

# Ecologie et teneurs en éléments traces de l'Espadon (*Xiphias gladius* Linné) autour des côtes corses

---

Réalisation du mémoire AMANDINE COLLIENNE  
Promoteur ULg Prof. Sylvie GOBERT  
Promoteur STARESO Dr Pierre LEJEUNE



Référence Convention OEC  
N° 13/181  
Département: Soutien aux activités  
de la pêche et de l'aquaculture et  
gestion des ressources halieutiques  
Service n°16

## ***Résumé***

Les buts de cette étude étaient de déterminer la niche trophique, par l'utilisation de deux techniques complémentaires: les isotopes stables et l'analyse de contenus stomacaux de l'espadon (*Xiphias gladius* L.) de la région de Corse, de connaître son niveau de contamination à certains éléments traces, de mettre en relation ces deux pôles de recherche ainsi que de déterminer si les espadons corses constituent une sous-population de la population méditerranéenne.

Des échantillons d'espadons et de proies sont prélevés au niveau de quatre sites corses (Calvi, Bastia, Saint-Florent et Ajaccio) entre le 6 décembre 2011 et le 8 mai 2012 par l'intermédiaire de pêcheurs locaux.

Les résultats obtenus pour l'analyse des contenus stomacaux, montrent une tendance à une proportion de téléostéens plus importante que celle des céphalopodes dans le régime alimentaire des espadons prélevés au niveau de la Corse.

Les isotopes stables semblent indiquer une préférence pour le maquereau (*Scomber scombrus*), la bogu (*Boops boops*), la sépiole (*Rossia macrosoma*) et le céphalopode *Toradores sagittatus* dans l'alimentation de ce prédateur. Une distinction trophique entre les espadons juvéniles et les adultes peut également être suggérée. Aucune conclusion n'a pu être tirée concernant les proportions des proies dans le régime alimentaire de l'espadon à partir du logiciel SIAR.

A partir de l'étude des concentrations en éléments traces des tissus musculaires des espadons, une faible biomagnification des éléments Al, Mn, Co, Ni, Cu, Se, Ag, Mo, As et Be paraît. Les éléments potentiellement biomagnifiés sont le Cr, le Bi, le Sn et plus particulièrement le Zn. Aucune relation de taille n'a pu être mise en évidence pour les concentrations en éléments traces et isotopes lourds (carbone et azote).

Les résultats obtenus dans cette étude ne sont pas suffisants pour affirmer l'existence d'une sous-population corse d'espadons au sein de la population méditerranéenne.

## ***Abréviations***

Cfr = Confer

Fig. = Figure

L = Longueur

l = largeur

LC = Limite critique,

LD = Limite de détection,

LQ = Limite de quantification

M = Mâle,

F = Femelle

min = minimum,

max = maximum

ND = Donnée non disponible

N = Nord, S = Sud, E= Est, O = Ouest

Tabl = Tableau

### Code des espèces

AL = Allache (*Sardinella aurita*)

AN = Anchois (*Engraulis encrasicolus*)

BOG = Bogue (*Boops boops*)

CHI = Chinchard commun (*Trachurus trachurus*)

CLM 1 = Calmar 1 (*Toradores sagittatus*)

CRE 1 = Crevette 1 (*Parapaneus longirostris*)

CRE 2 = Crevette2 (*Plesionika martia*)

ESP M = Espadon (*Xiphias gladius*) : muscle latéral

ESP EST = Espadon (*Xiphias gladius*) : muscle de l'estomac

MER = Merlan bleu (*Micromesistius poutassou*)

MRU = Merlu blanc (*Merluccius merluccius*)

SEP = Sépiole (*Rossia macrosoma*)

SAR = Sardine (*Sardina pilchardus*)

# Table des matières

I.	Avant-propos .....	1
II.	Objectifs .....	2
III.	Introduction .....	3
	A. Contexte général .....	3
	A.1 La Méditerranée .....	3
	A.2 La Corse .....	5
	B. Biologie de l'espadon .....	5
	C. Pêche à l'espadon .....	9
	D. Méthodes d'étude .....	12
	D.1 Contenus stomacaux .....	12
	D.2 Les isotopes stables .....	12
	D.3 Les éléments traces .....	14
IV.	Matériel et méthode .....	16
	a. Stratégie d'échantillonnages .....	16
	A.2 Campagnes de pêche .....	16
	A.2.1 Les espadons .....	16
	A.2.2 Les proies .....	17
	A.2.3 Producteurs primaires de la colonne d'eau .....	19
	B. Préparation des échantillons .....	19
	B.1 Les contenus stomacaux .....	19
	B.2 Les isotopes .....	20
	B.2.1 Les proies .....	20
	B.2.2 Les espadons .....	20
	B.2.3 Les producteurs primaires .....	20
	B.3 Les éléments traces .....	20
	C. Analyses .....	21
	C.1 Les contenus stomacaux .....	21
	C.2 Les isotopes .....	21
	C.3 Les éléments traces .....	22
	D. Analyses statistiques .....	23

V.	Résultats.....	24
	A. Contenus stomacaux.....	25
	B. Isotopes stables.....	26
	C. Eléments traces .....	28
VI.	Discussion.....	32
	A. Contenus stomacaux .....	32
	B. Isotopes stables .....	34
	C. Éléments traces .....	41
VII.	Conclusions et perspectives .....	48
VIII.	Annexes .....	i
	A.I Fiches pêcheurs .....	i
	A.II Description des contenus stomacaux .....	ii
	A.III Valeurs moyennes en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des échantillons considérés .....	vi
	A.IV Concentrations des différents métaux pour chaque individu traité.....	vi
	A.V Concentrations moyennes des échantillons certifiés pour chaque élément trace .....	ix

# I. Avant-propos

La Méditerranée est caractérisée par des niveaux élevés de capture d'espadons comparables à ceux de l'Atlantique Nord malgré son volume nettement plus faible. En 2008, les prises s'élevaient à 12 164 T et 10 572 T débarquées (poids éviscéré) pour la Méditerranée et l'Atlantique Nord respectivement (Anonymous 2010; Anonymous 2011).

Des résultats d'études génétiques ont démontré que l'espadon de Méditerranée forme un stock unique, bien que les informations sur celui-ci soient incomplètes. La Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique (ICCAT) est l'organisme responsable de la conservation des thonidés et des espèces apparentées dans l'océan Atlantique et ses mers adjacentes. Malheureusement, les données scientifiques sur la biologie même de l'espèce, sur l'état des stocks et sur l'impact des pêcheurs professionnels sont insuffisantes.

La forte demande et la haute valeur économique de l'espadon (*Xiphias gladius* Linné) font de sa pêche un marché viable. Afin de comprendre l'impact de la pêche et de gérer au mieux la conservation de cette espèce, une compréhension approfondie de son écologie et de sa chaîne trophique est importante. La connaissance de ses sources de nourriture permet notamment d'identifier de nouvelles zones de nourrissage ou de reproduction. De plus, si la population de Corse diverge de celle du reste de la Méditerranée, une surexploitation du stock mènerait à sa disparition sans possibilité de remplacement, avec comme conséquence, la disparition du marché de l'espadon au niveau de la Corse.

L'étude des concentrations en éléments traces dans les tissus des poissons est importante puisque ceux-ci peuvent être une source significative de métaux lourds chez l'Homme, transmis lors de l'alimentation (Anonymous 2004). La chair d'espadon est en plus consommée de façon relativement importante dans le monde. L'évaluation des concentrations respectives des différents éléments est d'autant plus importante que l'espadon est un grand prédateur situé au sommet de la chaîne trophique. Son métabolisme élevé l'oblige à avoir un apport continu d'énergie qui se traduit par un taux de prédation et une consommation de proies très élevés. De par leur position trophique, les espadons tendent à biomagnifier les divers polluants et sont donc particulièrement susceptibles d'atteindre de hautes concentrations en métaux traces (Bryan et al. 1979). Le taux de contamination de l'espadon

dépendra de trois facteurs majeurs: son milieu de vie, ici les côtes corses, les différentes proies qui constituent sa chaîne alimentaire et leur accumulation en éléments traces et enfin l'accumulation de ces éléments dans les tissus de celui-ci. L'étude des proies est donc une étape cruciale de la compréhension de son métabolisme. A la suite de cette capacité de biomagnification, les espadons pourraient servir de bio-indicateurs de la pollution du milieu.

## II. Objectifs

Cette étude s'intègre dans la thèse de Jessica DIJOUX, doctorante de l'université de Corte, dont les trois axes d'étude sont : l'état de population, la contamination en éléments traces et la chaîne alimentaire des espadons corses. Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet « Gestion et valorisation des eaux en Méditerranée » et du sous-projet STELLA MARE (Sustainable TEchnologies for LittoraL Aquaculture and MARine REsearch) dont les objectifs respectifs sont d'augmenter les connaissances nécessaires à la gestion de l'eau en Méditerranée et d'établir une plate-forme marine Corse.

L'objectif de ce mémoire est triple. Le premier but consiste en l'étude de la niche trophique (détermination du régime alimentaire et de la position trophique) de l'espadon (*Xiphias gladius* L.) par l'utilisation de deux techniques complémentaires : les isotopes stables et l'analyse de contenus stomacaux. Le deuxième est l'étude du taux de contamination de cette espèce aux éléments traces. Les concentrations en éléments traces d'un organisme dépendent de plusieurs facteurs abiotiques et biotiques dont le régime alimentaire. Inversement, l'étude des concentrations en éléments traces dans les espadons et dans plusieurs proies potentielles peut indiquer les relations trophiques entre les espèces. Il est donc justifié d'étudier ensemble ces deux pôles de recherche et de les mettre en relation. Le troisième objectif est de déterminer si les espadons corses constituent une sous-population de la population méditerranéenne.

### III. Introduction

#### A. Contexte général

##### A.1 La Méditerranée

La Méditerranée est une mer oligotrophe (Margalef 1985) intercontinentale, située en milieu tempéré entre les latitudes 30° et 46° Nord, séparant l'Afrique au Sud de l'Europe au Nord et de l'Asie à l'Est et dont la superficie est d'environ 2,5 millions de Km<sup>2</sup>. Elle s'étend d'Est en Ouest sur approximativement 3 800 km et la distance Nord-Sud maximale, située entre la France et l'Algérie, est d'environ 900 km. La Méditerranée est une mer profonde dont les fonds se situent en moyenne vers 1500 m de profondeur. Le plateau et le talus continental, qui constituent les principaux habitats des ressources halieutiques, sont relativement étroits dans la plupart des zones à l'exception du golfe de Gabès et de la partie septentrionale de l'Adriatique. La masse d'eau est divisée géographiquement en un bassin occidental et un oriental, séparés par des hauts fonds entre la Sicile et la Tunisie, dont les superficies respectives sont de 0,85 million et 1,65 million de km<sup>2</sup>. Le canal de Sicile d'environ 150 km de large et de profondeur maximale de 400 m, constitue une barrière physique importante entre les deux bassins. Cette mer quasi fermée est ouverte vers l'Atlantique par le détroit de Gibraltar, vers la mer Noire par le détroit du Bosphore et vers la mer Rouge, depuis 1869, par le canal de Suez. Les détroits bordant la Méditerranée, de faibles profondeurs et largeurs, limitent fortement les échanges avec les océans et mers avoisinants. La combinaison des faibles échanges aquatiques et du climat méditerranéen relativement sec donne à la Méditerranée son caractère de bassin de concentration. Les précipitations (environ 800 Km<sup>3</sup>/an) et l'eau apportée par les fleuves qui s'y jettent sont largement insuffisantes pour combler l'évaporation due à l'ensoleillement. Les apports fluviaux globaux sont estimés à 222 Km<sup>3</sup>/an, provenant principalement du Rhône (48 Km<sup>3</sup>/an) et de l'Ebre (10 Km<sup>3</sup>/an) dans la partie Nord-Ouest ainsi que du Pô (49 Km<sup>3</sup>/an) au Nord-Est. Le déficit annuel d'eau douce, estimé à 2500 Km<sup>3</sup>/an, est essentiellement compensé par l'afflux d'eau froide de l'Atlantique par le détroit de Gibraltar (1 700 Km<sup>3</sup>/an) et l'apport d'eau hyposaline venant de la mer Noire (164 Km<sup>3</sup>/an ; Bedrani et al.).

La structure hydrique de la Méditerranée est complexe. Depuis la surface jusqu'au fond, on peut identifier 3 masses d'eau différentes. Entre la surface et 150-200 m de fond, on trouve de l'eau Atlantique modifiée (EAM) provenant du réchauffement de l'eau Atlantique. Entre 300 et 800 m de profondeur réside de l'eau intermédiaire levantine (EIL) formée à partir de convections hivernales en mer Levantine. En dessous de 800 m, on observe de l'eau méditerranéenne profonde (EMP) formée par refroidissement et évaporation de l'eau de surface. Sous la thermocline permanente, la température est de  $13 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$  tout au long de l'année (Lleonart 2005). En plus de cette structure de base, la position géographique de la Méditerranée lui confère d'importantes variations saisonnières. En été, les eaux de surface se stratifient tandis qu'elles s'homogénéisent en hiver. En période estivale, l'ensoleillement réchauffe la couche de surface, ce qui diminue sa densité et lui permet de flotter sur la couche d'eau sous-jacente, créant une thermocline saisonnière à maximum 60 m de profondeur (Levitus et al. 1994). La thermocline est une barrière importante au passage des nutriments et donc un frein à la production biologique. En hiver, la thermocline saisonnière est dégradée par les tempêtes et les courants qui créent du mélange vertical permettant la remontée des nutriments vers la surface.

La Méditerranée est riche en biodiversité, issue d'espèces anciennement originaires de l'Atlantique lors de la réouverture du détroit de Gibraltar, d'espèces endémiques et depuis peu, d'espèces provenant de la mer Rouge via le canal de Suez. Sa biomasse est relativement importante et son apport de pêche était d'approximativement 1,5% de la pêche mondiale de 2005 pour une superficie d'environ 0,8% des océans mondiaux (Lleonart 2005)

Les côtes méditerranéennes, d'un périmètre de 46 000 Km, sont densément peuplées, hautement industrialisées et parmi les zones les plus anciennement occupées par les civilisations. L'activité et la concentration humaines dans les régions du pourtour de la mer Méditerranée exercent un impact fort sur l'environnement, ne serait-ce qu'en termes d'élimination des déchets et eaux usées urbaines. La Méditerranée subit aussi les effets négatifs des rejets et des émissions de polluants des industries et particulièrement les industries chimiques, pétrochimiques et métallurgiques. Le transport maritime est lui aussi important puisque 15% des activités mondiales de navigation en nombre de bateaux ont lieu en Méditerranée. En 2006, 13 000 navires marchands ont effectué 250 000 accostages dans un port interne. Elle est également un lieu de transit extrêmement utilisé puisque cette même année, 10 000 bateaux d'une taille moyenne de 50 000 T de port en lourd (capacité de

transport du bateau) l'ont traversée sans y accoster (Anonymous 2008b). En outre, la région méditerranéenne est la plus grande région touristique au monde avec un tourisme au caractère fortement saisonnier. La conjonction d'une forte anthropisation et d'un faible échange d'eau avec l'Atlantique font de cette mer un lieu de conservation des polluants en tout genre.

## A.2 La Corse

La Corse est une île rocheuse issue d'explosions volcaniques, située au Nord du bassin occidental méditerranéen à 42° N et 9° E. Sa superficie totale est de 8 682 Km<sup>2</sup>, avec une distance Nord-Sud de 184 kilomètres et une longueur totale des côtes de 1000 Km. Elle est entourée de la mer Ligure au Nord, faisant face à la France et l'Italie, séparée de la Sardaigne au Sud par le détroit de Bonifacio et baignée à l'Est par la mer Tyrrhénienne. La densité de population locale de la Corse est faible : 34 habitants au km<sup>2</sup> avec 305 674 habitants en 2009. La population est principalement concentrée au niveau de deux grandes villes côtières : Bastia et Ajaccio (Alot 2009). En été, un nombre impressionnant de touristes y séjournent, impactant significativement l'environnement.

## B. Biologie de l'espadon

L'espadon, (*Xiphias gladius* Liné 1758) membre unique de la famille des Xiphiidés, est un large poisson téléostéen pélagique. Il est caractérisé par la présence d'un rostre allongé en forme d'épée aplatie, par un corps effilé et cylindrique terminé par une large caudale hétérocerque, par des pectorales en forme de faucilles rigides ainsi que par l'absence de nageoire pelvienne (Fig.1 ; Nakamura 1985).

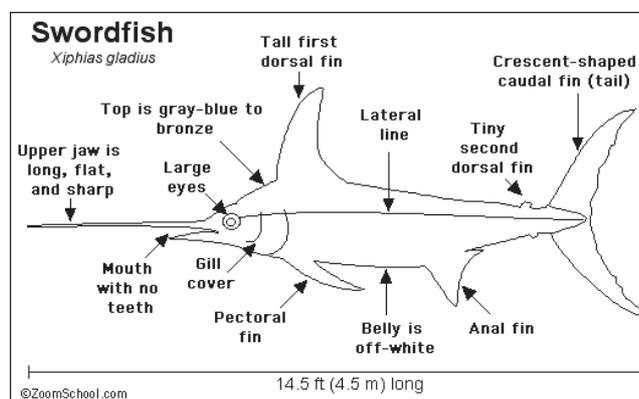


Fig 1. Schéma de la morphologie de l'espadon –Source : <http://w3.shorecrest.org>

*Xiphias gladius* est une espèce cosmopolite migratrice distribuée dans tous les océans du globe, entre les latitudes 45° Nord et Sud (Palko et al. 1981). Elle vit en milieu épi- et mésopélagique de température de surface supérieure à 13°C (Nakamura 1985). Les caractéristiques biologiques de l'espadon dépendent de la localisation de la population ainsi que du sexe. Cet animal présente, par exemple, un dimorphisme sexuel de la croissance. Les mâles sont plus rapidement matures que les femelles et grandissent plus lentement. Ils atteignent donc une taille asymptotique inférieure à celle des femelles (Marsh et Stiles 2011). D'après De la Serna (1996), la longueur à laquelle 50% des femelles méditerranéennes sont matures est de 142 cm LJFL (lower jaw fork length). La taille des espadons en méditerranée varie entre 50 et 220 cm avec une haute fréquence d'observation pour les tailles allant de 100 à 125 cm. En mer Ligure, elle varierait de 75 à 185 cm et elle peut atteindre 280 cm en Atlantique. La longévité maximale des individus en Méditerranée est de 10 ans (Lee 1992; Aliçi et Oray 2001).

La reproduction des espadons a lieu par fertilisation externe. En Méditerranée, les pontes se font durant les mois d'été, dans les eaux supérieures à 24 degrés au niveau de zones de frai. Ces zones ont été observées entre Rhodes et Chypre et au niveau du détroit de Sicile. Au moment des pontes, les individus habituellement solitaires forment de petits groupes de plusieurs individus (Palko et al. 1981; Cavallaro et al. 1991; Tserpes et al. 2008). Après les pontes, on observe généralement un comportement de migration vers des fonds nourriciers, principalement chez les femelles matures (Nakamura 1985; DeMartini et al. 2000).

*Xiphias gladius* est une espèce adaptée pour la vie dans des conditions extrêmes de température et de pression (Garey 1982). Sa vaste distribution démontre leur capacité de vivre dans une large gamme de températures variant de 14 à 31°C en surface. Ils sont également adaptés à subir rapidement de puissantes variations de températures de l'ordre de 20°C sur moins de 2 heures lors de leurs migrations verticales journalières entre la surface et 1000 m de fond (Dewar et al. 2011). Globalement, ils remontent en surface entre 0 et 100 m la nuit et descendent en direction des fonds vers 400-600 m le jour. Afin d'éviter que ces brusques changements de température affectent leur système nerveux central, les espadons ont développé un système de réchauffement du cerveau et des yeux par l'intermédiaire d'un muscle brun capable de maintenir la tête 10 à 15°C au-dessus de la température de l'eau ambiante. A l'inverse, la température du reste de leur corps, notamment au niveau des muscles et des viscères, est proche de la température de l'eau. Le réchauffement de la rétine

permet à l'espadon de détecter les mouvements de ses proies de façon nette même en eau froide, ce qui permet à ce prédateur d'exploiter une niche thermale et bathymétrique étendue (Garey 1982). Il existe des variations dans les schémas de migration entre les individus résidant en zone néritique et océanique. Ceux des zones néritiques se nourrissent de jour d'espèces benthiques en s'approchant des côtes et partent vers le large la nuit pour débusquer en surface la faune migratrice qui remonte elle aussi chasser (Carey et Robison 1981). Les espadons océaniques chassent dans la deep sound scattering layer. Cette couche, dont la limite supérieure est située vers 500 m de profondeur, est constituée d'organismes vivants qui s'y concentre pendant la journée. Le fait de se nourrir à cette profondeur a plusieurs avantages : la densité d'organisme est plus grande qu'en surface la nuit (Dewar et al. 2011) et, dans les eaux profondes, les proies ont plus de chance d'avoir une activité ralentie par le froid (Fry 1971) contrairement à l'espadon. La nuit, ils remontent également en surface pour suivre le pélagos qui migre (Carey et Robison 1981). Grâce à leurs migrations verticales, qui sont principalement dictées par la disponibilité en proies, les espadons adultes sont capables de chasser sur une large étendue de la colonne d'eau et ont accès à une large diversité de tailles et d'espèces. (Dewar et al. 2011). Cette grande diversité de proies suggère une grande souplesse individuelle de leur régime alimentaire (Chancollon et al. 2006). Les profondeurs des migrations journalières sont influencées par la luminosité. La profondeur maximale atteinte de jour augmente avec la profondeur de pénétration de la lumière dans l'eau. De façon similaire, les espadons remontent moins fortement vers la surface lors des nuits de pleine lune. Les espadons sont également capables de survivre quelques temps sous la couche de mélange, là où la concentration en oxygène est plus faible. Ils possèdent pour cela une importante surface de branchie (Carey et Robison 1981). Sa capacité de tolérance des eaux hypoxiques lui permet également de se nourrir sur une large gamme de profondeurs (Dewar et al. 2011). En plus des migrations journalières, l'espadon possède un comportement de basking qui consiste en de rapides mouvements entre la surface et des zones plus profondes (Dewar et al. 2011) au cours de la journée et qui pourrait être un moyen de se réoxygéner après de longues périodes en zones anoxiques (Carey et Robison, 1981).

Comme la plupart des grands pélagiques, l'espadon est doté d'une musculature adaptée à la nage rapide et puissante. Il peut se déplacer jusqu'à 130 Km/h en vitesse de pointe (Lee et al. 2009). Sa composition musculaire reflète sa nature de chasseur ; elle est principalement constituée de fibres blanches, adaptée à des pointes de vitesse élevées sur de courtes périodes.

Les espadons sont tout de même capables de voyager sur de longues distances via l'utilisation de courants dominants (Garey 1982).

*Xiphias gladius* est un prédateur opportuniste qui mange surtout des vertébrés et invertébrés pélagiques (Palko et al. 1981). On le retrouve généralement dans les endroits riches en poissons tels que les zones frontales et les intersections de courants (Nakamura 1985). D'après Scott et Tibbo (1968), les espadons adultes chasseraient en solitaire des bancs de poissons ou de céphalopodes qu'ils attaquent avec leur rostre afin de se nourrir des individus blessés. Les trop grosses proies seraient ainsi découpées. Shimose et al. (2007) trouvent également l'utilisation du rostre dans l'alimentation du marlin bleu (*Makaira nigricans*). Au sein d'une même espèce de proie, la fréquence de blessures liées à l'épée serait plus importante chez les individus de taille supérieure.

La composition du régime alimentaire de l'espadon varie selon les régions et les saisons tant en terme d'espèces qu'en terme de proportion des différents ordres (Chancollon et al. 2006). D'après Hernandez-Garcia (1995), les espadons du détroit de Gibraltar consomment principalement du poisson, des céphalopodes et des décapodes. Les poissons sont les plus fréquemment trouvés dans les estomacs, constituant 93,3 % des proies. Parmi cette majorité de poissons, 37,8 % sont des merlans bleus (*Micromesistius poutassou*). Les Ommastrephidés représentent la famille de céphalopodes la plus abondante à 36,5 %. *Todarodes sagittatus* en est l'espèce dominante et équivaut à 23,4 % des céphalopodes. Les Histioteuthidés sont la deuxième plus importante famille avec *Histioteuthis bonnellii* comme espèce principale, intervenant pour 11,4 %. Plus à l'intérieur de la Méditerranée, la proportion de poissons diminue au détriment des céphalopodes. Au niveau de l'Est de la Méditerranée, les céphalopodes représentent la majeure partie du régime alimentaire. Bello (1991) a répertorié 11 espèces de céphalopodes, toutes pélagiques, à savoir : *Ancistroteuthis lichtensteinii*, *Ommastrephes bartramii*, *Histioteuthis reversa*, *Ancistrocheirus lesueurii*, *Histioteuthis bonnellii*, *Heteroteuthis dispar*, *Ocythoe tuberculata rafinesque*, *Argonauta argo*, *Todarodes sagittatus*, *Cranchiidae spp.* et *Onychoteuthis banksii*. Les espèces les plus abondantes sont *Todarodes sagittatus* et *Ancistroteuthis lichtensteinii*, tous deux des céphalopodes nageurs rapides. La plupart des poissons consommés sont petits : 90% mesurent entre 3 et 8 cm de long (Bello 1991). Contrairement aux autres régions, les crustacés participent significativement à l'alimentation des espadons méditerranéens et l'espèce dont la biomasse est la plus consommée est la crevette pénéide *Funchalia woodwardi* (Relini et al. 1994).

Dans les eaux atlantiques, ils se nourrissent notamment de thons, de barracudas, de divers calmars, de harengs ainsi que d'une série d'autres poissons (Tibbo et al. 1961; Nakamura 1985).

### C. Pêche à l'espadon

L'espadon est une ressource halieutique mondiale importante pêchée dans tous les océans du globe et reportée par 30 pays dont les principaux sont : le Japon, les Etats-Unis, l'Italie, l'Espagne, le Canada, la République de Corée, la Chine, les Philippines et le Mexique (Nakamura 1985). Il est aujourd'hui classé en huit stocks de pêche répartis de par le monde, à savoir : le Pacifique Nord-Ouest, Nord-Est, Sud-Ouest et Sud-Est, l'Atlantique Nord et Sud, l'océan Indien et la Méditerranée (Marsh et Stiles 2011). Les captures mondiales se situaient autour de 95 000 tonnes en 2010 (Nakamura 1985). L'espadon est une espèce cible mais plus de la moitié des pêches mondiales seraient constituées de prises accidentelles des palangriers visant les thons (Ward et Elscot 2000). La Méditerranée est caractérisée par des niveaux élevés de capture d'espadons comparables à ceux de l'Atlantique Nord malgré son volume nettement plus faible. En 2008, les prises s'élevaient à 12 164 T et 10 572 T débarquées (poids éviscéré) pour la Méditerranée et l'Atlantique Nord respectivement. Depuis ces 10 dernières années, les quatre principaux pays producteurs d'espadon au niveau de la Méditerranée sont : l'Italie, le Maroc, la Grèce et l'Espagne avec respectivement 45%, 19%, 10% et 10% des prises (Anonymous 2010; Anonymous 2011).

En Méditerranée, la pêche artisanale, représente un pourcentage significatif du total des prises. La pêche est généralement dite mixte plutôt que spécialisée ; les pêcheurs possèdent différents types de filets et visent une large gamme d'espèces en fonction des saisons et du marché le plus offrant. Malgré la potentialité d'exploitation des eaux maritimes corses, la pression de pêche y est la plus faible de Méditerranée. La pêche corse est uniquement artisanale : les bateaux sont petits, mesurant généralement moins de 15 m, et le tonnage est relativement faible (de 15 à 20 tonnes par an). La prise de poissons se fait au niveau des côtes durant un temps en mer relativement court (sorties de moins de 12 heures) et la chaîne de distribution est courte. Les pêcheurs vendent leurs produits directement aux détaillants poissonniers. Il n'existe quasiment pas d'exportations de produits de la mer et une partie des poissons consommés par les habitants sont même importés de France ou d'autres pays méditerranéens (Harper et Zeller 2001).

En Corse, l'espadon est pêché à la palangre. Sa prise par les filets maillants, les harpons ou la madrague (séries de cages faites de filets) est interdite. Ce type de pêche est nocturne ; le matériel est installé au crépuscule et récupéré à l'aube du jour suivant. Pour augmenter l'efficacité de prise, des bâtons lumineux imitant la bioluminescence des proies peuvent être fixés sur la ligne. La pêche au palangrier consiste en une ligne principale attachée à des flotteurs à partir de laquelle partent des centaines de lignes secondaires qui pendent horizontalement et qui sont terminées par un crochet entouré d'un appât. Pour la capture de l'espadon, on utilise principalement une palangre pélagique (Fig.2). La ligne principale peut mesurer jusqu'à 100 Km de long et le nombre de crochets peut varier de 200 à 2000 par set. La limite du nombre de crochets fixé par la Commission Européenne est de 3500 pour une palangre dérivante (Régulation (EC) No. 1967/2006). L'inconvénient de cette méthode de pêche est qu'elle est peu sélective. Les prises accessoires (requins, tortues, oiseaux marins, etc.) sont fréquentes et diversifiées malgré le fait que seules une ou deux espèces sont ciblées (George 1992).

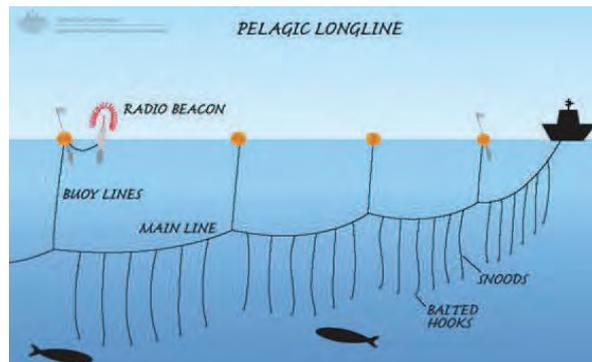


Fig.2 : Schéma d'une palangre pélagique – Source : <http://www.afma.gov.au>

Certains pêcheurs corses utilisent la pêche à la senne coulissante afin de récolter des appâts frais pour les hameçons de leur palangre. Un grand filet rectangulaire occupant toute la hauteur d'eau est placé circulairement et refermé par le bas afin d'encercler les bancs de poissons (Fig. 3 et 4). Les proies récoltées sont ensuite stockées dans des cages en pleine eau en attendant d'être utilisées comme appâts vivants pour les palangres.

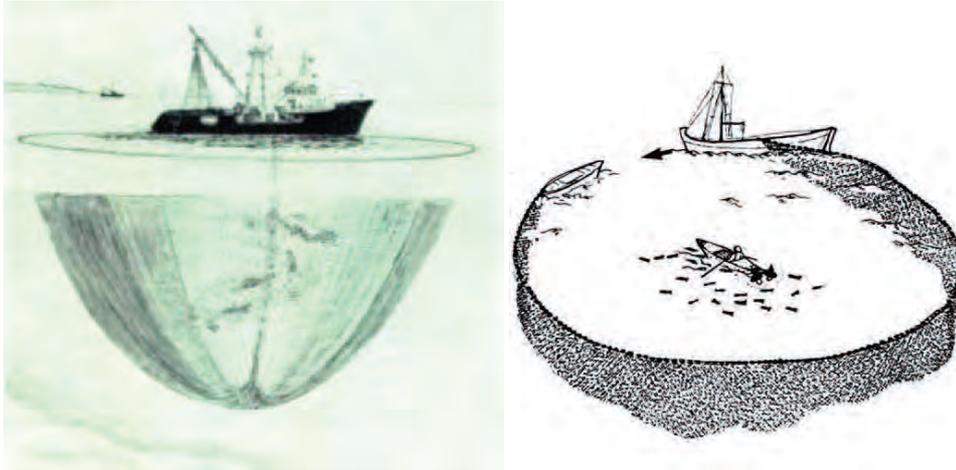


Fig.3 et 4 Schémas d'une senne coulissante – Sources : <http://www.dfo-mpo.gc.ca> et <http://www.destin-tanganyika.com>

La biomasse totale du stock d'espadon méditerranéen est estimée en déclin depuis ces 20 dernières années. En effet, la pression de pêche n'a cessé d'augmenter suite à sa haute demande sur la marché et à sa haute valeur économique. Le stock de Méditerranée est donc considéré comme surexploité, les pêches dépassant le rendement maximal durable situé entre 14 250 et 15 500 T (Anonymous 2008a; Marsh et Stiles 2011). Afin de préserver cette ressource mondiale, des collaborations multinationales de gestion de *Xiphias gladius* ont été mises en place à différents endroits du globe. De nombreuses campagnes de recherche ont également été lancées afin d'améliorer les estimations et courbes d'évolution des différents stocks dans le but d'établir de meilleures décisions de gestion. Il existe à l'heure actuelle trois organisations internationales majeures de gestion des thons et espèces apparentées, incluant l'espadon : Inter-American Tropical Tuna Commission (IATTC), International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT) et Indian Ocean Tuna Commission (IOTC). L'ICCAT s'occupe de la gestion d'une trentaine d'espèces de thonidés en Atlantique et en Méditerranée. Elle fut fondée en 1969 avec l'objectif de maintenir les populations de ces espèces à leur rendement maximal. L'ICCAT établit des recommandations internationales sur base de résultats apportés par des Conseils de scientifiques de différents pays. Cette commission fixe notamment des TACs (Total Admissible Catch) qui sont ensuite divisés en quotas nationaux. La faiblesse de la gestion des pêches d'espadon en Méditerranée réside dans le fait que chaque pays réglemente ses pêcheries indépendamment les unes des autres. La Commission Générale des Pêches pour la Méditerranée (GFCM) de la FAO (Fishery Agriculture Organization) travaille en partenariat avec l'ICCAT (GFCM-ICCAT Working Group on Stocks of Large Pelagic Fishes in the Mediterranean Sea) pour établir des

recommandations de gestion et améliorer l'échange des données entre pays sans imposer de mesure.

## D. Méthodes d'étude

### D.1 Contenus stomacaux

L'analyse des contenus stomacaux est une méthode classique et largement répandue qui permet d'obtenir de plus amples informations sur les habitudes alimentaires d'une espèce. Elle permettra dans ce cas-ci de déterminer les espèces principalement consommées par les espadons pêchés aux côtes corses.

### D.2 Les isotopes stables

Les isotopes stables sont complémentaires des analyses de contenus stomacaux. Ils sont devenus des outils d'investigation intéressants en écologie et possèdent de nombreuses applications comme la détermination des positions trophiques, des régimes alimentaires, des migrations ou de distinction des stocks.

La plupart des éléments présents sur terre sont présents sous plusieurs formes, appelées isotopes. Différentes formes isotopiques possèdent un même nombre de protons mais un nombre distinct de neutrons, ce qui leur donne des masses différentes. Il existe généralement une forme majeure d'isotope présente en proportion nettement supérieure aux autres. Par exemple, le  $^{12}\text{C}$  et le  $^{14}\text{N}$  interviennent respectivement pour 98,89 % et 99,633 % des éléments carbones et azote. Cette proportion relative n'est pas constante dans la nature et dépend de nombreux facteurs (Fry 2006). La variation naturelle provient du fait que les isotopes possèdent des propriétés physico-chimiques légèrement différentes, ce qui cause des discriminations entre les différentes formes au cours de processus biologiques (DeNiro et Epstein 1978). Les molécules contenant un ou plusieurs isotopes lourds ont tendance à réagir plus lentement que celles ne contenant que des formes isotopiques légères mais forment des liaisons chimiques plus stables (Fry 2006).

L'utilisation des isotopes stables dans les études de chaînes alimentaires réside dans le principe énonçant que la composition isotopique des tissus d'un consommateur est un mélange pondéré de la composition isotopique de ses sources de nourriture, si l'on prend en compte le fractionnement isotopique. Celui-ci est issu de l'ensemble des modifications

isotopiques générées lors des processus métaboliques. Ce principe est résumé par « You are what you eat plus a few per mille » (DeNiro et Epstein 1978). On observe de manière générale des enrichissements en carbone et azote lourds dans les tissus des consommateurs par rapport à ceux de leur nourriture. Les deltas  $^{15}\text{N}$  et  $^{13}\text{C}$  d'un consommateur sont estimés être augmentés de 3,4 ‰ et de 0,4 ‰ respectivement par rapport à la composition isotopique de sa nourriture moyenne (Post 2002). Le facteur d'enrichissement trophique est calculé de la manière suivante :  $\Delta\delta X = \delta X_{\text{consommateur}} - \delta X_{\text{nourriture}}$ . C'est grâce à cela qu'on peut utiliser les rapports  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  pour déterminer le niveau trophique auquel un individu appartient (DeNiro et Epstein 1978; Post 2002). Toutefois, la valeur de l'enrichissement peut varier selon de nombreux paramètres tels que l'espèce, l'âge, la taille, la nourriture, l'état de santé, l'organe, le mode d'excrétion de l'azote, de la composition tissulaire et élémentaire, etc. (Caut et al. 2009 ; Vanderklift et Ponsard 2003). Caut, Angulo, et al. (2009) trouvent des valeurs moyennes d'enrichissement de 0,75 ‰ pour le carbone et de 2,75 ‰ pour l'azote, Vanderklift et Ponsard (2003), un enrichissement en azote de  $2,5 \pm 0,1$  et McCutchan et al. (2003) obtiennent un enrichissement moyen de  $0,5 \pm 0,1$  ‰ pour le carbone et de  $2,3 \pm 0,2$  ‰ pour l'azote. Contrairement au rapport isotopique de l'azote, le  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  varie peu selon les niveaux trophiques (Rounick et Winterbourn 1986). Il est donc utilisé pour évaluer la source de carbone d'un organisme, pour autant que les différentes sources possèdent des signatures isotopiques suffisamment distinctes (DeNiro et Epstein 1978). Toutefois, vu le haut niveau trophique de l'espadon, l'écart entre les  $\delta^{13}\text{C}$  du prédateur et des producteurs primaires risque d'être plus conséquent. Grâce au  $\delta^{13}\text{C}$ , il est aussi possible de déterminer si les producteurs primaires sont plutôt benthiques ou pélagiques ou encore s'ils sont côtiers ou océaniques (Hobson et al. 1994; France 1995). La composition isotopique en carbone enregistrée par un animal doit être égale à la somme des compositions isotopiques de ses sources alimentaires, de ses excréments et de sa respiration. Toutefois, suite à l'incroyable variabilité environnementale des rapports azotés et carbonés, les valeurs seules de  $\delta^{15}\text{N}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  d'un individu ne sont pas suffisantes pour décrire son réseau alimentaire (Rounick et Winterbourn 1986). Pour chaque étude et chaque écosystème, il est indispensable de déterminer une ligne de base qui décrit les rapports  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  des différents producteurs primaires (Post 2002). Dans les écosystèmes aquatiques, le problème est complexifié par une importante variation isotopique temporelle des producteurs primaires qui suit celle des nutriments disponibles (Cabana et Rasmussen 1996).

Les différents compartiments tissulaires d'un poisson ont des enregistrements isotopiques variables pour un même élément. Ce phénomène provient des différences d'assimilation des différentes fractions alimentaires que sont les protéines, les lipides et les glucides et de leurs différentes implications des voies de synthèse. Les lipides sont par exemple appauvris en  $^{13}\text{C}$  (DeNiro et Epstein 1977). La composition isotopique d'un composé dépend d'abord de la composition isotopique de sa source et ensuite du fractionnement isotopique lié aux processus physico-chimiques impliqués dans sa synthèse (Dufour et Gerdeaux 2001). Les principaux types de fractionnement sont ceux de réactions d'échanges isotopiques lors d'équilibres, et ceux liés à la diffusion qui crée un fractionnement cinétique. En plus de la variabilité spatiale, les éléments analysés auront des rapports isotopiques plus ou moins variables en fonction du temps. L'intégration du signal se fera sur une période plus ou moins longue en fonction de la vitesse de renouvellement du tissu. Les os possèdent un turnover de plusieurs années, les muscles de plusieurs mois et le sang de quelques jours. Le tissu analysé dépendra donc de l'échelle de temps que l'on désire étudier. Lors de l'incorporation des éléments dans les tissus, il se produit un enrichissement préférentiel des isotopes lourds par rapport à la nourriture, compensé par une excrétion accrue des isotopes légers (Minagawa et Wada 1984).

L'avantage de cette technique est qu'elle permet de combiner les bienfaits des études de niveaux trophiques et celles de chaînes alimentaires. En effet, elle capture simultanément la compréhension de la complexité des interactions trophiques et le traçage des flux énergétiques et massiques des réseaux trophiques, sans être limitée par un nombre discret de positions trophiques (Post 2002) Les analyses aux isotopes stables reflètent les compositions alimentaires sur de large gamme d'échelles de temps, contrairement aux contenus stomacaux qui ne représentent que le dernier repas. Elle contourne également les problèmes liés à la digestion continue entre la prise du poisson et la conservation de son estomac et aux fréquentes possibilités de régurgitation du contenu lors de la capture (Tibbo et al. 1961). Mais cette méthode possède également des limitations puisqu'il n'est pas possible de distinguer plusieurs sources potentielles de nourriture lorsqu'elles ont des signatures isotopiques trop similaires (DeNiro et Epstein 1978).

### D.3 Les éléments traces

Une partie de ce mémoire est consacré à l'étude des concentrations en éléments traces dans les muscles de l'espadon. Celles-ci donneront une idée de l'état de contamination de la population d'espadons par les éléments traces.

Par définition, les éléments traces sont les éléments chimiques présents en faibles concentrations dans l'environnement (Duffus 2003). Certains, les oligo-éléments, sont essentiels en faibles quantités à la croissance et au bon développement des organismes, tandis que d'autres sont totalement inutiles au métabolisme (expl : Pb, Hg, Cd). Toutefois, tout élément devient toxique et peut causer des dégâts physiologiques lorsqu'il est présent en excès dans les organismes (expl : Cu, Zn, Cr). Les seuils de concentration auxquels ces éléments deviennent toxiques sont variables d'un élément à l'autre et d'une espèce à l'autre, allant de doses extrêmement faibles à modérées. Parmi les éléments traces, la majorité est constituée de métaux. Les métaux peuvent être particulièrement polluants dans l'environnement aquatique, et plus particulièrement dans les tissus des organismes suite à leur haute persistance, leur toxicité, leur accumulation et leur faible biodégradabilité.

Les deux vecteurs majeurs de l'assimilation des éléments pour un poisson sont l'eau par les branchies lors de la respiration et surtout la nourriture lors de la digestion (Dallinger et al. 1987). Les éléments concentrés dans les tissus d'un organisme par le biais de la chaîne alimentaire sont dits biomagnifiés, ceux concentrés à partir du milieu ambiant sont dits bioconcentrés. On parle de bioaccumulation lorsqu'un élément est à la fois biomagnifié et bioconcentré dans un tissu.

## IV. Matériel et méthode

### A. Stratégie d'échantillonnages

#### A.1 Sites d'échantillonnages



Fig. 5 : Carte de la Corse – Source : <http://www.midi-nautisme.com>

#### A.2 Campagnes de pêche

Les échantillons sont prélevés au niveau de 4 sites : Calvi, Bastia, Saint-Florent et Ajaccio. Les proies sont obtenues par l'intermédiaire de partenariats entre des scientifiques de STARESO de l'équipe de recherche sur la pêche artisanale et divers pêcheurs corses. Les espadons sont reçus grâce à la collaboration entre les pêcheurs locaux et l'Université de Corte.

##### A.2.1 Les espadons

Les espadons sont pris à partir de palangriers pélagiques entre le 6 décembre 2011 et le 8 mai 2012. Les palangres sont généralement ancrées à partir de la surface avec une profondeur

de cale d'environ 20 m. Les hameçons, dont le nombre varie entre 120 et 600, sont chargés d'appâts le plus souvent vivants. Les appâts sont constitués de chinchards (*Trachurus trachurus*), de bogues (*Boops boops*) et de maquereaux (*Scomber scombrus*) provenant de pêches à la senne. Les poissons sont conservés dans des cages aquatiques circulaires afin d'être maintenus en vie.

Au total, neuf espadons ont été échantillonnés (Tabl. 1). Les espadons capturés sont éviscérés immédiatement sur le bateau. C'est lors de cette opération que les estomacs sont prélevés et que des bouts de muscles d'une surface d'un cm<sup>2</sup> sont découpés à l'arrière des branchies. Toutefois, comme les muscles extérieurs de seulement 3 espadons ont été obtenus, les analyses ont également été faites sur le muscle lisse des estomacs. Un total de 8 morceaux a été découpé à l'aide d'un scalpel en céramique au niveau de l'extrémité fermée des estomacs. Les tissus sont congelés le plus rapidement possible pour leur conservation. En plus des prélèvements, des données biologiques sur les individus sont relevées tout comme les informations relatives au bateau et matériel de capture. Cette prise de données s'effectue à l'aide de fiches de pêche remplies directement par le pêcheur (Cfr. annexe A.I).

Tabl. 1 : Informations relatives à la prise des espadons échantillonnés

Individus	Date de prise	Zone de pêche	Profondeur de prise (m)	Type appât
<b>Espadon 1</b>	18/12/2011	Bastia	20	CHI/BOG/MAQ
<b>Espadon 2</b>	4/05/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 3</b>	4/05/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 4</b>	4/05/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 5</b>	4/05/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 6</b>	30/04/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 7</b>	30/04/2012	Saint-Florent	15	CHI
<b>Espadon 8</b>	1/05/2012	Bastia	20	CHI
<b>Espadon 9</b>	1/05/2012	Bastia	20	CHI

### A.2.2 Les proies

Comme déduit de la littérature, le régime alimentaire des espadons est extrêmement varié. Ce mémoire se concentre donc sur une série de 15 espèces, choisies sur base des résultats d'études préalables et en fonction de leur disponibilité dans les captures halieutiques des eaux corses.

Les proies seront collectées entre le 26 mars et le 8 mai 2012 à partir de bateaux de pêches pélagiques : chaluts et senneurs, aux mêmes zones portuaires que celles des espadons (Tabl.2). Chaque espèce est prélevée avec un nombre d'exemplaires variant de 2 à 16. Un total de 140 proies a été prélevé et analysé.

Tabl. 2 : Informations relatives aux proies échantillonnées. BOG = Bogue (*Boops boops*), JA = Jarret bleu (*Spicara smaris*), CHI = Chinchard commun (*Trachurus trachurus*), SAR = Sardine (*Sardina pilchardus*), MAQ = Maquereau commun (*Scomber scombrus*), MER = Merlan bleu (*Micromesistius poutassou*), AL = Allache (*Sardinella aurita*), AN = Anchois (*Engraulis encrasicolus*), MRU = Merlu blanc (*Merluccius merluccius*), CRE 1 = Crevette 1 (*Parapaneus longirostris*), CRE 2 = Crevette2 (*Plesionika martia*), CRE 3 = Crevette 3 (*Acanthephyra purpurea*), CLM 1 = Calmar 1 (*Toradores sagittatus*), CLM 2 = Calmar 2 (*Illex coindetti*) et SEP = Sépiole (*Rossia macrosoma*).

Espèces	Nombre individus (Calvi – Bastia – Saint-Florent – Ajaccio)	Taille moyenne (cm) (min-max)	Poids moyen (g) (min-max)
BOG	16 (5-9-2-0)	18 ± 1 (16-19)	78 ± 16 (47-104)
JA	12 (2-10-0-0)	11 ± 2 (8-16)	20 ± 17 (8-70)
CHI	15 (3-10-2-0)	17 ± 2 (15-20)	59 ± 17 (35-91)
SAR	11 (0-11-0-0)	10 ± 3 (6-13)	13 ± 11 (3-26)
MAQ	11 (1-10-0-1)	21 ± 5 (17-33)	144 ± 146 (66-565)
MER	10 (0-10-0-0)	24 ± 2 (22-29)	125 ± 35 (85-194)
AL	7 (0-3-4-0)	17 ± 4 (13-22)	66 ± 38 (15-128)
AN	8 (0-2-6-0)	14 ± 1 (12-14)	78 ± 3 (13-23)
MRU	2 (0-2-0-0)	25 ± 6 (21-29)	118 ± 66 (71-165)
CRE 1	8 (0-8-0-0)	14 ± 1 (12-16)	10 ± 2 (7-13)
CRE 2	8 (0-8-0-0)	8 ± 1 (6-10)	3 ± 1 (2-5)
CRE 3	8 (0-8-0-0)	7 ± 2 (5-9)	2 ± 1 (1-4)
CLM 1	9 (0-9-0-0)	44 ± 5 (37-48)	179 ± 38 (124-257)
CLM 2	7 (0-6-1-0)	17 ± 10 (9-40)	31 ± 52 (5-150)
SEP	8 (0-8-0-0)	8 ± 4 (5-15)	9 ± 2 (3-7)

### A.2.3 Producteurs primaires de la colonne d'eau

Des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de Bastia le 28/04/2012 et à Calvi le 18/05/12 afin de mesurer les rapports isotopiques du phytoplancton. L'eau prélevée est filtrée afin de récolter le phytoplancton et la matière organique en suspension. Un pré-filtrage est effectué sur un tamis de 200 µm de maille afin d'éliminer le mésozooplancton (200-500 µm). L'eau est ensuite passée à travers un filtre de silice inorganique (GF/F Whateman de 47 mm diamètre) afin d'éviter la contamination du filtrat en carbone lors des mesures isotopiques. Le matériel organique obtenu sur le filtre est rincé à l'eau milliQ afin d'en extraire le sel et servira à l'établissement de la ligne de base des analyses isotopiques. Les filtres sont également conservés par congélation à -24°C dans de l'aluminium.

## B. Préparation des échantillons

Une fois récoltées, les proies sont mesurées, pesées et photographiées puis conservées par congélation à -20°C. Après décongélation et sur chaque proie, du muscle est prélevé par dissection avec un scalpel en céramique. Le découpage de muscle s'effectue au niveau du flanc pour les poissons, au niveau du manteau pour les céphalopodes et au niveau de la queue pour les crevettes. On prélève 1 g pour les analyses isotopiques et 1 g pour les analyses aux éléments traces.

Les segments d'estomacs d'espadons découpés sont rincés à l'eau miliQ et éponnés à l'aide de papier Tork afin de retirer le mucus en contact avec ceux-ci. Ils subiront ensuite le même traitement que les autres muscles analysés.

Tout au long des manipulations, le matériel utilisé est systématiquement nettoyé et rincé à l'eau miliQ.

### B.1 Les contenus stomacaux

Les estomacs d'espadon sont pesés, mesurés et photographiés entiers puis vidés de leur contenu également pesé.

## B.2 Les isotopes

### B.2.1 Les proies

Le muscle découpé est placé dans un tube en verre, taré et annoté. Le pot est repesé une fois plein pour obtenir le poids frais utilisé. L'échantillon est ensuite congelé puis plongé dans l'azote liquide pendant une vingtaine de minutes puis lyophilisé le temps d'une nuit. Les prélèvements séchés sont pesés afin d'obtenir le poids sec de l'échantillon et réduit en poudre (Microbroyeuse MM201, Retch ; 2 minutes à 25 Hz)

### B.2.2 Les espadons

Les prélèvements de muscle d'espadon sont traités pour les analyses de compositions isotopiques et élémentaires selon un protocole identique à celui des proies.

### B.2.3 Les producteurs primaires

Les filtres sont laissés une nuit au lyophilisateur, avec refroidissement préalable à l'azote liquide, afin de les sécher. Après cela, ils sont séparés du bord extérieur dépourvu de matière, coupés en deux morceaux équivalents suivant le diamètre puis divisés en deux dans le sens de l'épaisseur afin de réduire le volume occupé. Ils sont ensuite placés dans une double cupule en étain afin d'être analysés par l'EA-IRMS.

## B.3 Les éléments traces

Le muscle frais est pesé puis déposé dans la bombe en téflon afin d'être minéralisé. Ce poids frais minéralisé est converti en poids sec grâce au pourcentage de matière sèche obtenu sur ce même échantillon lors de son analyse aux isotopes stables. Avant de les digérer aux micro-ondes, on ajoute à chaque échantillon 1 millilitre d'eau oxygénée pour favoriser l'oxygénation de l'acide nitrique, 2 mL d'acide nitrique suprapur 65 % pour l'acidification (1 mL/100 µg de matière sèche pour du muscle constitué de 80 % d'eau) et 5 mL d'eau miliQ pour compléter un volume total ajouté de 8 mL. Ensuite, le minéralisat est récupéré dans des flacons en plastique de 50 mL par des rinçages successifs à l'eau miliQ. Le liquide est finalement mis à niveau afin d'obtenir une dilution de 50 mL. Les bombes sont rincées à l'eau miliQ entre chaque utilisation, dégraissées à l'acétone, nettoyées au micro-ondes (6 mL d'eau miliQ et 2 d'acide nitrique) entre chaque groupe d'organismes (poissons, crustacés, céphalopodes et espadons). Les éléments présents dans les minéralisats seront postérieurement analysés et dosés.

## C. Analyses

### C.1 Les contenus stomacaux

Ce contenu est ensuite trié en comptant les otolithes de poissons, les becs de céphalopodes, les vers parasites et en observant la présence de morceau de poisson, de vertèbres, etc. Les otolithes sont maintenues dans de l'alcool à 70 % et les becs sont placés dans du formol à 3 % (dilution à l'eau de mer pour tamponner l'effet acide) pendant 24 heures afin de fixer les tissus avant d'être plongés dans de l'alcool à 70 %. Les otolithes et becs sont conservés dans un but éventuel de détermination future. Les résultats obtenus seront confrontés à ceux des isotopes stables.

### C.2 Les isotopes

Les isotopes ne sont jamais mesurés de façon directe ; on mesure toujours le rapport de l'isotope rare sur l'isotope fréquent. Ces rapports isotopiques des échantillons sont mesurés à l'aide d'un analyseur élémentaire (EA ; Vario MicroCube, Elementar) couplé avec un spectromètre de masse isotopes stables (IRMS ; Isoprime 100, Isoprime). Les variations isotopiques environnementales sont très faibles. On utilise donc la notion de delta, exprimé en pour mille, qui compare la teneur des différents isotopes de l'échantillon à celle contenue dans une référence internationale. X représente par convention l'isotope lourd et R représente le rapport isotope lourd/isotope léger.

$$\delta X = \left( \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \right) \times 1000$$

Pour chaque échantillon, on prélève 1,5 mg de poudre que l'on place dans une cupule en étain placée dans un batch. En plus des individus dont les rapports isotopiques doivent être mesurés, on place dans ce batch des cupules vides qui serviront de blancs afin de connaître la contamination de celles-ci en carbone et azote lourds pour une correction ultérieure des valeurs obtenues. Il faut également passer des échantillons certifiés, ici du IAEA-N2 (International Atomic Energy Agency ; sulfate d'ammonium : 0,5 g ; valeur mesurée :  $19,97 \pm 1,18$  ‰) et du IEAE-C6 (sucrose : 0,5 g ; valeur mesurée :  $-7,9 \pm 9,1$  ‰), dont les valeurs exactes en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  sont connues et calibrées par rapport au standards internationaux V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite) et azote atmosphérique  $\text{N}_2$ . Enfin, on place à plusieurs reprises au sein et entre les différents batchs, un échantillon choisi, ici le Chinchard 8 (CHI 8 : 1,5 g) qui sert de réplikat. Il permet de mesurer la répliquabilité (ici, de 0,05) des échantillons qui dépend de la variabilité au cours du temps des mesures de la machine. Une correction devra être appliquée à nos valeurs. Les rapports isotopiques de cupules vides et de filtres

vierges sont également dosés afin de connaître leurs contaminations potentielles en carbone et azote lourds.

La contribution relative (%) des différentes proies est obtenue par l'utilisation du logiciel SIAR, développé par Jackson et al. (2009). Ce programme permet de résoudre les proportions les plus probables d'un régime alimentaire, basées sur les signatures isotopiques du prédateur et de son alimentation. Il calcule toutes les solutions possibles en tenant compte des contraintes biologiques et isotopiques imposées. Les solutions proposées sont ainsi exprimées en terme de fréquence d'occurrence ; c'est-à-dire le nombre de fois qu'une solution apparaît parmi l'ensemble des solutions générées par le modèle. Lors du regroupement de plusieurs espèces dans une catégorie, la moyenne des valeurs isotopiques de carbone et d'azote des différents individus est utilisée. Les valeurs d'enrichissement trophique sont celles décrites par McCutchan et al. (2003) de  $2,3 \pm 0,28$  ‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $0,4 \pm 0,17$  ‰ pour le  $\delta^{15}\text{N}$ .

### C.3 Les éléments traces

Les éléments traces analysés lors de cette étude sont : le béryllium (Be), l'aluminium (Al), le vanadium (V), le manganèse (Mn), le cobalt (Co), l'arsenic (As), le sélénium (Se), le molybdène (Mo), l'argent (Ag), l'étain (Sn), l'antimoine (Sb), le bismuth (Bi), le chrome (Cr), le fer (Fe), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd). La concentration de ces éléments est mesurée à l'aide d'un couplage ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry). Avant d'être passés à l'ICP-MS, les minéralisats devront être dilués 10 fois. Pour ce faire, un millilitre de chaque échantillon en solution est prélevé à l'aide d'une micropipette et ajouté à 9 millilitre de solution étalon contenant un mélange d'éléments rares, ici du Rhodium ( $\approx 1$  ppb), du Gallium (8-10 ppb), du Scandium (8-10 ppb) et du Rhenium ( $\approx 1$  ppb) en concentrations connues. Le mélange obtenu est ensuite vortexé quelques secondes afin d'homogénéiser le liquide. La solution étalon sert à évaluer la déviation des mesures de la machine au cours du temps. Des standards avec des concentrations croissantes et connues des éléments sont utilisés pour calculer la régression d'une droite d'étalonnage qui servira à attribuer une valeur en ppb à nos échantillons à partir de la mesure d'intensité (coups par minute).

En plus des échantillons, des blancs constitués d'1 mL d'eau oxygénée, de 2 mL d'acide nitrique et de 5 mL d'eau milliQ chauffés au micro-ondes sont dilués de façon identique. Pour chaque élément, l'écart type des valeurs des blancs est utilisé pour calculer trois limites : la limite critique, la limite de détection et la limite de quantification. La limite critique représente la valeur à partir de laquelle une mesure se différencie de celles des blancs, la limite de détection, la valeur à partir de laquelle un élément peut être considéré comme détecté et donc présent dans le tissu et la limite de quantification, la valeur à partir de laquelle une mesure peut être utilisée pour quantifier la présence d'un élément. Les blancs et les standards sont passés après chaque groupe de 30 échantillons afin de corriger les valeurs brutes obtenues en fonction de déviations de mesures dans le temps. L'intensité de ces blancs est donc soustraite à l'intensité des échantillons. Des échantillons certifiés, ici DOLT-3 : dogfish liver, NIST 1566b : oyster tissue, NIST 1577c : bovine liver et NIST 2976 : mussel tissue, sont utilisés afin de connaître la fiabilité des valeurs, c'est-à-dire l'erreur commise par le biais des manipulations, par comparaison entre les valeurs connues et mesurées.

#### D. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica. La distribution normale des valeurs est évaluée par le test de normalité de Shapiro-Wilk. Lorsque la p-value des différentes variables dépendantes (métaux et isotopes) à l'issue de ce test est inférieure à 0,05, on en déduit une distribution non normale des valeurs. A l'inverse, lorsque la valeur est supérieure à 0,05, la distribution est dite normale. Une distribution non normale exige l'utilisation de tests non paramétriques et la normale celle de tests paramétriques. Dans le cas de tests non paramétriques, on utilise le test de Kruskal-Wallis pour évaluer la différence significative des moyennes que l'on confronte par une comparaison multiple des rangs. Pour les tests paramétriques, une ANOVA à un facteur est appliquée pour comparer les moyennes et un test post hoc de Tukey est ensuite lancé pour connaître les moyennes qui divergent statistiquement entre elles. Toutefois, par faute d'équivalent en non paramétrique, l'homogénéité des moyennes entre les différentes espèces au sein des différentes villes d'échantillonnage a été testée par une ANOVA hiérarchique bien que la distribution des mesures soient non normale. Les résultats obtenus par ce test statistique est donc à prendre avec recul.

## V. Résultats

Tabl. 3 : Données biologiques des espadons échantillonnés

	Poids éviscéré (Kg)	Taille (cm)	Sexe (M-F)	Zone de pêche	Date de prise	Etat lors de la capture
<b>Espadon 1</b>	4	ND	M	Bastia	18/12/2011	mort
<b>Espadon 2</b>	ND	ND	ND	Saint-Florent	4/05/2012	ND
<b>Espadon 3</b>	40	135	ND	Saint-Florent	4/05/2012	ND
<b>Espadon 4</b>	12	100	ND	Saint-Florent	4/05/2012	ND
<b>Espadon 5</b>	ND	ND	ND	Saint-Florent	4/05/2012	ND
<b>Espadon 6</b>	17	110	F	Saint-Florent	30/04/2012	ND
<b>Espadon 7</b>	25	130	F	Saint-Florent	30/04/2012	ND
<b>Espadon 8</b>	25	170	M	Bastia	1/05/2012	vivant
<b>Espadon 9</b>	23	165	M	Bastia	1/05/2012	mort

Le tableau ci-dessus montre les données biologiques des 9 espadons échantillonnés. Certaines données sont absentes car non relevées par les pêcheurs lors de la capture de l'animal, et sont indiquées par « ND » sur le tableau. Tous les individus sont pris à la même période de temps, fin avril – début mai, à l'exception du premier, pêché en décembre de l'année d'avant. On compte 3 mâles, provenant de Bastia (espadons 1, 8 et 9), 2 femelles, provenant de Saint-Florent (espadons 6 et 7) et 4 dont le sexe n'est pas déterminé (espadons 2-5, Saint-Florent). Deux sont pêchés morts (espadons 1 et 9), un vivant (espadon 8) et pour les autres, les informations sont manquantes (espadons 2-7). Les espadons dont les tailles sont disponibles mesurent entre 100 et 170 cm, ce qui donne une moyenne de 135 ( $\pm$  28) cm. Les espadons 4 et 6 ont une taille inférieure à la moyenne et d'environ 100 cm, le 3 et le 7 une taille correspondant à la moyenne et le 8 et 9 sont plus grands que la moyenne, mesurant environ 170 cm. Les neuf individus pèsent entre 4 et 40 Kg. Le premier espadon est un juvénile tandis que les autres sont des adultes. Le poids moyen des adultes est de 24 ( $\pm$  10) Kg. Les espadons 4 et 6 sont plus maigres que la moyenne avec à peu près 15 Kg, les 7, 8 et 9 correspondent à la moyenne et l'espadon 3 est plus lourd que la moyenne, pesant 40 Kg. Dans ces résultats, la relation taille-poids n'est pas respectée. On peut tout de même rassembler les individus en 4 groupes : l'espadon 4 est moins imposant que les autres ; son poids et sa taille sont inférieurs aux moyennes, les espadons 6 et 7 sont de taille inférieure et de poids équivalent aux moyennes, les espadons 8 et 9 sont grands et minces ; leur taille est supérieure

à la moyenne tandis que leur poids est inférieur et l'espardon 3, à l'inverse, est petit pour un poids élevé ; sa taille est inférieure et son poids supérieur aux moyennes respectives.

## A. Contenus stomacaux

Tabl. 4 : Caractéristiques des contenus stomacaux

	Estomac 1	Estomac 2	Estomac 3	Estomac 4	Estomac 5	Estomac 6	Estomac 7	Estomac 8	Estomac 9
<b>Poids (g)</b>	ND	333	418	190	402	1229	396	469	ND
<b>L x l (cm)</b>	13x5	17x8	15x8	17x6	21x8	27x10	19x7	19x9	ND
<b>Poids contenu (g)</b>	109	ND	8	16	121	579	31	160	ND
<b>Nombre otolithes</b>	ND*	165	3	560	95	2	7	102	4
<b>Poids chair poisson (g)</b>	88	0	2	0	44	357	0	123	1053
<b>Nombre de becs de céphalopodes</b>	ND*	4	5	9	13	0	0	4	0
<b>Poids chair céphalopode (g)</b>	0	0	0	0	0	144	0	0	232
<b>Nombre de vers parasites</b>	ND*	9	4	10	8	2	0	19	20
<b>Indice de remplissage (%)</b>	2,7	ND	0	0,1	ND	3,4	0,1	0,6	ND

\* = présents mais non comptés

Ce tableau présente les caractéristiques des 9 estomacs échantillonnés. Ceux-ci pèsent entre 190 et 1229 g avec des contenus qui varient de 8 à 579 g. Un indice de remplissage de l'estomac est calculé sur base de la formule utilisé par Hernandez-Garcia en 1995 : indice de remplissage (%) = (poids frais du contenu stomacal / poids frais de l'espardon éviscéré) x 100. Dans ce cas-ci, la moyenne du pourcentage de remplissage est de 1,2 ( $\pm$  1,5) % et trois estomacs sur 6 peuvent être considérés comme vides, à savoir ceux des individus 3, 4 et 7. Les nombres de poissons et de céphalopodes ingérés peuvent être estimés en divisant les nombres d'otolithes et de becs par deux. Les becs des céphalopodes sont constitués d'une partie supérieure et d'une inférieure qui sont séparées dans les contenus stomacaux. Ces nombres varient de 1 (espardon 6) à 280 (espardon 4) pour les téléostéens et de 0 (espadons 6 et 7) à 7 (espardon 5) pour les céphalopodes. Le nombre moyen de poissons ( $59 \pm 189$ ) est 30 fois plus élevé que celui obtenu pour les céphalopodes ( $2 \pm 5$ ). Le poids frais de poisson va de 0 à 1053 g et celui des céphalopodes de 0 à 232 g. La moyenne du poids frais de poisson (185

$\pm 345$  g) est 4 fois plus élevée que celle du poids frais de céphalopode ( $4 \pm 86$  g). On peut également souligner que lorsque les otolithes de poissons et becs de céphalopodes sont nombreux, le poids en chair équivalente est faible, voir nul, et inversement. Les pourcentages de fréquence des poissons frais et des otolithes est de 67% et de 100%, ceux des céphalopodes sont clairement plus faibles avec 22 % pour les frais et 67 % pour les becs. Les parasites sont présents en nombre restreint mais de façon quasi omniprésente, seul l'estomac 7 n'en présente pas.

Le bref descriptif des contenus de chaque estomac est disponible dans les annexes (Cfr. A.II).

## B. Isotopes stables

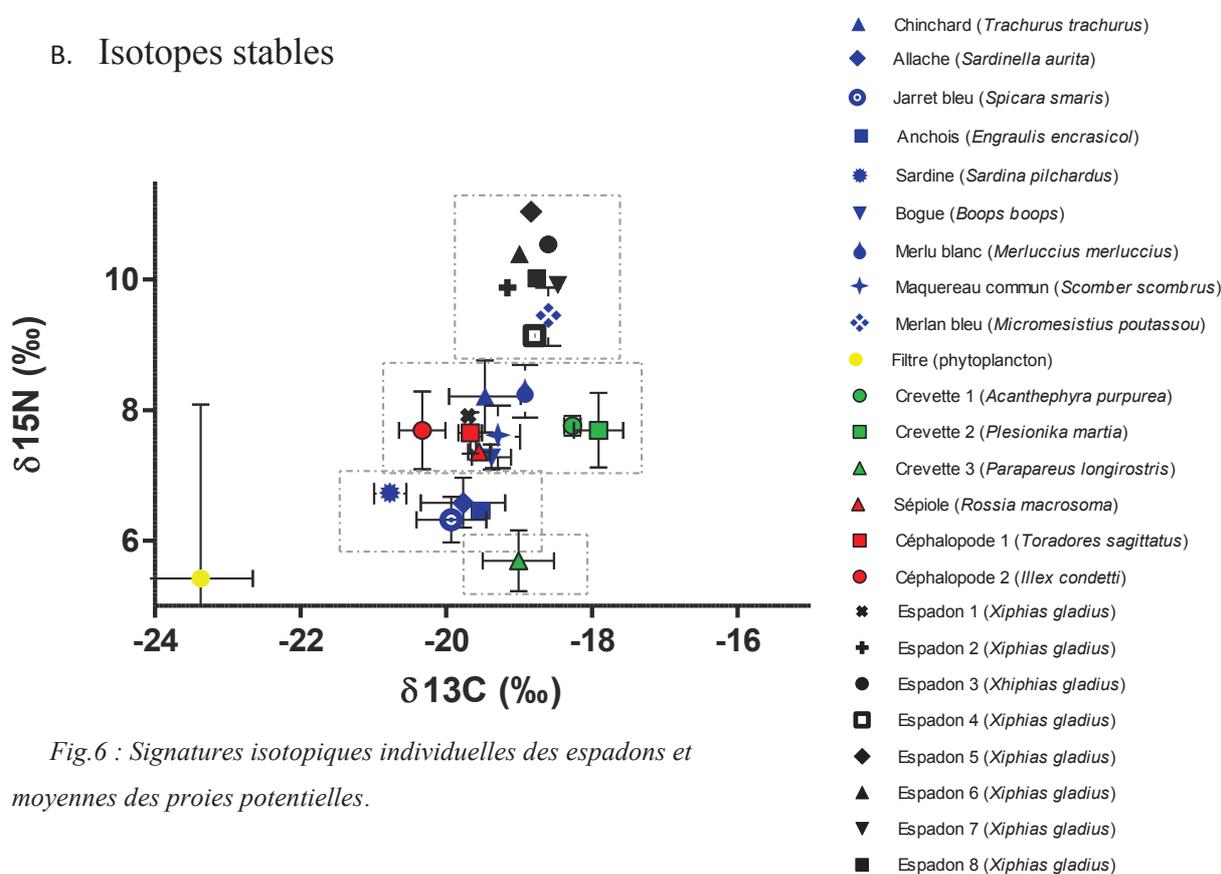


Fig.6 : Signatures isotopiques individuelles des espadons et moyennes des proies potentielles.

Faute du matériel biologique nécessaire, les valeurs isotopiques des espadons 2, 3, 6-8 sont obtenues à partir des valeurs mesurées pour le muscle de l'estomac, reconverties en muscle du flanc. A partir des espadons 1, 4 et 5, on calcule l'écart moyen mesuré entre les deux types de muscle que l'on soustrait aux valeurs isotopiques trouvées au niveau de l'estomac.

Sur ce graphique (Fig. 6), des valeurs en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  de  $-23,4$  ‰ et  $5,42$  ‰ sont visibles pour le phytoplancton. Toutefois, aucune des proies n'a de valeur similaire en  $\delta^{13}\text{C}$  à celle des producteurs primaires de la colonne d'eau.

Les données isotopiques des espadons (*Xiphias gladius*) se situent entre -19,7 ‰ (espadon 1) et -18,5 ‰ (espadon 7) pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et entre 7,91‰ (espadon 1) et 11,04‰ (espadon 5) pour le  $\delta^{15}\text{N}$ . Le premier espadon est nettement individualisé de ses congénères avec des valeurs isotopiques significativement plus faibles. Les autres sont rassemblés vers des  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $\delta^{15}\text{N}$  aux alentours de 19 et 10 ‰ respectivement. L'espadon 4 se distingue légèrement du reste du cluster par un  $\delta^{15}\text{N}$  quelque peu inférieur (9,14 ‰) et un  $\delta^{13}\text{C}$  similaire mais sans pour autant être significativement différents des autres individus adultes.

Les signatures isotopiques du carbone des proies potentielles sont comprises entre -20,8 ( $\pm 0,2$ ) ‰ pour la sardine (*Sardina pilchardus*) et -17,9 ( $\pm 0,3$ ) ‰ pour la crevette 2 (*Plesionika martia*). Celles de l'azote sont comprises entre 5,69 ( $\pm 0,46$ ) ‰ pour la crevette 3 (*Parapareus longirostris*) et 9,43 ( $\pm 0,45$ ) ‰ pour le merlan (*Micromesistius poutassou*). Celui-ci contient des valeurs isotopiques en azote presque aussi élevées que la majorité des espadons et sont même supérieures aux individus 1 et 4. Les 3 espèces de céphalopodes ont des valeurs isotopiques relativement proches, surtout *Illex coindetti* et *Toradores sagittatus* pour le  $\delta^{15}\text{N}$  et *Toradores sagittatus* et *Rossia macrosoma* pour le  $\delta^{13}\text{C}$ . Pour les crevettes, on remarque que *Parapaneus longirostris* et *Plesionika martia* ont des valeurs isotopiques en carbone et azote lourds relativement proches, contrairement à celles de *AcanthePHYRA purpurea* dont les valeurs isotopiques sont nettement plus faibles pour l'azote et légèrement plus faibles pour le carbone. Le tableau des valeurs isotopiques en carbone et azote des espadons et des proies est disponible dans les annexes (Cfr. A.III).

De manière globale, on peut rassembler les espèces en 4 grands groupes, phytoplancton mis à part, et qui sont indiqués par des rectangles sur le graphique. Le premier est constitué uniquement de la crevette 3 (*AcanthePHYRA purpurea*) ; son  $\delta^{15}\text{N}$  avoisine les 5,5 ‰. Le deuxième groupe rassemble la sardine (*Sardina pilchardus*), l'allache (*Sardinella aurita*), l'anchois (*Engraulis encrasicolus*) et le jarret (*Spicara smaris*) dont les  $\delta^{15}\text{N}$  sont proches de 6,5 ‰. Le troisième rectangle reprend les trois céphalopodes : *Toradores sagittatus*, *Illex coindetti* et *Rossia macrosoma*, le maquereau commun (*Scomber scombrus*), la bogue (*boops boops*), le chinchard commun (*Trachurus trachurus*), le merlu blanc (*Merluccius merluccius*) et les deux autres crevettes : *Parapaneus longirostris* et *Plesionika martia*. Le  $\delta^{15}\text{N}$  de ces espèces est d'à peu près 8 ‰. Le dernier groupe est celui des espadons 2 à 8 et du merlan bleu (*Micromesistius poutassou*) dont les  $\delta^{15}\text{N}$  sont aux alentours de 10 ‰.

## C. Eléments traces

Dans ces résultats, les individus sont regroupés par espèce sans tenir compte de la division géographique. L'étude spatiale a dû être abandonnée au vu du faible nombre d'individus pour chaque ville. L'analyse statistique montre que ceci ne constitue pas une source d'erreur importante puisque les valeurs d'éléments traces et d'isotopes ne sont pas significativement différentes entre les villes au sein d'une même espèce pour la plupart des variables. L'étain montre cependant une exception pour les jarrets de Calvi et Bastia et pour le calmar 2 (*Illex coindetti*) de Bastia et de Saint-Florent, le  $\delta^{13}\text{C}$  pour les chinchards de Bastia et Saint-Florent et le  $\delta^{15}\text{N}$  pour les maquereaux de Calvi et de Bastia. Cependant, comme ces espèces sont capables de déplacements importants lors de leurs migrations et considérant le faible niveau de pollution de ces villes (Gosselin et al. 2006), la Corse peut être vue comme un ensemble. Il est donc justifié de rassembler les individus uniquement selon leur espèce.

Tabl. 5 : Concentrations moyennes ( $\mu\text{g/g}$  de poids frais) de 19 éléments traces pour les différentes proies échantillonnées.

Espèces	Al 27	V 51	Fe 54	Cr 52	Mn 55	Co 59	Ni 60
<b>BOG</b>	2,2 ± 3,1	0,017 ± 0,011	14,5 ± 4,5	< LD	0,5 ± 0,3	0,019 ± 0,007	< LQ
<b>JA</b>	2,3 ± 2,3	0,025 ± 0,010	16,1 ± 3,5	< LQ	0,9 ± 0,4	0,021 ± 0,008	< LQ
<b>CHI</b>	3,0 ± 5,6	0,010 ± 0,005	19,0 ± 5,4	< LD	0,5 ± 0,1	0,043 ± 0,030	< LQ
<b>SAR</b>	2,5 ± 5,1	< LQ	31,0 ± 9,7	< LC	0,7 ± 0,2	0,024 ± 0,009	< LQ
<b>MAQ</b>	6,5 ± 10,1	0,005 ± 0,003	23,0 ± 10,1	< LD	0,4 ± 0,1	0,026 ± 0,010	< LQ
<b>MER</b>	9,5 ± 13,1	0,018 ± 0,012	9,3 ± 4,8	< LQ	1,2 ± 0,3	0,007 ± 0,004	< LQ
<b>AL</b>	< LQ	0,021 ± 0,027	49,2 ± 24,7	< LQ	1,4 ± 0,8	0,023 ± 0,010	< LQ
<b>AN</b>	< LQ	0,025 ± 0,010	37,8 ± 15,0	< LQ	1,3 ± 0,5	0,034 ± 0,010	0,135 ± 0,073
<b>MRU</b>	11,6 ± 4,2	0,032 ± 0,008	13,5 ± 1,9	0,04 ± 0,02	1,7 ± 0,1	0,015 ± 0,002	< LQ
<b>CRE 1</b>	28,2 ± 22,3	0,200 ± 0,078	23,8 ± 14,8	0,09 ± 0,07	2,6 ± 0,7	0,068 ± 0,014	0,253 ± 0,071
<b>CRE 2</b>	127,6 ± 60,6	0,322 ± 0,147	94,1 ± 41,4	0,39 ± 0,17	8,8 ± 6,4	0,179 ± 0,050	0,494 ± 0,204
<b>CRE 3</b>	107,7 ± 50,0	0,258 ± 0,108	74,1 ± 34,8	0,35 ± 0,22	4,7 ± 2,3	0,088 ± 0,024	0,371 ± 0,098
<b>CLM 1</b>	31,0 ± 31,1	0,097 ± 0,063	29,3 ± 19,4	0,10 ± 0,08	5,8 ± 1,5	0,065 ± 0,008	0,223 ± 0,064
<b>CLM 2</b>	24,5 ± 36,0	0,038 ± 0,038	22,8 ± 19,1	0,07 ± 0,12	1,1 ± 0,6	0,042 ± 0,024	0,248 ± 0,288
<b>SEP</b>	260,7 ± 148,9	0,710 ± 0,436	208,3 ± 108,2	0,83 ± 0,48	32,3 ± 23,5	0,357 ± 0,207	1,322 ± 0,703
<b>MOYENNE PROIES</b>	41,3 ± 72,1	0,119 ± 0,192	44,3 ± 51,0	0,13 ± 0,23	4,3 ± 8,1	0,067 ± 0,091	0,233 ± 0,331
<b>ESP M</b>	4,8 ± 4,6	0,006 ± 0,001	29,6 ± 12,5	0,08 ± 0,05	0,3 ± 0,1	0,014 ± 0,008	< LD
<b>ESP EST</b>	3,8 ± 5,0	0,024 ± 0,010	58,5 ± 28,0	0,05 ± 0,04	1,1 ± 0,3	0,062 ± 0,019	< LQ

LC	0,371	0,001	0,151	0,006	0,002	0,000	0,017
LD	0,725	0,002	0,295	0,012	0,004	0,001	0,034
LQ	2,058	0,005	0,843	0,033	0,011	0,003	0,097

Espèces	Cu 63	Zn 66	Se 78	Ag 107	Cd 114	Sn 118
BOG	1,1 ± 0,4	37 ± 12	2,38 ± 0,39	< LD	0,017 ± 0,011	< LQ
JA	1,8 ± 0,3	25 ± 4	2,42 ± 0,29	< LC	0,015 ± 0,011	< LQ
CHI	1,6 ± 0,4	31 ± 14	2,23 ± 0,49	< LD	0,012 ± 0,014	< LQ
SAR	3,5 ± 1,2	50 ± 29	1,42 ± 0,54	< LQ	0,026 ± 0,028	< LD
MAQ	2,5 ± 1,1	37 ± 16	2,51 ± 0,97	< LQ	0,011 ± 0,011	< LQ
MER	0,7 ± 0,1	14 ± 1	2,60 ± 0,44	< LC	< LQ	< LQ
AL	3,8 ± 1,7	48 ± 21	3,45 ± 1,19	< LD	0,018 ± 0,015	< LQ
AN	4,8 ± 1,8	62 ± 25	1,52 ± 0,42	0,007 ± 0,004	0,052 ± 0,031	< LD
MRU	0,9 ± 0,1	15 ± 1	1,79 ± 0,19	< LQ	0,012 ± 0,013	< LC
CRE 1	17,5 ± 5,1	46 ± 4	3,60 ± 0,87	0,055 ± 0,037	0,030 ± 0,010	< LQ
CRE 2	20,4 ± 5,8	53 ± 8	2,22 ± 0,56	0,392 ± 0,159	0,117 ± 0,036	< LQ
CRE 3	15,2 ± 4,0	42 ± 4	1,16 ± 0,12	0,256 ± 0,047	0,041 ± 0,029	0,031 ± 0,010
CLM 1	29,9 ± 8,4	56 ± 6	1,96 ± 0,40	0,075 ± 0,021	0,084 ± 0,029	0,028 ± 0,027
CLM 2	13,0 ± 10,4	46 ± 9	2,19 ± 0,39	0,074 ± 0,069	0,251 ± 0,137	< LQ
SEP	121,9 ± 60,9	83 ± 17	3,12 ± 0,60	0,387 ± 0,166	0,268 ± 0,166	0,044 ± 0,043
MOYENNE PROIES	15,9 ± 30,6	43 ± 18	2,30 ± 0,70	0,084 ± 0,141	0,064 ± 0,085	< LQ
ESP M	1,6 ± 0,5	84 ± 22	3,07 ± 0,56	< LQ	0,019 ± 0,007	0,059 ± 0,045
ESP EST	4,5 ± 0,9	2101 ± 687	8,35 ± 4,37	0,051 ± 0,084	0,747 ± 0,051	0,038 ± 0,011
LC	0,016	0,025	0,060	0,001	0,001	0,005
LD	0,032	0,049	0,118	0,002	0,002	0,009
LQ	0,092	0,140	0,339	0,005	0,005	0,026

Espèces	Sb 121	Mo 95	As 75	Be 9	Pb 208	Bi 209
BOG	< LD	< LQ	10,7 ± 4,8	< LC	< LQ	< LC
JA	< LD	0,026 ± 0,017	11,2 ± 2,8	< LC	0,13 ± 0,28	< LC
CHI	< LC	< LQ	14,6 ± 6,4	< LC	0,06 ± 0,06	< LQ
SAR	< LC	0,022 ± 0,015	12,7 ± 5,2	< LC	< LQ	< LC
MAQ	< LC	< LQ	15,9 ± 6,5	< LC	< LD	< LC
MER	0,004 ± 0,003	< LQ	98,4 ± 29,9	< LC	< LD	< LC
AL	< LD	0,015 ± 0,006	27,6 ± 16,0	< LC	< LQ	< LC
AN	< LD	0,021 ± 0,006	21,1 ± 8,4	< LC	< LD	< LC
MRU	0,009 ± 0,001	0,016 ± 0,001	100,0 ± 10,8	< LC	< LQ	< LC
CRE 1	0,021 ± 0,003	0,049 ± 0,013	285,8 ± 60,7	< LC	< LQ	< LD
CRE 2	0,034 ± 0,011	0,062 ± 0,014	423,1 ± 155,3	< LQ	0,13 ± 0,07	0,012 ± 0,004
CRE 3	0,113 ± 0,238	0,048 ± 0,007	190,9 ± 63,3	< LQ	0,12 ± 0,06	< LQ
CLM 1	0,008 ± 0,002	0,048 ± 0,009	132,0 ± 30,4	< LC	0,11 ± 0,04	< LQ
CLM 2	0,009 ± 0,003	0,041 ± 0,007	35,7 ± 20,5	< LC	0,23 ± 0,19	< LC
SEP	0,021 ± 0,015	0,134 ± 0,031	173,1 ± 17,7	0,014 ± 0,010	0,71 ± 0,28	0,004 ± 0,003
MOYENNES PROIES	0,016 ± 0,028	0,034 ± 0,033	103,5 ± 121,5	< LD	< LD	< LQ

<b>ESP M</b>	<b>&lt; LQ</b>	0,016 ± 0,010	7,3 ± 4,6	< LC	0,06 ± 0,03	<b>&lt; LQ</b>
<b>ESP EST</b>	<b>&lt; LD</b>	0,124 ± 0,049	6,2 ± 2,4	< LC	0,12 ± 0,27	<b>&lt; LQ</b>
<b>LC</b>	0,002	0,002	0,009	0,003	0,010	0,000
<b>LD</b>	0,004	0,004	0,017	0,006	0,021	0,001
<b>LQ</b>	0,011	0,012	0,049	0,013	0,059	0,002

En paramétrique (distribution normale des valeurs) :  $LC = t_{(1-\alpha, \gamma)} \sigma_{blancs}$  ;  $LD = 2t_{(1-\alpha, \gamma)} (4\gamma/4\gamma+1) \sigma_{blancs}$  ;  $LQ = 10 \sigma_{blancs}$  ;  $\sigma$  = écart type,  $\gamma$  = degré de liberté et  $\alpha$  = ordre du quantile.

Le tableau ci-dessus nous montre la concentration en  $\mu\text{g/g}$  de poids frais des éléments traces mesurés sur 15 proies potentielles de l'espadon (*Xiphias gladius*) et dans deux types de muscle chez celui-ci : l'estomac et le muscle latéral. Au sein de chaque espèce, lorsque la moyenne d'un élément est inférieure à une des limites, elle est indiquée dans le tableau. Le tableau complet des concentrations par individu se trouve dans les annexes (Cfr. A.IV).

Pratiquement tous les éléments traces sont mesurés dans les tissus des espadons à l'exception du béryllium, dont la quantité est inférieure à la limite critique. L'antimoine et le nickel ont des concentrations significativement similaires entre l'estomac et le muscle latéral, concentrations situées entre la limite de détection et de quantification. De façon similaire, l'argent est présent dans les deux types de muscles en concentrations avoisinant la limite de quantification. Celle en bismuth est inférieure à la limite de quantification pour les deux types de tissus.

Le plomb, le sélénium, le chrome, l'étain, l'arsenic et l'aluminium sont présents en concentrations non significativement différentes entre les deux types de muscles. Le reste des éléments est plus concentré dans l'estomac que dans le muscle blanc. Parmi ceux-ci, la majorité est toutefois moins de 5 fois plus importante que dans ce muscle latéral. Ce sont le cobalt (4 x), le fer (2 x), le cuivre (3 x), le manganèse (4 x) et le vanadium (4 x). Le molybdène (8 x) est plus de 5 fois concentré. Le cadmium (40 x) et le zinc (25 x), eux sont plus de 10 fois concentrés.

Les concentrations en cadmium, en chrome, en plomb, en sélénium, en fer, en antimoine, en molybdène, en cuivre, en aluminium, en cobalt et en argent ne sont pas significativement différentes entre l'ensemble des proies et le muscle blanc de l'espadon. Tous ces éléments sont donc présents chez toutes les espèces étudiées. Le cas du bismuth est similaire mais avec des valeurs non quantifiables.

La concentration en zinc ( $84 \pm 22$  mg/Kg) du muscle latéral des espadons est supérieure aux moyennes des concentrations pour le muscle latéral de l'ensemble des proies ( $43 \pm 18$  mg/Kg) à raison d'un facteur 2. L'étain est également plus concentré dans le muscle latéral des espadons que la moyenne des proies mais de façon non quantifiable. Le béryllium est aussi bien absent chez les espadons que chez les proies en moyenne. Le reste des éléments sont présents en concentrations plus importantes pour la moyenne des proies potentielles que dans le muscle latéral des espadons. Le vanadium (20 x), le manganèse (14 x) et l'arsenic (14 x) sont plus de 10 fois plus importantes pour la moyenne des proies que pour les espadons. Le nickel est également moins présent dans les muscles des espadons que pour la moyenne des proies mais de manière non quantifiable.

La sépiole (*Rossia macrosoma*) contient des concentrations élevées en métaux traces par rapports aux autres proies. Tous les éléments ont des concentrations significativement différentes entre la sépiole et les autres espèces. Le sélénium et l'antimoine se trouvent en quantités équivalentes à l'ensemble des proies, bien que statistiquement différentes de celui-ci. Tous les autres éléments sont entre deux et huit fois plus concentrés chez la sépiole que pour la moyenne des proies. L'étain, le plomb et le bismuth sont également présents en quantité plus importante chez *Rossia macrosoma* que la moyenne des proies dont les valeurs sont en dessous des limites de détection et de quantification. La crevette 2 (*Plesionika martia*) est la deuxième espèce contenant des concentrations élevées après la sépiole. Les valeurs de sélénium et d'étain sont significativement similaires à l'ensemble des proies, les autres éléments étant, par opposition, différents. Les contenus de *Plesionika martia* en cuivre, en zinc et en fer sont tout de même équivalents à la moyenne des proies. Les autres éléments sont tous entre 2 et 5 fois plus importants dans les muscles de la crevette que pour la moyenne des proies. Le béryllium, l'argent et le cadmium sont trouvés en quantités plus importantes chez cette crevette que pour la moyenne des proies, sans être évaluables.

Les concentrations de chaque élément pour l'ensemble des individus analysés (sous formes brute et graphique) sont disponibles dans les annexes (A.III et IV).

## V. Discussion

Les tailles et poids des espadons échantillonnés correspondent à ceux décrits dans la littérature pour la mer Ligure (75-185 cm) et en Méditerranée (1,5-133 Kg) (Aliçi et Oray 2001). Puisque De La Serna (1996) pense que la longueur à laquelle 50% des femelles méditerranéennes sont matures est de 142 cm LJFL, les deux femelles de cette étude (espadons 6 et 7) ne sont sûrement pas matures. Les mâles étant plus rapidement matures que les femelles et à des tailles inférieures, les espadons 8 et 9 doivent être matures.

### A. Contenus stomacaux

La moyenne du pourcentage de remplissage de 1,15 ( $\pm$  1,5) % est légèrement plus basse que la moyenne de 2,5 ( $\pm$  2,3) %, obtenue par Hernandez-Garcia en 1995 lors de son étude sur des espadons pêchés au niveau du détroit de Gibraltar.

Dans les estomacs ci-dessus, on observe une tendance à une proportion de poissons téléostéens nettement plus importante que celle des céphalopodes aussi bien en termes de nombre, qu'en termes de poids frais ou de fréquence. Ceci rejoint assez bien les observations faites par Hernandez-Garcia (1995) dont le pourcentage de fréquence (100 %) et le nombre (93 %) de poissons sont plus importants que ceux des céphalopodes (17 et 5 %). Son étude indique que le merlan bleu (*Micromestius poutassou*) est l'espèce la plus abondante parmi les poissons. On peut donc penser qu'une partie des poissons, tissus ou substances dures, trouvés dans les espadons ci-dessus est constituée de merlan bleu. Une détermination de l'espèce basée sur les otolithes permettrait de valider cette hypothèse. Il est aussi dit que les céphalopodes sont présents dans les estomacs les plus remplis, ce qui est également le cas ici mais qui ne peut pas être généralisé puisqu'un seul individu présente ce cas. L'espèce majoritaire de céphalopodes dans les estomacs d'Hernandez-Garcia (1995) est *Todarodes sagittatus*, qui est également l'espèce principale parmi les céphalopodes découverts par Bello en 1991 dans les espadons provenant de la Méditerranée (mers Adriatique et Ionienne) et par Relini et al. (1994, mer Ligure). Ce calmar fait aussi partie des espèces clés retrouvées dans les espadons pêchés dans la baie de Biscay par Chancollon et al. en 2006. Ici encore, on peut supposer que cette espèce est donc présente dans l'estomac de nos espadons. A nouveau, une

détermination de l'espèce à partir des becs de céphalopodes permettrait de valider cette hypothèse. A l'inverse, les résultats diffèrent de ceux obtenus par Chancollon et al. en 2006 au niveau de la Baie de Biscay dans l'Atlantique Nord dont les proportions relatives de proies étaient de 40,5 % de téléostéens et de 59,3 % de céphalopodes. Toutefois, ils ajoutent qu'en considérant uniquement les poids frais, celui de poissons dominait largement, ce qui est notre cas également. Bello en 1991 trouve que les proies des espadons au niveau de l'Est de la Méditerranée sont constituées en premier lieu de céphalopodes et en deuxième de téléostéens. Relini et al. (1994), en mer Ligure, trouvent une proportion de 52:24:1 pour les céphalopodes:téléostéens:crustacés. La présence de crustacés se manifeste par des cuticules dans l'estomac de l'espadon 1 et par un morceau de carapace dans l'estomac 7. Ils évoquent également la présence d'un grand nombre de poissons de la famille des Paralépididés, poissons anguilliformes. Dans l'estomac 6, on retrouve un poisson de morphologie similaire qui pourrait éventuellement être associé à cette famille.

D'après Palko (1981), l'espadon étant opportuniste, le contenu stomacal dépendrait surtout de la disponibilité en proies de l'environnement avoisinant.

Les résultats des contenus stomacaux doivent être analysés avec précaution et prendre en compte le fait que les palangres sont posées la nuit et relevées entre plusieurs heures et plusieurs jours après. Entre la capture du poisson et la congélation de son estomac, la digestion des aliments continue. De plus, la possibilité de régurgitation est fréquente pendant et après la prise de l'espadon (Tibbo et al. 1961). Ces deux phénomènes biaisent donc les indices de remplissage des estomacs ainsi que les observations en général. Il faut également souligner que le nombre de sites d'échantillonnage est restreint et que leur éloignement est faible par rapport aux capacités de déplacement des espadons. Sans compter que le nombre limité d'estomacs triés ne permettent pas de couvrir les importantes variations inter-individuelles, traduites par des écarts types élevés. A cela, il faut ajouter que les otolithes et les becs de céphalopodes peuvent s'accumuler à cause de la structure villose de l'estomac et de leur temps de dégradation. A l'inverse, certains otolithes ont pu échapper au comptage en étant dissimulés dans les nombreux replis de la paroi de l'estomac (Hernandez-Garcia 1995). Tous ces facteurs sont des sources d'erreurs importantes et pourraient montrer une tendance très différente de la réalité.

Les otolithes, contrairement aux becs de céphalopodes, sont fortement affectés par la dégradation acide de l'estomac. Le taux de dégradation des otolithes est basé sur celui de *Micromestis poutassou* (modalité voir Hernandez-Garcia 1995), ce qui donne un pourcentage de diminution de la longueur de l'otolithe obtenu par :  $\% \text{ diminution} = 1,932 + 0,843 T$ , T représentant le temps de dégradation (en heures). Il faut un peu moins de 5 jours pour avoir une disparition complète des otolithes. Les comptages d'otolithes sont donc indicateurs de proies consommées peu de temps avant la capture du prédateur. Le fait que les estomacs remplis de proies fraîches ne contiennent pas ou peu de substances dures seules et vice versa pourrait correspondre à des stades différents de la digestion. On supposerait alors que l'espadon ne se nourrit plus tant que la digestion de son contenu stomacal n'est pas complète.

Dans l'estomac 4, le nombre d'otolithes est très élevé (560) bien que l'estomac soit considéré comme vide selon l'indice de remplissage. Le diamètre de la plupart des otolithes était petit (< à 1 mm) par rapport aux autres estomacs (1 -5 mm). Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'individu ait consommé un très grand nombre de poissons de petites tailles provenant d'un banc. Stillwell et Kohler (1985) nous disent que l'espadon ne subit pas de limitation par la taille de ses proies, pour autant qu'elle soit suffisante à attirer l'attention du prédateur et qu'elle puisse être coupée à coup de rostre. Ceci justifie la présence d'un alevin de poisson dans l'estomac d'un espadon adulte de 40 Kg et 135 cm de long (espadon 3). La présence d'un calmar et de poissons sectionnés en deux, est en accord avec les observations de Toll (1981), de Stillwell et Kohler (1985) et de Bello (1991) qui documentent la présence de cicatrices sur certaines proies et la décapitation d'autres.

## B. Isotopes stables

Les valeurs isotopiques moyennes des filtres, représentant le phytoplancton, sont cohérentes avec celles de la littérature qui prévoient une gamme de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -18 et -24 ‰ dans les milieux marins de nos régions (Fry 2006). Dauby (1989) trouve un  $\delta^{13}\text{C}$  de -23 ‰ en baie de Calvi. Cependant, la barre d'erreur associée aux valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  du phytoplancton est tellement grande que la position de son point sur le graphique devient peu fiable.

Les valeurs isotopiques significativement plus faibles du premier espadon par rapport aux autres peut provenir du fait que cet individu est un juvénile ne pesant que 4 Kg. Son régime

alimentaire peut être différent de celui des adultes. Chancollon et al. (2006) nous disent que les espadons (*Xiphias gladius*) subissent des changements de régime alimentaire ontogéniques. Le  $\delta^{15}\text{N}$ , dont la valeur tend à s'accroître avec le niveau trophique, sert à indiquer la position d'un individu ou d'une espèce dans une chaîne alimentaire tandis que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$ , qui ont tendance à être conservées entre un consommateur et sa nourriture, sont utilisées pour déterminer la source de production primaire d'une chaîne trophique (De Niro et Epstein 1978). Le changement de régime alimentaire entre un juvénile et un adulte affecte les proies consommées tant en terme d'espèces que de niveaux trophiques, ce qui caractérise une niche trophique séparée et peut se marquer dans les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote. La valeur plus faible du  $\delta^{15}\text{N}$  suggère que le juvénile consomme des proies de niveau trophique inférieur et celle du  $\delta^{13}\text{C}$  suggère la consommation d'espèces différentes de celles des espadons adultes. Plus le poisson est grand, plus il exploite une large gamme de taille de proies dans son environnement (Young et al. 2006).

Lors d'une étude sur des espadons (*Xiphias gladius*) prélevés entre 2001 et 2004 au niveau de la côte Est de l'Afrique dans l'océan Indien, Ménard et al. (2007), mesurent des valeurs isotopiques entre -17,4 et -15,0 ‰ de  $\delta^{13}\text{C}$  et entre 11,8 à 16,2 ‰ de  $\delta^{15}\text{N}$ . Cardona et al. (2012) ont également mesuré les déviations standards isotopiques du carbone et de l'azote chez des espadons prélevés dans le Nord-Ouest de la Méditerranée entre 2006 et 2007. Ils obtiennent les moyennes de  $-17,8 \pm 0,3$  ‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $11,4 \pm 0,4$  ‰ pour le  $\delta^{15}\text{N}$ . Les résultats de notre étude vont de -19,7 à -18,5 ‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et de 7,911 ‰ à 11,043 ‰ pour le  $\delta^{15}\text{N}$  avec des moyennes respectives de  $-18,8 \pm 0,3$  ‰ et de  $10,1 \pm 0,6$  ‰. Dans les deux cas, les valeurs isotopiques des espadons corses sont plus basses aussi bien pour le carbone que pour l'azote. Les mesures obtenues dans nos résultats semblent plus proches de celles du Nord-Ouest de la Méditerranée. Les différences peuvent s'expliquer en partie par l'existence de variations spatiales et temporelles des valeurs d'isotopes.

En effet, la composition isotopique d'un animal dépend de celle de sa nourriture, de son niveau trophique et de la signature isotopique des producteurs primaire de la chaîne alimentaire (De Niro et Epstein 1978, Post 2002). Divers processus océaniques rencontrés entre les différents océans et mers, affectent la composition isotopique de ces producteurs primaires, ce qui se répercute sur le reste du réseau trophique. La combinaison de la divergence des signatures isotopiques de la base de la chaîne alimentaire, des signatures au sein des espèces et des espèces consommées par le prédateur contribue aux variations

spatiales qui expliquent principalement la variation du  $\delta^{13}\text{C}$ . La valeur du  $\delta^{15}\text{N}$  dépend, elle, surtout de la source d'azote utilisée (nitrate, ammonium ou diazote) et est très variable au cours du temps. Le fractionnement isotopique entre une source et son consommateur est d'autant plus grand que l'élément est disponible. Ce fractionnement évolue donc au cours des blooms qui passent d'une situation illimitée en azote à une situation déficiente en azote. Les mécanismes de concentration du carbone du phytoplancton est inductible, ce qui conduit également à des variations temporelles de la concentration en  $\delta^{13}\text{C}$ . Il faut donc prendre en compte que dans les deux autres études, les valeurs isotopiques des espadons sont intégrées sur plusieurs années, ce qui efface les variations saisonnières, tandis qu'ici, les individus proviennent tous d'une même période de temps.

L'océan Indien est un océan moins oligotrophe que la Méditerranée et est donc enrichi en azote par rapport à celle-ci. La disponibilité plus importante du  $^{15}\text{N}$  conduit à un fractionnement plus important du  $\delta^{15}\text{N}$  et à un enrichissement plus élevé entre un consommateur et sa source. De plus, la mer d'Oman contient de nombreuses zones anoxiques en sub-surface, où l'utilisation de la réaction de dénitrification bactérienne est intensive (Gruber et Sarmiento 1997). Cette réaction favorise la transformation du nitrate léger en diazote, ce qui laisse une proportion importante de nitrates lourds. Lorsque de l'eau de sub-surface est amenée en surface, elle augmente le  $\delta^{15}\text{N}$  de l'azote à une valeur supérieure à cinq pour mille (Naqvi et al. 2006). Cet azote lourd est ensuite disponible pour les différentes chaînes alimentaires. Il est plus probable que les variations isotopiques soient d'ordre temporel. En effet, la distance entre les deux sites d'études est faible par rapport à celles que les espadons sont capables de parcourir lors de leurs migrations.

Ménard et al. (2007) montrent une corrélation positive entre les valeurs isotopiques du carbone et de l'azote en fonction de la taille. Si celle-ci s'exprime réellement dans la nature, les différences de tailles entre les espadons des trois études peuvent aussi être corrélées aux variations isotopiques observées. Pourtant, dans ce cas-ci, la relation selon la taille n'est pas significative. Cependant, la relation n'a peut-être pas pu être exprimée à la suite de son trop faible effectif ( $N = 5$ ,  $N$  représentant le nombre d'individus). Les variations inter-individuelles se marquent d'autant plus que le nombre d'observations est restreint. Il faut aussi se rappeler que la masse corporelle de l'individu influence également les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  et de  $\delta^{15}\text{N}$  puisque deux individus de la même taille peuvent avoir des poids différents et donc des

niveaux trophiques éventuellement différents. De plus, la relation taille-poids des individus analysés n'est pas respectée. Aucune corrélation selon le sexe n'a été observée.

Tabl. 6 : Comparaison entre les valeurs isotopiques de certaines proies des résultats et celles de la littérature

Espèces	Résultats		Littérature			
	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Localisation	Références
<b>BOG</b>	$-19,4 \pm 0,3$	$7,3 \pm 0,2$	$18,7 \pm 0,1$	$6,7 \pm 0,4$	Calvi (France)	Pinnegaret al. (2000)
<b>CHI</b>	$-19,5 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,6$	ND	$9,5 \pm 0,1$	Castellammare (Italie)	Pinnegar et al. (2003)
<b>CHI</b>	$-19,5 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,6$	$-17,6 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,5$	N-O Méditerranée	Cardona et al. (2012)
<b>SAR</b>	$-20,8 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,2$	$-18,0 \pm 0,2$	$8,7 \pm 0,2$	N-O Méditerranée	Cardona et al. (2012)
<b>SAR</b>	$-20,8 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,2$	ND	$7,9 \pm 0,1$	Castellammare (Italie)	Pinnegar et al. (2003)
<b>MAQ</b>	$-19,3 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,5$	$-18,5 \pm 0,9$	$11,4 \pm 0,4$	N-O Méditerranée	Cardona et al. (2012)
<b>AL</b>	$-19,8 \pm 0,6$	$6,6 \pm 0,4$	ND	$7,7 \pm 0,1$	Castellammare (Italie)	Pinnegar et al. (2003)
<b>AN</b>	$-19,5 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,1$	ND	$7,9 \pm 0,3$	O Majorque	Polunin, et al. (2003)
<b>AN</b>	$-19,5 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,1$	$-18,5 \pm 0,6$	$9,8 \pm 0,8$	N-O Méditerranée	Cardona et al. (2012)
<b>MER</b>	$-18,6 \pm 0,2$	$9,4 \pm 0,4$	ND	$10,8 \pm 0,1$	S îles Baléares (Espagne)	Pinnegar et al. (2003)
<b>MRU</b>	$-18,9 \pm 0,1$	$8,3 \pm 0,4$	ND	$9,7 \pm 0,0$	Castellammare (Italie)	Badalamenti et al (2002)
<b>CLM 1</b>	$-19,7 \pm 0,2$	$7,65 \pm 0,32$	$-17,8 \pm 0,6$	$5,6 \pm 0,5$	N-O Méditerranée	Cardona et al. (2012)

Le tableau 6 compare les valeurs isotopiques de certaines espèces analysées lors de cette étude avec des valeurs de la littérature. Les valeurs isotopiques rencontrées pour chaque espèce dans les différentes zones de la Méditerranée sont similaires. De façon générale, les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  sont plus basses de 1 à 3 ‰ pour le carbone et de 1 à 4 ‰ pour l'azote chez nos individus qu'ailleurs. Les différences observées sont vraisemblablement dues au fait que les mesures sont faites à des endroits et années différents pour des raisons évoquées plus haut. On peut aussi faire l'hypothèse que les  $\delta^{15}\text{N}$  plus élevés des autres études sont liés à un

niveau d'anthropisation plus haut que celui de la Corse où l'impact de l'homme sur l'environnement marin reste faible (Gosselin et al. 2006). En effet, le  $\delta^{15}\text{N}$  de l'azote provenant des égouts est très élevé (15 ‰ au lieu de -5 à +5 ‰ ; Heaton 1986), ce qui se répercute donc sur les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  tout au long de la chaîne alimentaire. Par contre, le  $\delta^{15}\text{N}$  de nos bogues (*Boops boops*) est similaire à celui de Pinnegar et al. (2000) ce qui pourrait se justifier par le fait qu'une partie de celles-ci provient de Calvi.

Les 4 grands groupes correspondent probablement à 4 niveaux trophiques différents causés par un régime alimentaire distinct. Le premier groupe ne concerne que la crevette 3 (*Acantheephyra purpurea*) qui est une espèce mangeuse de poissons, de chaetognathes et d'autres crustacés (krill). Par rapport à sa composition alimentaire, les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  sont étonnamment basses. Il aurait été plus prévisible qu'elle se situe au même niveau que le groupe 3 ou que son régime alimentaire soit constitué en partie de producteurs primaires. Le deuxième rassemble les petits poissons pélagiques, principalement consommateurs de zooplancton, et plus particulièrement de copépodes. Le troisième groupe se constitue d'espèces carnivores se nourrissant de petits poissons pélagiques, de crustacés (principalement du krill ou des copépodes), de mollusques et de céphalopodes. La bogue (*Boops boops*) est un poisson omnivore qui se nourrit aussi bien de proies benthiques (crustacés, mollusques et annélides) que de proies pélagiques (siphonophores, œufs, copépodes) et de végétaux (algues chlorophycées). Sa composition isotopique en azote est donc intermédiaire entre les zooplanctonophage et les piscivores. Le dernier groupe se compose des espadons 2 à 8 et du merlan bleu. Les espadons sont strictement carnivores et se nourrissent principalement de céphalopodes, de téléostéens et de crustacés. Leurs proies peuvent atteindre de grandes tailles, leur niveau trophique est donc relativement élevé. Le régime alimentaire du merlan bleu (*Micromesistius poutassou*) étant constitué principalement de crustacés (type krill), de copépode, d'amphipodes et de juvéniles de poisson, on se serait plutôt attendu à ce qu'il soit situé au niveau du troisième groupe.

Une partie des variations du  $\delta^{13}\text{C}$  observée au sein des niveaux trophiques peut s'expliquer par des différences d'habitats des espèces. En effet, le  $\delta^{13}\text{C}$  est généralement plus élevé chez les organismes benthiques que chez les pélagiques et chez les néritiques que chez les océaniques (Hobson et al. 1994).

Les crevettes 1 (*Parapaneus longirostris*) et 2 (*Plesionika martia*) ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  visiblement plus élevées (aux alentours de -18 ‰) que le reste des espèces échantillonnées (aux alentours de -20 ‰) qui pourraient correspondre à une chaîne trophique basée sur des producteurs primaires différents.

Si on applique les valeurs moyennes de fractionnement trophique d'environ 0,4 et 2,3 ‰ pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{15}\text{N}$  de McCutchan et al. (2003) à la moyenne des valeurs isotopiques des espadons, on en déduit que les proies qui pourraient être les plus fréquentes dans leur régime alimentaire sont la bogue (Boops boops), le maquereau (*Scomber scombrus*) le céphalopode 1 (*Toradores sagittatus*) et la sépiole (*Rossia macrosoma*). Toutefois, les organismes du groupe 2 peuvent globalement participer à ce régime alimentaire. Ceci diffère partiellement des proies majoritaires suggérées par l'étude des contenus stomacaux que sont le merlan (*Micromesistius poutassou*) et le céphalopode 1 (*Toradores sagittatus*). Cette divergence de proies pourraient rendre compte des différences d'informations obtenues par les deux techniques. Les contenus stomacaux nous renseignent sur les aliments ingérés tandis que les isotopes stables nous suggèrent les aliments assimilés. On ne trouve aucune espèce dans les proies prélevées qui pourrait correspondre au régime alimentaire de l'espadon 1. Cependant, il faut noter que les valeurs de fractionnement utilisées ici sont des moyennes qui donnent souvent une bonne indication des relations trophiques mais ce n'est pas toujours le cas. Les valeurs d'enrichissement dépendent de nombreux facteurs comme l'âge de l'animal, la taille, la nourriture, l'état physiologique, etc. Les proies associées à l'alimentation de l'espadon sont donc une indication plutôt qu'une affirmation de la réalité et sont à confronter avec d'autres moyens d'étude.

La contribution relative (%) des différentes proies des espadons adultes ne peut pas être obtenue par l'utilisation du logiciel SIAR. Lorsqu'on lance le modèle en considérant chaque proie comme une source distincte, ou même lorsqu'on rassemble les différentes proies en 5 catégories, celui-ci ne parvient pas à distinguer les sources principales et les catégories sont déterminées soit selon les 4 groupes trophiques décrits plus haut et selon une différence minimum de 2 ‰ d'écart pour le  $\delta^{13}\text{C}$  (Fig.7), soit selon l'habitat (Fig.8). Il attribue une valeur moyenne de 20 % à toutes les proies et les solutions proposées ont toutes une faible fréquence d'occurrence. Les sources ne sont pas constituées de valeurs isotopiques en carbone suffisamment éloignées les unes des autres. Ceci démontre une importante limite d'efficacité de l'utilisation des isotopes dans l'étude des réseaux trophiques. L'évaluation de

la source de carbone d'un organisme n'est possible que pour autant que les différentes sources soient composées de  $\delta^{13}\text{C}$  suffisamment distincts (DeNiro et Epstein 1978).

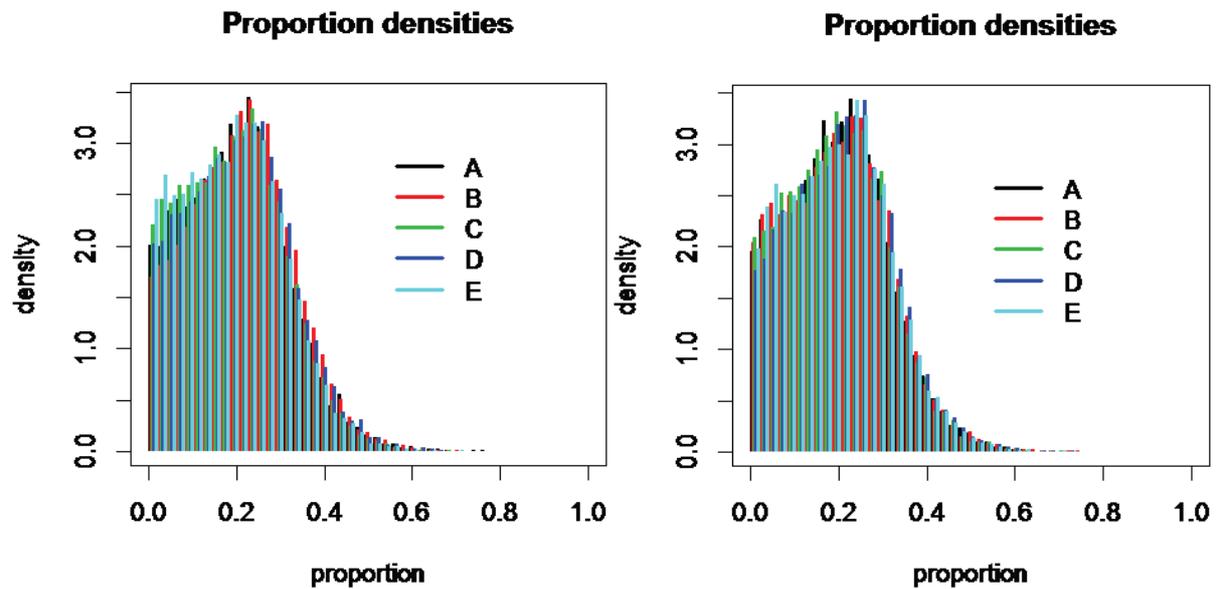


Fig. 7 et 8: Pourcentage de contribution relative de 5 sources potentielles. A gauche : A = *Acanthephyra purpurea* ; B = *Sardina pilchardus*, *Spicara smaris*, *Sardinella aurita* et *Engraulis encrasicolus* ; C = *Plesionika martia* et *Parapaneus longirostris* ; D = *Merluccius merluccius*, *Trachurus trachurus*, *Boops boops*, *Scomber scombrus*, *Rossia macrosoma*, *Illex coindetti* et *Toradores sagittatus* ; E = *Micromesistius poutassou*. A droite : A = *Sardina pilchardus*, *Spicara smaris*, *Sardinella aurita*, *Engraulis encrasicolus*, *Trachurus trachurus* et *Scomber scombrus* ; B = *Boops boops* ; C = *Micromesistius poutassou* et *Merluccius merluccius* ; D = *Plesionika martia*, *Acanthephyra purpurea* et *Parapaneus longirostris* et E = *Rossia macrosoma*, *Illex coindetti* et *Toradores sagittatus*. SIAR

## C. Éléments traces

Des différences de concentrations avec le muscle latéral de l'espadon, en faveur de l'estomac, sont rencontrées pour le Co, Fe, Cu, Mn, V, Mo, Cd et Zn. Onsanit et al. (2010) trouvent également une distribution globalement plus élevée des éléments dans le muscle de l'estomac que dans le muscle abdominal pour *Lateolabrax japonicus* au niveau des îles Fidji. Les éléments traces ne s'accumulent pas de la même façon dans les différents tissus d'un organisme suite aux fonctions physiologiques différentes de ceux-ci et donc à l'action de processus métaboliques différents (Storelli et al. 2005). Les deux muscles sont de types distincts ; du muscle squelettique constitue le flanc du poisson tandis que du muscle lisse constitue l'estomac. Ces différences de constitution et également de fonction pourraient expliquer les différences de concentrations entre les deux types de tissus. Le Cd est 40 fois et le zinc 25 fois plus concentrés dans le muscle de l'estomac que dans le muscle latéral ; on peut donc penser qu'il y a une accumulation préférentielle dans ce muscle. Les deux vecteurs majeurs de l'assimilation des éléments pour un poisson sont l'eau par les branchies lors de la respiration et surtout la nourriture lors de la digestion (Dallinger et al. 1987). Les éléments traces assimilés sont ensuite transportés dans le sang, déposés dans les tissus et excrétés ou stockés (Kojadinovic et al. 2007). On peut penser que les éléments plus concentrés dans le muscle de l'estomac sont ceux assimilés principalement par la prise de nourriture.

Les seuils de concentration en Cd et en Pb dans le muscle d'espadon consommé sont fixés par la Commission Européenne à 0,3 ( $\mu\text{g/g}$  de poids frais, Régulation (EC) No. 1881/2006) sont respectivement 16 et 7 fois supérieurs à la concentration moyenne trouvée dans le muscle des espadons échantillonnés. Le taux de plomb de 0,4 ( $\mu\text{g/g}$  poids frais) fixé par la Commission Européenne, lui, est de sept fois supérieur à ceux observés ici. Les espadons de cette étude sont donc relativement peu contaminés pour ces deux éléments.

Tabl.7 : Comparaison entre les concentrations en éléments traces des résultats des espadons et celles de la littérature.

Eléments	Résultats	Littérature		
	Concentrations (µg/g de poids frais)	Concentrations (µg/g de poids frais)	Localisation	Références
<b>Al</b>	4,8 ± 4,6	1,30	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>V</b>	0,006 ± 0,001	0,021	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Fe</b>	29,6 ± 12,5	22,4 ± 19,1	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)
<b>Fe</b>	29,6 ± 12,5	3,8	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Cr</b>	0,08 ± 0,05	0,39	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Mn</b>	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,2	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)
<b>Mn</b>	0,3 ± 0,1	0,0	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Co</b>	0,014 ± 0,008	0,004	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Ni</b>	< LD	0,548 ± 0,03	Latium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
<b>Ni</b>	< LD	0,042	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Cu</b>	1,6 ± 0,5	0,6 ± 0,3	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007))
<b>Cu</b>	1,6 ± 0,5	3,9 ± 0,3	Latium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
<b>Cu</b>	1,6 ± 0,5	0,4	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Zn</b>	84 ± 22	42 ± 35	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)
<b>Zn</b>	84 ± 22	28 ± 0	Latium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
<b>Zn</b>	84 ± 22	5	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Se</b>	3,07 ± 0,56	2,45 ± 1,21	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)
<b>Se</b>	3,07 ± 0,56	0,48	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Ag</b>	< LQ	0,051	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Cd</b>	0,019 ± 0,007	0,101 ± 0,054	S mer Tyrrhénienne	Damiano et al. (2011)
<b>Cd</b>	0,019 ± 0,007	1,04 ± 1,09	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)
<b>Sb</b>	< LQ	0,001	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>Mo</b>	0,016 ± 0,010	0,004	Côtes de France	Guérin et al. (2011)
<b>As</b>	7,3 ± 4,6	3,7 ± 1,4	Mer Ionienne	Storelli et al. (2005)
<b>Pb</b>	0,06 ± 0,03	0,97 ± 0,65	NC Atlantique	Damiano et al. (2011)
<b>Pb</b>	0,06 ± 0,03	1,16 ± 0,75	S mer Tyrrhénienne	Damiano et al. (2011)
<b>Pb</b>	0,06 ± 0,03	0,12 ± 0,12	Canal Mozambique	Kojadinovic et al. (2007)

Le tableau ci-dessus compare les concentrations musculaires ( $\mu\text{g}$  par g de poids frais) en éléments traces obtenues dans les résultats avec ceux de la littérature. Pour toutes les observations qui vont suivre, il faut remarquer que la moyenne des valeurs de concentrations dans le muscle abdominal des 19 éléments est obtenue sur base de seulement trois individus, ne représentant peut-être pas un espadon moyen au niveau de la Corse. Les concentrations moyennes dans le muscle latéral des espadons provenant de l'océan Indien (canal du Mozambique) sont similaires aux nôtres pour le fer, le magnésium, le zinc, le sélénium et le plomb, supérieures pour le cadmium (55 x) et inférieures pour le cuivre (3x). Les concentrations moyennes dans le muscle abdominal des espadons pris au niveau de l'Italie sont inférieures à celles des espadons en Corse pour le zinc (3x) et supérieure pour le nickel et pour le cuivre (2x). Les espadons venant des côtes françaises ont des concentrations musculaires moyennes similaires aux résultats obtenus uniquement pour l'aluminium, supérieures pour le vanadium (4 x), le chrome (5x), le nickel, l'argent et l'antimoine, et inférieures pour le fer (8 x), le magnésium, le cobalt (4 x), le cuivre (4 x), le zinc (17 x), le sélénium (6 x) et le molybdène (4 x). Les valeurs de cadmium (5 x) et de plomb (19 x) sont en moyenne inférieures dans le muscle des espadons 1, 4 et 5 que dans celui des espadons pêchés en mer Tyrrhénienne, l'arsenic est équivalent à celui de la mer Ionienne et le plomb est nettement inférieur (16 x) à l'Atlantique Nord-Central. Les variations spatiales de la concentration des différents éléments est l'un des facteurs qui pourraient expliquer les différences de concentrations observées entre les études. La Méditerranée est naturellement oligotrophique mais, suite à l'important peuplement et à l'industrialisation de ses côtes, ses eaux subissent les effets de l'anthropisation dont l'impact dans certains endroits est non négligeable. Les océans Indien et Atlantique sont naturellement plus riches pour les éléments mesurés. Les capacités de déplacements des espadons étant fortes, on ne peut affecter ceux-ci qu'à des régions vastes, ici, la Méditerranée, l'océan Indien et l'Atlantique Nord. Il est toutefois difficile de faire des comparaisons entre l'océan Indien, l'Atlantique et la mer Méditerranée puisque la taille des espadons est plus petite dans cette dernière. En effet, en plus des facteurs abiotiques tels que la distribution des éléments dans l'eau et la physico-chimie des masses d'eau, de nombreux paramètres biotiques tels que l'âge, la taille le sexe, le régime alimentaire, l'état de santé et la biodisponibilité des éléments (formes, concentration, facilités d'acquisition, etc.) affectent l'accumulation des éléments dans un organisme marin. Sans compter que la présence ou l'absence de certains éléments influence l'absorption d'autres éléments. Les concentrations en fer, en zinc et en sélénium seraient liées entre elles dans les muscles des espadons (Kojadinovic et al. 2007).

Certains éléments (expl. Cd et Se) tendent à s'accumuler dans les tissus tout au long de la vie des organismes ; ceci est dû à la faible capacité d'excrétions de ces éléments. Leur bioconcentration est donc en corrélation avec la taille des individus. Kojadinovic et al. (2007) trouvent une relation positive selon la taille pour le cadmium mais pas de relation pour le plomb des espadons de l'océan Indien. Aucune corrélation significative n'est observée dans notre étude pour l'ensemble des éléments. Il faut cependant ajouter que la corrélation des concentrations en éléments traces selon la taille est calculée à partir des valeurs des concentrations dans le muscle de l'estomac car trop de données de taille étaient disponibles pour être utilisées pour les muscles latéraux.

Les éléments traces essentiels au développement des poissons, ici le Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, V, Zn et Sn, sont présents au sein d'une même espèce en concentrations moins variables que les éléments non-essentiels, grâce à des systèmes de régulation. Les éléments non-essentiels, ici Al, Sb, Pb, Ag, Cd, As, Be et Bi, suivent les mêmes voies d'acquisition que les éléments essentiels mais sont peu régulés et sont donc présents en concentrations plus représentatives du niveau d'exposition à ces éléments avec une tendance à l'accumulation. Les concentrations en Cd et en Pb montrent d'importantes variations spatiales, les espadons échantillonnés en Corse montrant des valeurs plus faibles que celles des autres régions. Le Zinc, bien qu'essentiel montre également d'importantes variations selon les études. Les valeurs des espadons de cette étude sont supérieures à celles trouvées au niveau de l'Italie et de la France. La Méditerranée est naturellement riche en zinc via des activités hydrothermales mais subit également des apports anthropiques via le ruissellement et le rejet direct. Les sources principales d'enrichissement sont les industries minière et métallurgique (Scoullou 1996). Ceci pourrait justifier les concentrations élevées rencontrées dans notre étude.

Tabl.7 : Comparaison entre les concentrations en éléments traces des proies des résultats et celles de la littérature.

		Résultats	Littérature		
Eléments	Espèces	Concentrations ( $\mu\text{g/g}$ de poids frais)	Concentrations ( $\mu\text{g/g}$ de poids frais)	Localisation	Références
<b>Al</b>	SAR	$2,5 \pm 5,1$	0,2	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	$6,5 \pm 10,1$	1,2		
	AN	< LQ	3,1		
	MRU	$11,6 \pm 4,2$	0,8		
<b>V</b>	SAR	< LQ	0,043	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	$0,005 \pm 0,003$	0,022		
	AN	$0,025 \pm 0,010$	0,274		
	MRU	$0,032 \pm 0,008$	0,007		
<b>Co</b>	SAR	$0,024 \pm 0,009$	0,036	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	$0,026 \pm 0,010$	0,005		
	AN	$0,023 \pm 0,010$	0,019		
	MRU	$0,034 \pm 0,010$	0,001		
<b>Ni</b>	CHI	< LQ	$0,733 \pm 0,001$	Latinium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
	SAR	< LQ	$0,683 \pm 0,010$		
	MAQ	< LQ	$0,403 \pm 0,010$		
	AN	$0,135 \pm 0,073$	$1,211 \pm 0,020$		
	MRU	< LQ	$0,895 \pm 0,020$		
	CRE 1	$0,253 \pm 0,071$	$0,619 \pm 0,020$		
<b>Cu</b>	CHI	$1,6 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,2$	Latinium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
	SAR	$3,5 \pm 1,2$	$1,5 \pm 0,02$		
	MAQ	$2,5 \pm 1,1$	$3,5 \pm 0,2$		
	AN	$4,8 \pm 1,8$	$4,0 \pm 0,05$		
	MRU	$0,9 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,5$		
	CRE 1	$17,5 \pm 5,1$	$21,1 \pm 0,7$		
<b>Zn</b>	CHI	$31 \pm 14$	$11 \pm 0$	Latinium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
	SAR	$50 \pm 29$	$9 \pm 1$		
	MAQ	$37 \pm 16$	$4 \pm 0$		
	AN	$62 \pm 25$	$8 \pm 1$		
	MRU	$15 \pm 1$	$51 \pm 0$		
	CRE 1	$46 \pm 4$	$12 \pm 0$		
<b>Se</b>	SAR	$1,42 \pm 0,54$	0,02	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	$2,51 \pm 0,97$	0,44		
	AN	$1,52 \pm 0,42$	0,69		
	MRU	$1,79 \pm 0,19$	0,23		
<b>Ag</b>	SAR	< LQ	0,021	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	< LQ	0,288		
	AN	$0,007 \pm 0,004$	0,059		
	MRU	< LQ	0,094		
<b>Cd</b>	CHI	$0,012 \pm 0,014$	$0,019 \pm 0,000$	Latinium (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
	SAR	$0,026 \pm 0,028$	$0,025 \pm 0,010$		
	MAQ	$0,011 \pm 0,011$	$0,008 \pm 0,000$		

	AN	0,052 ± 0,031	0,026 ± 0,010		
	MRU	0,012 ± 0,013	0,012 ± 0,000		
	CRE 1	0,030 ± 0,010	0,431 ± 0,002		
<b>Sb</b>	SAR	< LC	0,001	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	< LC	0,001		
	AN	< LD	0,001		
	MRU	0,009 ± 0,001	0,001		
<b>Mo</b>	SAR	0,022 ± 0,015	0,027	Côtes France	Guérin, et al. (2011)
	MAQ	< LQ	0,018		
	AN	0,021 ± 0,006	0,032		
	MRU	0,016 ± 0,001	0,003		
<b>Pb</b>	CHI	0,06 ± 0,06	0,66 ± 0,02	Latinius (Italie)	Papetti et Rossi (2009)
	SAR	< LQ	1,88 ± 0,04		
	MAQ	< LD	0,60 ± 0,02		
	AN	< LD	1,30 ± 0,05		
	MRU	< LQ	0,34 ± 0,01		
	CRE 1	< LQ	0,45 ± 0,03		

Lorsque les concentrations musculaires en éléments traces des proies de nos résultats sont comparées avec celles de la littérature, on observe que le plomb, le nickel et l'argent sont moins présents au niveau de la Corse qu'au niveau de l'Italie et de la France. Dans cette étude, par contre, le sélénium est présent dans les muscles des proies en concentrations supérieures à celles de la France. Les valeurs musculaires du cadmium sont similaires entre la Corse et l'Italie, sauf pour la crevette *Parapaneus longirostris* dont les concentrations sont 14 fois plus élevées en Italie. Les autres éléments ont des tendances variables selon les espèces. Parmi les proies comparées, seul le merlu (*Merluccius merluccius*) présente des concentrations généralement supérieures en Corse que dans les autres villes ; le reste des espèces (*Engraulis encrasicolus*, *Sardina pilchardus*, *Scomber scombrus*, *Trachurus trachurus* et *Parapaneus longirostris*) est globalement moins concentré en éléments traces dans notre étude que dans les autres. Une fois de plus, ces variations sont le résultat d'un ensemble de facteurs abiotiques et biotiques qui influencent l'accumulation des éléments de façon propre à chaque espèce. L'habitat, notamment, peut avoir des conséquences sur cette accumulation. Pappetti et Rossi (2009) affirment que les concentrations en Cd, Cu et Zn du muscle des poissons benthiques sont plus élevées que celles des poissons pélagiques.

L'espadon est un top prédateur d'une relativement longue durée de vie : environ 10 ans en Méditerranée. Il a également un métabolisme intense qui lui demande un apport fréquent d'énergie. Son taux de prédation est donc très élevé. La vitesse de prise des contaminants est corrélée à l'intensité du métabolisme. La combinaison d'une alimentation fréquente et du haut

taux métabolique contribue à l'accumulation des contaminants dans l'organisme (Canli et Atli 2003). Pourtant cette bioaccumulation est peu visible dans les résultats obtenus puisque aucune différence significative n'est observée avec la moyenne des proies pour l'aluminium, le fer, le chrome, le cobalt, le cuivre, le sélénium, l'argent, le cadmium, l'antimoine, le molybdène, le béryllium, le plomb et le bismuth. La concentration en arsenic, en vanadium, en manganèse et en nickel dans le muscle abdominal des espadons est même inférieure à la concentration moyenne dans les muscles des proies. Seul le zinc et l'étain sont plus concentrés. Cette faible accumulation observée peut être due à une bonne régulation des éléments essentiels et à l'utilisation de mécanismes efficaces de détoxification pour les autres. Le processus de détoxification le plus courant est la fixation des métaux sur une protéine appelée méthalotionéine. En le fixant, elle réduit la concentration de métaux ioniques libres et protège donc les cellules des effets toxiques du métal. Ceux-ci s'expriment notamment à la suite du remplacement par le métal des ions ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ) dans les enzymes, causant leur désactivation. Les méthalotionéines visent principalement le Cd, l'Ag, le Cu et le Zn. Les éléments piégés sont ensuite traités dans le foie et évacués par les reins (Jackson 1998 ; Mason, et Jenkins 1995 ; Roesijadi 1996). Le sélénium agit aussi contre la toxicité du cadmium et de l'argent (Chen et al. 1975). Une deuxième technique de détoxification est l'insolubilisation des ions en concrétions.

Les concentrations musculaires des éléments dans la sépiole (*Rossia macrosoma*) et la crevette 2 (*Plesionika martia*) sont significativement plus hautes que la moyenne des proies, à l'exception du sélénium et de l'étain pour la crevette. Ces deux espèces pourraient donc être des espèces hyper-accumulatrices des polluants.

Si on reprend les proies les plus probablement consommées par l'espadon, déterminées sur base des isotopes stables (la sépiole *Rossia macrosoma*, la bogue *Boops boops* et le maquereau *Scomber scombrus*), et des contenus stomacaux (merlan *Micromesistius poutassou* et le céphalopode 1 *Toradores sagittatus*), et que l'on compare leurs concentrations en éléments traces avec celles des espadons, on remarque que la plupart de ces éléments sont présents en concentrations similaires pour la bogue et le maquereau et du merlan. Les concentrations musculaires de la bogue et de l'espadon sont significativement similaires pour l'Al, le Mn, le Co, le Ni, le Cu, le Se, l'Ag, le Cd, le Sb, le Mo, l'As, le Be et le Pb. Les concentrations dans la bogue sont plus élevées pour le vanadium et inférieures pour le fer, le chrome, le zinc, le bismuth et l'étain. Les concentrations musculaires du maquereau sont

significativement similaires pour l'Al, le V, le Fe, le Mn, le Co, le Ni, le Cu, le Se, le Cd, l'Ag, le Mo, l'As et le Be. Les concentrations dans le maquereau sont inférieures à l'espadon pour le chrome, le zinc, l'antimoine, le plomb, le bismuth et l'étain. Les concentrations musculaires de l'espadon et du merlan sont significativement similaires pour l'Al, le Cr, le Co, le Ni, l'Ag, le Sn, le Mo, le Sb, le Be et le Bi. Les concentrations dans le merlan sont plus élevées pour le vanadium, le manganèse et l'arsenic et inférieures pour le fer, le cuivre, le zinc, le cadmium et le plomb. Les concentrations musculaires de la sépiole sont significativement plus élevées que celles de l'espadon pour l'ensemble des éléments à l'exception du Zn, du Se, du Sn et du Bi où elles sont significativement similaires. Le céphalopode 1 renferme également des concentrations musculaires globalement plus élevées que celles de l'espadon pour tous les éléments exceptés le zinc et le sélénium. Si on prend en compte, en plus, le fait que le Cd est un élément indicateur de la source de nourriture (Das et al. 2004), on peut donc faire l'hypothèse que les espadons de cette étude consomment peu ou pas du tout la sépiole, le céphalopode 1 et le merlan bleu puisque les concentrations en Cd sont globalement plus élevées que celles des éléments des espadons. Si la bogue, le merlan et le maquereau font partie des proies dominantes de leur régime alimentaire, les espadons analysés biomagnifient peu l'Al, le Mn, le Co, le Ni, le Cu, le Se, l'Ag, le Mo, l'As et le Be puisqu'ils sont présents en concentrations équivalentes ou inférieures dans les tissus des proies que dans ceux du consommateur. Par contre, le Cr, le Bi, le Sn et plus particulièrement le Zn sont potentiellement biomagnifiés dans le muscle des espadons puisque présents de façon significativement plus concentrées par rapport aux muscles des ces proies.

## Conclusions et perspectives

Cette étude s'intégrait dans la thèse de Jessica DIJOUX, doctorante de l'université de Corte, dont les trois axes d'étude sont : l'état de population, la contamination en éléments traces et la chaîne alimentaire des espadons corses. Les objectifs de ce mémoire étaient de déterminer la niche trophique (étude du régime alimentaire et de la position trophique) de l'espadon (*Xiphias gladius* L.), de connaître son taux de contamination aux éléments traces, de mettre en relation ces deux pôles de recherche ainsi que de déterminer si les espadons corses constituent une sous-population de la méditerranéenne. Afin de réaliser cela, des

muscles latéraux d'espadon et de proies potentielles ont été analysés pour leur contenu en isotopes stables (carbone et azote) et en éléments traces. Les contenus des estomacs de ces mêmes espadons ont également été triés.

Dans l'analyse des contenus stomacaux, malgré un faible pourcentage de remplissage moyen, on observe une tendance à une proportion de poissons (en nombre, poids et fréquence d'apparition) plus importante que celle des céphalopodes. Hernandez-Garcia (1995), qui trouve des résultats similaires aux nôtres pour des espadons pris au niveau du détroit de Gibraltar, déclare une majorité de merlans bleus (*Micromesistius poutassou*) pour les téléostéens et de calmars (*Toradores sagittatus*) pour les céphalopodes rencontrés dans les estomacs de son effectif. Ces deux espèces ont donc de fortes chances d'être fréquemment ingérées par nos espadons. Il serait intéressant de déterminer les espèces présentes dans les estomacs d'espadons de ce mémoire sur base des otolithes et des becs de céphalopodes et ce, afin de les confronter avec les proies d'espadons indiquées dans la littérature et avec celles déduites de l'étude des isotopes stables. Lors de cette détermination, il faudra tenir compte du fait que les espèces à otolithes larges seront surestimées et celles à otolithes étroites seront sous-estimées puisque les plus gros otolithes se dégradent plus lentement que les petits, (Jobling and Breiby 1986).

L'analyse des isotopes stables (carbone et azote) nous montre que les rapports isotopiques  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  et  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  mesurés lors de cette étude sont différents de ceux obtenus dans l'océan Indien. Ces variations spatiales sont causées par des valeurs isotopiques différentes des producteurs primaires (conservées sur le reste de la chaîne trophique), par la présence d'autres espèces et par des niveaux trophiques divergents dus aux tailles d'espadons différentes. Contrairement aux résultats de Ménard et al. (2007), aucune relation de taille n'est confirmée pour les  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ . On observe également que les valeurs isotopiques des juvéniles sont nettement individualisées par rapport à celles des espadons adultes. Cette possibilité d'une niche trophique propre pour les jeunes espadons appuie l'idée d'un changement ontogénique du régime alimentaire émise par Chancollon et al. (2006).

Les proies potentielles des espadons peuvent être réparties en niveaux trophiques : les omnivores, les carnivores de niveau trophique bas (consommateurs de copépodes), les carnivores de niveau trophique intermédiaire (consommateurs de vertébrés et invertébrés de petites tailles), et les carnivores de haut niveau trophique (consommateurs de vertébrés et

invertébrés de tailles supérieures). Selon les valeurs moyennes de fractionnement de McCutchan et al. (2003) d'environ 0,4 pour mille pour le  $\delta^{13}\text{C}$  et de 2,3 pour mille pour le  $\delta^{15}\text{N}$ , on en déduit que le groupe majoritairement consommé par les espadons est celui des carnivores de niveau trophique intermédiaire et de l'omnivore. Malheureusement, le logiciel SIAR n'a donné aucune conclusion concernant les proportions de chaque proie dans le régime alimentaire de l'espadon, si ce n'est la confirmation de la limitation de l'utilisation des isotopes stables à des sources de  $\delta^{13}\text{C}$  suffisamment éloignés.

Le recouplement des proies déduites entre les contenus stomacaux et les isotopes stables n'est pas évident. Ceci rend peut-être compte de la différence d'informations préférées par les deux techniques : la première indique les proies ingérées tandis que la seconde suggère les proies assimilées. Cependant, au vu du faible nombre d'espadons étudiés dans ce mémoire (9 individus), un effectif plus large aurait sans doute permis d'obtenir une analyse plus profonde des proies potentielles ainsi qu'une meilleure comparaison entre les résultats des contenus stomacaux et des isotopes stables.

Les concentrations en éléments traces significativement non semblables entre les muscles latéraux et de l'estomac semblent indiquer une accumulation préférentielle dans l'estomac. Une divergence de métabolisme entre les deux tissus ainsi qu'une assimilation via la nourriture pourraient justifier ce phénomène.

La divergence de mesures en éléments traces du muscle abdominal des espadons entre la Méditerranée, l'océan Indien et l'Atlantique Nord est liée à de nombreux facteurs abiotiques : propriété des masses d'eau, distribution, forme et concentration des éléments dans l'eau, etc. et biotiques : âge, santé, régime alimentaire, capacité de détoxification de l'espèce, etc. Malgré leur position trophique, métabolisme et taux de prédation élevés, une faible bioaccumulation des éléments a été constatée dans cette étude. La position de la chaîne trophique seule n'est donc pas suffisante pour expliquer le phénomène de bioaccumulation.

Sur base des concentrations en éléments traces des proies suggérées par les isotopes stables et les contenus stomacaux, on peut penser que l'Al, le Mn, le Co, le Ni, le Cu, le Se, l'Ag, le Mo, l'As et le Be sont peu biomagnifiés dans le muscle abdominal de l'espadon puisqu'ils sont présents en concentrations équivalentes ou inférieures tant dans les tissus des proies que dans ceux du consommateur. Par contre, le Cr, le Bi, le Sn et plus particulièrement le Zn sont

potentiellement biomagnifiés dans le muscle des espadons puisque présents de façon significativement plus concentrées par rapport aux muscles des ses proies.

Bien que les valeurs isotopiques de notre étude soient différentes de celles d'autres régions de la Méditerranée mais plus proches que celles de l'océan Indien, les résultats obtenus ne sont pas suffisants pour affirmer l'existence d'une sous-population corse d'espadons au sein de la population méditerranéenne. Les éléments traces ne montrent pas de tendance particulière entre les concentrations musculaires des espadons corses et ceux d'autres études en Méditerranée.

Pour les trois objectifs, une nouvelle étude devrait être réalisée afin de confirmer les résultats obtenus. Cette étude nécessitera un nombre d'individus (proies et espadons) échantillonnés nettement plus grand afin de diminuer les erreurs liées aux variations interindividuelles, d'obtenir de meilleures statistiques et de mieux mettre en évidence les relations selon la taille des valeurs isotopiques (en carbone et en azote) et des concentrations en éléments traces. Il est également indispensable de posséder un maximum de données biologiques de chaque espadon afin de ne pas être limité dans l'interprétation des résultats. Il serait bon également de prélever des espadons pendant au minimum une année complète afin de lisser les variations isotopiques saisonnières. Une ligne de base fiable contenant plusieurs sources primaires (phytoplancton, épiphytes, algues) est également indispensable pour situer précisément le niveau trophique des prédateurs. Le nombre d'espèce de proies ciblées devrait être plus réduit afin d'échantillonner un nombre plus grand d'individus de chaque espèce. Il faut également penser que les proies analysées dans ce mémoire ne sont peut-être pas les proies effectivement consommées par l'espadon. D'autres espèces de proies potentielles pourraient donc aussi être étudiées.

## Références

- Aliçli, T. Z., & Oray, I. K. (2001). Age and growth of swordfish (*Xiphias gladius* L., 1758) in the Eastern Mediterranean sea. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 52(2), 698-707.
- Alot, J. (2009). Résultats du recensement de la population. *Quant'île*, 5.
- Anonymous. (2004). Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain on a request from the commission related to mercury and methylmercury in food. *The EFSA Journal*, 34, 1-14.
- Anonymous. (2008)a. Report of the 2007 Mediterranean swordfish stock assessment session. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 62(4), 951-1038.
- Anonymous. (2008)b. Study of maritime traffic flows in the Mediterranean sea. In Lloyd's Marine, Intelligence Unit (Ed.): REMPEC, SAFEMED.
- Anonymous. (2010). Report of the 2009 Atlantic swordfish stock assesement meeting. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 65(1), 1-123.
- Anonymous. (2011). Report of the 2010 Mediterranean swordfish stock assessment meeting. *Coll. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 66(4), 1405-1470 .
- Badalamenti, F., D'Anna, G., Pinnegar, J. K., & Polunin, N. V. C. (2002). Size-related trophodynamic changes in three target fish species recovering from intensive trawling. *Marine Biology*, 141(3), 561-570.
- Bedrani, S., Capone, R., Alvarez-Coque, J.-M. G., Malorgio, G., Miclet, G., Oliver, P., & Simantov, A. (2002). *Développement et politiques agroalimentaires dans la région méditerranéenne : rapport annuel 2002*. Paris.
- Bello, G. (1991). Role of cephalopods in the diet of the swordfish, *Xiphias gladius*, from the Eastern Mediterranean Sea. *Bulletin of Marine Science*, 49(1-2), 312-324.
- Bryan, G. W. (1979). Bioaccumulation of marine pollutants. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological sciences*, 286(1015), 483-505.
- Cabana, G., & Rasmussen, J. B. (1996). Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93(20), 10844-10847.
- Caddy, J. F., Refk, R., & Do-Chi, T. (1995). Productivity estimates for the Mediterranean: Evidence of accelerating ecological change. *Ocean and Coastal Management*, 26(1), 1-18.
- Canli, M., & Atli, G. (2003). The relationships between heavy metal (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) levels and the size of six Mediterranean fish species. *Environmental Pollution*, 121(1), 129-136.

- Cardona, L., de Quevedo, I. A., Borrell, A., & Aguilar, A. (2012). Massive consumption of gelatinous plankton by mediterranean apex predators. *PLoS ONE*, 7(3).
- Carey, F. G., & Robison, B. H. (1981). Daily patterns in the activities of swordfish (*Xiphias gladius*) observed by acoustic telemetry (Atlantic, Pacific). *Fishery Bulletin*, 79(2), 277-292.
- Caut, S., Angulo, E., & Courchamp, F. (2009). Variation in discrimination factors ( $\Delta 15\text{N}$  and  $\Delta 13\text{C}$ ): The effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction. *Journal of Applied Ecology*, 46(2), 443-453.
- Cavallaro, G., Potoschi A., & Cefali, A. (1991). Fertility gonad-somatic index and catches of eggs and larvae of *Xiphias gladius* L. 1758 in the southern Tyrrhenian Sea. *Coll. Vol. of Sci. Pap., ICCAT*. 35, 502-507.
- Chancollon, O., C. Pusineri, & V. Ridoux. (2006). Food and feeding ecology of Northeast Atlantic swordfish (*Xiphias gladius*) off the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science*, 63(6), 1075-1085.
- Chen, R. W., Whanger, P. D., & Weswig, P. H. (1975). Selenium induced redistribution of cadmium binding to tissue proteins: a possible mechanism of protection against cadmium toxicity. *Bioinorganic Chemistry*, 4(2), 125-133.
- Dallinger, R., Prosi, F., Segner, H., & Back, H. (1987). Contaminated food and uptake of heavy metals by fish: a review and a proposal for further research. *Oecologia*, 73(1), 91-98.
- Damiano, S., Papetti, P., & Menesatti, P. (2011). Accumulation of heavy metals to assess the health status of swordfish in a comparative analysis of Mediterranean and Atlantic areas. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1920-1925.
- Das, K., Siebert, U., Fontaine, M., Jauniaux, T., Holsbeek, L., & Bouquegneau, J. M. (2004). Ecological and pathological factors related to trace metal concentrations in harbour porpoises *Phocoena phocoena* from the North Sea and adjacent areas. *Marine Ecology Progress Series*, 281, 283-295.
- Dauby, P. (1989). The stable carbon isotope ratios in benthic food webs of the gulf of Calvi, Corsica. *Continental Shelf Research*, 9(2), 181-195.
- De La Serna, J. M., Ortiz De Urbina, J. M., & Macias, D. (1996). Observations on sex ratio maturity fecundity by length class for swordfish captured with surface longline in western Mediterranean. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 45(1), 115-139.
- DeMartini, E. E., Uchiyama, J. H., & Williams, H. A. (2000). Sexual maturity, sex ratio, and size composition of swordfish, *Xiphias gladius*, caught by the Hawaii-based pelagic longline fishery. *Fishery Bulletin*, 98(3), 489-506.
- DeNiro, M. J. & Epstein, S. (1978). Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(5), 495-506.

- Dewar, H., Prince, E. D., Musyl, M. K., Brill, R. W., Sepulveda, C., Luo, J., McNaughton, L. M. (2011). Movements and behaviors of swordfish in the Atlantic and Pacific Oceans examined using pop-up satellite archival tags. *Fisheries Oceanography*, 20(3), 219-241.
- Duffus, J. H. (2003). Erratum: "Heavy metals" - A meaningless term? IUPAC technical report (Pure and Applied Chemistry (2002) 74 (793-807)). *Pure and Applied Chemistry*, 75(9), 1357.
- Dufour, E., & Gerdeaux, D. (2001). Apports des isotopes stables ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^{36}\text{S}/^{34}\text{S}$   $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) aux études écologiques sur les poissons. *Cybium*, 25(4), 369-382.
- France, R. L. (1995). Differentiation between littoral and pelagic food webs in lakes using stable carbon isotopes. *Limnology and Oceanography*, 40(7), 1310-1313.
- Fry, B. (2006). *Stable isotope ecology*. New York: Springer.
- Fry, F. E. J. (1971). The Effect of Environmental Factors on the Physiology of Fish. *Vol. 6* (pp. 1-98).
- Garey, F. G. (1982). A brain heater in the swordfish. *Science*, 216(4552), 1327-1329.
- George, J. P. (1992). La pêche à la palangre. *Collection FAO Formation*, 22.
- Gosselin, M., Bouquegneau, J. M., Lefèbvre, F., Lepoint, G., Pergent, G., Pergent-Martini, C., & Gobert, S. (2006). Trace metal concentrations in *Posidonia oceanica* of North Corsica (northwestern Mediterranean Sea): Use as a biological monitor? *BMC Ecology*, 6.
- Gruber, N., & Sarmiento, J. L. (1997). Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 235-266.
- Guérin, T., Chekri, R., Vastel, C., Sirot, V., Volatier, J. L., Leblanc, J. C., & Noël, L. (2011). Determination of 20 trace elements in fish and other seafood from the French market. *Food Chemistry*, 127(3), 934-942.
- Harper, S., & Zeller, D. (2011). Fisheries catch reconstructions: islands, part II. *Fisheries Centre Research Reports*, 19(4), 1198-6727.
- Heaton, T. H. E. (1986). Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review. *Chemical Geology*, 59(1), 87-102.
- Hernandez-Garcia, V. (1995). The diet of the swordfish *Xiphias gladius* Linnaeus, 1758, in the central east Atlantic, with emphasis on the role of cephalopods. *Fishery Bulletin*, 93(2), 403-411.
- Hobson, K. A., Piatt, J. F., & Pitocchelli, J. (1994). Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships. *Journal of Animal Ecology*, 63(4), 786-798.
- Hobson, K. A., & Welch, H. E. (1992). Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 84(1), 9-18.

- Jackson, T. A. (1998). Mercury in aquatic ecosystems. In Langston, W. J, Bebianno, M. J. (Ed.). *Metal metabolism in aquatic environments* (77-138). New York : Chapman & Hall.
- Jackson, A. L., Inger, R., Bearhop, S., & Parnell, A. (2009). Erroneous behaviour of MixSIR, a recently published Bayesian isotope mixing model: A discussion of Moore & Semmens (2008). *Ecology Letters*, 12(3), E1-E5.
- Jobling, M., & Breiby, A. (1986). The use and abuse of fish otoliths in studies of feeding habits of marine piscivores. *Sarsia*, 71, 265-274.
- Kojadinovic, J., Potier, M., Le Corre, M., Cosson, R. P., & Bustamante, P. (2007). Bioaccumulation of trace elements in pelagic fish from the Western Indian Ocean. *Environmental Pollution*, 146(2), 548-566.
- Lee, D. W. (1992). Update of the 1990 and 1991 data available on swordfish sex ratio at size collected from US fishery. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 39(1), 579-592.
- Lee, H. J., Jong, Y. J., Chang, L. M., & Wu, W. L. (2009). Propulsion strategy analysis of high-speed swordfish. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 52(175), 11-20.
- Levitus, S., Boyer, T. P., & Antonov, J. (1994). *World Ocean Atlas 1994 - Volume 5: Interannual variability of upper ocean thermal structure* (Vol. 5). Washington: DIANE.
- Lleonart, J. (2005). Review of the state of world marine fishery resources : Mediterranean and black sea. *FAO fisheries technical paper*, 457.
- Margalef, R. (1985). Western Mediterranean. In Pergamon (Ed.), *Introduction to the Mediterranean*.
- Marsh J., & Stiles, M. (2011). Swordfish (*Xiphias gladius*). In Seafood Watch (Ed.), *Seafood Report*. Monterey. Bay. Aquarium.
- Mason, A.Z., Jenkins, K.D. (1995). Metal detoxification in aquatic organisms. In Tessier, A., Turner, DR (Ed.). *Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems* (479-607). Chichester : John Wiley and Sons.
- McCutchan Jr, J. H., Lewis Jr, W. M., Kendall, C., & McGrath, C. C. (2003). Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 102(2), 378-390.
- Ménard, F., Lorrain, A., Potier, M., & Marsac, F. (2007). Isotopic evidence of distinct feeding ecologies and movement patterns in two migratory predators (yellowfin tuna and swordfish) of the western Indian Ocean. *Marine Biology*, 153(2), 141-152.
- Minagawa, M., & Wada, E. (1984). Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food chains: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(5), 1135-1140.

- Nakamura, I. (1985). An annotated and illustrated catalogue of marlins, sailfishes, spearfishes and swordfishes known to date. *FAO species catalogue*, 5.
- Naqvi, S. W. A., Naik, H., Pratihary, A., D'Souza, W., Narvekar, P. V., Jayakumar, D. A., Saino, T. (2006). Coastal versus open-ocean denitrification in the Arabian Sea. *Biogeosciences*, 3(4), 621-633.
- Onsanit, S., Ke, C., Wang, X., Wang, K. J., & Wang, W. X. (2010). Trace elements in two marine fish cultured in fish cages in Fujian province, China. *Environmental Pollution*, 158(5), 1334-1342.
- Orsi Relini, L., Garibaldi, F., & Palandri, G. (1994). Feeding of the swordfish, the bluefin tuna and other pelagic nekton in the Western Ligurian sea. *Coll. Vol. of Sci. Pap., ICCAT*. 44, 283-286.
- Palko, B. J., Beardsley, G. L., Richards W.J. (1981). Synopsis of the biology of the swordfish *Xiphias gladius* L. *NOAA Technical Report*. 441, 1-21.
- Papetti, P., & Rossi, G. (2009). Heavy metals in the fishery products of low Lazio and the use of metallothionein as a biomarker of contamination. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1-4), 589-598.
- Pinnegar, J. K., & Polunin, N. V. C. (2000). Contributions of stable-isotope data to elucidating food webs of Mediterranean rocky littoral fishes. *Oecologia*, 122(3), 399-409.
- Pinnegar, J. K., Polunin, N. V. C., & Badalamenti, F. (2003). Long-term changes in the trophic level of western Mediterranean fishery and aquaculture landings. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(2), 222-235.
- Polunin, N. V. C., Morales-Nin, B., Pawsey, W. E., Cartes, J. E., Pinnegar, J. K., & Moranta, J. (2001). Feeding relationships in Mediterranean bathyal assemblages elucidated by stable nitrogen and carbon isotope data. *Marine Ecology Progress Series*, 220, 13-23.
- Post, D. M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3), 703-718.
- Roesijadi, G. (1996). Metallothionein and its role in toxic metal regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology - C Pharmacology Toxicology and Endocrinology*, 113(2), 117-123.
- Rounick, J. S. & M. J. Winterbourn (1986). Stable carbon isotopes and carbon flow in ecosystems. *University of California Press*, 36(3), 171-177.
- Scott, W. B. & Tibbo, S. N. (1968). Food and Feeding Habits of Swordfish, *Xiphias gladius*, in the Western North Atlantic. *Journal de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada*, 25(5), 903-919.

- Scoullou, M., & Constantinos, V. (1996). Assessment of the state of pollution of the Mediterranean sea by zinc, copper and their compounds In UNEP & FAO (Eds.), *MAP Technical Reports* (Vol. 105).
- Shimose, T., Yokawa, K., Saito, H., & Tachihara, K. (2007). Evidence for use of the bill by blue marlin, *Makaira nigricans*, during feeding. *Ichthyological Research*, 54(4), 420-422.
- Stillwell, C. E., & Kohler, N. E. (1985). Food and feeding ecology of the swordfish *Xiphias gladius* in the Western North Atlantic Ocean with estimates of daily ration. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 22, 239-247.
- Storelli, M. M., Giacomini-Stuffler, R., Storelli, A., & Marcotrigiano, G. O. (2005). Accumulation of mercury, cadmium, lead and arsenic in swordfish and bluefin tuna from the Mediterranean Sea: A comparative study. *Marine Pollution Bulletin*, 50(9), 1004-1007.
- Tibbo, S. N., Day, L. R., & Doucet, W. F. (1961). The swordfish (*Xiphias gladius* L.), its life history and economic importance in the Northwest Atlantic. *Bull. Fish. Res. Board. Can.*, 130.
- Toll, R. B., & Hess, S. C. (1981). Cephalopods in the diet of the swordfish *Xiphias gladius* from the Florida Straits. *Fishery Bulletin*, 79(4), 765-774.
- Tserpes, G., Peristeraki, P., & Valavanis, V. D. (2008). Distribution of swordfish in the eastern Mediterranean, in relation to environmental factors and the species biology. *Hydrobiologia*, 612(1), 241-250.
- Vanderklift, M. A., & Ponsard, S. (2003). Sources of variation in consumer-diet  $\delta^{15}\text{N}$  enrichment: A meta-analysis. *Oecologia*, 136(2), 169-182.
- Ward, P. and S. Elscot (2000). Broadbill swordfish: Status of world fisheries. Canberra, Australia, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry - Bureau of Rural Sciences
- Young, J., Lansdell, M., Riddoch, S., & Revill, A. (2006). Feeding ecology of broadbill swordfish, *Xiphias gladius*, off eastern Australia in relation to physical and environmental variables. *Bulletin of Marine Science*, 79(3), 793-809.

# VIII. Annexes

## A.I Fiches pêcheurs

Mardi 1<sup>er</sup> Mai

Pas de sortie  
 Sortie palangre  Sortie lamparo  
 Sortie mais pas de prise de note

**FILAGE / VIRAGE :**  
 Date filage (j/m) : 30/04    Heure début filage : 07h00    Heure début virage : 08h00

**PARAMETRE ENGIN :**  
 Montage n° : .....    Zone de pêche (code carte fiche de pêche) : 8 3713

Palangre encrée  
 Palangre dérivante

Palangre de surface  
 Palangre de fond

Nombres d'hameçons mouillés : 140    Profondeur moyenne de l'engin : 20 m

Type d'appâts : Sardines    vifs     congelés

Fréquence leurres lumineux par nbre d'ham : ..... (ex : 1/2 = 1 cyalume / 2 ham)

**CAPTURE ESPADON :**

Taille	poids (éviscéré)	sexe	stade maturité	état de l'animal lors de la capture	traitement appliqué (prélèvements effectués)	présence parasites	C	R	M
<u>1630</u>	<u>25</u>	<u>M / F</u>		<u>Vivant</u>	<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>	<input checked="" type="checkbox"/>		
<u>1665</u>	<u>23</u>	<u>M / F</u>		<u>Mort</u>	<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>	<input checked="" type="checkbox"/>		
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			
		<u>M / F</u>			<u>estomac / muscle blanc</u>	<u>oui / non</u>			

Observations, difficultés rencontrées (nombre de cassure, nombre d'hameçons perdus, prédation par requin, autre...) :

1 coupe (CORSICA France)  
perte de temps et perdu 20 heures

C = capturé : pris vivant ou mort par le pêcheur

R = rejeté vivant à l'eau (individu légalement pas autorisé à être prélevé)

M = rejeté mort : perdu pour le pêcheur et la nature

Nom du pêcheur : MULLER...DANICN.....  
 Date de la mise à l'eau de la ligne (filage) : (j/m/année) 0,3 / 0,4 / 1,2  
 Heure du début de filage : (h)       
 Palangre encrée  Palangre dérivante  Palangre de surface  Palangre de fond   
 Longueur de la palangre : 1400 m      Nombres d'hameçons mouillés : 300.....  
 Longueur des avançons de bouées : 35 m      Profondeur moyenne de l'engin : 15 m  
 Taille des hameçons : 6 cm      diamètre de la ligne mère : 140 mm  
 Intervalle inter-hameçons : 37 m  
 Fréquence de leurres lumineux par nombre d'hameçons : ..... (ex : 1,2 : 1 evaluate tous les 2 hameçons)  
 Type d'appâts : ... Sevrou ..... vifs  congelés   
 Zone de pêche (code carte fiche de pêche) : 8.37.13  
 Date de remontée de la ligne : (j/m/année) 0,4 / 0,4 / 1,2  
 Heure de remontée : (h)     

**Longueur Maxillaire inférieure - Fourche caudale (LMF)**



espadon taille en m (LMF)	poids (éviscéré)	sexe	stade de maturité	état de l'animal lors de la capture	traitement appliqué (prélèvements effectués)	présence de parasites
135	40	M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
100	12	M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
X		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
X		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non
		M / F			estomac / muscle blanc	oui / non

Observations : .....  
 .....  
 .....

A.II Description des contenus stomacaux

**Estomac 1 :**

Présence de poissons frais et de cuticules de crustacés.

**Estomac 2 :**

Gamme de diamètre des otolithes : 1 – 4 mm. Parmi les 4 becs, deux étaient grands : 3 et 2 cm de long. Présence de vertèbres, d'arrêtes et de chair de poissons.



**Estomac 3 :**

Estomac quasi vide, mucus couleur sang. Les otolithes sont jaunes. Présence d'un alevin de poisson.



**Estomac 4 :**

Peu de contenu, mucus brunâtre. Les otolithes sont majoritairement de diamètre inférieur au millimètre. Vers parasite entre 5 et 15 cm de long et entre 0,5 et 4 mm de diamètre.



**Estomac 5:**

Gamme de diamètre des otolithes: 1-4 mm. Parmi les 13 becs, deux mesuraient 2,5 cm de long. Présence d'écailles (environ 1 cm de longueur), de vertèbres et de chair de poisson. Enormément de débris squelettiques. Présence de chinchard (reconnaisable aux écailles saillantes au niveau de la ligne latérale)



### **Estomac 6:**

Pratiquement que des proies fraîches et entières. Présence d'un anguilliforme (43 cm de long et 1,5 cm de large) et d'un calmar (longueur 30 cm) + présence de vertèbres. Certains poissons sont coupés de façon assez nette pour un stade de décomposition relativement peu avancé.



### **Estomac 7:**

Paroi très épaisse et rouge, peu de contenu avec énormément de mucus. Diamètre des otolithes d'environ 5 mm. Présence de vertèbres et d'un morceau de coquille de vertébré type décapode (araignée de mer ?)



### **Estomac 8:**

Diamètre des otolithes variant entre 0,5 et 5 mm. Plus de petits vers (longueur : 4 cm, diamètre: < 1mm) que de grands (longueur : 10 cm, diamètre : 2 mm). Présence de poissons

(chinchards + autres) dont certains presque entiers, têtes de poissons isolées du reste du corps.  
Présence de colonnes vertébrales blanches et de vertes.



### **Estomac 9:**

Présence d'une plume de céphalopode de 15 cm de long. Présence de deux calmars (longueur : 30 cm) dont un a la tête séparée du manteau. Présence de 8 cristallins d'œil de poisson d'environ 4 mm de diamètre. Diamètre des otolithes de 5 mm.

Rem : l'estomac était ouvert dans le sachet avec le contenu éparpillé => risque de pertes et d'apports de matériel. Les individus coupés peuvent l'avoir été lors de l'entaillement de l'estomac.



A.III : Valeurs moyennes en  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  des échantillons considérés

	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
	Écart	Écart
	Moyenne type	Moyenne type
<b>BOG</b>	-19,4 ± 0,3	7,28 ± 0,19
<b>JA</b>	-19,9 ± 0,5	6,32 ± 0,35
<b>CHI</b>	-19,5 ± 0,5	8,21 ± 0,55
<b>SAR</b>	-20,8 ± 0,2	6,72 ± 0,18
<b>MAQ</b>	-19,3 ± 0,3	7,59 ± 0,48
<b>MER</b>	-18,6 ± 0,2	9,43 ± 0,45
<b>AL</b>	-19,8 ± 0,6	6,58 ± 0,38
<b>AN</b>	-19,5 ± 0,1	6,46 ± 0,11
<b>MRU</b>	-18,9 ± 0,1	8,29 ± 0,40
<b>CRE 1</b>	-18,3 ± 0,1	7,76 ± 0,15
<b>CRE 2</b>	-17,9 ± 0,3	7,69 ± 0,57
<b>CRE 3</b>	-19,0 ± 0,5	5,69 ± 0,46
<b>CLM 1</b>	-19,7 ± 0,2	7,65 ± 0,32
<b>CLM 2</b>	-20,3 ± 0,3	7,69 ± 0,59
<b>SEP</b>	-19,5 ± 0,1	7,36 ± 0,11
<b>ESP 1</b>	-19,7	7,91
<b>ESP 2</b>	-19,2	9,88
<b>ESP 3</b>	-18,6	10,54
<b>ESP 4</b>	-18,8	9,14
<b>ESP 5</b>	-18,8	11,04
<b>ESP 6</b>	-19,0	10,39
<b>ESP 7</b>	-18,5	9,92
<b>ESP 8</b>	-18,8	10,02

A.IV. Concentrations des différents métaux pour chaque individu traité.

	Al 27	V 51	Fe 54	Cr 52	Mn 55	Co 59	Ni 60	Cu 63	Zn 66	Se 78	Ag 107	Cd 114	Sn 118	Sb 121	Mo 95	As 75	Be 9	Pb 208	Bi 209
BOG6	LD	0,007	8,527	LD	0,440	0,009	LC	0,831	18,605	2,117	LC	0,008	LD	LD	LQ	7,646	LC	LC	LC
BOG8	LD	0,013	13,730	LC	1,027	0,016	0,059	1,010	43,702	2,312	LC	0,010	LD	LD	LQ	11,691	LC	LD	LC
BOG9	LQ	0,006	11,333	LD	0,287	0,011	0,052	0,960	31,885	1,942	LQ	0,006	LQ	LD	0,012	6,281	LC	LD	LC
BOG10	LD	0,009	17,096	LC	0,596	0,014	LD	1,234	31,908	1,920	LC	0,006	LQ	LC	LQ	9,300	LC	LC	LC
BOG11	LD	0,005	8,694	LC	0,219	0,012	LD	0,728	23,854	1,875	LC	0,016	LQ	LQ	LQ	10,714	LC	LQ	LC
BOG12	LQ	0,019	10,589	LD	0,317	0,018	0,056	0,733	28,067	2,173	LC	0,015	LD	LC	LQ	9,148	LC	0,080	LC
BOG13	LQ	0,027	15,304	LD	0,548	0,033	0,065	1,618	49,741	3,183	LQ	0,026	LQ	LQ	LQ	15,975	LC	LQ	LC
BOG14	2,156	0,010	13,627	LD	0,309	0,013	0,048	1,123	39,539	2,098	LC	0,015	LQ	LQ	LQ	5,934	LC	0,224	LQ
BOG15	4,273	0,025	21,274	LQ	0,393	0,018	0,066	0,988	39,437	2,405	LC	0,043	LQ	LQ	LQ	21,585	LD	0,075	LQ
BOG16	LQ	0,010	10,522	LD	0,347	0,020	0,065	0,950	28,163	2,526	LC	0,015	LQ	LQ	LQ	9,384	LC	LQ	LC
BOG17	LQ	0,011	14,665	LD	0,403	0,021	0,044	1,135	55,032	2,554	LC	0,016	LQ	LQ	LQ	14,529	LC	0,181	LC
BOG19	13,147	0,043	19,568	LQ	1,124	0,025	0,084	1,456	50,420	2,793	LQ	0,024	LQ	LQ	LQ	18,027	LC	LQ	LC
BOG20	2,122	0,024	17,933	LQ	0,525	0,027	0,064	1,026	55,949	2,320	LC	0,037	LQ	LQ	LQ	9,678	LC	0,066	LC
BOG21	LQ	0,025	15,793	LD	0,433	0,025	0,074	1,165	45,686	2,899	LC	0,012	LD	LQ	LQ	11,040	LC	LD	LC
BOG22	LQ	0,032	23,261	LQ	1,141	0,024	0,057	2,298	30,602	2,843	LQ	0,019	LD	LD	0,013	5,741	C	LQ	LC
BOG23	LQ	0,007	10,072	LD	0,307	0,013	LD	1,047	26,345	2,032	LC	0,009	LD	LD	0,013	4,410	C	LD	LC
JAR13	LD	0,015	12,021	LQ	0,726	0,013	0,067	1,774	17,712	2,127	LC	0,011	LC	LC	0,022	10,512	LC	LC	LC
JAR16	LQ	0,024	23,446	LD	0,780	0,025	0,065	1,967	27,716	3,103	LC	0,009	LD	LC	0,021	11,607	LC	LQ	LC
JAR19	LQ	0,018	17,220	LQ	1,180	0,017	0,075	1,960	25,583	2,223	LC	0,008	LC	LC	0,020	10,111	LC	LQ	LC
JAR 24	LQ	0,029	16,971	LQ	0,848	0,019	0,100	1,836	27,631	2,030	LC	0,020	LC	LC	0,034	12,275	LC	LQ	LC
JAR26	LQ	0,037	17,205	LQ	1,014	0,042	0,121	1,739	26,225	2,499	LC	0,036	LD	LD	0,043	11,480	LC	0,163	LQ
JAR 29	2,511	0,037	11,383	LD	0,637	0,023	0,060	1,295	23,451	2,478	LC	0,011	LD	LC	0,016	10,822	LC	LC	LC
JAR34	LQ	0,025	17,786	LQ	0,893	0,023	0,111	1,686	20,466	2,574	LC	0,012	LC	LC	0,032	12,702	LC	LQ	LC
JAR43	LQ	0,017	14,350	LD	0,630	0,021	0,065	1,851	18,704	2,625	LC	0,013	LC	LC	0,021	11,516	LC	LD	LC
JAR51	9,336	0,023	16,126	LD	0,694	0,028	0,062	2,389	29,568	2,459	LC	0,008	LD	LC	0,017	14,740	LC	LC	LC
JAR53	2,813	0,038	13,418	LQ	1,870	0,019	0,105	1,890	25,992	2,102	LQ	0,011	LD	LQ	0,067	13,322	LC	1,007	LC
JAR 87	2,928	0,027	19,881	LQ	1,251	0,011	0,204	1,965	32,224	2,497	LQ	0,037	LQ	LC	LQ	11,671	LC	0,170	LC
JAR 88	LQ	LQ	13,041	LD	0,546	0,015	0,037	1,159	22,287	2,330	LC	LQ	0,102	LC	LQ	3,392	LC	LQ	LC
CHI 1	LQ	0,010	14,603	LC	0,313	0,015	0,041	1,576	32,048	1,770	LC	LQ	LQ	LC	LQ	6,426	LC	0,062	LC
CHI 2	LQ	0,005	17,684	LD	0,395	0,033	0,043	2,017	43,918	2,065	LC	LQ	LQ	LC	LQ	11,186	LC	LQ	LQ
CHI 3	LQ	LQ	9,982	LC	0,327	0,006	LC	0,964	17,185	1,629	LC	LQ	LD	LC	LD	6,006	LC	LC	LQ
CHI 4	LQ	0,008	18,628	LC	0,537	0,053	0,064	1,491	20,412	2,001	LC	0,008	LD	LC	LQ	26,910	LC	LQ	LC
CHI 5	LQ	0,008	12,242	LD	0,387	0,023	0,045	0,938	14,916	2,316	LC	0,006	LD	LC	LQ	17,088	LC	LQ	LQ
CHI 6	2,124	0,019	17,870	LD	0,824	0,046	0,066	1,724	43,248	2,411	LC	0,007	LQ	LC	LQ	9,688	LC	LQ	LQ
CHI 7	LQ	0,009	15,751	LD	0,551	0,053	0,117	1,632	26,100	2,501	LC	0,052	LD	LC	LQ	13,001	LC	0,059	LC
CHI 8	LQ	0,008	22,674	LD	0,459	0,139	0,079	1,839	33,443	1,917	LQ	0,008	LQ	LC	LQ	13,323	LC	LQ	LQ
CHI 9	2,104	0,009	19,568	LQ	0,368	0,028	0,064	1,066	28,298	2,328	LQ	0,009	LQ	LC	LQ	21,487	LC	0,092	0,003
CHI 10	LD	0,009	26,747	LD	0,395	0,032	0,052	2,048	16,297	1,835	LC	LQ	LD	LC	LD	15,397	LC	LQ	LQ
CHI 11	19,093	0,016	28,237	0,035	0,676	0,057	0,117	2,322	65,412	3,663	LQ	0,014	0,027	LQ	0,012	23,558	LC	0,084	LQ
CHI 12	3,955	0,010	19,714	LQ	0,678	0,049	0,084	1,812	38,450	2,107	LC	0,009	LQ	LC	LQ	20,912	LC	0,226	LC
CHI 13	LQ	0,018	26,848	LD	0,521	0,042	0,063	1,130	19,957	2,128	LC	LQ	LQ	LC	LQ	16,286	LC	0,125	LQ
CHI 14	LQ	LQ	13,836	LD	0,371	0,036	0,060	1,519	20,086	2,118	LC	0,007	LD	LC	LQ	8,255	LC	LD	LC
CHI 15	4,491	0,019	21,274	LQ	0,413	0,032	0,095	2,009	40,295	2,661	LQ	0,037	LQ	LC	LQ	9,680	LC	LQ	LQ
SAR 1	17,757	LQ	33,624	LC	0,779	0,023	0,034	3,676	30,152	1,993	LC	LQ	LD	LC	0,016	14,782	LC	LC	LC
SAR 2	LD	LQ	25,927	LC	0,611	0,022	LD	2,484	30,136	1,511	LC	LQ	LD	LD	0,015	17,848	LC	LQ	LC
SAR 3	LD	LQ	38,364	LC	0,781	0,029	0,051	4,220	32,114	1,606	LC	0,012	LD	LC	0,015	16,718	LC	LC	LC
SAR 4	LC	LQ	37,456	LC	0,622	0,030	0,038	3,571	27,722	2,256	LC	0,007	LD	LC	0,012	14,177	LC	LC	LC
SAR 5	LD	LQ	41,860	LC	0,642	0,032	LD	4,759	30,986	1,759	LC	LQ	LD	LC	LQ	14,777	LC	LC	LC
SAR 6	LQ	0,006	26,510	LC	0,617	0,016	0,055	3,091	45,223	0,898	LQ	0,053	LC	LC	0,057	10,541	LQ	LQ	LC
SAR 7	LQ	LQ	13,637	LD	0,459	0,011	0,056	1,696	44,678	0,818	LQ	0,011	LC	LC	0,015	7,886	LD	0,102	LC
SAR 8	2,823	0,009	39,365	LQ	1,168	0,032	0,128	5,422	113,274	1,506	0,006	0,056	LQ	LC	0,024	12,892	LQ	LD	LC
SAR 9	LQ	LQ	27,428	LC	0,537	0,014	LD	3,041	55,146	0,781	LC	0,017	LC	LC	LQ	4,756	LC	LC	LC
SAR 10	LQ	0,005	16,749	LD	0,399	0,015	LD	1,902	38,614	0,704	LQ	0,029	LC	LC	0,026	4,578	LC	LC	LC
SAR 11	LD	0,007	40,422	LD	0,895	0,037	0,092	4,664	99,570	1,750	0,006	0,089	LD	LC	0,046	20,343	LD	LC	LC
MAQ 1	23,648	LD	11,160	LC	0,252	0,013	LD	1,603	76,042	1,757	LC	LQ	LQ	LQ	LQ	6,612	LC	LC	LC
MAQ 2	15,635	0,006	11,957	LQ	0,221	0,009	LD	1,153	25,608	1,618	LC	0,006	0,054	LD	LQ	4,899	LC	0,083	LQ
MAQ 3	LD	LD	14,635	LD	0,235	0,021	LD	1,691	28,841	2,427	LC	0,036	LQ	LC	LQ	18,038	LC	LC	LC
MAQ 4	LD	LQ	11,547	LC	0,280	0,022	LD	1,393	31,602	2,192	LQ	LQ	LQ	LC	LQ	18,003	LC	LQ	LC
MAQ 5	LQ	0,007	42,096	LD	0,649	0,038	0,037	4,842	34,683	3,021	LQ	0,009	LD	LC	0,012	13,383	LC	LQ	LC
MAQ 6	LQ	0,006	30,827	LD	0,539	0,044	LD	3,042	65,922	5,318	0,005	0,010	LQ	LD	0,012	25,488	LC	LC	LC
MAQ 7	28,522	LQ	15,185	LQ	0,230	0,022	LD	1,498	25,883	2,357	LC	LQ	LQ	LC	LQ	10,614	LC	LC	LC
MAQ 8	LQ	LQ	28,111	LC	0,442	0,023	LC	3,247	24,751	2,053	LQ	0,007	LQ	LC	LQ	17,752	LC	LC	LC
MAQ 9	LQ	0,009	22,903	LD	0,347	0,028	0,035	2,836	35,071	2,481	LQ	0,032	LQ	LC	LQ	18,378	LC	LD	LC
MAQ 10	LD	LQ	27,873	LC	0,397	0,037	0,037	3,055	32,175	1,886	LQ	0,006	LD	LC	LQ	25,949	LC	LQ	LC
MAQ 11	LQ	0,009	25,087	LD	0,534	0,027	0,038	2,457	34,780	2,756	LQ	0,010	LD	LC	0,013	18,444	LC	LD	LC
MAQ 12	LQ	0,008	34,485	LD	0,544	0,031	0,042	2,819	29,264	2,283	LC	0,011	LQ	LC	LQ	12,772	LC	LQ	LC
MER 1	44,084	0,034	16,884	0,053	1,479	0,009	0,084	0,733	14,438	2,171	LC	LD	LQ	LQ	LQ	144,198	LC	LD	LC
MER 3	2,325	0,012	7,147	0,052	1,076	LQ	0,046	0,683	12,765	2,634	LC	LQ	LQ	LD	LQ	103,483	LC	LC	LC
MER 4	10,568	0,025	10,725	LQ	1,432	0,007	0,057	0,735	14,485	2,380	LC	LD	LQ	LQ	LQ	77,396	LC	LQ	LC
MER 5	LQ	0,006	3,672	LD	0,743	0,004	LD	0,686	13,714	3,303	LC	LD	LQ	LC	LQ	45,235	LC	LC	LC
MER 6	2,721	0,011	8,656	LD	1,103	0,004	LD	0,640	13,961	3,181	LC	LQ							

AL 1	5,647	0,081	88,495	LQ	2,004	0,022	0,089	3,164	56,837	2,836	LC	0,010	0,027	LQ	0,014	37,059	LC	0,094	LQ
AL 2	LQ	0,009	70,007	LD	1,073	0,035	0,107	7,126	86,929	5,744	LQ	0,043	LQ	LQ	0,023	59,885	LC	LD	LQ
AL 3	LQ	0,026	14,023	LC	3,075	0,009	LC	1,731	59,772	1,844	LC	0,006	LD	LC	LQ	21,928	LC	LQ	LC
AL 4	LQ	0,008	55,835	LQ	1,035	0,035	0,034	4,641	39,797	3,596	LQ	0,027	LD	LD	0,018	17,057	LC	LC	LC
AL 5	LQ	0,005	45,844	LD	0,779	0,028	0,038	4,005	25,466	3,679	LQ	0,032	LD	LC	0,020	14,482	LC	LC	LC
AL 6	3,830	0,010	37,657	LD	0,998	0,014	LD	3,088	36,658	2,991	LC	0,007	LQ	LC	LQ	20,775	LC	LD	LC
AL 7	LQ	0,011	32,983	LD	1,173	0,017	LD	2,980	34,012	3,434	LC	LQ	LD	LD	0,013	21,797	LC	LD	LC
AN 1	LQ	0,022	30,719	LQ	1,280	0,034	0,221	4,325	91,195	1,584	0,006	0,100	LQ	LQ	0,023	20,511	LC	LQ	LC
AN 2	LQ	0,016	26,939	LQ	1,227	0,025	0,074	3,917	81,220	1,185	LQ	0,025	LQ	LC	0,017	23,497	LC	LD	LC
AN 3	LQ	0,031	65,595	LQ	1,728	0,049	0,108	8,438	94,685	2,438	0,009	0,045	LQ	LC	0,021	37,309	LC	LC	LC
AN 4	LQ	0,018	30,411	LQ	0,857	0,035	0,153	4,322	40,021	1,340	0,010	0,031	LD	LC	0,017	14,903	LC	LC	LC
AN 5	LD	0,015	52,572	LD	1,573	0,041	0,133	6,562	63,513	1,726	0,007	0,042	LD	LC	0,020	28,073	LC	LC	LC
AN 6	LD	0,028	42,103	LD	1,002	0,028	0,088	3,756	39,683	1,280	LQ	0,053	LD	LC	0,030	17,936	LC	LC	LC
AN 7	LQ	0,029	34,620	LD	0,661	0,038	0,257	4,524	59,117	1,145	0,013	0,100	LC	LD	0,028	13,417	LC	LC	LC
AN 8	LQ	0,044	19,495	LQ	2,015	0,019	0,044	2,535	26,580	1,485	0,005	0,023	LQ	LC	0,014	12,945	LC	LD	LC
MRU 1	14,571	0,037	14,830	0,051	1,640	0,016	0,067	0,999	13,998	1,916	0,005	0,021	LC	LQ	0,017	92,299	LC	0,089	LC
MRU 2	8,596	0,026	12,092	LQ	1,825	0,013	0,062	0,853	15,391	1,653	LC	LQ	LD	LQ	0,015	107,639	LC	LC	LC
CRE 25 E3	74,056	0,198	49,377	0,191	3,263	0,069	0,256	14,438	39,475	1,170	0,267	0,028	0,029	0,029	0,046	152,580	LD	0,068	LQ
CRE 26	94,932	0,186	58,192	0,196	3,347	0,074	0,303	11,916	40,635	1,007	0,226	0,035	0,041	0,029	0,045	192,472	0,020	0,163	LQ
CRE 27	92,931	0,252	63,433	0,265	6,034	0,124	0,358	21,400	44,681	1,275	0,299	0,109	0,045	0,029	0,055	184,021	LQ	0,110	LQ
CRE 28	145,793	0,342	109,227	0,761	6,264	0,100	0,471	17,768	40,933	1,117	0,329	0,024	0,029	0,025	0,046	166,984	LQ	0,185	LQ
CRE 29	212,564	0,484	140,010	0,535	9,397	0,112	0,541	13,206	41,601	1,022	0,212	0,025	0,032	0,027	0,063	139,942	0,015	0,204	LQ
CRE 30	72,821	0,183	37,363	0,178	2,524	0,054	0,278	9,456	40,001	1,171	0,194	0,045	LQ	0,039	0,043	182,895	LQ	LQ	LC
CRE 31	59,921	0,163	51,954	0,220	3,585	0,074	0,405	14,273	38,788	1,132	0,235	0,015	0,034	0,701	0,047	166,283	LQ	0,115	0,003
CRE 34	108,190	0,253	83,364	0,482	3,448	0,094	0,353	19,059	50,420	1,349	0,285	0,044	LQ	0,021	0,040	341,659	LQ	0,089	LQ
CRE 35 E2	240,996	0,596	167,159	0,575	22,992	0,246	0,835	15,592	45,963	2,714	0,387	0,108	0,052	0,041	0,073	633,756	LQ	0,271	0,015
CRE 36	107,815	0,259	76,691	0,418	4,574	0,141	0,569	17,909	52,802	2,325	0,335	0,053	LQ	0,042	0,041	506,395	LD	0,099	0,016
CRE 37	49,528	0,119	32,852	0,122	2,452	0,108	0,192	29,543	60,360	1,806	0,473	0,144	LQ	0,020	0,084	393,446	LC	LQ	0,015
CRE 38	170,324	0,404	122,861	0,543	9,937	0,194	0,541	22,512	55,138	2,598	0,445	0,114	0,038	0,027	0,057	350,152	LQ	0,161	0,009
CRE 39	107,703	0,277	77,931	0,288	5,763	0,190	0,409	24,582	58,028	2,261	0,410	0,087	0,027	0,034	0,062	584,311	LQ	0,112	0,015
CRE 40	127,491	0,330	100,865	0,331	8,309	0,170	0,337	16,845	53,381	1,686	0,186	0,135	LQ	0,025	0,061	247,906	LQ	0,119	0,009
CRE 41	68,859	0,193	60,747	0,267	4,967	0,138	0,390	12,093	39,102	1,390	0,209	0,170	LD	0,026	0,047	194,912	LC	0,088	0,004
CRE 42	147,752	0,401	113,299	0,568	11,074	0,248	0,676	24,604	61,406	3,011	0,689	0,122	LQ	0,053	0,074	473,898	LQ	0,180	0,013
CRE 45 E1	12,535	0,184	11,215	0,036	1,785	0,069	0,228	20,379	45,262	4,248	0,063	0,032	0,031	0,027	0,056	416,557	LC	LD	LC
CRE 46	82,039	0,314	59,028	0,248	3,610	0,059	0,294	14,987	42,469	3,135	0,046	0,044	LQ	0,024	0,041	294,682	LC	0,087	LQ
CRE 47	27,489	0,218	23,166	0,083	2,837	0,074	0,273	14,689	42,010	3,089	0,064	0,029	LD	0,022	0,058	291,304	LC	LQ	LQ
CRE 49	20,367	0,098	16,802	0,056	2,181	0,059	0,176	18,267	47,642	3,266	0,016	0,030	LQ	0,017	0,045	236,874	LC	LQ	LC
CRE 50	16,117	0,251	21,622	0,095	2,251	0,077	0,300	13,494	46,008	3,192	0,036	0,017	LD	0,018	0,041	282,127	LC	LQ	LC
CRE 52	18,472	0,187	16,689	0,065	2,930	0,077	0,267	15,623	53,290	5,486	0,067	0,037	LQ	0,021	0,037	231,622	LC	LQ	LQ
CRE 53	23,515	0,088	19,947	0,058	1,890	0,042	0,134	13,663	45,196	2,866	0,016	0,014	LQ	0,021	0,041	231,036	LC	LQ	LC
CRE 54	25,402	0,256	21,645	0,080	3,221	0,084	0,351	28,667	47,142	3,544	0,130	0,033	LQ	0,021	0,074	302,012	LC	LQ	LQ
CLM 1 M	2,279	0,018	43,303	0,040	0,956	0,023	0,070	4,857	36,667	1,945	0,033	0,430	LC	LQ	0,045	24,365	LC	0,197	LC
CLM 2 M	2,156	0,026	5,960	LD	0,772	0,018	0,059	9,102	42,833	1,963	0,022	0,158	LD	LQ	0,038	23,312	LC	0,351	LC
CLM 3 M	32,581	0,017	5,024	LQ	0,887	0,084	0,079	10,746	41,766	1,939	0,021	0,139	LD	LQ	0,049	31,181	LC	LQ	LC
CLM 4 M	9,332	0,038	15,012	LQ	0,892	0,039	0,065	35,530	45,562	2,384	0,198	0,437	LQ	LQ	0,033	22,717	LC	0,175	LC
CLM 5 M	22,436	0,029	36,542	0,048	1,034	0,061	0,246	5,835	45,425	2,427	0,035	0,300	LD	LQ	0,041	35,315	LC	0,152	LC
CLM 6 M	LQ	0,016	5,818	LQ	0,724	0,024	0,841	13,339	47,259	2,885	0,070	0,121	LD	LQ	0,050	32,291	LC	0,086	LC
CLM 7 M	101,594	0,123	47,889	0,344	2,346	0,045	0,377	11,343	65,942	1,818	0,141	0,173	0,098	0,015	0,034	80,809	LC	0,592	LQ
CLM 7 M	37,007	0,124	33,649	0,121	8,626	0,076	0,302	33,819	66,381	2,816	0,079	0,094	0,029	0,012	0,066	181,446	LD	0,173	LQ
CLM 8 M	25,757	0,076	25,017	0,098	4,365	0,056	0,188	30,103	51,315	1,772	0,061	0,110	LQ	LQ	0,041	112,899	LC	0,111	LQ
CLM 9 M	15,231	0,064	19,931	0,062	5,393	0,060	0,161	24,213	54,297	1,792	0,063	0,065	LQ	LQ	0,045	125,144	LC	0,084	LQ
CLM 10 M	14,051	0,067	21,743	0,056	5,443	0,064	0,188	33,303	57,003	1,889	0,093	0,119	LQ	LQ	0,052	125,601	LC	0,075	LC
CLM 11 M	31,860	0,090	31,731	0,096	4,967	0,060	0,198	35,564	56,804	1,968	0,076	0,064	0,100	LQ	0,045	116,726	LC	0,088	LQ
CLM 12 M	21,864	0,081	23,546	0,070	6,406	0,079	0,177	43,290	54,285	1,925	0,115	0,111	LQ	LQ	0,050	110,320	LC	0,136	LQ
CLM 13 M	14,782	0,067	15,114	0,074	4,327	0,059	0,177	21,780	58,205	1,976	0,073	0,054	LQ	LQ	0,049	150,837	LC	0,071	LQ
CLM 14 M	8,086	0,048	14,732	0,052	4,563	0,063	0,280	31,776	61,334	2,185	0,076	0,096	LQ	LQ	0,049	174,299	LC	0,090	LQ
CLM 15 M	110,067	0,254	77,963	0,301	7,737	0,064	0,334	15,006	47,482	1,318	0,041	0,039	LQ	LQ	0,033	91,113	LC	0,158	LQ
SEPI 1 M	321,556	0,694	217,160	0,950	27,596	0,294	1,330	126,494	91,148	3,238	0,393	0,179	0,036	0,019	0,106	192,794	LQ	0,534	0,003
SEPI 2 M	251,825	0,681	223,606	0,811	22,621	0,323	1,390	176,888	91,036	4,025	0,581	0,560	0,048	0,022	0,147	191,591	LQ	0,679	0,004
SEPI 3 M	150,827	0,403	134,714	0,528	12,267	0,176	0,689	83,638	71,068	2,712	0,272	0,445	LQ	0,013	0,091	153,242	LD	0,634	LQ
SEPI 4 M	129,076	0,375	113,855	0,396	22,098	0,241	0,860	107,227	78,584	2,888	0,398	0,161	LQ	LQ	0,109	188,662	LQ	0,492	0,003
SEPI 5 M	512,839	1,595	417,845	1,851	72,672	0,811	2,834	34,324	63,450	2,301	0,110	0,059	0,040	0,026	0,182	158,884	0,016	0,916	0,010
SEPI 6 M	97,814	0,322	98,446	0,391	14,189	0,201	0,755	92,595	85,830	2,706	0,284	0,188	LQ	LQ	0,128	164,696	LQ	0,428	LQ
SEPI 7 M	194,709	0,512	158,386	0,651	20,518	0,322	1,021	234,750	114,697	3,913	0,615	0,329	LQ	0,013	0,144	182,721	LQ		

A.V : Concentrations moyennes des échantillons certifiés pour chaque élément trace

Echantillons certifiés		Al 27	V 51	Fe 54	Cr 52	Mn 55	Co 59	Ni 60
<b>DOLT-3</b> (foie de roussette)	Cr	25	NP	1484 ± 57	3,5	NP	NP	2,72 ± 0,35
	Cm	28 ± 2	0,34 ± 0,01	1545 ± 57	3,0 ± 0,9	10,5 ± 0,44	0,50 ± 0,12	2,48 ± 0,34
<b>NIST 1566b</b> (muscle d'huître)	Cr	197 ± 6	0,577 ± 0,023	206 ± 7	NP	18,5 ± 0,2	0,376 ± 0,009	1,04 ± 0,09
	Cm	213 ± 82	0,842 ± 0,451	268 ± 102	0,47 ± 0,20	23,8 ± 8,9	0,481 ± 0,192	1,34 ± 0,59
<b>NIST 1577c</b> (foie de bovin)	Cr	NP	0,008 ± 0,000	198 ± 0	0,053 ± 0,014	10,5 ± 0,5	0,30 ± 0,02	0,045 ± 0,009
	Cm	1,9 ± 1,3	0,008 ± 0,001	199 ± 2	0,054 ± 0,006	10,1 ± 0,1	0,31 ± 0,00	0,026 ± 0,010
<b>NIST 2976</b> (muscle de moule)	Cr	134 ± 34	NP	171 ± 5	0,50 ± 0,16	33 ± 2	0,61 ± 0,02	0,93 ± 0,12
	Cm	145 ± 11	0,76 ± 0,05	182 ± 10	0,42 ± 0,03	38 ± 2	0,64 ± 0,03	0,83 ± 0,06

Echantillons certifiés		Cu 63	Zn 66	Se 78	Ag 107	Cd 114	Sn 118
<b>DOLT-3</b> (foie de roussette)	Cr	31,2 ± 1,0	87 ± 2	7,1 ± 0,5	1,20 ± 0,07	19,4 ± 0,6	0,4
	Cm	33,5 ± 0,9	98 ± 4	7,4 ± 0,3	1,25 ± 0,03	19,8 ± 0,3	0,5 ± 0,0
<b>NIST 1566b</b> (muscle d'huître)	Cr	72 ± 2	1424 ± 46	2,06 ± 0,15	0,67 ± 0,01	2,48 ± 0,08	0,031 ± 0,008
	Cm	92 ± 35	1871 ± 693	2,70 ± 1,04	0,84 ± 0,31	3,28 ± 1,22	0,036 ± 0,015
<b>NIST 1577c</b> (foie de bovin)	Cr	275 ± 5	181 ± 1	2,03 ± 0,4	0,006 ± 0,002	0,097 ± 0,001	NP
	Cm	276 ± 3	180 ± 4	2,00 ± 0,06	0,005 ± 0,001	0,106 ± 0,003	0,012 ± 0,002
<b>NIST 2976</b> (muscle de moule)	Cr	4,02 ± 0,33	137 ± 13	1,80 ± 0,15	0,011 ± 0,005	0,82 ± 0,16	0,096 ± 0,039
	Cm	4,01 ± 0,223	148 ± 8	1,96 ± 0,10	0,009 ± 0,001	0,87 ± 0,06	0,118 ± 0,010

Echantillons certifiés		Sb 121	Mo 95	As 75	Be 9	Pb 208	Bi 209
<b>DOLT-3</b> (foie de roussette)	Cr	NP	NP	10,2 ± 0,5	NP	0,32 ± 0,5	NP
	Cm	0,017 ± 0,002	3,3 ± 0,2	9,8 ± 0,2	0,003 ± 0,002	0,32 ± 0,00	0,041 ± 0,001
<b>NIST 1566b</b> (muscle d'huître)	Cr	0,011 ± 0,002	NP	7,7 ± 0,7	NP	0,31 ± 0,01	NP
	Cm	0,015 ± 0,008	0,24 ± 0,09	10,1 ± 3,7	0,016 ± 0,010	0,42 ± 0,19	0,010 ± 0,004

<b>NIST 1577c (foie de bovin)</b>	Cr	0,003 ± 0,000	3,3 ± 0,1	0,020 ± 0,001	NP	0,063 ± 0,001	NP
	Cm	0,005 ± 0,001	3,5 ± 0,0	0,025 ± 0,043	0,001 ± 0,003	0,059 ± 0,002	0,000 ± 0,001
<b>NIST 2976 (muscle de moule)</b>	Cr	NP	NP	13,3 ± 1,8	NP	1,19 ± 0,18	NP
	Cm	0,013 ± 0,002	0,51 ± 0,04	14,8 ± 0,9	0,006 ± 0,002	1,21 ± 0,09	0,008 ± 0,000

Cr = Concentration réelle

Cm = Concentration mesurée

NP = Non présent