quatre groupes distincts pour la Côte Bleue et la rade Sud de Marseille et en trois groupes pour le plateau des Chèvres. Le regroupement des espèces sur la figure 4 est issu des résultats de cette classification, en revanche la représentation des ellipses n'est qu'illustrative.

Pour les trois sites des Bouches-du-Rhône, des patterns similaires sont observés. Les deux espèces de zooplanctonophages : *Chromis chromis* et *Spicara smaris* ressortent séparément dans la classification ascendante hiérarchique avec les plus faibles valeurs en

² Normalisation des variables en soustrayant par leurs moyennes et en divisant par leurs déviations standards (Legendre & Anderson, 1999 ; McArdle & Anderson, 2001)

³ La PERMANOVA (Analyse de la variance par permutation) (Anderson 2001) est un type d'analyse statistique permettant d'éviter la transformation des données (ou quand celle-ci n'est pas possible) pour répondre aux postulats de base d'une ANOVA classique qui est la normalité des résidus et l'homogénéité de la variance à laquelle la PERMANOVA est plus robuste (Anderson, 2005).

$\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$. Ces signatures isotopiques montrent que ces espèces sont situées à un faible niveau trophique relatif et forment un premier groupe. Un deuxième groupe rassemble les mésocarnivores de type 2 (*Diplodus* spp.) et le macrocarnivore (*Labrus viridis*) avec des valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ et des $\delta^{15}\text{N}$ les plus élevées. Des nuances sont toutefois notées selon le site. Un troisième groupe rassemble les mésocarnivores de type 1 (*Labridae*) avec des valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ et en $\delta^{15}\text{N}$. Le quatrième groupe est formé par le syngnathe *Nerophis maculatus* qui n'est présent que sur la Côte Bleue et la rade Sud et qui présente des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ les plus fortes. Les signatures moyennes en C diffèrent de manière significative d'un site à l'autre contrairement aux valeurs en $\delta^{15}\text{N}$. Le site de la Côte Bleue a des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ supérieures ou égales à celles de la rade Sud de Marseille ; le plateau des Chèvres possède les $\delta^{13}\text{C}$ les plus faibles.

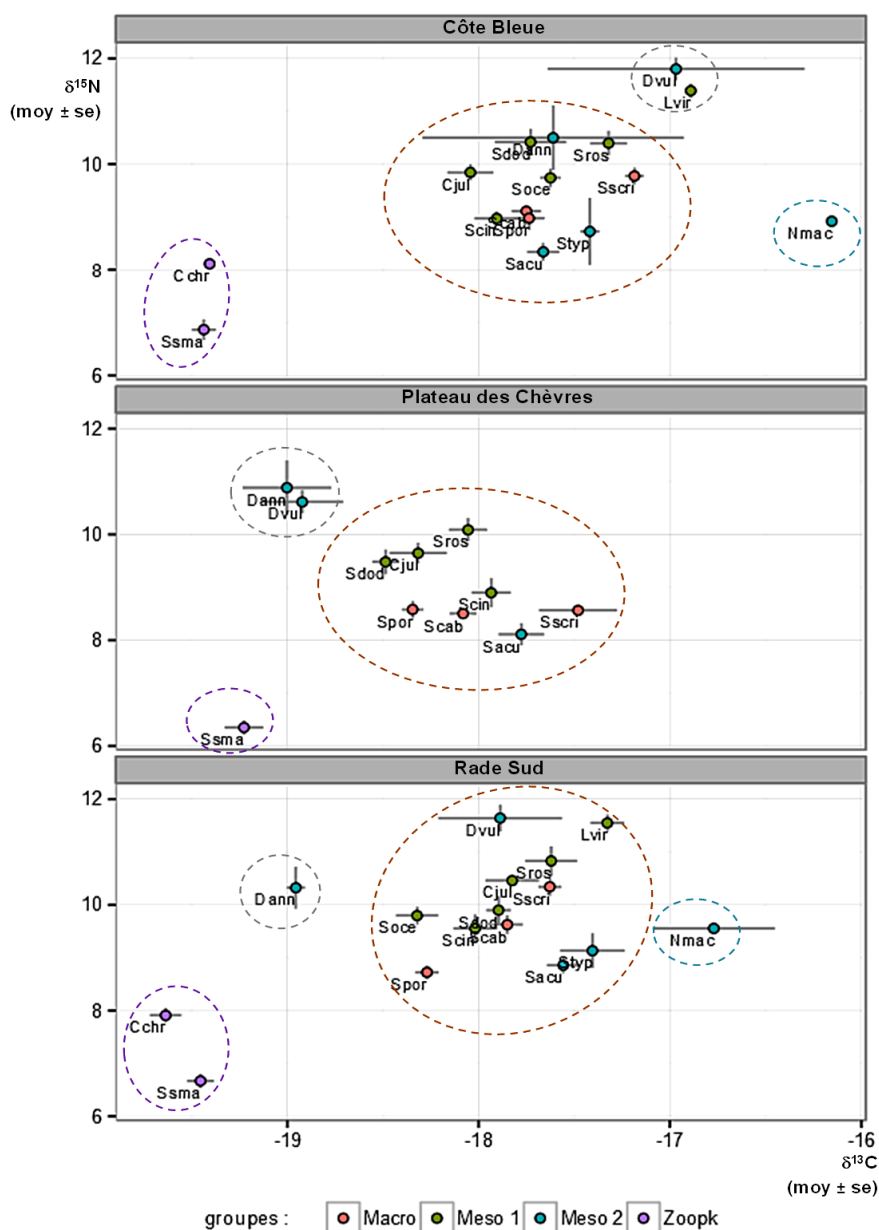


Figure 4 : Signatures isotopiques moyennes en $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C} \pm$ erreur-standard obtenues pour les 16 espèces étudiées. Les quatre groupes trophiques sont représentés par : Macro = macrocarnivores, Meso 1 = mésocarnivores de type 1, Meso 2 = mésocarnivores de type 2, Zoopk = zooplantonophages.

Chez la plupart des espèces de poissons étudiées aucune corrélation significative n'est observée entre la longueur totale des individus et les signatures isotopiques en carbone quel que soit le site. En revanche pour le $\delta^{15}\text{N}$, les régressions linéaires sont significatives pour la quasi-totalité des espèces et impliquent donc de faire des Ancova pour comparer les sites (Tableau II).

Tableau II : Résultats des tests statistiques analysant l'influence du facteur site sur les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ selon les différentes espèces de poissons. La colonne « Analyses » donne le test appliqué, soit Anova, soit Ancova, en fonction du résultat significatif ou non des régressions linéaires entre la longueur totale des poissons et les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$. Test *a posteriori* = Student-Newman-Keuls.

Espèces	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
	Analyses	Test <i>a posteriori</i>	Analyses	Test <i>a posteriori</i>
<i>Chromis chromis</i>	Anova	CB>RS	Anova	CB=RS
<i>Coris julis</i>	Ancova	PC<RS et CB =PC=RS	Ancova	RS>CB>PC
<i>Diplodus annularis</i>	Anova	CB=PC=RS	Ancova	CB=PC=RS
<i>Diplodus vulgaris</i>	Anova	CB>PC et RS=PC=CB	Ancova	CB>RS>PC
<i>Labrus viridis</i>	Anova	CB>RS	Ancova	CB=RS
<i>Nerophis maculatus</i>	Anova	CB=RS	Anova	CB=RS
<i>Scorpaena porcus</i>	Ancova	CB>RS>PC	Ancova	CB=PC=RS
<i>Serranus cabrilla</i>	Anova	CB=PC=RS	Ancova	RS>CB>PC
<i>Serranus scriba</i>	Anova	CB>PC>RS	Ancova	RS>CB>PC
<i>Spicara smaris</i>	Ancova	PC>RS>CB	Ancova	CB>RS>PC
<i>Symphodus cinereus</i>	Ancova	CB=PC=RS	Ancova	RS>CB>PC
<i>Symphodus doderleini</i>	Anova	CB>RS>PC	Ancova	RS>CB>PC
<i>Symphodus ocellatus</i>	Anova	CB>RS	Ancova	CB=RS
<i>Symphodus rostratus</i>	Anova	CB>RS>PC	Ancova	RS>CB>PC
<i>Syngnathus acus</i>	Anova	CB=RS	Ancova	RS>PC>CB
<i>Syngnathus typhle</i>	Anova	CB=RS	Anova	CB=RS

3.2. Variations des concentrations ($\mu\text{g.g}^{-1}$) des éléments traces entre les 3 sites marseillais et la station témoin de la rade d'Hyères

Les résultats des tests statistiques montrent des concentrations en éléments traces différentes selon les sites et les espèces.

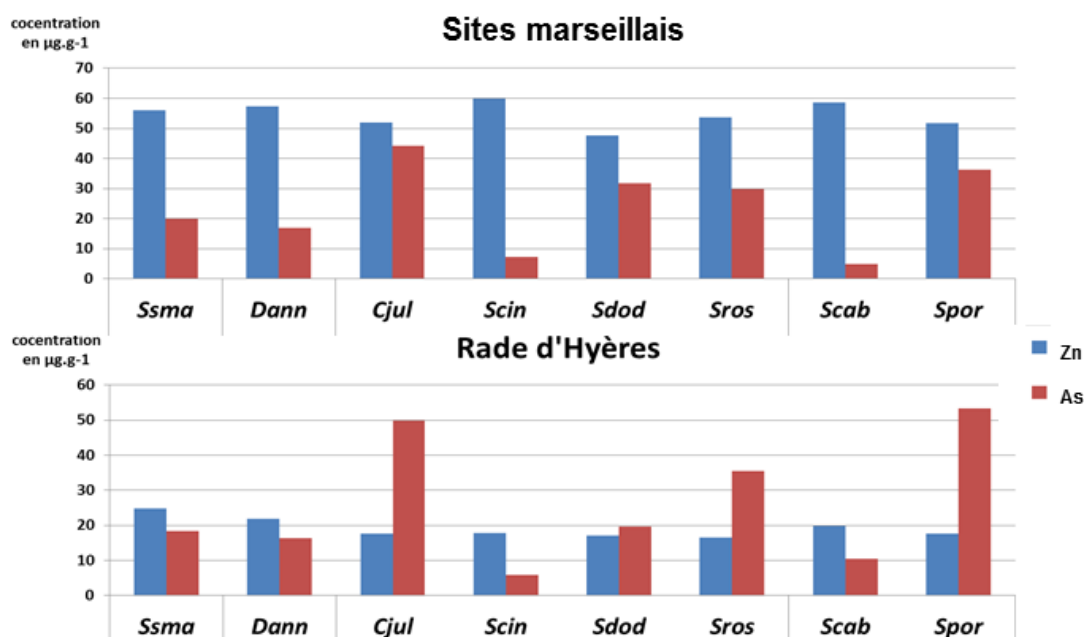
En ce qui concerne les sites de la Côte Bleue, la rade Sud et le plateau des Chèvres aucune différence significative n'a été observée, ces sites sont regroupés par la suite sous le terme sites marseillais. En revanche, dans les 3 sites marseillais la teneur en éléments traces est significativement supérieure à celle du site témoin de la rade d'Hyères, avec une teneur moyenne dans les chairs de poisson qui est supérieure, soit de $9 \mu\text{g.g}^{-1}$ contre $5.29 \mu\text{g.g}^{-1}$ à Hyères (Tableau III).

Tableau III : Concentrations moyennes en éléments traces en $\mu\text{g.g}^{-1}$ dans les espèces de poissons des herbiers de posidonie dans les trois sites Marseillais et dans la rade d'Hyères. PC = plateau des Chèvres ; RS = rade Sud de Marseille ; CB = Côte Bleue ; RH = rade d'Hyères.

Familles	Espèces	Catégories trophiques	Sites marseillais			Site témoin
			PC	RS	CB	RH
Scorpaenidae	<i>Scorpaena porcus</i>	Macrocarvivores	10.19	10.87	9.32	8.14
Serranidae	<i>Serranus cabrilla</i>	Macrocarvivores	8.20	6.29	7.63	3.74
Serranidae	<i>Serranus scriba</i>	Macrocarvivores	-	6.20	7.45	5.34
Sparidae	<i>Diplodus annularis</i>	Mésocarnivore 2	7.28	9.67	9.11	4.53
Sparidae	<i>Diplodus vulgaris</i>	Mésocarnivore 2	12.29	10.33	7.66	-
Centracanthidae	<i>Spicara smaris</i>	Zooplantonophage	10.09	7.12	9.60	6.02
Pomacentridae	<i>Chromis chromis</i>	Zooplantonophage	-	7.28	8.08	3.76
Labridae	<i>Coris julis</i>	Mésocarnivore 1	10.20	11.13	12.26	8.09
Labridae	<i>Labrus viridis</i>	Mésocarnivore 1	-	7.95	7.10	5.26
Labridae	<i>Symphodus cinereus</i>	Mésocarnivore 1	9.52	7.17	7.10	3.01
Labridae	<i>Symphodus doderleini</i>	Mésocarnivore 1	12.05	8.24	8.36	4.71
Labridae	<i>Symphodus ocellatus</i>	Mésocarnivore 1	-	10.09	9.42	5.10
Labridae	<i>Symphodus rostratus</i>	Mésocarnivore 1	9.00	8.98	11.67	6.17

Au niveau des éléments traces à proprement parlé, les teneurs dans les différents sites varient selon le même patron, le zinc est le métal trace le plus représenté ($45.17 \mu\text{g.g}^{-1}$) en moyenne, suivit par l'arsenic ($23.35 \mu\text{g.g}^{-1}$), puis avec des concentrations moyennes plus faibles de l'ordre de 1.84 à $0.02 \mu\text{g.g}^{-1}$ se positionnent respectivement le chrome, le cuivre, le mercure, le nickel, le baryum, le plomb et pour finir le cadmium. Les patterns de concentration dans les huit espèces communes aux quatre sites sont représentés sur la figure 5.

Concentrations moyennes en Zn et As pour les 8 espèces communes



Concentrations moyennes en éléments traces pour les 8 espèces communes

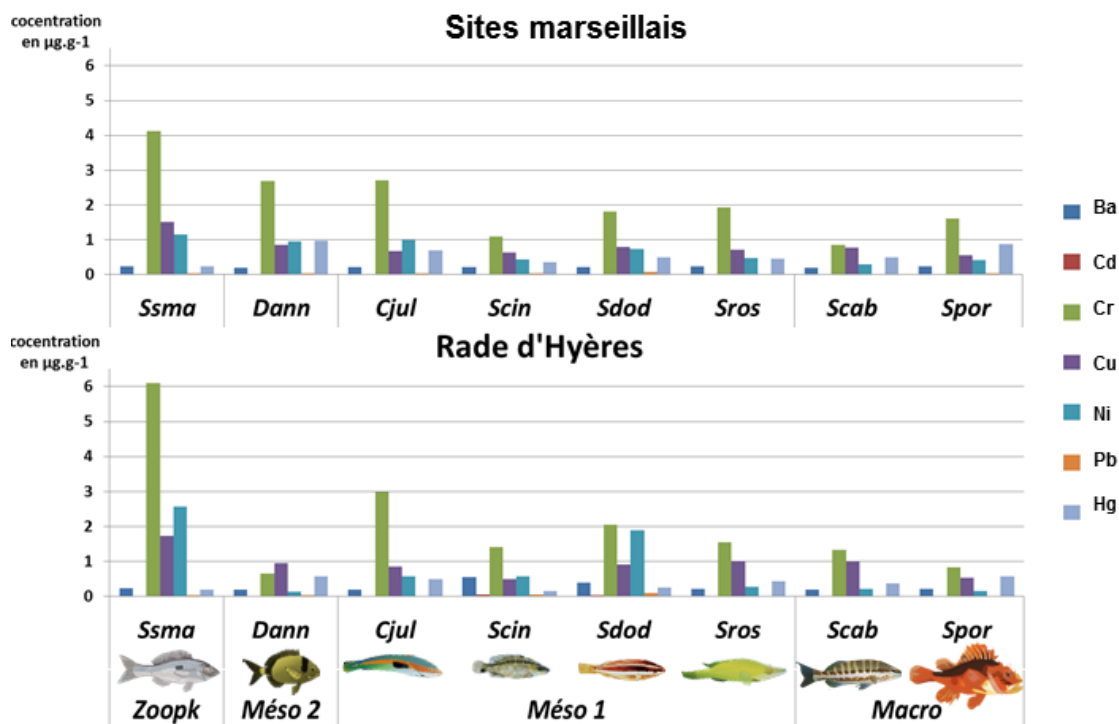


Figure 5 : Concentrations moyennes des éléments traces (µg.g⁻¹) dans les chairs des 8 poissons présents aussi bien dans la rade d'Hyères que dans les trois sites marseillais. Le zinc et l'arsenic sont séparés des autres éléments traces pour faciliter la lecture des graphiques, car présents en concentrations beaucoup plus élevées. As = arsenic ; Ba = baryum ; Cd = cadmium ; Cr = chrome ; Cu = cuivre ; Ni = nickel ; Pb = plomb ; Zi = zinc et Hg = mercure. Cjul = *Coris julis* ; Dann = *Diplodus annularis* ; Scab = *Serranus cabrilla* ; Scin = *Symphodus cinereus* ; Sdod = *Symphodus doderleini* ; Spor = *Scorpaena porcus* ; Sros = *Symphodus rostratus* ; Ssma = *Spicara smaris*. Zoopk = zooplanctonophage ; Méso2 = mésocarnivore de type 2 ; Méso1 = mésocarnivores de type 1 ; Macro = macrocarnivores

Les analyses en composantes principales (ACP) nous permettent d'observer un regroupement par espèce similaire quel que soit le site. Les espèces des sites marseillais semblent se répartir selon le même pattern. Les espèces *Scorpaena porcus*, *Serranus scriba*, *Diplodus vulgaris*, *Symphodus doderleini* et *Coris julis* sont principalement associées au mercure, arsenic et plomb aussi bien à Marseille qu'à Hyères. Au contraire, *Spicara maena* reflète une association différente selon le site ; elle est fortement associée au chrome, cadmium, nickel, baryum, cuivre et zinc à Marseille, et avec le cuivre, le nickel et le chrome dans la rade d'Hyères (figure 6).

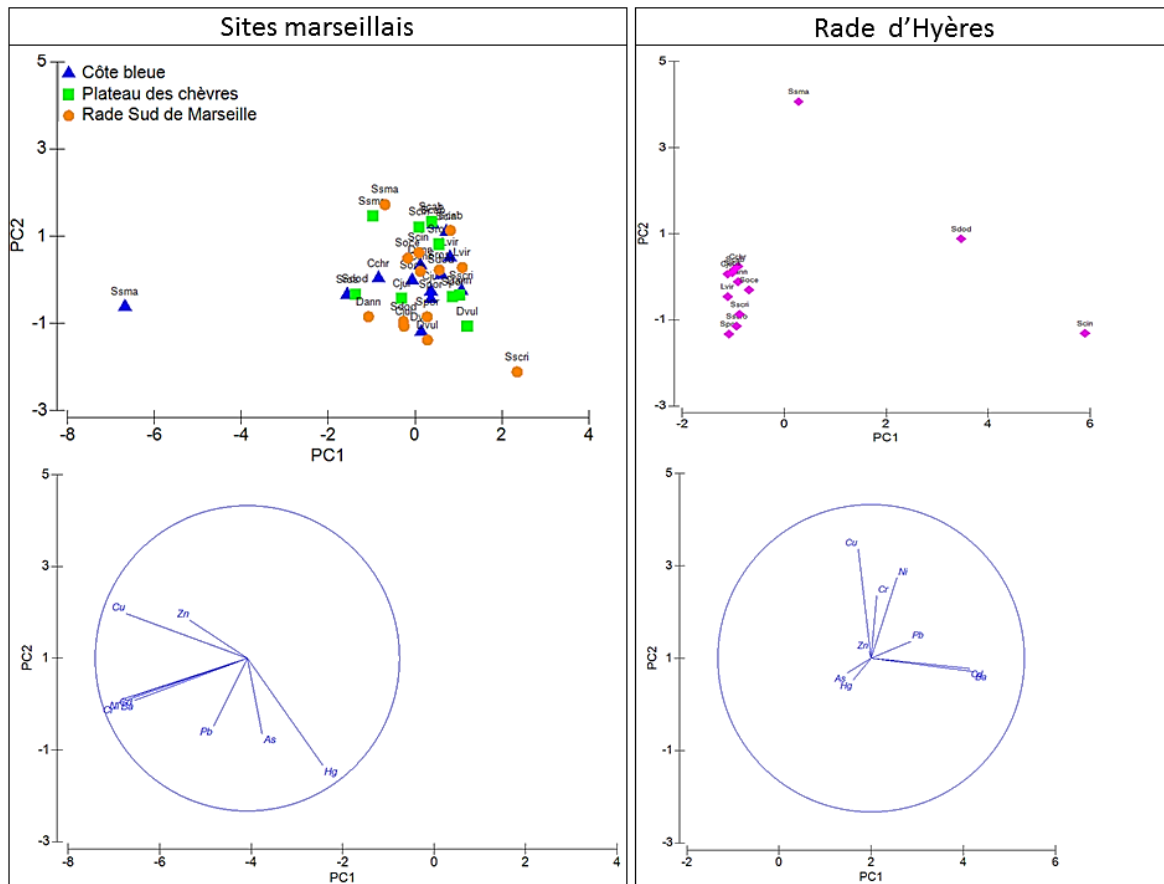


Figure 6 : Analyses en composantes principales (ACP) des éléments traces ($\mu\text{g.g}^{-1}$) dans les chairs des poissons avec d'une part la projection des espèces sur le plan factoriel et d'autre part la projection des variables (les 9 éléments traces) sur le même plan aussi bien dans les trois sites Marseillais que dans la rade d'Hyères. As = arsenic ; Ba = baryum ; Cd = cadmium ; Cr = chrome ; Cu = cuivre ; Ni = nickel ; Pb = plomb ; Zi = zinc et Hg = mercure. Cchr = *Chromis chromis* ; Cjul = *Coris julis* ; Dann = *Diplodus annularis* ; Dvul = *Diplodus vulgaris* ; Lvir = *Labrus viridis* ; Scab = *Serranus cabrilla* ; Scin = *Symphodus cinereus* ; Sdod = *Symphodus doderleini* ; Soce = *Symphodus ocellatus* ; Spor = *Scorpaena porcus* ; Sros = *Symphodus rostratus* ; Sscri = *Serranus scriba* ; Ssma = *Spicara smaris*.

Discussion

Les poissons étudiés sont des espèces non migratrices et plus ou moins sédentaires dans l'herbier de posidonie. Leurs signatures en isotopes stables pourraient donc refléter leur alimentation locale et l'état du milieu environnant. Ces espèces présentent des différences de signatures en isotopes stables pour le carbone mais pas pour l'azote. Cela signifie que dans les trois sites marseillais (Côte Bleue, Rade Sud et Plateau des Chèvres), les niveaux trophiques respectifs des différentes espèces de poissons restent sensiblement les mêmes. Par contre, on observe des différences significatives en $\delta^{13}\text{C}$ qui sont principalement dues aux influences dites marines ou terrestres. Pour le site de la Côte Bleue, les valeurs des signatures isotopiques en carbone traduisent une influence majoritairement marine. Le plateau des Chèvres quant à lui illustre une influence plus terrestre avec des $\delta^{13}\text{C}$ en relativement plus faibles. En effet, ce site est soumis de façons régulières à des apports d'origines terrestres et anthropiques par l'émissaire de Cortiou. La rade Sud de Marseille se place à un niveau intermédiaire avec des apports ponctuels d'origine terrestre par le rejet en mer de l'Huveaune lors de forts épisodes pluvieux.

Les deux espèces *Spicara smaris* et *Chromis chromis*, dont les signatures en $\delta^{15}\text{N}$ et en $\delta^{13}\text{C}$ sont les plus basses, sont connues pour être des zooplanctonophages (Bell et Harmelin-Vivien, 1983 ; Khoury, 1984 ; Pinnegar et Polunin, 2000). Leur régime alimentaire est dominé par les mêmes catégories de proies zooplanctoniques, essentiellement de petits crustacés ayant une signature isotopique faible.

Les crénilabres (*Symphodus* spp.), les syngnathes du genre *Syngnathus*, la rascasse (*Scorpaena porcus*) et les serrans (*Serranus scriba* et *S. cabrilla*) ont des signatures très proches et se placent à des niveaux intermédiaires. Ceci est certainement dû au fait que ces espèces consomment des proies benthiques et vagiles ayant des signatures isotopiques assez proches bien que de natures différentes (gastéropodes, petits crustacés pour les crénilabres et les syngnathes ; crevettes, crabes et petits poissons pour les rascasses et les serrans). Il est important de préciser qu'un comportement alimentaire opportuniste conduisant à la consommation de proies de signatures en $\delta^{15}\text{N}$ plus élevées, donnera une signature isotopique moyenne égale à la valeur moyenne des signatures isotopiques des différentes proies.

En outre, il est intéressant de constater que les deux espèces de *Diplodus* considérées comme omnivores (Bell et Harmelin-Vivien, 1983 ; Sala et Ballesteros, 1997) ont des signatures en $\delta^{15}\text{N}$ généralement supérieures à celles des espèces macrocarnivores, telles que *Scorpaena porcus* et *Serranus cabrilla*, ce qui pourrait les placer à un niveau trophique plus élevé. Cependant, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ plus élevées chez les *Diplodus* spp. Soit, ils ont consommé des proies avec un $\delta^{15}\text{N}$ élevé avant d'avoir été capturés, soit ils présentent un fractionnement isotopique de l'azote plus fort que chez les autres espèces étudiées (Cresson *et al.*, 2014). Des valeurs élevées en $\delta^{15}\text{N}$ peuvent également s'expliquer par une consommation de proies de plus grande taille, ayant une signature plus élevée, chez des individus plus gros et donc plus âgés (Darnaude, 2003 ; Xu *et al.*, 2007). Une autre possibilité est l'augmentation de l'excrétion en $\delta^{14}\text{N}$ en fonction de l'âge (Peterson et Fry, 1987). Les individus analysés, quel que soit le site, présentaient une corrélation positive entre les tailles des individus et leurs

signatures en $\delta^{15}\text{N}$. Dans ce cas, l'âge et la taille peuvent également s'avérer jouer un rôle dans l'interprétation des résultats.

Le labre *Labrus viridis*, se place à un niveau trophique élevé de par sa préférence alimentaire (poissons) qui le classe dans le groupe des piscivores.

Les fortes valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ observées chez le syngnathe *Nerophis maculatus*, présent dans la rade Sud et la Côte Bleue, suggèrent une forte influence de la posidonie dans le réseau trophique de cette espèce. Ce poisson se nourrit en effet d'harpacticoïdes qui sont des copépodes benthiques consommant probablement des débris de posidonie. Leurs signatures en carbone sont donc très proches de celles de la posidonie qui possède des signatures en $\delta^{13}\text{C}$ très élevées (16 ‰).

Pour les éléments traces, nous avons mis en évidence que les espèces des sites marseillais se regroupent selon le même pattern, ce qui signifie que les poissons de la Côte Bleue, de la rade Sud de Marseille et du plateau des Chèvres réagissent de la même manière à la contamination du milieu par les éléments traces. Les diverses influences des trois sites telles que les apports du Rhône, de l'émissaire de Cortiou, de la ville de Marseille et de son port autonome, influencent donc de manière globale l'ensemble des sites marseillais. Les 5 espèces qui possèdent des taux de concentrations moyennes les plus importants en éléments traces sont *Diplodus vulgaris*, *Coris julis*, *Scorpaena porcus* et *Symphodus ocellatus*, espèces qui possèdent des $\delta^{15}\text{N}$ moyens à élevés, et le zooplanctonophage *Spicara smaris*. Cette espèce, dont le $\delta^{15}\text{N}$ est le plus faible pour les trois sites, présente des taux de contaminations importants sur la Côte Bleue ainsi qu'au plateau des Chèvres. Ceci pourrait indiquer une consommation d'agrégats de matière organique particulière fortement contaminés en plus du zooplancton.

Pour l'espèce de macrocarnivore *Scorpaena porcus* qui est décrite comme sédentaire, les $\delta^{15}\text{N}$ sont moyens ce qui semble traduire une consommation de gros crustacés tels que des crabes et des crevettes plutôt que de poissons. Les résultats des dosages en éléments traces dans leurs chairs montrent des teneurs totales élevées dans les 4 sites.

Entre les sites marseillais et la rade d'Hyères, il y a des oppositions entre les regroupements des métaux traces dans les différentes espèces. Les concentrations moyennes en zinc sont supérieures aux concentrations moyennes en arsenic. En général, nous avons observé des concentrations moyennes en zinc et en arsenic pour Marseille, supérieures à celles de la rade d'Hyères. La concentration en Zn est généralement plus élevée que celle en As, sauf pour *Coris julis*, *Symphodus rostratus* et *Scorpaena porcus* dans la rade d'Hyères (figure 5). Ce résultat implique qu'il faudrait s'intéresser de manière approfondie aux teneurs en éléments traces dans les invertébrés benthiques qui sont les proies préférentielles de ces espèces et des autres poissons étudiés, afin de mieux appréhender la contamination dans le compartiment des poissons de cet écosystème.

Conclusion

Les traceurs écologiques représentent une méthode d'étude indirecte de l'écologie trophique des organismes, sur la base du postulat « je suis ce que je mange ». Néanmoins, les valeurs de ces paramètres (bio)chimiques mesurés dans les tissus sont le résultat d'un ensemble de processus qui se déroulent en amont de l'incorporation des différents éléments dans la matière biologique analysée. Leur utilisation en tant que traceurs est parfois difficile à interpréter, car plusieurs facteurs et mécanismes de régulation différents existent selon les espèces et les conditions du milieu. En réponse aux objectifs annoncés, les résultats obtenus sont préliminaires et permettent de mettre en évidence les grandes tendances des signatures isotopiques stables et des concentrations en éléments traces chez plusieurs espèces de poissons des herbiers de posidonie. Ils renseignent et permettent d'orienter la suite de ce projet vers une interprétation plus fine et plus complète de l'ensemble de l'écosystème en prenant en compte d'autres compartiments, comme les crustacés, proies les plus consommées.

Les principaux résultats obtenus montrent une organisation du réseau trophique des poissons des herbiers de posidonie similaire dans les trois sites marseillais malgré diverses influences anthropiques. Les signatures isotopiques indiquent que les poissons se répartissent sur au moins deux niveaux trophiques différents, depuis les zooplanctonophages (*Spicara* et *Chromis*) jusqu'aux macrocarnivores (*Scorpaena* spp. et *Serranus* spp.). Le genre *Diplodus* présente les $\delta^{15}\text{N}$ les plus élevés (10.3 et 11.8 ‰) ainsi que des $\delta^{13}\text{C}$ moyens compris entre -19 et -17 ‰. Ce résultat étonnant s'explique soit par une consommation de proies avec un $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé, soit par un fractionnement isotopique de l'azote plus fort que chez les autres espèces, mais ne traduit pas un niveau trophique supérieur (Cresson *et al.*, 2014).

Des variations spatiales significatives dans les teneurs en contaminants sont observées entre les sites marseillais et le site témoin de la rade d'Hyères. Les espèces se regroupent entre elles selon les mêmes patterns de distribution pour les trois sites marseillais. Les métaux traces affichent également le même patron, avec de fortes concentrations en zinc, arsenic et chrome, et de plus faibles concentrations en mercure, cadmium et plomb pour les quatre sites. Les espèces présentant un $\delta^{15}\text{N}$ élevé possèdent généralement des taux de contamination plus importants. C'est par exemple le cas de la girelle *Coris julis*, du sar *Diplodus vulgaris* ou de la rascasse *Scorpaena porcus*. L'espèce *Spicara smaris* avec un $\delta^{15}\text{N}$ le plus faible détient étonnamment des taux de contaminations importants sur la Côte Bleue, le plateau des Chèvres et la rade d'Hyères montrant que le $\delta^{15}\text{N}$ n'est pas toujours un bon proxy du taux de contamination des espèces. Dans le cas de *S. smaris*, il est probable que ce zooplanctonophage puisse se nourrir directement sur la matière particulaire qui présente de fortes concentrations en contaminants dû au phénomène d'adsorption des contaminants sur les particules.

Comprendre les relations existant entre le climat, les apports des fleuves au milieu marin, les ressources exploitables et les activités anthropiques est donc un enjeu majeur, tant sur le plan de la connaissance scientifique que de la gestion économique, voire sociétale, du milieu côtier. Le couplage des analyses des isotopes stables et des contaminants, constitue l'un des aspects les plus innovants de ce projet, permet de caractériser la bioaccumulation dans les réseaux trophiques de l'écosystème de l'herbier de posidonie et constitue une base de référence sur les concentrations en contaminants dans les poissons qui y vivent et sont consommés ensuite par l'homme.

Références bibliographiques

- Anderson MJ (2001) A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26 (1):32-46
- Anderson M, Gorley R, Clarke K (2005) PERMANOVA. Permutational multivariate analysis of variance, a computer program Department of Statistics, University of Auckland 24
- Bănaru D (2008) Influence des apports du Danube sur les réseaux trophiques des poissons de la côte roumaine (mer Noire). Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille 2
- Bell J, Harmelin-Vivien M (1983) Fish fauna of French Mediterranean *Posidonia oceanica* seagrass meadows. II: feeding habits. *Tethys* 11 (1):1-14
- Cossa D, Thibaud Y, Roméo M, Gnassia-Barelli M (1990) Le mercure en milieu marin: Biogéochimie et écotoxicologie. Rapports scientifiques et techniques de l'IFREMER
- Cresson P, Ruitton S, **Ourgaud M**, Harmelin-Vivien M (2014) Contrasting perception of fish trophic level from stomach content and stable isotope analyses: A Mediterranean artificial reef experience. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 452:54-62
- Darnaude A (2003) Apports fluviaux en zone côtière et réseaux trophiques marins benthiques: Transfert de matière organique particulaire terrigène jusqu'aux poissons plats au large du Rhône. Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille 2
- DeNiro MJ, Epstein S (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et cosmochimica acta* 42 (5):495-506
- Dierking J, Wafo E, Schembri T, Lagadec V, Nicolas C, Letourneur Y, Harmelin-Vivien M (2009) Spatial patterns in PCBs, pesticides, mercury and cadmium in the common sole in the NW Mediterranean Sea, and a novel use of contaminants as biomarkers. *Marine Pollution Bulletin* 58 (11):1605-1614
- Fry B, Anderson RK, Entzeroth L, Bird JL, Parker PL (1984) ^{13}C enrichment and oceanic food web structure in the northern Gulf of Mexico. *Contrib Mar Sci* 27:49-63
- Gray JS (2002) Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin* 45 (1):46-52
- Harmelin-Vivien M (1983) Ichthyofaune des herbiers de posidonies des côtes provençales françaises. Rapport de la Commission internationale pour la Mer Méditerranée 28:161-163
- Harmelin-Vivien M (1984) Ichthyofaune des herbiers de posidonies du parc naturel régional de Corse. In: First International Workshop on *Posidonia oceanica* Beds. GIS Posidonie, Marseille. pp 291-301
- Harmelin-Vivien M, Cossa D, Crochet S, Bănaru D, Letourneur Y, Mellon-Duval C (2009) Difference of mercury bioaccumulation in red mullets from the north-western Mediterranean and Black seas. *Marine Pollution Bulletin* 58 (5):679-685
- Harmelin-Vivien M, Kaim-Malka R, Ledoyer M, Jacob-Abraham S (1989) Food partitioning among scorpaenid fishes in Mediterranean seagrass beds. *Journal of Fish Biology* 34 (5):715-734
- Harrigan P, Zieman J, Macko S (1989) The base of nutritional support for the gray snapper (*Lutjanus griseus*): an evaluation based on a combined stomach content and stable isotope analysis. *Bulletin of Marine Science* 44 (1):65-77
- Khoury C. (1984) Ethologies alimentaires de quelques espèces de poissons de l'herbier de Posidonies du Parc national de Port-Cros. In: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et J. Olivier (eds), 1st intern. Workshop *Posidonia oceanica* beds, GIS Posidonie Publ., 1: 335-347
- Kohn MJ (1999) Enhanced: You are what you eat. *Science* 283 (5400):335-336
- Koyama J, Nanamori N, Segawa S (2000) Bioaccumulation of Waterborne and Dietary Cadmium by Oval Squid, *Sepioteuthis lessoniana*, and its Distribution Among Organs. *Marine Pollution Bulletin* 40 (11):961-967
- Lahaye V, Bustamante P, Spitz J, Dabin W, Das K, Pierce GJ, Caurant F (2005) Long-term dietary segregation of common dolphins *Delphinus delphis* in the Bay of Biscay, determined using cadmium as an ecological tracer. *Marine Ecology Progress Series* 305:275-285
- Lajtha K, Marshall J (1994) Sources of variation in the stable isotopic composition of plants, Lajtha K., Michener RH, *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 1-21. Blackwell Scientific Publications, Oxford
- Lassus P, Cossa D (1989) Le cadmium en milieu marin: biogéochimie et écotoxicologie.
- Legendre P, Anderson MJ (1999) Distance-based redundancy analysis: testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological Monographs* 69 (1):1-24

- McArdle BH, Anderson MJ (2001) Fitting multivariate models to community data: a comment on distance-based redundancy analysis. *Ecology* 82 (1):290-297
- Minagawa M, Wada E (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et cosmochimica acta* 48 (5):1135-1140
- Neff JM (2002) Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water. Elsevier
- Ostrom PH, Fry B (1993) Sources and cycling of organic matter within modern and prehistoric food webs. In: *Organic geochemistry*. Springer, pp 785-798
- Owens NJP (1987) Natural variations in ^{15}N in the marine environment. *Advances in marine biology* 24:389
- Peterson BJ, Fry B (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics*:293-320
- Pinnegar JK, Polunin NV (2000) Contributions of stable-isotope data to elucidating food webs of Mediterranean rocky littoral fishes. *Oecologia* 122 (3):399-409
- Post DM (2002) Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology* 83 (3):703-718
- Sala E, Ballesteros E (1997) Partitioning of space and food resources by three fish of the genus *Diplodus* (Sparidae) in a Mediterranean rocky infralittoral ecosystem. *Oceanographic Literature Review* 44 (11)
- Smit AJ, Brearley A, Hyndes GA, Lavery PS, Walker DI (2006) $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ analysis of a *Posidonia sinuosa* seagrass bed. *Aquatic Botany* 84 (3):277-282
- Trueman CN, McGill RA, Guyard PH (2005) The effect of growth rate on tissue-diet isotopic spacing in rapidly growing animals. An experimental study with Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19 (22):3239-3247
- Vander Zanden M, Rasmussen JB (2001) Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnology and oceanography* 46 (8):2061-2066
- Vander Zanden MJ, Casselman JM, Rasmussen JB (1999) Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes. *Nature* 401 (6752):464-467
- Xu J, Zhang M, Xie P (2007) Size-related shifts in reliance on benthic and pelagic food webs by lake anchovy. *Ecoscience* 14 (2):170-177

