



HAL
open science

**Les couches diffusantes du golfe de Gascogne :
caractérisation acoustique, composition spécifique et
distribution spatiale**

Barbara Remond

► **To cite this version:**

Barbara Remond. Les couches diffusantes du golfe de Gascogne : caractérisation acoustique, composition spécifique et distribution spatiale. Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. NNT : 2015PA066076 . tel-01159010

HAL Id: tel-01159010

<https://theses.hal.science/tel-01159010v1>

Submitted on 2 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Pierre et Marie Curie

Ecole doctorale des Sciences de l'Environnement (ED129)

*Institut Français pour l'Exploitation de la MER (IFREMER)
Unité Ecologie et Modèles pour l'Halieutique (EMH)*

**Les couches diffusantes du golfe de Gascogne :
caractérisation acoustique, composition spécifique et
distribution spatiale**

Par Barbara REMOND

Thèse de doctorat en écologie marine

Dirigée par Jean-Marc GUARINI et Mathieu DORAY

Soutenue le 13 avril 2015

Devant un jury composé de :

Arnaud BERTRAND	Directeur de recherche IRD	Rapporteur
Stéphane GAUTHIER	Chercheur scientifique POC (MPO), Ca.	Rapporteur
Philippe KOUBBI	Professeur UPMC	Examinateur
Pierre PETITGAS	Cadre de recherche IFREMER	Examinateur
Anne LEBOURGES-DHAUSSY	Ingénieur de recherche IRD	Examinatrice
Gareth LAWSON	Associate scientist WHOI, USA	Examinateur
Mathieu DORAY	Cadre de recherche IFREMER	Directeur de thèse

A ma Maman.

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie chaleureusement Mathieu et Pierre. **Mathieu**, merci pour ta porte et ton esprit constamment ouverts, pour ton calme et ta pédagogie, pour ton écoute et ton intérêt, pour ta manière de toujours voir le bon côté des choses. Merci de m'avoir fait découvrir le monde de l'acoustique et celui du travail en mer (ainsi que l'art de la godaille!), qui laissent en moi une empreinte indélébile. **Pierre**, merci avant tout pour ton enthousiasme et ton sourire qui ne te quittent jamais. Merci pour tes questions originales, ta droiture, ton écoute et ta curiosité insatiable. Merci de m'avoir rassurée dans les moments de doute et de m'avoir transmis la "fibre CIEM" en m'en expliquant les rouages. De manière quasi-conjointe, je remercie chaleureusement **Anne** et **Laurent**. Merci pour toutes ces discussions enrichissantes sur l'acoustique, j'ai tellement appris à vos côtés! Merci pour votre grande disponibilité, merci d'avoir apprécié les bons résultats tout en sachant relever les mauvais et m'aider à les améliorer. Merci à chacun pour votre humour, toujours une petite phrase rigolote au bout du fil. Merci Anne d'avoir été ce côté féminin et maternel de la thèse. Merci Laurent d'avoir pris le temps (beaucoup de temps) de m'expliquer les recoins de l'acoustique. J'estime que ce travail est le résultat d'une équipe complémentaire, curieuse et intéressée avec qui j'ai pris un immense plaisir à travailler.

Je tiens à formuler un remerciement très spécial pour **Jean-Marc**, sans qui, cette thèse n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie toutes les personnes qui, en mettant la main à la pâte sur divers sujets connexes, ont donné des coups de pouce à cette thèse. Je remercie les autres membres de mon comité de thèse : **Lars**, **Elvire**, **Christine**, **Marc**, **Martin**, **Patrice**, merci pour votre entrain à participer à chaque comité et pour les questions pertinentes que vous avez relevé à chaque rencontre. Venant de domaines de recherche différents, vous avez tous joué le jeu d'apporter des visions complémentaires sur ce sujet multidisciplinaire.

Je remercie les membres de la petite communauté des développeurs de méthodes d'analyse de données acoustiques du grand Ouest : **Gildas**, **Nolwenn**, **Jérémie**, **Naïg** et **Yannick**. Merci aux membres du projet Seaman-France, dont les réunions multidisciplinaires étaient très intéressantes.

Merci à toi, **EMH**, pour ton soutien en toute circonstance, tes discussions instructives, tes pauses-café légendaires, tes causeries mouvementées et ta générosité. Merci à ton faiseur d'ambiance **Olivier**. Merci à tous tes Gai-Luron qui font ce que tu es. Un merci particulier à **Adrien**, **Pierre**, **Romain**, **Laurence**, **Loïc**, **Sigrid** et **Anne-Sophie** avec qui j'ai aimé partager plus qu'un simple quotidien professionnel, votre soutien m'a été précieux.

Merci aux **joyeux coloqs**. Merci à **Flo**, que je ne haïs pas trop.

Merci à toute l'équipe PELGAS qui font de cette campagne une expérience unique, particulièrement **Florence**, **Jacques**, **Erwan**, **Sophie**, **Martin** et **Paul** pour leur humour et leur patience. Merci à **Manu** pour cette campagne 2013 haute en couleur avec les black-out et les apéros sciens' chez **Jean-MichMich** que je remercie aussi pour son humour, sa sensibilité et ses goûts musicaux de qualité.

Merci à l'équipe du **Zoocam** pour avoir été à l'écoute de nos besoins.

Merci à cette chouette communauté du **WGFAST**.

Merci au forum **Amédée** pour les riches rencontres que j'ai pu y faire.

Merci à l'**Ifremer** et à la **région Pays de la Loire** d'avoir financé ce travail. Merci à l'**ED**

129 d'avoir accepté d'héberger cette thèse.

Merci à **Arnaud** et **Stéphane** d'avoir accepté de rapporter cette thèse, ainsi qu'à l'ensemble des membres du jury.

Merci à mes copinettes **Agnès**, **Aurore**, **Camillou**, **Marion**, **Cécile**, **Célia**, **Doriane** ainsi qu'à **Max** et **Antoine** d'être toujours là pour des pliages, des mots doux, des soirées et pour parler de ce beau poisson qu'est le Muge. Merci à mon petit **Hubert** de me faire tellement rire !

Je remercie mon Papa **Pascal** et ma petite sœur **Morgane** qui, malgré toutes ces épreuves, sont toujours prêts à me soutenir. Je vous dois énormément. Merci.

Je remercie cette petite crevette rose qui a pointé son nez en plein milieu des couches diffusantes. Merci **Léonie** pour la joie et le bonheur que tu apportes.

Enfin, je te remercie toi, **Alexis**, du plus profond de moi-même et pour à peu près tout.

Table des matières

Introduction générale	8
1 Contexte	16
1.1 L'acoustique sous-marine	17
1.1.1 Les ondes acoustiques	17
1.1.2 Émission et propagation des ondes acoustiques	18
1.1.3 Rétrodiffusion acoustique	19
1.1.4 Détection et représentation des échos	22
1.1.5 L'acoustique en halieutique	23
1.2 Acoustique et plancton	24
1.3 Le golfe de Gascogne	30
1.3.1 La géographie	30
1.3.2 L'hydrologie	31
1.3.3 Les variations saisonnières de la production primaire	33
1.4 Les campagnes PELGAS	33
2 Les paysages acoustiques du golfe de Gascogne au printemps 2013	36
2.1 Introduction	37
2.2 Méthode de classification multifréquence non supervisée pour la définition de paysages acoustiques	39
2.2.1 Méthode de classification non supervisée des échos (ACM-KM)	40
2.3 Comparaison des méthodes de classification non supervisées et supervisées des échos	42
2.3.1 Matériel et méthodes	42
2.3.2 Résultats	49
2.3.3 Discussion	76
2.4 Application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM aux données de la campagne PELGAS 2013	78
2.4.1 Matériel et méthodes	78
2.4.2 Résultats	80
2.4.3 Discussion	104
2.5 Discussion	106
2.6 Bilan	107
3 Les paysages acoustiques dans l'écosystème pélagique du golfe de Gascogne au printemps 2013	109
3.1 Introduction	110
3.2 Comparaison des paysages acoustiques aux indicateurs des compartiments de l'écosystème pélagique collectés pendant PELGAS 2013, à l'échelle du golfe de Gascogne	111
3.2.1 Matériel et méthodes	111

3.2.2	Résultats	115
3.3	Comparaison des distributions verticales des couches diffusantes et des paramètres hydrologiques à l'échelle d'une radiale	121
3.3.1	Matériel et méthode	121
3.3.2	Résultats	125
3.4	Discussion	131
3.5	Bilan	138
4	Etude de la composition des couches diffusantes du panache de la Gironde	141
4.1	Introduction	142
4.2	Étude du contexte acoustique multifréquence intégré sur la profondeur	143
4.2.1	Matériel et méthodes	144
4.2.2	Résultats	149
4.2.3	Discussion, limites et perspectives	152
4.3	Etude du contexte acoustique multifréquence résolu sur la verticale	153
4.3.1	Matériel et méthodes	153
4.3.2	Résultats	154
4.3.3	Discussion, limites et perspectives	161
4.4	Comparaison des caractérisations acoustiques et hydro-biologiques de l'écosystème pélagique	162
4.4.1	Matériel et méthodes	163
4.4.2	Résultats	170
4.4.3	Discussion, limites et perspectives	181
4.5	Combinaison des approches directe et inverse pour caractériser la structure en taille et l'abondance des réflecteurs des couches résonantes	182
4.5.1	Matériel et méthodes	182
4.5.2	Résultats	196
4.5.3	Discussion	206
4.6	Bilan	210
	Synthèse et perspectives	213
	Bibliographie	231
	Annexes	232
	Comparaison des méthodes de classification des échos	232
	Paramétrisation des méthodes testées	232
	Comparaison sur les jeux de réponses fréquentielles théoriques # 1 et # 2	233
	Comparaison sur le jeu de données <i>in-situ</i> de 2 minutes	239
	Comparaison sur le jeu de données <i>in-situ</i> de 1h	250
	Plan du filet <i>Midwater Ringnet Trawl</i> (MIK)	261
	Table des figures	276
	Table des tableaux	278

Introduction générale

C'est une folie de haïr toutes les roses parce que une épine vous a piqué, d'abandonner tous les rêves parce que l'un d'entre eux ne s'est pas réalisé, de renoncer à toutes les tentatives parce qu'on a échoué [...] Pour chaque fin il y a un nouveau départ.

Le Petit Prince,
- Antoine de Saint-Exupéry -

Contexte général

Des données *in-situ* à échelle spatiale fine sur l'environnement et la production primaire (observations *in-situ*, images satellites, modèles) sont aujourd'hui largement disponibles. De la même manière, les statistiques de pêches commerciales et les données de campagnes halieutiques permettent une bonne appréhension de la distribution spatiale et de l'abondance des espèces de poissons, exploitées ou non. En revanche, les compartiments du zooplancton et du micronecton souffrent d'un déficit de données spatialement et temporellement bien résolues sur des extensions supérieures ou égales à 100 km², que ce soit en termes de composition spécifique ou de biomasse. Ce sont pourtant des niveaux trophiques structurant dans les écosystèmes, qui assurent le transfert énergétique vers les niveaux trophiques supérieurs (Lassalle et al., 2013). Les compartiments du zooplancton et du micronecton comprennent des espèces sentinelles, indicatrices des changements dans le fonctionnement de l'écosystème et plus précisément des dérèglements climatiques (Beaugrand, 2005). D'autre part, l'introduction du compartiment poisson dans les modèles d'écosystèmes pélagiques (type NPZD), nécessite une reformulation du compartiment zooplancton et donc une amélioration de sa connaissance (Lehodey et al., 2010). Dans le contexte plus général de l'approche écosystémique des pêches, l'un des prochains défis est de disposer d'une description quantitative spatialisée par classe de tailles des taxons dominant les compartiments zooplanctonique et micronectonique.

Méthodes d'échantillonnage classiques du zooplancton et du micronecton

Les organismes zooplanctoniques présentent des distributions spatiales agrégées à large échelle et des variations inter-annuelles et saisonnières complexes (Levin, 1992). Or, ces patrons sont appréhendés par des méthodes d'échantillonnage discrètes et grossières dans le temps et dans l'espace. L'observation de ces organismes se fait majoritairement par leur collecte avec des filets à plancton. Les caractéristiques des nombreux filets à plancton varient en fonction de la classe de tailles considérée et de la question scientifique à laquelle l'étude s'intéresse. Cependant, les filets sont généralement utilisés en "station", impliquant l'arrêt ou le fort ralentissement du navire, ce qui limite la surface potentiellement échantillonnée. L'identification manuelle des échantillons par des experts est généralement très chronophage. De plus, le zooplancton, et particulièrement le macrozooplancton, est connu pour éviter les filets à cause des perturbations visuelles et mécaniques qu'ils engendrent (Fleminger & Clutter, 1965; Debby et al., 2004). L'abondance du macrozooplancton est donc généralement sous-estimée. Plus récemment, de nouveaux outils d'observation optiques ont été développés et permettent un échantillonnage plus continu du mésozooplancton (Gorsky et al., 2010). Alors qu'ils observent les patrons verticaux des structures en tailles des particules planctoniques, ils sont peu adaptés à l'observation de la dimension horizontale à large échelle.

Conceptualisé dans les années 1920, le *Continuous Plankton Recorder* (CPR) est le collecteur de zooplancton le plus répandu dans le monde (Reid et al., 2003). Il a été développé pour être traîné à une profondeur de 10 m par des navires d'opportunité (plaisance, de commerce,...). Les organismes planctoniques sont filtrés par une maille de 270 μm et collecté par un tissu qui s'enroule dans un compartiment rempli de formol. Même si l'on compte aujourd'hui plus de 4 millions de milles nautiques échantillonnés par le CPR (Reid et al., 2003), les informations sont intégrées par 10 milles nautiques (MN) et ne permettent pas d'étudier les structures spatiales horizontales du zooplancton à des échelles d'observation fines.

Les organismes composant le micronecton sont, par définition, capables de nager contre les

courants ce qui leur permet d'éviter facilement les filets dont l'ouverture est restreinte, comme la plupart des filets à plancton. Les études qui se sont intéressées à la capture de ces organismes ont utilisé des chaluts mésopélagiques (Gauthier et al., 2014; Bertrand et al., 1999) dont l'ouverture était de l'ordre de 20 m de diamètre et les mailles de 5 à 800 mm. Ces engins de pêche sont conséquents à mettre en œuvre et ils ne peuvent être utilisés qu'à une résolution spatiale et temporelle grossière.

La notion d'échelle

Selon Bertrand (1999), pour comprendre comment se mettent en place les patrons observés *in-situ*, l'étude des processus à des échelles différentes est inéluctable pour obtenir une réponse complète. Il s'appuie sur le texte de Levin (1992) qui écrit :

" [...] *there is no single "correct" scale on which to describe populations or ecosystems. [...] each species observes the environment on its own unique suite of scales of space and time [...]* "

Le monde réel est simplement ce qu'il est, un flot dynamique constant qui produit des dynamiques externes étrangères à toute notion de but, de fonction ou de description (Ahl & Allen, 1996; Doray, 2006). Lorsque l'on observe un système, nous le faisons généralement sur une gamme d'échelles réduite, et notre perception des événements ne nous donne accès qu'à l'infime partie d'un tout. Que l'échelle d'observation soit choisie délibérément ou imposée par les contraintes technologiques ou logistiques, la perception de la variabilité de l'état d'un système est conditionnée par l'échelle à laquelle ce système est observé (Stommel, 1963; Haury et al., 1978).

Les possibilités de changement d'échelle dépendent de la technologie des instruments de mesure et des capacités d'analyse (Levin, 1992). Haury et al. (1978) se sont inspirés du diagramme de Stommel (1963) pour rendre compte des échelles spatio-temporelles des processus biologiques et écologiques depuis la migration nyctémérale jusqu'au cycle des ères de glaciation. Même si ces processus semblent constituer un *continuum*, quelques grands niveaux d'organisation peuvent être définis. Ainsi, Haury et al. (1978) décrivent 6 échelles pour l'étude des processus écologiques : "*mega-scale*" ($> 3000 \text{ km}^2$), "*macro-scale*" (1000 à 3000 km^2), "*meso-scale*" (100 à 1000 km^2), "*coarse-scale*" (100 m^2 à 100 km^2), "*fine-scale*" (1 à 100 m^2) et "*micro-scale*" (1 cm^2 à 1 m^2).

Dans le cas de l'étude de la distribution du plancton, les engins deviennent de plus en plus performants et automatiques, mais la collecte des échantillons, reste une étape réalisée selon une résolution spatiale et temporelle discrète. Les techniques acoustiques permettent, à l'inverse, de collecter des données rapidement sur des processus se produisant à plusieurs échelles en même temps (Horne, 2000).

Les données acoustiques

Le développement des technologies utilisant la propagation du son pour détecter les organismes aquatiques à distance, date de moins d'un siècle et continue d'évoluer rapidement (Horne, 2000). La première application biologique de l'acoustique a été la détection de la présence de poissons dans un bassin (Kimura, 1929). A l'issue de la seconde guerre mondiale, l'utilité des échosondeurs sous-marins a été démontré par les chercheurs et les pêcheurs (Sund, 1935; Tester, 1943; Balls, 1948) qui ont montré que le son pouvait être utilisé pour localiser et visualiser quantitativement la distribution, l'abondance et le comportement des poissons. Le développement

de procédures de calibrations standards des instruments (Foote, 1983) et l'étude de la relation linéaire entre l'intensité des échos et l'abondance des organismes qui les génèrent (Love, 1971; Nakken & Olsen, 1977; Foote et al., 1987; Simmonds & MacLennan, 2005) ont permis les estimations basées sur la taille des poissons et du zooplancton.

De nos jours, des données acoustiques sont collectées en continu pendant de nombreuses campagnes à la mer scientifiques. L'échantillonnage acoustique peut être effectué sur des extensions géographiques supérieures à 100 km²n en un temps relativement court et selon une résolution verticale et horizontale très fine (Simmonds & MacLennan, 2005). Ces campagnes sont classiquement dédiées à l'observation de la distribution spatiale et à la quantification de l'abondance des espèces de poissons, qui sont présents sous forme de bancs dans la colonne d'eau et détectables par les ondes acoustiques (exemple de la campagne PELGAS, Doray et al. (2014)). Pourtant, les images acoustiques (échogrammes, cf. contexte acoustique) présentent des groupes d'échos correspondants à des agrégations de cibles beaucoup plus étendues que les bancs de poissons : les couches diffusantes. L'observation de la migration verticale effectuée par la majorité de ces couches mène à l'hypothèse qu'elles sont essentiellement composées d'organismes vivants, habituellement rattachés au zooplancton.

Les couches diffusantes

Un phénomène global

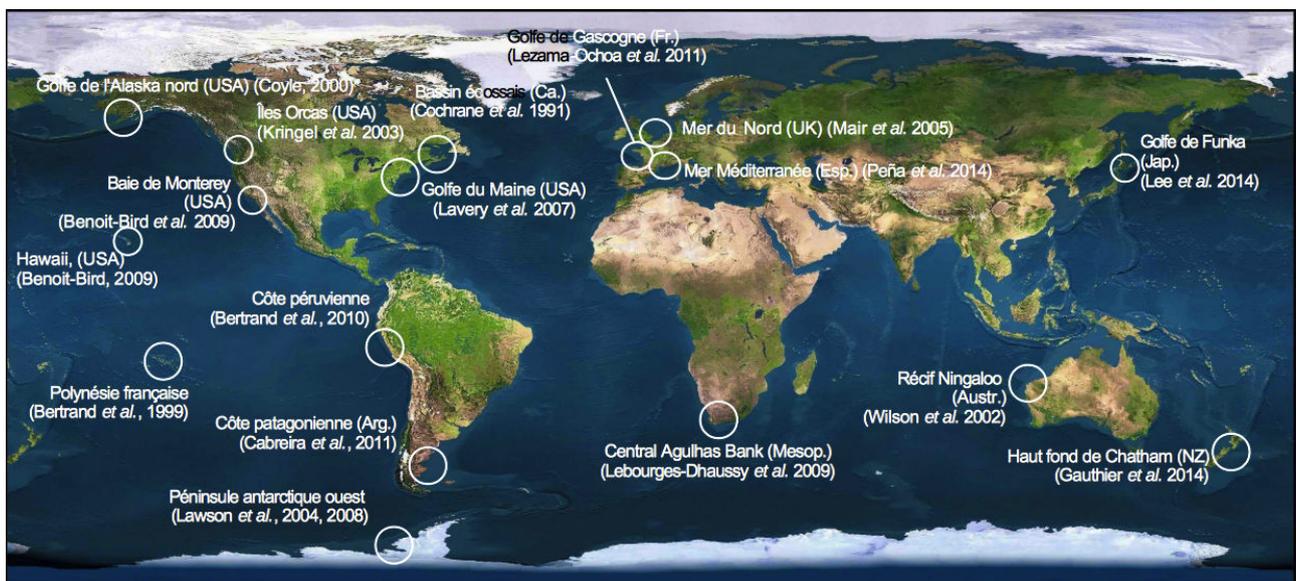


FIGURE 1 – Localisation d'exemples d'études qui ont collecté des données acoustiques et ont fait l'observation de couches diffusantes.

Les couches diffusantes ont été observées sur des échogrammes collectés dans des zones géographiques très diverses (figure 1) : dans le golfe de l'Alaska (De Robertis et al., 2010; Coyle, 2000) ; dans les eaux du Pacifique nord (Murase et al., 2009) ; dans les eaux côtières de la Patagonie en Atlantique sud-ouest (Cabreira et al., 2011) ; autour du banc Georges sur la côte est des Etats-Unis (Greene et al., 1998) ; dans les eaux de la Caroline du Sud aux Etat-Unis (Barans et al., 1997) ; dans le détroit de Géorgie en Colombie Britannique au Canada (Romaine

et al., 2002); autour de l'île de la Géorgie du sud (Brierley et al., 1998); dans les îles Orcas, Washington, Etats-Unis (Kringel et al., 2003); dans le golfe du Maine (Benfield et al., 2003); autour de la baie de Cape Cod, Massachusetts, Etats-Unis (Warren et al., 2001) et ce ne sont que des exemples.

Les couches zooplanctoniques

Si les analyses des échos des bancs de poissons ont souvent la finalité commune d'estimer la biomasse des espèces de poissons commerciales disponibles (Massé, 1996), celles des couches diffusantes ont des objectifs très variables. Considérées comme du "bruit" (Ballon et al., 2011) duquel il faut extraire les bancs de poissons, les échos des couches diffusantes ont longtemps été mis de côté, voir filtrés (Korneliussen & Ona, 2002; Cabreira et al., 2011). Ce n'est que depuis les années 1980 que les propriétés acoustiques des couches diffusantes sont étudiées (Holliday, 1977; Wiebe et al., 1996; Stanton, 1988b).

Certaines espèces de krill étant exploitées, les scientifiques se sont naturellement intéressés aux agrégations de ces organismes pour mieux comprendre leur biologie et leur écologie (voir la synthèse de Miller & Hampton (1989)). Les couches diffusantes de krill ont, la plupart du temps, une composition homogène (McQuinn et al., 2013). Le développement de modèles estimant la réponse acoustique d'un individu à partir de ses caractéristiques physiques comme sa taille ou sa composition (e.g. Chu et al. (1993); Martin Traykovski (1998)) a permis de démontrer qu'une relation linéaire existe entre l'énergie acoustique rétro-diffusée par une couche d'euphausiacés et l'abondance et la structure en tailles des organismes qui la composent (Stanton & Chu, 2000). Lorsqu'une couche diffusante est composée d'un mélange d'organismes dont les propriétés acoustiques sont proches de celles du krill (copépodes, petits euphausiacés), la réponse acoustique mesurée est alors un bon indice de la quantité d'organismes présents dans le volume insonifié. La collecte d'organismes par des filets à plancton dans les tranches de profondeur occupées par la couche diffusante, donne un aperçu de l'abondance et des tailles des différents types d'organismes. Ces données biologiques servent de paramètres initiaux aux modèles de réflecteurs qui comparent la réponse théorique de ces animaux à celle qui a été mesurée (Brierley & Watkins, 1996).

Les couches "fantômes"

Les euphausiacés et les copépodes sont les organismes les plus abondants dans l'océan et leurs agrégations représentent la majorité des couches diffusantes. Cependant, il existe une diversité de couches dont la réponse multi-fréquentielles (intensité acoustique en fonction de la fréquence), l'épaisseur et la profondeur peuvent beaucoup varier. Parmi ces couches, certaines présentent une réponse acoustique particulièrement forte, par rapport aux faibles abondances d'organismes qui les composent. Elles sont ainsi parfois nommées couches "fantômes". Les propriétés multifréquentielles et la composition spécifique de ces couches "fantômes" ne sont étudiées que depuis peu (Lavery et al., 2007; Lawson et al., 2004; Mair et al., 2005; Peña et al., 2014). Les études qui s'y sont intéressées expliquent rarement l'ensemble de la composition spécifique et ont formulé diverses hypothèses sur la composition réelle des couches fantômes. En mer du Nord, Mair et al. (2005) n'ont trouvé aucune corrélation entre les couches diffusantes observées par acoustique et l'échantillonnage biologique du mésozooplancton. Ils terminent en discutant sur la potentielle composition des couches diffusantes "fantômes" qu'ils observent :

[...] "*larves ou petits poissons avec une vessie gazeuse développée, siphonophores,*

autres organismes porteurs d'inclusion gazeuse ou une combinaison de l'ensemble." [...] "des bulles de gaz piégées dans les sédiments qui s'échappent dans la colonne d'eau ou provenant du déferlement des vagues de surface." [...] "des inclusions gazeuses contenues dans les cellules phytoplanctoniques qui seraient présentes dans les jets d'eau expulsés (par les calamars par exemple)" [...] "le résultat de quelques processus hydrographiques physiques."

L'ensemble de ces travaux analysent les données acoustiques multifréquences de diverses régions du globe mais ils s'accordent sur la nécessité de valider les hypothèses émises à partir des données acoustiques multi-fréquences, par un échantillonnage physique des organismes.

A condition de valider les hypothèses de nature, de taille et de densité d'organismes composant les couches diffusantes fantômes par des données biologiques, l'acoustique pourrait permettre d'estimer l'abondance et la structure en taille des organismes formant les couches diffusantes détectées en continu sur des zones géographiques étendues. Mais la mise en relation des données acoustiques et de la composition des échantillons n'est pas toujours triviale (Mair et al., 2005). Cependant, elle peut révéler des informations surprenantes comme, par exemple, le rôle des organismes gélatineux dans la rétro-diffusion des ondes acoustiques, qui peut s'avérer plus important que prévu (Lavery et al., 2007).

Étude des couches diffusantes du golfe de Gascogne observées pendant la campagne PELGAS

Pendant les campagnes écosystémiques PELGAS, des données acoustiques multifréquences sont collectées en continu pour estimer la biomasse de petits poissons pélagiques présente au printemps dans le golfe de Gascogne. Ces données acoustiques contiennent des échos de couches diffusantes qui ont jusqu'alors été très peu étudiées. Nous nous intéressons, dans cette thèse, aux couches diffusantes observées dans le golfe de Gascogne aux printemps 2012 et 2013. A l'échelle du golfe de Gascogne (mésos-échelle, 100 à 1000 km²), l'objectif de ce travail est de définir les caractéristiques acoustiques des couches diffusantes observées et d'en décrire les patrons de distribution spatiale. Aux échelles d'un réseau de stations (échelle grossière, 100 m² à 100 km²) et du profil vertical d'une station (fine échelle, 10 à 100 m²), le but est de déterminer la composition spécifique de ces couches diffusantes.

Dans le premier chapitre, les bases de l'acoustique sous-marine et son utilisation dans le domaine halieutique sont décrites, afin de fournir au lecteur les éléments nécessaires pour suivre le cheminement de ce travail.

Dans le second chapitre, les couches diffusantes sont étudiées à méso-échelle à l'aide de données multifréquences. Une méthode de classification non supervisée des échos est présentée pour caractériser la réponse acoustique de différents types de couches diffusantes et décrire leurs patrons de distribution spatiale à l'échelle du golfe de Gascogne. Dans un premier temps, les performances de classification de la méthode sont comparées à celles des méthodes supervisées appliquées précédemment dans la zone. Dans un deuxième temps, la méthode est appliquée aux données acoustiques de la campagne PELGAS 2013. Les paysages acoustiques du golfe de Gascogne qui en découlent sont enfin décrits et comparés entre eux.

Dans le troisième chapitre, les paysages acoustiques, définis au chapitre 2, sont comparés aux distributions spatiales d'indices de l'état des compartiments de l'écosystème pélagique du golfe de Gascogne collectés en routine pendant la campagne PELGAS, afin de mettre en

évidence d'éventuelles corrélations. La comparaison est effectuée dans un premier temps à l'échelle du golfe de Gascogne (*meso-scale*, centaines de km) puis à l'échelle grossière d'une radiale acoustique (100 m à 100 km).

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons à la composition taxonomique des couches diffusantes. Dans un premier temps, les couches diffusantes sont étudiées à l'échelle grossière (*coarse-scale*) d'un jeu de stations dans une zone atelier restreinte. Les profils acoustiques verticaux multifréquences sont classifiés pour étudier la diversité des couches diffusantes et la replacer dans le contexte hydrologique de la zone. Dans un second temps, des estimations d'abondance et de tailles de réflecteurs sont calculées avec un algorithme d'inversion à partir des profils acoustiques multifréquences et de modèles de réflecteurs. Les résultats sont comparés à des données hydro-biologiques collectées au même moment. Dans un troisième temps, la composition des couches diffusantes est étudiée à la fine échelle (1 à 10 m) de la fenêtre spatio-temporelle de l'échantillonnage par un filet à micronecton. Une réponse fréquentielle théorique est calculée à partir des tailles et des abondances des organismes mésozooplanctoniques collectés par le filet à l'aide de modèles de réflecteurs acoustiques et est comparée à la réponse fréquentielle *in-situ*. Les différences entre les deux réponses fréquentielles sont comblées par l'ajout d'inclusions gazeuses virtuelles, dont la distribution en taille a été estimée par inversion du signal acoustique *in-situ*. Les densités et tailles des inclusions gazeuses sont comparées aux données biologiques, et des hypothèses sont formulées quant à la nature et à la contribution des organismes porteurs de bulles de gaz à la réponse acoustique des couches diffusantes.

En dernier lieu, les résultats des études des couches diffusantes aux différentes échelles sont synthétisés et discutés, et des perspectives sont évoquées pour approfondir leur étude.

Chapitre 1

Contexte

*Entre
Ce que je pense,
Ce que je veux dire,
Ce que je crois dire,
Ce que je dis,
Ce que vous avez envie d'entendre,
Ce que vous croyez entendre,
Ce que vous entendez,
Ce que vous croyez comprendre,
Ce que vous comprenez,
Il y a 10 possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer.
Mais essayons quand même...*

Encyclopédie du savoir relatif et absolu,
- Bernard Werber -

1.1 L'acoustique sous-marine

Dans l'océan, la propagation des ondes acoustiques, générées par les écho-sondeurs, est influencée par les caractéristiques de l'eau et des objets qui s'y trouvent. Cette partie présente les bases physiques de l'acoustique halieutique à partir des ouvrages de Diner & Marchand (1995) et de Simmonds & MacLennan (2005).

1.1.1 Les ondes acoustiques

Les ondes acoustiques sont similaires aux ondes lumineuses par leur caractère ondulatoire. Les ondes acoustiques ont besoin d'un support pour se propager, mais elles sont absorbées beaucoup moins rapidement que la lumière dans l'eau, ce qui explique leur large utilisation dans le domaine maritime. De manière schématique, une onde acoustique est une succession de phases de compression et d'expansion des particules du milieu (ici l'eau), les oscillations, qui se déplacent dans des directions privilégiées, décrites par la fonction de directivité (figure 1.1). La fréquence, f , représente le nombre d'oscillations par seconde et s'exprime en Hertz (Hz). La période, T , est l'inverse de la fréquence (Hz^{-1}) :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

La distance entre deux fronts d'onde successifs, la longueur d'onde, λ (en mm), définit la résolution spatiale maximale de détection des objets.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (1.2)$$

où k est le nombre d'ondes. Plus la longueur d'onde est faible, plus la fréquence et la résolution spatiale sont élevées. Lorsque l'on connaît la fréquence à laquelle l'onde est émise, f , et sa longueur, λ , on peut alors calculer la vitesse de cette onde dans l'eau, c (en m/s) :

$$c = \lambda f \quad (1.3)$$

Dans les études acoustiques, c'est l'intensité I du flux acoustique, c'est-à-dire son énergie par unité de surface, qui est mesurée. Elle s'exprime comme le ratio entre l'intensité incidente I_1 et l'intensité reflétée par une cible I_2 , et s'exprime en décibels (dB). Le décibel est une unité logarithmique avec laquelle il est possible d'exprimer, sur une gamme de valeurs réduite, des changements d'intensité qui couvrent plusieurs ordres de grandeur dans l'échelle arithmétique.

$$[dB] = 10 \times \log_{10}\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (1.4)$$

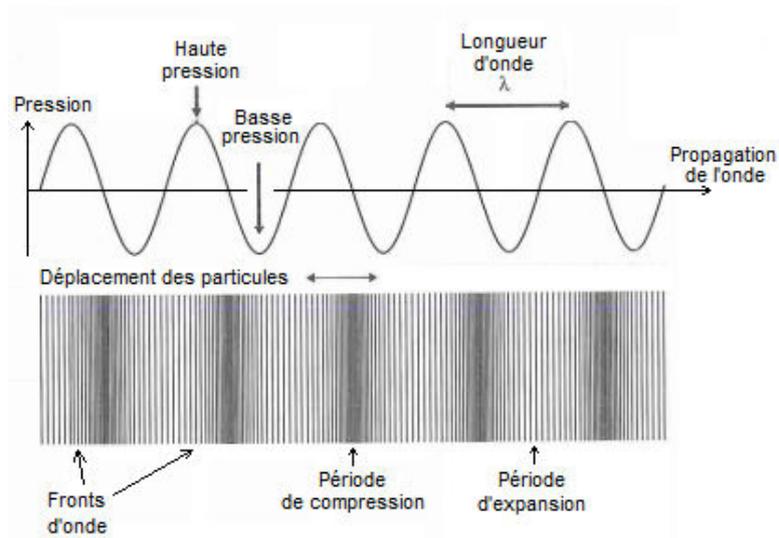


FIGURE 1.1 – Schéma de la propagation d’ondes acoustiques illustrant le changement de pression entre les périodes de compression et d’expansion. Schéma modifié d’après Simmonds & MacLennan (2005)

1.1.2 Émission et propagation des ondes acoustiques

Nous décrivons ici l’émission des ondes sonores par les échosondeurs halieutiques utilisés dans cette thèse. Les transducteurs des échosondeurs halieutiques remplissent les fonctions d’émission et de réception des ondes. A l’émission, une onde acoustique (ou ping) est émise par le transducteur. La majorité de l’énergie acoustique est dirigée dans le lobe principal (figure 1.2), qui se situe au centre du faisceau et est perpendiculaire au plan du transducteur. Le reste de l’énergie acoustique forme les lobes secondaires répartis autour du lobe principal.

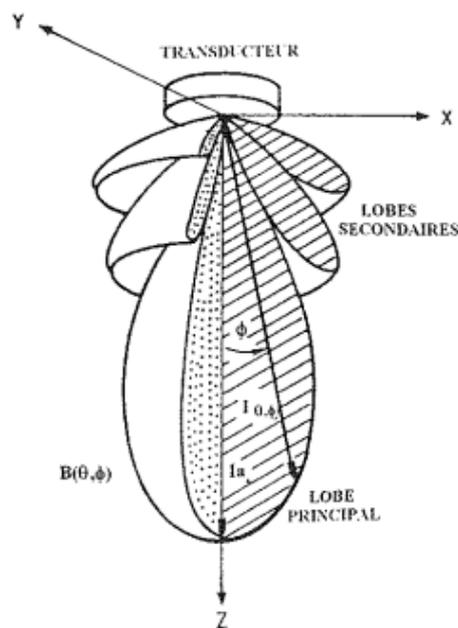


FIGURE 1.2 – Schéma de la fonction de directivité d’un faisceau acoustique. Le lobe principal contient la majeure partie d’intensité acoustique du faisceau. L’énergie restante forme les lobes secondaires. D’après Diner & Marchand (1995)

Lors de la propagation de l'onde acoustique dans l'espace et dans le temps, sa fréquence d'émission est constante mais la forme conique du faisceau induit une augmentation rapide du volume échantillonné avec la distance au transducteur (figure 1.3). L'intensité acoustique propagée (énergie par unité de temps) diminue avec l'augmentation de l'aire insonifiée par le faisceau. Cette perte d'intensité du signal acoustique est compensée par l'application d'un gain proportionnel à la distance du transducteur (*Time Variable Gain*, TVG) au signal reçu. D'autre part, l'énergie du signal acoustique est atténuée par l'eau, c'est-à-dire qu'elle est convertie en chaleur au fur et à mesure de sa propagation. Les signaux à hautes fréquences induisent des déplacements de particules à une vitesse plus élevée que les signaux à basse fréquence, ce qui entraîne des pertes d'énergie, dues aux frictions plus importantes. L'augmentation rapide de l'absorption avec la fréquence est le facteur limitant qui détermine la plus haute fréquence à laquelle il est possible de détecter une cible à une distance donnée. Au-delà de cette limite, la perte due à l'absorption devient trop importante, le signal reçu est du même ordre de grandeur que le bruit et ne peut pas être détecté.

Dans la zone qui se situe immédiatement après le transducteur, le champ proche, la relation entre l'intensité du signal et la distance au transducteur est complexe (figure 1.3). Ce phénomène est dû au fait que les fronts d'onde produits par les différents éléments du transducteur, ne sont pas parallèles ce qui altère leur relation de phase. Ce n'est que dans le champ lointain où les fronts d'onde sont presque parallèles, que l'on considère que le faisceau est formé. Le champ proche est ce que l'on appelle la zone "aveugle" du transducteur car les données acoustiques n'y sont pas exploitables (figure 1.7).

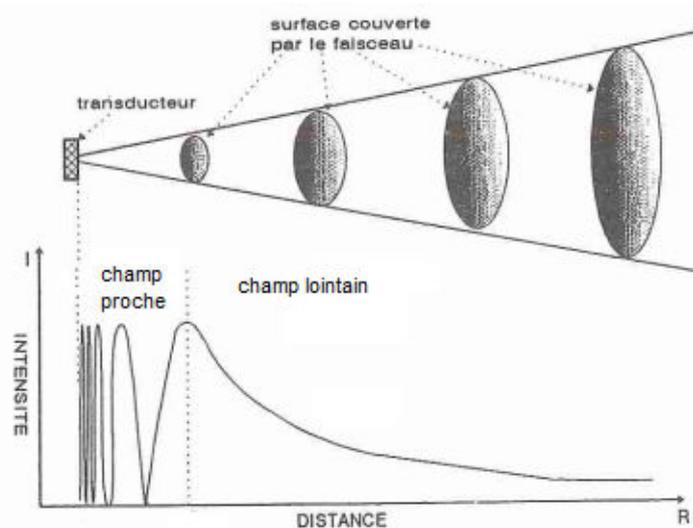


FIGURE 1.3 – Variation de l'aire insonifiée et de l'intensité acoustique avec l'ouverture du faisceau acoustique. Dans le champs proche, ou zone aveugle, les fronts d'onde impulsées par les différents éléments du transducteur ne sont pas en phase et la relation entre l'intensité et la distance au transducteur est complexe. Dans le champ lointain, les fronts d'onde sont en phase et la relation entre l'intensité et la distance est connue. D'après Diner & Marchand (1995)

1.1.3 Rétrodiffusion acoustique

Une cible désigne n'importe quel objet présentant une impédance acoustique différente de celle du milieu environnant. Si la taille de la cible est très faible par rapport à la longueur d'onde

($L \ll \lambda$), la cible est insonifiée totalement et la rétro-diffusion s'effectue dans une multitude de directions. Dans ce cas, c'est le volume, plutôt que la forme, de la cible qui détermine la nature de la rétro-diffusion.

Si la taille de la cible est nettement supérieure à celle de la longueur d'onde ($L \gg \lambda$), seule la portion de l'objet présente dans le volume insonifié réfléchit le signal, dans une direction privilégiée. Lorsque la surface est plate, la rétro-diffusion est dirigée selon un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (figure 1.4). Si la cible est sphérique, l'énergie rétro-diffusée augmente proportionnellement au carré du rayon de la sphère. Dans ce cas, on dit que la rétro-diffusion est dans la zone de Rayleigh.

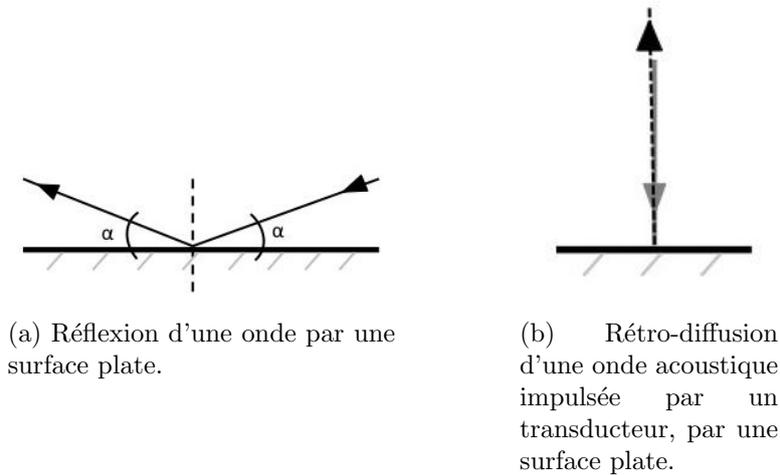


FIGURE 1.4 – Illustration de la réflexion. (a) cas d'une onde réfléchi par une surface plate. Les angles d'incidence et de réflexion (α) sont égaux. (b) cas d'une onde acoustique impulsée par un transducteur rétro-diffusée par une surface plate. La flèche en pointillés représente la rétro-diffusion enregistrée par le sondeur.

Le phénomène de résonance

Toutes les cibles, ont une fréquence naturelle d'oscillation (ou fréquence de résonance), qui est dépendante de la taille de l'organisme (Anderson, 1950), et de sa composition. Lorsque la fréquence de l'onde impulsée est proche de la taille de l'organisme, l'amplitude du signal rétro-diffusé approche un maximum et l'écho se produit dans la zone dite de résonance (Rayleigh (1945), figure 1.5). La rétro-diffusion mesurée à des fréquences inférieures à la fréquence de résonance est située dans la zone dite de Rayleigh, tandis que celle qui est mesurée à des fréquences supérieures à la fréquence de résonance est située dans la zone dite géométrique.

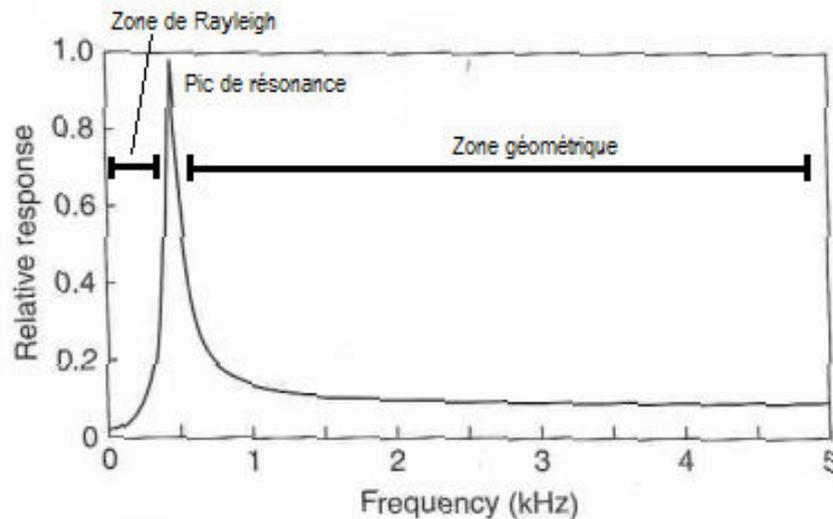


FIGURE 1.5 – Réponse fréquentielle d’une cible. Lorsque la fréquence du faisceau acoustique est proche de la taille de la cible, l’intensité rétro-diffusée augmente rapidement en pic à la fréquence de résonance. Lorsque la fréquence du faisceau est inférieure à la fréquence de résonance, elle est dans la zone de Rayleigh, lorsque la fréquence du faisceau est supérieure, elle est dans la zone géométrique. D’après Simmonds & MacLennan (2005).

Si la différence d’impédance acoustique entre l’eau et la cible est très importante (à l’interface entre une bulle de gaz et l’eau de mer par exemple), cela crée une rétro-diffusion très intense. Lorsqu’une bulle de gaz est à l’état d’équilibre dans l’eau, la pression du gaz à l’intérieur de la bulle est équivalente à la pression environnante. Si l’on contraint la bulle en lui infligeant des oscillations (en la plaçant dans le faisceau acoustique), alors la pression du gaz varie (figure 1.6). Le changement de pression du gaz engendre un état oscillatoire de la bulle autour de son état d’équilibre, selon la fréquence imposée. La cavité que forme la bulle d’air dans le milieu induit un fort déplacement de la surface de la bulle ce qui produit le phénomène de résonance. Les oscillations s’effectuent selon une fréquence particulière : la fréquence de résonance fondamentale ou fréquence de Minnaert (Leroy, 2004). Si l’on ajoute une nouvelle perturbation à la bulle entrée en résonance (une nouvelle impulsion dans le faisceau acoustique), et que la fréquence de la perturbation est proche de la fréquence de Minnaert, alors l’énergie rétro-diffusée par la bulle sera plus importante que l’énergie incidente. La fréquence de Minnaert a la particularité d’avoir une longueur d’onde très grande par rapport à la taille de la bulle.

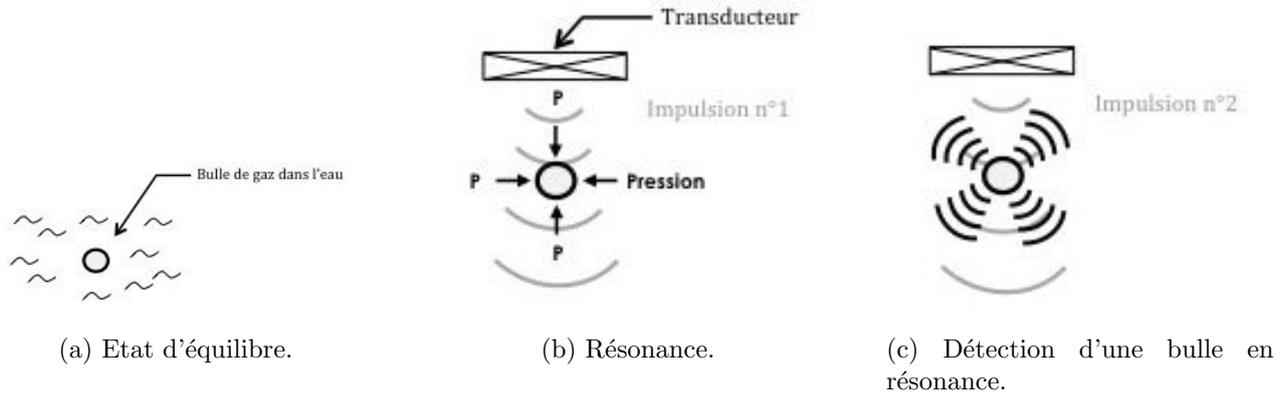


FIGURE 1.6 – Schémas illustrant le phénomène de résonance. (a) A l'état d'équilibre la pression du gaz dans la bulle est équivalente à la pression environnante. (b) La bulle entre en résonance suite à sa perturbation par une onde acoustique. (c) Une onde acoustique détecte une bulle en résonance, l'énergie acoustique enregistrée est très forte par rapport à l'énergie envoyé par le transducteur.

1.1.4 Détection et représentation des échos

Lorsque l'onde acoustique rencontre une cible, une partie de l'énergie incidente est rétro-diffusée en direction du transducteur. Les échos des cibles sont enregistrés par le transducteur qui fonctionne comme un hydrophone entre chaque émission. Le temps écoulé entre l'émission et la réception d'un écho est proportionnel à la distance à laquelle se trouve la cible.

Lorsqu'une seule cible est détectée par le faisceau acoustique, sa réponse est exprimée en terme de surface réfléchissante ou *backscattering cross-section* (σ_{bs} , exprimée en m^2). La surface réfléchissante représente l'aire d'un réflecteur standard qui produirait un signal équivalent au signal reçu.

$$\sigma_{bs} = \frac{R^2 I_2}{I_1} \quad (1.5)$$

où I_1 et I_2 sont les intensités incidentes et rétro-diffusée et R la distance à laquelle se trouve la cible.

Les σ_{bs} sont exprimés en échelle arithmétique et il est souvent plus pratique d'utiliser son équivalent en échelle logarithmique : l'indice de cible ou *Target Strength* (TS, exprimé en décibels) :

$$TS = 10 \times \log_{10}(\sigma_{bs}) \quad (1.6)$$

Lorsque plusieurs cibles individuelles sont contenues dans le volume échantillonné, le signal reçu est une combinaison de leurs échos et il n'est alors plus possible de discriminer les cibles individuellement. La réponse acoustique des cibles situées dans un volume donné est exprimée en terme d'intensité acoustique par unité de volume (*volume backscattering coefficient*, sv).

$$sv = \frac{\sum \sigma_{bs}}{V_0} \quad (1.7)$$

Le sv est la somme des indices de toutes les cibles contenues dans le volume V_0 . Comme pour la détection des cibles individuelles, il est plus pratique d'utiliser l'équivalent en échelle logarithmique :

$$Sv = 10 \times \log_{10}(sv) \quad (1.8)$$

Cette équation exprime le fait que l'intensité acoustique est proportionnelle au nombre de cibles échantillonnées dans le faisceau acoustique, et permet donc de quantifier la densité des organismes insonifiés (principe de linéarité). Les Sv rétrodiffusés au cours du temps (abscisses) et en fonction de la distance au transducteur (ordonnées) sont classiquement représentés en deux dimensions dans des échogrammes (figure 1.7). L'intensité de chaque écho est représentée par une palette de couleurs allant par exemple, du rouge pour les réflecteurs les plus forts (surface, fond de la mer, bancs de poissons) au bleu pour les réflecteurs les plus faibles (couches diffusantes).

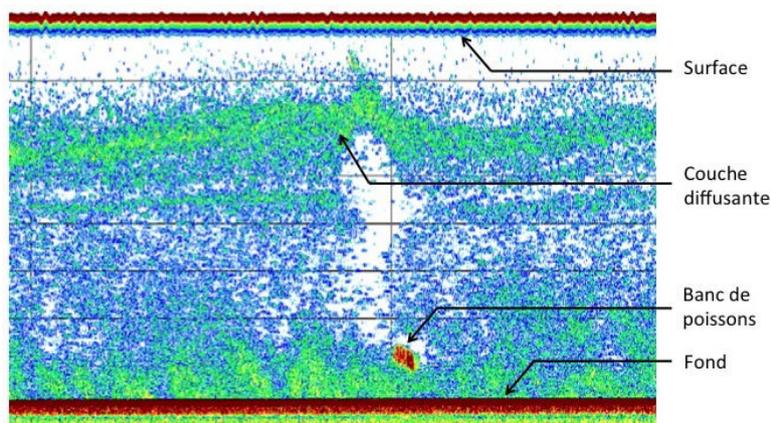


FIGURE 1.7 – Exemple d'un échogramme obtenu avec un écho-sondeur émettant à 38 kHz. La ligne épaisse de couleur foncée, en bas de la figure, représente le fond de la mer. La ligne épaisse en haut de la figure, représente la zone aveugle du sondeur. Les écho-traces les plus rouges sont les plus intenses (cf. bancs de poisson) et les plus bleues sont les plus faibles.

1.1.5 L'acoustique en halieutique

L'acoustique sous-marine est la seule technique qui permet de détecter et de positionner les bancs de poissons pélagiques en observant simultanément leur environnement biotique et abiotique. Les instruments d' "acoustique halieutique" (sondeurs et sonars), sont ainsi largement utilisés à la fois par les pêcheurs et les scientifiques. Les navires, utilisés pour mener des campagnes scientifiques utilisant l'acoustique halieutique, sont aujourd'hui équipés d'échosondeurs scientifiques, généralement fixés sous la coque. Ces navires collectent des données acoustiques en continu, sur de vastes zones géographiques, en un temps d'échantillonnage relativement court et ce sans perturber le milieu ni les organismes. La gamme des fréquences auxquels les données sont acquises par les écho-sondeurs halieutiques, s'étend de 10 à 420 kHz (Horne, 2000). Les faisceaux des sondeurs scientifiques sont très étroits (classiquement 7°), afin d'obtenir une résolution spatiale la plus fine possible. La fréquence de résonance des poissons pélagiques est située en-dessous de 10 kHz (Stanton et al., 2012) et les fréquences halieutiques classiques opèrent donc dans la zone géométrique de la réponse fréquentielle des poissons détectés. Ainsi la réponse fréquentielle des poissons à vessie dans la gamme des fréquences halieutiques résulte en une courbe plate et intense (figure 1.8). L'étude de la résonance des poissons pélagiques nécessiterait des sondeurs opérant à des fréquences plus basses, dont les antennes volumineuses ne peuvent pas être facilement intégrées sur la coque des navires de recherche.

Les campagnes acoustiques halieutiques collectent classiquement des Sv de poissons dans le but d'estimer la quantité de poissons pélagiques présente dans la zone d'étude, afin de fournir des

données nécessaires à la gestion des stocks (exemple de la campagne PELGAS : Doray et al. (2014)). Les données collectées lors de ces campagnes sont également utilisées afin d'étudier l'écologie des poissons pélagiques (Petitgas et al., 2014; Zwolinski & Demer, 2012; Bertrand et al., 2010), ou d'autres organismes.

1.2 Acoustique et plancton

Les organismes planctoniques sont détectés par les ondes acoustiques selon le même processus physique de rétro-diffusion. Ce sont cependant des organismes beaucoup plus petits que les poissons, qui sont proches les uns des autres dans la colonne d'eau. Les échos qu'ils génèrent prennent la forme de "couches diffusantes" sur les échogrammes.

La figure 1.8 est extraite de Lavery et al. (2007) et représente la réponse fréquentielle des grands types de réflecteurs planctoniques et des poissons. Si la combinaison des Sv collectés à seulement deux fréquences peut être suffisante pour distinguer les échos intenses des autres (e.g. Ballon et al. (2011)), il est essentiel de disposer d'une gamme de fréquences la plus large possible pour étudier les caractéristiques acoustiques et la composition spécifique des couches diffusantes (Costello et al., 1989; Korneliussen & Ona, 2003; Warren et al., 2003; Mair et al., 2005; Lawson et al., 2004).

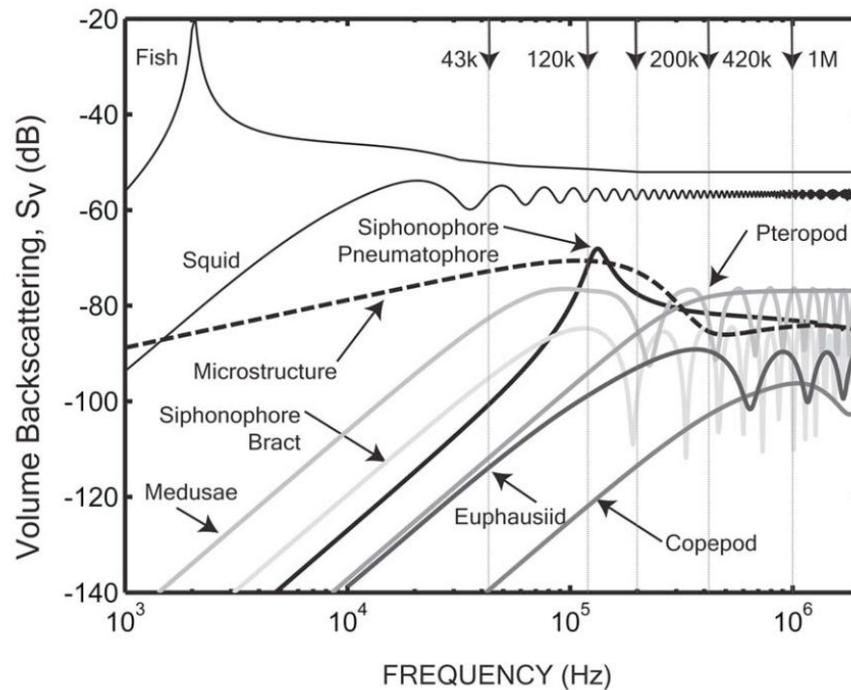


FIGURE 1.8 – Courbes théoriques de l'intensité de la réponse acoustique en fonction de la fréquence pour les grands types de réflecteurs. Issu de Lavery et al. (2007).

Modélisation des réflecteurs planctoniques

Dans la littérature, la caractérisation acoustique des couches diffusantes est abordée selon deux approches. L'approche (ou problème) directe consiste à modéliser la réponse fréquentielle théorique d'un groupe d'organismes dont les propriétés géométriques et acoustiques sont connues *a priori*, et à la comparer à la réponse fréquentielle mesurée dans la même zone (Lawson et al.,

2004; Lavery et al., 2007). L'approche (ou problème) inverse consiste à estimer les vecteurs de taille et d'abondance de réflecteurs acoustiques théoriques optimaux pour reproduire la réponse acoustique mesurée *in-situ* (Greenlaw & Johnson, 1983; Holliday & Pieper, 1995; Holliday, 1977). Ces deux approches nécessitent de définir des modèles de la réponse acoustique des réflecteurs potentiellement insonifiés. Stanton (1988b) a, dans un premier temps, considéré les cibles planctoniques comme des cylindres remplis de fluide. Cependant, il existe une diversité bien trop vaste de formes, de tailles et de composition au sein des communautés planctoniques (Fraser, 1962; Hardy, 1970) pour que leur réponse acoustique soit représentée de façon réaliste par une unique formule. Les réponses acoustiques de cylindres élastiques (Stanton, 1988a), puis de cylindres courbés (Stanton, 1989) ont donc été développés afin de mieux représenter les organismes. Même si elles considèrent un réflecteur similaire, la différence des réponses fréquentielles de ces trois formes d'objets (figure 1.9) montre que la forme de l'organisme joue un rôle non négligeable dans l'intensité qu'il rétro-diffuse aux différentes fréquences.

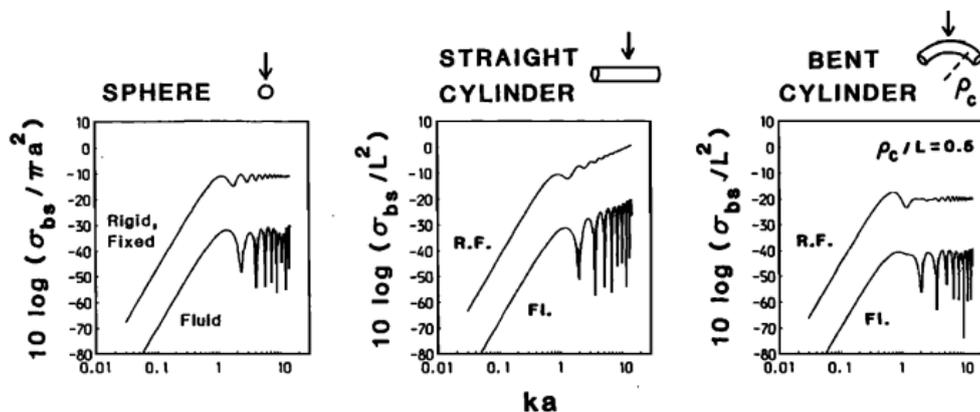


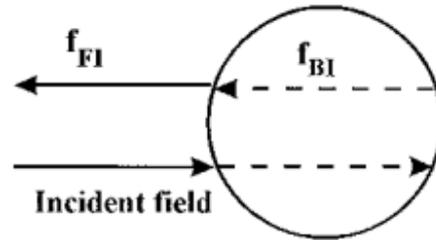
FIGURE 1.9 – Résultats issus de l'étude de Stanton (1989) : Comparaison de la réponse acoustique normalisée d'une sphère, d'un cylindre droit (angle d'incidence normal) et d'un cylindre courbé uniformément pour les cas rigide et fixe (courbes supérieures) et fluide (courbe inférieure).

C'est à partir des années 1980 que les études s'intéressant à la modélisation de la réponse acoustique des divers types de zooplancton se sont multipliées. Elles visaient à mesurer la réponse individuelle de réflecteurs planctoniques dans des conditions d'orientation et de densité contrôlées (Chu et al., 1993; Brierley et al., 2001; Miyashita et al., 1996; David et al., 2001). Les travaux de T. Stanton et de ses collaborateurs (Stanton et al., 1996, 1998) ont servis de base aux études de ce domaine. Ces auteurs ont classé les organismes planctoniques en trois grandes classes de réflecteurs selon leur anatomie, qui détermine la manière dont l'écho est formé (Stanton et al., 1994a, 1996) : les *Fluid-Like* (FL), les *Elastic-Shell* (ES), les *Gas-bearing* (GB).

Les organismes *Fluid-Like* (FL)

Les réflecteurs de type FL (figure 1.10) sont caractérisés par un corps composé de tissus mous dont les propriétés acoustiques sont proches de celles de l'eau environnante. La totalité de l'organisme est considérée comme un réflecteur homogène qui réfléchit une faible intensité de l'énergie acoustique incidente. Les copépodes ou les euphausiacés (figure 1.10c) sont de bons représentants du groupe des FL, notamment le krill d'Antarctique *Euphausia superba* qui a fait l'objet de nombreuses études. La modélisation de la rétro-diffusion des organismes FL a connu

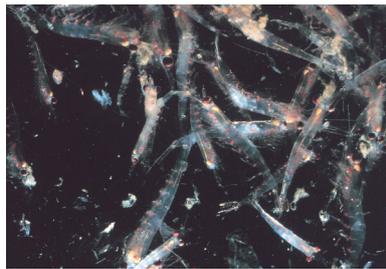
un intérêt particulier dans le courant des années 1990, puisqu'ils dominent les communautés méso- et macro-zooplanctoniques en termes d'abondance. En 2000, Stanton & Chu (2000) ont réalisé un état de l'art des différentes approches qui ont été développées depuis les années 1970 pour modéliser la réponse acoustique des copépodes et des euphausiacés.



(a) Illustration de la rétro-diffusion d'une onde acoustique par le corps d'un réflecteur FL, d'après (Stanton et al., 1998). "Incident field" désigne l'onde acoustique incidente, f_{BI} désigne la réflexion de l'onde sur la surface du fond, f_{FI} désigne la réflexion de l'onde sur la surface de devant.



(b) Copépode.



(c) Krill.



(d) Larve de crustacé.

FIGURE 1.10 – Illustration de la réflectivité des organismes *Fluid-Like* (FL, a). Exemple d'organismes considérés comme FL (b, c, d).

L'intensité acoustique diffusée par les réflecteurs FL est généralement très faible, mais varie selon la fréquence considérée. Aux basses fréquences (jusqu'à 70 kHz), l'intensité acoustique augmente avec la fréquence, puis oscille et décroît aux hautes fréquences (figure 1.11). Le modèle représentant la réponse acoustique d'un copépode utilisé dans ce travail est le modèle *Truncated Fluid Sphere* (TFS, Holliday (1992), figure 1.11).

Trois types de modèles sont utilisés pour décrire les propriétés acoustiques d'un cylindre de fluide déformé, chacun étant basé sur des hypothèses différentes.

Le premier type de modèles est basé sur la théorie des séries modales (*modal-series-based theory*), décrite par Stanton (1988a). Elle s'applique à des cylindres qui ont une section circulaire dont le rayon peut légèrement varier le long du grand axe. La réflectivité est supposée homogène sur tout le cylindre, et la solution modale est pertinente pour les réflecteurs denses ou peu denses. Cependant, ce modèle n'est valide que pour des angles d'incidence quasi-normaux du faisceau acoustique.

Le second type de modèles considère le corps de l'organisme comme un ensemble de petits volumes. L'écho complet est la somme de la contribution de chaque élément. Cette méthode est basée sur la *Distorted-Wave Born Approximation* (DWBA), selon laquelle la rétro-diffusion est

mathématiquement exprimée comme une intégrale en trois dimensions le long du volume du corps. Les modèles basés sur la DWBA ont été largement utilisés dans les études du plancton (Martin Traykovski, 1998; McGehee et al., 1998; Stanton et al., 1998; Lavery et al., 2002). Ils peuvent être appliqués à n'importe quelle forme d'organisme, mais ne sont pas valides pour des réflecteurs denses, car les échos multiples et l'absorption à l'intérieur du corps sont négligés. Le modèle est valide pour toutes les orientations de la cible et à toutes les fréquences.

Le troisième type de modèles est basé sur une représentation simple de la rétro-diffusion comme un ensemble de rayons reflétés par la surface avant et arrière du corps. Les rayons sont les réflexions discrètes des interfaces entre le corps et le milieu qui se combinent pour former l'écho. La rétro-diffusion du volume à l'intérieur du corps est négligé. Ces modèles sont moins précis que les deux premiers. Ils sont souvent restreint aux applications de la rétro-diffusion aux hautes fréquences, dans la zone géométrique de rétro-diffusion (Stanton et al., 1994a).

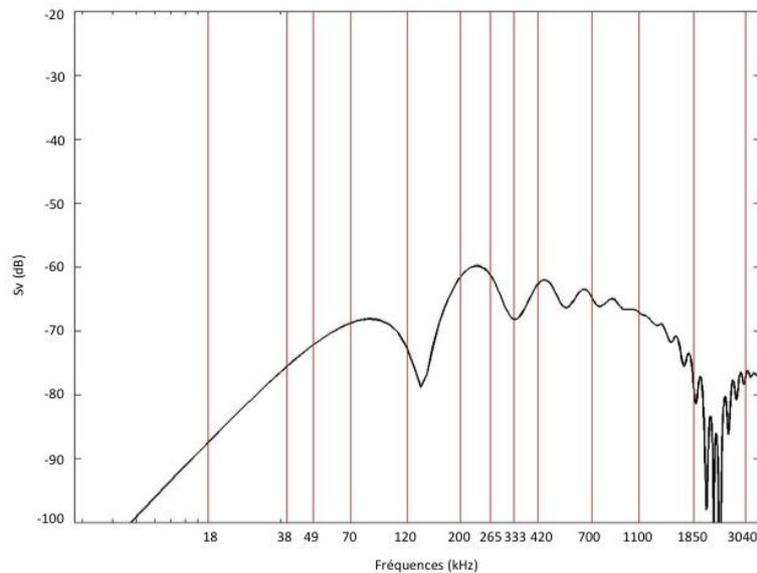
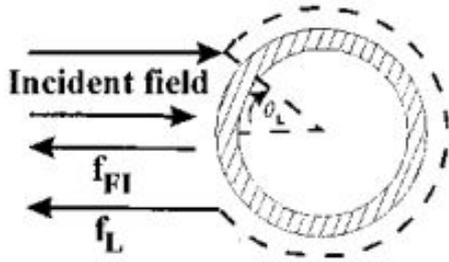


FIGURE 1.11 – Courbe théorique de l'intensité de la réponse acoustique d'un copépode en fonction de la fréquence selon le modèle *Truncated Fluid Sphere* (Holliday, 1992).

Les organismes *Elastic Shell* (ES)

Les réflecteurs ES (figure 1.12) sont pourvus d'une coquille externe dense dont la forme est plus ou moins sphérique. Les gastéropodes sont l'exemple type de réflecteurs ES. L'écho est essentiellement provoqué par la rencontre de l'onde incident avec la coquille. La rétro-diffusion du tissu interne est souvent négligée.



(a) Illustration de la rétro-diffusion d'une onde acoustique par un réflecteur ES, d'après (Stanton et al., 1998). "Incident field" désigne l'onde incidente, f_{FI} désigne la réflexion de l'onde par la surface de devant, f_L désigne la contribution des ondes de Lamb à la rétro-diffusion de l'onde incidente. θ_L désigne l'angle d'origine des ondes de Lamb.



(b) Gastéropode.

FIGURE 1.12 – Illustration de la réflectivité d'un réflecteur *Elastic-Shell* (ES, a) et exemple d'un organisme considéré comme réflecteurs ES.

L'opercule est une ouverture dans la coquille permettant au pied de l'organisme de sortir. Elle représente une discontinuité dans la sphère de la coquille et rend la modélisation de ces organismes difficile : la solution exacte d'une coquille totalement sphérique est une estimation grossière de la réponse acoustiques des réflecteurs ES. La réponse fréquentielle d'une sphère parfaite présente de forts pics de résonance qui ne sont pas mesurées *in-situ*. Pour palier à cette différence entre la théorie et l'expérimentation, il semble que l'approche la plus pertinente soit l'analyse des rayons discrets (cf. modélisation des organismes FL). Cette approche permet de modéliser l'influence des propriétés particulières de la coquille (Stanton et al., 1998).

Les mesures des échos de gastéropodes présentent deux pics distincts. Le premier pic est interprété comme la réflexion immédiate de l'onde incidente sur l'avant de la coquille. Le délai entre les deux pics est relativement long. Plus long que si le deuxième pic était la simple réflexion de l'onde par l'autre côté de la coquille. Stanton et al. (1998) pensent que le deuxième pic correspond à des vibrations de la coquille qui naviguent autour de la coquille dans toutes les directions (ou ondes de Lamb). Ces vibrations se propagent à des vitesses subsoniques et sont principalement portées par la coquille, mais une partie de l'énergie peut s'échapper dans l'eau. L'énergie des ondes qui s'échappent se propage jusqu'au transducteur en provoquant le deuxième pic de l'écho. Le modèle des rayons discrets considère les effets de la dispersion des ondes de Lamb, mais ne prend pas en compte l'opercule, qui n'a, jusqu'à présent, pas été modélisée avec succès.

Le spectre fréquentielle des gastéropodes peut être oscillatoire ou plat selon l'orientation de l'animal par rapport au faisceau. Si l'on supprime les termes des ondes de Lamb dans le modèle de Stanton, il n'y a plus d'interférences et le spectre est plat. Les deux cas s'observent *in-situ*. Le modèle de Stanton et al. (1994b) représente la réponse des réflecteurs ES sans les ondes de Lamb (figure 1.13).

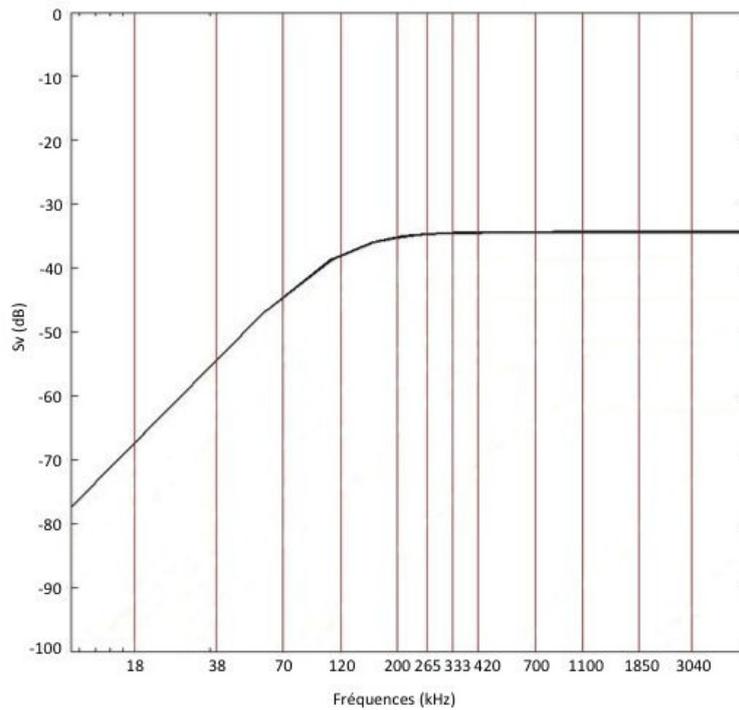
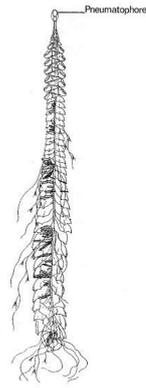


FIGURE 1.13 – Courbe théorique de l'intensité de la réponse acoustique induite par un gastéropode en fonction de la fréquence, selon le modèle de Stanton et al. (1994b).

Les organismes *Gas-Bearing* (GB)

Certains organismes zooplanctoniques ont une inclusion gazeuse qui, même si elle est petite par rapport à la taille totale de l'organisme, produit un écho très fort. Les siphonophores physonectes sont l'exemple type des réflecteur GB cité dans la littérature, mais les larves de poissons pourvues de vessie gazeuse ou les petits poissons à vessie sont également des organismes GB (figure 1.14). Les tissus du corps des siphonophores sont gélatineux et considérés comme FL. Les deux parties peuvent être considérées indépendamment. Pour la partie FL, les modèles cylindriques qui fonctionnent bien pour les euphausiacés ne sont pas valides pour les formes irrégulières du corps des siphonophores. Celles-ci peuvent en revanche être modélisée avec la méthode DWBA. La bulle de gaz est considérée comme une sphère car elle est moins déformée par les tissus que la vessie d'un poisson. Une comparaison des modèles de bulles de gaz a été menée dans le cadre de cette étude et est présentée dans le chapitre 3.4. Lorsque plusieurs individus sont observés *in-situ*, l'écho comprend la réponse acoustique d'animaux aux orientations diverses. Les fluctuations de la réponses qui sont dues à la partie FL sont masquées par la réponse de la partie gazeuse. Cette dernière peut provoquer le phénomène de résonance (*cf.* partie 1.1.3). Les réflecteurs GB peut aussi être des larves de poissons dotées de vessies gazeuses de petite taille ou encore des espèces de poissons à vessie dont les individus adultes sont de petite taille (myctophidés).



(a) Siphonophore physonecte, le pneumatophore est une inclusion gazeuse à la tête de l'organisme colonial.



(b) Larve de poisson avec vessie natatoire (noir).

FIGURE 1.14 – Illustration de deux types d'organismes considérés comme réflecteurs *Gas-Bearing*.

1.3 Le golfe de Gascogne

1.3.1 La géographie

Le golfe de Gascogne est une baie océanique ouverte à l'ouest sur l'océan Atlantique (figure 1.15). La côte ibérique espagnole fait office de frontière sud ($43^{\circ} 20'N$) et la côte ouest française constitue les frontières à l'est et au nord ($48^{\circ} N$). Le plateau armoricain au nord du golfe, large de 180 km, s'étend sur 300 km jusqu'au plateau de Rochebonne ($46^{\circ} N$). Du plateau de Rochebonne jusqu'à la frontière espagnole, s'étend le plateau d'Aquitaine dont la largeur varie entre 150 km au nord et 30 km au sud (Koutsikopoulos & LeCann, 1996).

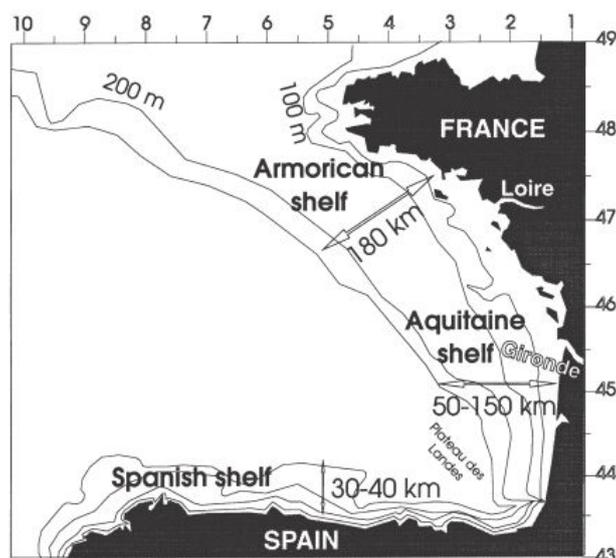
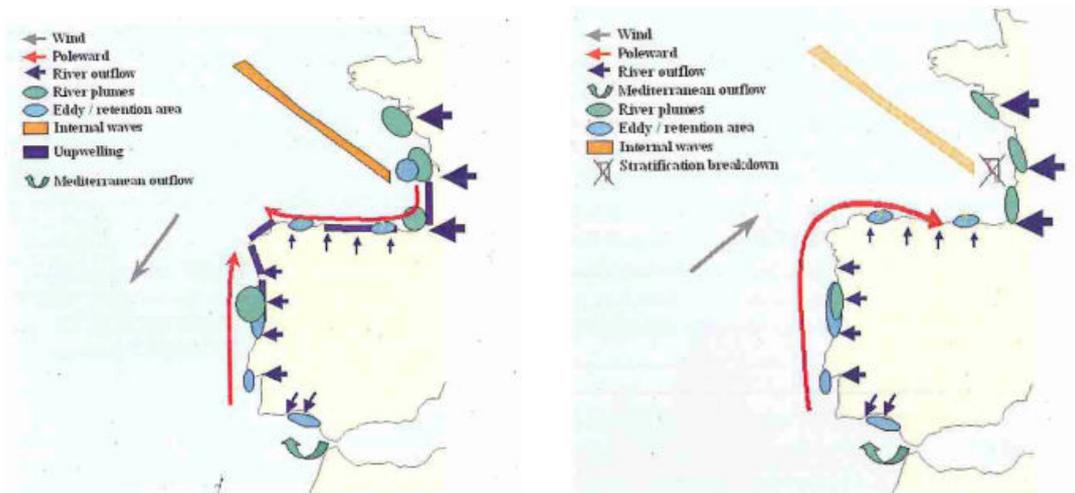


FIGURE 1.15 – Bathymétrie du golfe de Gascogne présentant les différentes zones du plateau continental. D’après Koutsikopoulos & LeCann (1996).

1.3.2 L’hydrologie

Le contexte hydrologique du plateau continental du golfe de Gascogne est rythmé par l’alternance de deux situations (Petitgas, 2010) :

- Dans la situation anticyclonique, les vents dominants sont orientés nord-nord-est. Ils engendrent la formation d’upwellings côtiers, notamment le long de la côte landaise (figure 1.16a). Les panaches des fleuves Loire, Gironde et Adour sont dispersés vers le large engendrant une stratification haline de la colonne d’eau, accentuée par le réchauffement des eaux de surface. Ce régime se produit au printemps (mars à juin).
- Dans la situation cyclonique, les vents dominants sont orientés sud-ouest (figure 1.16b). Les panaches des fleuves sont concentrés près de la côte et la colonne d’eau est mélangée. Ce régime se produit en été (juillet et août).



(a) Régime anticyclonique (printemps) : vents dominants nord-nord-est, upwellings côtiers, colonne d'eau stratifiée.

(b) Régime cyclonique (été) : vents dominants sud-ouest, colonne d'eau mélangée.

FIGURE 1.16 – Synthèse des évènements marquant l'hydrologie du golfe de Gascogne. D'après Petitgas (2010).

La classification d'indice hydrologiques de Gailhard-Rocher et al. (2012) décrit un paysage hydrologique par mois grâce à 9 groupes. Au mois de mai (figure 1.17), les eaux côtières sont très stratifiées par l'influence des panaches et présentent de fortes concentrations en chlorophylle-a et en matières en suspension. Les eaux du plateau continental sont mélangées.

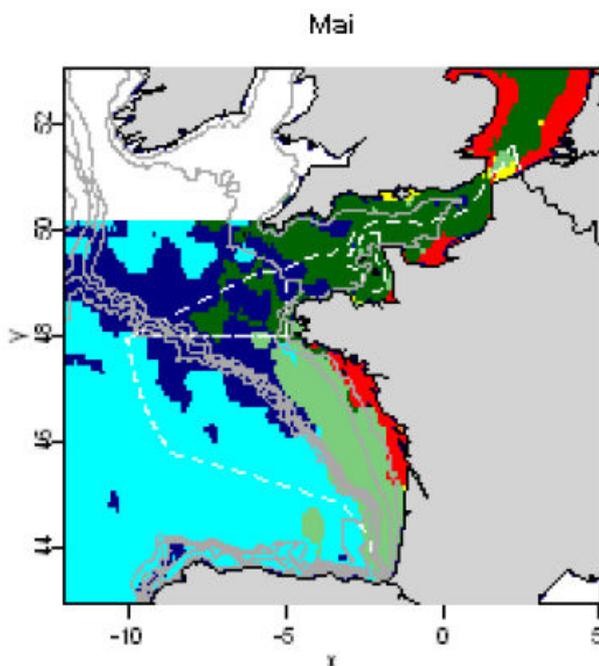


FIGURE 1.17 – Groupe de masses d'eau du golfe de Gascogne au mois de mai. D'après Gailhard-Rocher et al. (2012). Zone rouge : eaux marquées par une stratification due aux panaches. Zone vert clair : eaux mélangée sur la colonne d'eau couvrant l'ensemble du plateau continental. Zone bleu clair : eaux du large à la stratification peu intense. Zone bleu foncé : eaux du large très peu influencées par les panaches fluviaux et non stratifiées.

1.3.3 Les variations saisonnières de la production primaire

En hiver, la profusion de nutriments permet une forte croissance des organismes phytoplanctoniques. Dès que les eaux douces et riches en silicate sont déversées par les fleuves, la stratification haline se met en place. Cet événement de fin d'hiver provoque les premiers blooms phytoplanctoniques, principalement composés de diatomés (Labry et al., 2001; Herbland et al., 1998; Dupuy et al., 2011). Le phosphate devient rapidement l'élément limitant (Herbland et al., 1998) et la diminution de sa concentration provoque le déclin des blooms laissant un excès de nitrates dans le milieu (Loyer et al., 2006), au début du printemps. Dans un tel système, les petites espèces de phytoplancton (ciliés et dinoflagellées, Dupuy et al. (2011)), qui sont compétitives en cas de carence de phosphate, croissent (Loyer et al., 2006). Les vents dominants du printemps font dériver les blooms phytoplanctoniques printaniers à partir des panaches et au travers du plateau continental où ils sont consommés par les consommateurs primaires.

1.4 Les campagnes PELGAS

Les campagnes à la mer PELagique GAScogne (PELGAS) sont menées chaque année, depuis 2000, dans le golfe de Gascogne. Elles sont effectuées à bord du navire océanologique *Thalassa* (75 m). Dans le cadre du plan de collecte européen de données pour la gestion des pêches (DCF), leur objectif principal est d'estimer la biomasse des anchois (*Engraulis encrasicolus*) et des sardines (*Sardina pilchardus*), présents au printemps dans le golfe de Gascogne. Dans un contexte plus général d'approche écosystémique des pêcheries, les campagnes PELGAS sont une plateforme d'observation et d'étude de l'environnement pélagique du golfe au printemps. Les données collectées concernent tous les niveaux trophiques : des prédateurs supérieurs aux caractéristiques des masses d'eau en passant les poissons pélagiques et le plancton. La campagne se déroule en deux temps : les deux premiers legs sont consacrés à l'estimation de l'abondance des anchois et des sardines pour répondre à la demande d'évaluation des stocks de poissons d'espèces commerciales. Le troisième leg (environ 10 jours) est dédiés à des manipulations plus exploratoires. Pendant la première partie de la campagne, l'équipe scientifique se divise en quatre équipes :

- L'équipe acoustique, observe en temps réel les images acoustiques collectées en continu le long de radiales (figure 1.18). L'observation des échos enregistrés donne lieu à des pêches au chalut pour identifier la composition des bancs de poissons détectés par acoustique. Les membres du laboratoire acoustique sont chargés de la correction manuelle des données acoustiques et de l'échotypage.
- L'équipe pêche, trie, compte, pèse et mesure les poissons par espèce, collectés par les chalutages. Divers paramètres biologiques (maturation, âge, contenus stomacaux, parasites,...) sont également mesurés sur des poissons individuels.
- L'équipe hydro-biologique traite de jour les échantillons d'eau collectés tous les 3 milles nautiques par une pompe fixée sur la coque du navire (*Continuous Underwater Fish Eggs Survey*, CUFES). Les échantillons sont observés à la loupe binoculaire pour compter les oeufs d'anchois, de sardines et d'autres poissons. De nuit, le navire effectue des stations sur l'une des deux radiales prospectées pendant la journée (figure 1.18). A chaque point d'échantillonnage, les membres de l'équipe hydro-biologique mettent à l'eau une bathysonde équipée de CTD, rosette de bouteilles de prélèvement, capteur de fluorescence et des filets à plancton, afin de caractériser l'hydrologie, la production primaire et les communautés planctoniques.

- L'équipe des prédateurs supérieurs est composé d'observateurs positionnés sur le toit de la passerelle du navire. Ils comptent et identifient les oiseaux et les mammifères marins ainsi que les navires de pêches et les macrodéchets.

Les campagnes PELGAS sont une plateforme pour des partenariats entre laboratoires de l'Ifremer (EMH, STH, Dyneco,...) mais aussi avec l'Université de La Rochelle pour l'observation des prédateurs supérieurs et pour les études sur la production primaire et les communautés zooplanctoniques. Depuis 2007, l'échantillonnage des bancs de poissons est effectué en partenariat avec des pêcheurs professionnels.

En 2012 et 2013, l'échantillonnage du troisième leg s'est concentré sur une zone d'étude réduite au large de l'embouchure de la Gironde. Au début du mois de juin, le panache de la Gironde est dans une phase de transition d'un régime de stratification où à lieu le bloom phytoplanktonique au début du printemps vers un régime où la colonne d'eau se mélange. Une partie de l'échantillonnage du leg 3 a été dédié à ce travail de thèse pour notamment identifier la composition des couches diffusantes résonantes, observées dans la zone. Les détails de l'échantillonnage seront décrits plus loin dans le manuscrit.

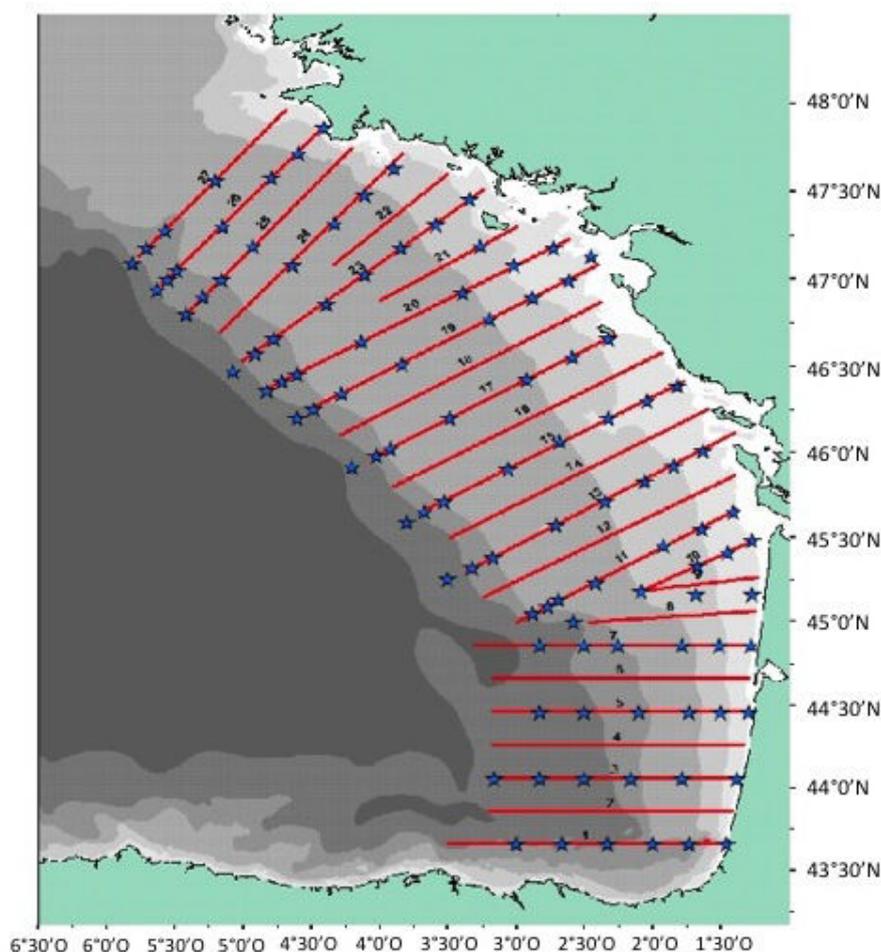


FIGURE 1.18 – Plan d'échantillonnage de la campagne PELGAS. Les radiales (rouge) de prospection acoustique sont échantillonnées pendant la journée. Les stations hydrologiques (étoiles) sont échantillonnées pendant la nuit.

Chapitre 2

Les paysages acoustiques du golfe de Gascogne au printemps 2013

The brain is full of lonely ideas, begging you to make some sense of them, to recognize them as interesting.

- Theodore ZELDIN -

2.1 Introduction

La distribution spatio-temporelle du zooplancton est étudiée depuis longtemps à l'aide de filets, et plus récemment d'instruments optiques. Le zooplancton du golfe de Gascogne a fait l'objet récemment de nombreuses études se concentrant sur un nombre réduit de stations d'échantillonnage. (Dupuy et al., 2011; Bonnet et al., 2007; Sautour et al., 1996; d'Elbee et al., 2009). Sautour et al. (1996) et Dupuy et al. (2011) n'étudient que quelques stations dans le panache de la Gironde, et d'Elbee et al. (2009) n'en considèrent qu'une seule dans la zone du Gouf de CapBreton. Les travaux de Albaina & Irigoien (2007), Irigoien et al. (2011) ou Ibaibarriaga et al. (2007) prennent en compte un jeu de stations bien plus important mais échantillonné pendant des campagnes différentes. Dans l'étude de Sourisseau & Carlotti (2006), des stations sont positionnées sur l'ensemble du golfe de Gascogne et les auteurs étudient les structures en tailles des particules mésozooplanctoniques sur l'extension du golfe de Gascogne, mais perdent la résolution verticale en intégrant les données sur l'ensemble de la colonne d'eau. Avec de telles approches, il est difficile de se rendre compte de la distribution spatiale des communautés planctoniques à différentes échelles d'observation. Les données acoustiques collectées lors de campagnes halieutiques, contiennent potentiellement des informations à fine, grossière ou méso-échelle sur les agrégations de plancton, mais sont 10 fois moins utilisées dans les études zooplanctonologiques publiées dans la littérature (source : *Web of Science*). L'utilisation des données acoustiques pour étudier et quantifier la distribution spatiale du plancton est encore peu répandue, bien qu'en expansion. La majorité des travaux traitant de la distribution spatiale, s'intéressent surtout à la distribution verticale des différentes classes de tailles du zooplancton (Barans et al., 1997; Benoit-Bird et al., 2009; Kringel et al., 2003; Simard et al., 2003; Wiebe et al., 1996) ou à celle des méduses (e.g. Baamstedt et al. (2003)).

Quelques études s'intéressent particulièrement à la distribution spatiale des couches diffusantes à échelle "grossière" (*coarse scale*, Haury et al. (1978)) soit en 3 dimensions soit en intégrant les données sur la verticale. Greene et al. (1998) s'intéressent à la distribution des couches diffusantes détectées autour du banc Georges (golfe du Maine, USA) à la fréquence 420 kHz. Lawson et al. (2004) s'intéressent à des couches diffusantes observées dans une baie à l'ouest de la péninsule Antarctique. Ces deux exemples sont restreints à des zones géographiques de 10 à 100 km². Plus récemment, dans le détroit du Mozambique, Béhagle et al. (2014) et Lebourges-Dhaussy et al. (2014) se sont respectivement intéressés à la distribution spatiale des agrégations de myctophidés et des classes de tailles de la communauté zooplanctonique. En Polynésie française, Bertrand et al. (1999) étudient la distribution spatiale de la communauté micro-nectonique. Ballon et al. (2011) s'intéressent à la distribution spatiale de la biomasse de macro-zooplancton dans la zone côtière péruvienne où a lieu un upwelling côtier de grande envergure. Enfin, Trenkel & Berger (2013) et Lezama-Ochoa et al. (2011) s'intéressent à la distribution spatiale de certains organismes zooplanctoniques à l'échelle du golfe de Gascogne. Ces études ont été menées dans des zones s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres (méso-échelle).

La classification automatique des échos est le "Saint Graal" des chercheurs en acoustique (Horne, 2000). Le potentiel de classification automatique des cibles acoustiques par espèce a été reconnu dès les années 1970 (Deuser et al., 1979; Giryn et al., 1979), mais sa mise en œuvre était alors limitée par la puissance des ordinateurs. Avec l'évolution des outils de détection acoustique et des outils informatiques, des méthodes de classification opérationnelles se sont développées, mais ne permettent cependant pas encore d'identifier toutes les espèces de poissons et de zooplancton en utilisant uniquement les données acoustiques. La méthode de classification la plus employée est l'échotypage. Cette classification est ef-

fectuée par un opérateur qui affecte manuellement les écho-traces (agrégats de pixels sur les échogrammes) de bancs de poissons et de couches diffusantes dans des catégories (ou échotypes) préalablement définies. Cette classification est validée par des pêches au chalut pour identifier la composition des bancs de poissons (exemple de la campagne PELGAS : Doray et al. (2014)). L'échotypage est utilisé en routine pour identifier les bancs de poissons, dans une optique d'estimation de biomasse et de gestion des stocks exploités. Les échotypes concernant les couches diffusantes sont souvent beaucoup moins bien définis, car peu ou pas validés par des pêches d'identification. Le principal inconvénient de l'échotypage manuel est qu'il nécessite des opérateurs expérimentés et calibrés, ainsi qu'un temps de traitement très long.

La discrimination automatique des échos des bancs de poissons et des couches diffusantes a jusqu'alors surtout été réalisée avec des approches de classification supervisées (James et al., 2013), appliquées à des données acoustiques collectées à deux fréquences, souvent 38 et 120 kHz (Ballon et al., 2011; Murase et al., 2009; Madureira et al., 1993). Ces méthodes de classification des écho-traces sont dites "supervisées" (James et al., 2013) car elles cherchent à segmenter les échogrammes dans des catégories prédéfinies sur la base d'hypothèses ou de connaissances *a priori* sur la forme des réponses fréquentielles enregistrées par les échosondeurs. Les vessies natatoires des poissons adultes provoquent une réponse acoustique relativement uniforme, constante et très intense aux fréquences halieutiques (cf. 1.1). La détection des autres réflecteurs présente une réponse fréquentielle plus contrastée. Lorsque l'on considère l'intensité de la réponse acoustique des cibles à deux fréquences assez éloignées, la réponse des bancs de poissons est généralement plate et forte et celle des couches diffusantes présente une pente non nulle et d'intensité globale plus faible (Ballon et al., 2011; Trenkel & Berger, 2013). La classification bi-fréquentielle proposée par Ballon et al. (2011) et appliquée par Lezama-Ochoa et al. (2011) dans le golfe de Gascogne, est basée sur le seuillage de la différence et de la somme des réponses acoustiques aux fréquences 38 et 120 kHz. Elle différencie trois types de réflecteurs (*Fish*, *Fluid-Like*, *Others*). Cette approche repose sur l'hypothèse forte qu'il n'y a qu'un seul type de réflecteur dans chaque unité d'échantillonnage acoustique, dont la réponse fréquentielle est bien décrite par les modèles théoriques de réflecteurs et/ou par une paramétrisation empirique des différences entre fréquences. La gamme de réflecteurs discriminés par cette méthode est limitée par le faible nombre de fréquences.

D'autres auteurs disposant de plus de 2 fréquences ont utilisé d'autres approches supervisées, parfois basées sur les différences entre fréquences (Gauthier & Horne, 2004; Jech & Michaels, 2007; Woillez et al., 2012; De Robertis et al., 2010; Korneliussen & Ona, 2002; Ballon et al., 2011; Trenkel & Berger, 2013). L'approche de De Robertis et al. (2010) consiste dans un premier temps, à échantillonner tous les échos observés sur les échogrammes dans le but de trouver des agrégations dont la composition est mono-spécifique. Des projections acoustiques sont effectuées sur les agrégations mono-spécifiques pour calculer une réponse fréquentielle. Les réponses fréquentielles calculées sont utilisées comme "modèles de réflecteurs" pour caractériser les agrégations hétérogènes. Cette approche n'est applicable que lorsque des agrégations mono-spécifiques d'un petit nombre d'espèces sont effectivement présentes dans la zone d'étude. Les méthodes de classification de Korneliussen & Ona (2002) et de Trenkel & Berger (2013) utilisent les formes des réponses fréquentielles issues de modèles de réflecteurs (approche modèle-centrée) afin de segmenter les échogrammes (Korneliussen & Ona, 2002) et de produire un indicateur de diversité spécifique, basé sur la diversité fréquentielle (Trenkel & Berger, 2013). Ces méthodes sont basées sur des hypothèses fortes concernant la communauté des réflecteurs présents dans la colonne d'eau. Or, dans les écosystèmes pélagiques à la diversité spécifique élevée, la réponse acoustique des écho-traces est une combinaison des réponses acoustiques individuelles des organismes qui les composent. La diversité de tailles, de densités et de natures des organismes

marins induit des réponses fréquentielles dynamiques et complexes. Cette réponse acoustique est également bruitée puisqu'elle prend en compte entièrement ou partiellement les bancs de poissons (Berger et al., 2009) et qu'elle est très dépendante de l'orientation des organismes.

Durant les campagnes PELGAS, les périodes de prospection acoustique sont dédiées à la détection des bancs de petits poissons pélagiques. Les échogrammes acquis en temps réel sont surveillés en continu, par des opérateurs à bord. La visualisation de ces échogrammes montre d'une part, l'omniprésence de couches diffusantes le long des radiales échantillonnées et d'autre part la diversité de couches diffusantes en terme de réponses fréquentielles.

Pour différencier les échos dans un écosystème multispécifique comme le golfe de Gascogne, où les réflecteurs acoustiques produisent potentiellement des réponses fréquentielles complexes, il nous est apparu nécessaire d'utiliser une méthode de classification non supervisée (James et al., 2013), c'est-à-dire, qui ne repose sur aucune hypothèse préalable sur la nature ou la réponse fréquentielle des cibles. L'autre critère ayant guidé le développement de la méthode est qu'elle soit applicable en mer, en quasi-temps réel, sur un PC de bureau à la puissance de calcul standard. Ce chapitre décrit la méthode de classification non supervisée qui a été développée afin de décrire des "paysages acoustiques" du golfe de Gascogne, à partir des patrons de distribution des couches diffusantes observées. Les performances de la méthode non supervisée sont évaluées à plusieurs échelles, et comparées à celles des méthodes supervisées, déjà appliquées dans la même zone, sur des réponses fréquentielles théoriques et des données *in-situ*.

2.2 Méthode de classification multifréquence non supervisée pour la définition de paysages acoustiques

Dans cette partie, nous présentons la méthode d'acquisition des données acoustiques lors des campagnes PELGAS et la méthode de classification non supervisée, développée dans le cadre de cette thèse pour décrire les patrons spatiaux des couches diffusantes à l'échelle du golfe de Gascogne.

Les données acoustiques collectées pendant la campagne PELGAS 2013

Du lever au coucher du soleil, la prospection acoustique est effectuée en continu sur un réseau de radiales parallèles et perpendiculaires à la côte (figure 1.18). Les 29 radiales s'étendent de la frontière espagnole, au sud, jusqu'à la pointe sud-ouest de la Bretagne, au nord. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'échantillonnage acoustique, réalisé au moyen de six échosondeurs mono-faisceau SIMRAD EK60 émettant à 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz. Le sondeur 18 kHz a une ouverture angulaire de 11° , les autres fréquences de 7° . Les échosondeurs sont opérés avec une durée d'impulsion de 1.024 ms. La cadence de tir est ajustée automatiquement en fonction de la profondeur par le logiciel Hermes (tableau 2.1, Trenkel et al. (2009)), afin d'éviter les échos fantômes du fond dans la colonne d'eau sur le plateau continental. En dehors du plateau continental, la cadence de tir est ajustée manuellement entre 0.5 et 1 ping par seconde, afin d'éviter les échos multiples du fond et conserver une bonne résolution spatiale entre 0 et 150 m de profondeur. Le seuil d'acquisition des données acoustiques est fixé à -100 dB. Les données acoustiques sont visualisées à bord en temps réel dans les logiciels Ifremer Movies+ (Weill et al., 1993) et Movies3D (Trenkel et al., 2008).

TABLE 2.1 – Cadences de tirs appliquées automatiquement par le logiciel Hermes (Trenkel et al., 2009) en fonction de la profondeur sur le plateau continental.

Profondeur min. [m]	Profondeur max. [m]	Récurrence [s]
0	30	0.35
30	50	0.4
50	75	0.45
75	100	0.5
100	125	0.6
125	150	0.7
150	175	0.8
175	200	0.9
200	250	1

Des mesures du bruit généré par le navire La Thalassa ont été réalisées afin d’estimer la portée des 6 sondeurs monofaisceau EK60 selon différents niveaux de détection (tableau 2.2). La portée maximale pour un seuil de détection donné est la distance du transducteur pour laquelle le niveau de bruit est égal au seuil de détection. En 2013, la fréquence 333 kHz était inexploitable suite à un dysfonctionnement, elle n’a donc pas été incluse dans la sélection. La fréquence 200 kHz a la portée maximale la plus faible et est donc limitante. Le seuil de détection minimal a été fixé à -80 dB, afin de pouvoir collecter des données non bruitées à toutes les fréquences sur tout le plateau continental du golfe de Gascogne, de 10 à 150 m de profondeur.

TABLE 2.2 – Portée maximale de la détection acoustique aux différentes fréquences des sondeurs mono-faisceaux EK60 sur le N/O Thalassa, pour différents seuil de détection.

Seuil de détection de Sv	18 kHz	38 kHz	70 kHz	120 kHz	200 kHz	333 kHz
-70 dB	4300 m	2300 m	830 m	390 m	230 m	120 m
-75 dB	3500 m	2000 m	730 m	340 m	200 m	100 m
-80 dB	2800 m	1800 m	650 m	300 m	170 m	80 m
-85 dB	2100 m	1600 m	560 m	260 m	150 m	70 m

Les données acoustiques collectées jusqu’à 150 m de profondeur par les échosondeurs EK60 aux fréquences 18, 38, 70, 120 et 200 kHz sont considérées dans cette étude. La détection du fond a été vérifiée visuellement dans Movies+ (Weill et al., 1993) aux 5 fréquences considérées. Elle est fixée à 150 m dans les zones dont la profondeur est supérieure à 200 m. Les volumes de rétro-diffusion (*Volume back-scattering*, Sv) supérieurs à -80 dB ont été écho-intégrés aux 5 fréquences de 10 m sous la surface à 0.3 m au-dessus du fond, dans des cellules de 0.1 MN de long et 1 m de profondeur. La taille des cellules d’écho-intégration est ici adaptée à l’application de la méthode ACM-KM sur les données de la campagne PELGAS 2013. Les cellules situées en-dessous de la ligne de fond ne représentent pas des données réelles. Pour éviter toute confusion, elles ont été affectées à -100 dB.

2.2.1 Méthode de classification non supervisée des échos (ACM-KM)

Les intensités acoustiques (Sv) mesurées aux p fréquences, sont écho-intégrées par cellules dont la dimension dépend de l'échelle à laquelle les phénomènes d'intérêt sont observés. Les résultats de l'écho-intégration sont rassemblés dans une matrice X de dimensions $n \times p$, où n est le nombre de cellules d'écho-intégration et p est le nombre de fréquences. Une valeur de densité acoustique très faible (-100 dB) est attribuée aux cellules d'écho-intégration situées sous le fond pour que la suite des analyses statistiques soit réalisable. Les Sv de chaque cellule à chaque fréquence sont centrés en soustrayant le Sv moyen de la fréquence. Le Sv centré de la cellule i à la fréquence j s'écrit :

$$Sv_{ijcent.} = Sv_{ij} - \overline{Sv}_j \quad (2.1)$$

Les Sv de la matrice X sont des données de type continu. Un tableau disjonctif complet (Lebart et al., 1997) est construit à partir de X en répartissant les valeurs de la matrice dans 5 catégories de Sv centrés. Cette approche permet une caractérisation de la réponse fréquentielle de chaque cellule d'écho-intégration. La définition de ces classes se fait en divisant la plage totale des valeurs par 5. L'étendue t de chaque classe est ainsi définie par :

$$t = \frac{Sv_{..}^{maxcent.} - Sv_{..}^{mincent.}}{5} \quad (2.2)$$

où $Sv_{..}^{maxcent.}$ et $Sv_{..}^{mincent.}$ sont les Sv maximum et minimum du jeu de données centré, qui comprend l'ensemble des cellules d'écho-intégration. Les limites inférieures et supérieures des catégories c sont définies par :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{inf.}^1 = Sv_{..}^{mincent.} \\ i_{sup.}^1 = Sv_{..}^{mincent.} + t = i_{inf.}^2 \\ i_{sup.}^2 = i_{inf.}^2 + t = i_{inf.}^3 \\ i_{sup.}^3 = i_{inf.}^3 + t = i_{inf.}^4 \\ i_{sup.}^4 = i_{inf.}^4 + t = i_{inf.}^5 \\ i_{sup.}^5 = Sv_{..}^{maxcent.} \end{array} \right.$$

Ces bornes engendrent la définition des catégories suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 : i_{inf.}^1 < Sv_{ijcent.} \leq i_{sup.}^1 \\ C_2 : i_{inf.}^2 < Sv_{ijcent.} \leq i_{sup.}^2 \\ C_3 : i_{inf.}^3 < Sv_{ijcent.} \leq i_{sup.}^3 \\ C_4 : i_{inf.}^4 < Sv_{ijcent.} \leq i_{sup.}^4 \\ C_5 : i_{inf.}^5 < Sv_{ijcent.} \leq i_{sup.}^5 \end{array} \right.$$

La catégorie C_1 regroupe les valeurs de Sv les plus faibles, tandis que la catégorie C_5 regroupe les valeurs les plus fortes. Les Sv par classe de valeurs forment une nouvelle matrice S de dimensions $n \times (p * c)$. Pour une fréquence donnée, la valeur $Sv_{ijcent.}$ ne peut appartenir qu'à une seule classe. Dans le tableau disjonctif complet S , la valeur $Sv_{ijcent.}$ devient une information d'appartenance $z_{ij} = 1$ ou d'absence $z_{ij} = 0$ à la classe considérée. Les marges horizontales de S ont la propriété d'être toutes égales au nombre de variables (ici, le nombre de fréquences) :

$$z_{i.} = \sum_{j=1}^{p*5} z_{ij} = p$$

Dans le cadre de ce travail, le tableau disjonctif complet compte 5 classes pour 5 fréquences, donc 25 variables. Une Analyse en Composantes Principales (ACP, Lebart et al. (1997)) est appliquée à la matrice S dans le but de grouper l'information redondante des variables et d'en réduire le nombre. La combinaison des étapes du tableau disjonctif complet et de l'ACP est analogue à une Analyse des Correspondances Multiples (ACM, Pagès (2014)). Les points correspondants aux individus des différents groupes et les variables du tableau disjonctif complet sont projetés dans l'espace factoriel des deux premières composantes principales, pour étudier les corrélations entre variables, déterminer les variables les plus influentes et les relations entre les groupes et les variables.

Une classification de type *K-means* (KM, Everitt (1993)) est appliquée dans l'espace factoriel des composantes principales qui expliquent au moins 96 % de la variance. Le nombre de groupes est choisi de façon à ce que les cellules appartenant à un même groupe aient une réponse fréquentielle semblable et que les réponses fréquentielles médianes par groupe soient très différentes entre les groupes. Les valeurs extrêmes d'intensités acoustiques sont filtrées en utilisant la médiane pour décrire leurs distributions par fréquence et par groupe. C'est la réponse fréquentielle médiane qui est calculée par groupe pour comparer les différents spectres en fréquence révélés par la classification des cellules. Les distributions des valeurs de S_v par fréquence et par groupe sont également visualisées, afin de vérifier qu'elles soient raisonnablement symétriques, monomodales, que leurs intervalles de variation soient disjoints et donc qu'elles soient bien représentées par leur médiane. La méthode de segmentation non supervisée des échogrammes présentée ici consiste en une analyse des correspondances multiples (ACM), suivie d'une classification de type *K-means* (KM), elle sera dénotée ACM-KM par la suite.

2.3 Comparaison des méthodes de classification non supervisées et supervisées des échos

Pour être appliquée aux données *in-situ* à l'échelle du golfe de Gascogne avec un maximum de confiance, la méthode de classification non supervisée ACM-KM, a été appliquée à des jeux de données simples et comparée aux résultats obtenus par d'autres méthodes de classification supervisées ou non. L'objectif principal est de déterminer la méthode de classification qui (i) discrimine le plus de réponses fréquentielles théoriques différentes avec une bonne précision, (ii) différencie les échotrases des bancs de poissons sur une extension de quelques minutes de prospection acoustique et selon un grain fin et (iii) décrit les patrons spatiaux visibles sur les échogrammes à toutes les échelles d'observation.

2.3.1 Matériel et méthodes

Les jeux de données et les modèles de réflecteurs

Dans un premier temps, les méthodes ont été testées sur trois jeux de réponses fréquentielles théoriques. L'objectif est de sélectionner les méthodes qui regroupent les réponses fréquentielles théoriques par grand type de réflecteurs de manière cohérente. Les jeux de réponses fréquentielles considérés sont les suivants :

- # 1 : les modèles utilisés dans le projet SIMFAMI (2005), tableau 2.3 ;
- # 2 : les modèles utilisés dans le projet SIMFAMI (2005) en remplaçant le modèle de petite bulle de gaz par le modèle de bulles de gaz de Ye (1997) avec les paramètres moyens de Remond et al. (soumis) ;

- # 3 : les mêmes modèles que # 2, avec les modèles de bulles de Ye (1997) présentant des pics de résonance maxima à 18, 38, et 70 kHz (figure 2.1).

Les modèles de réflecteur répertoriés dans le tableau 2.3, ont été utilisés pour obtenir les réponses fréquentielles théoriques présentées dans la figure 2.1.

Au sein du jeu des réponses fréquentielles théoriques #1 issu du projet SIMFAMI, les réponses acoustiques des poissons avec et sans vessie proviennent de données empiriques. Les réponses fréquentielles des réflecteurs planctoniques et des petites bulles de gaz en revanche, représentent des populations fictives. Ces courbes ont été développées pour illustrer les travaux réalisés dans le cadre du projet SIMFAMI (2005) mais ne représentent pas des observations *in-situ*. La méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013), décrite dans le prochain paragraphe, est basée sur ce jeu de réponses fréquentielles fictif. Dans le cadre du banc d'essai que nous mettons en place ici, nous souhaitons rester au plus proche des méthodes supervisées qui ont été sélectionnées. Ainsi, le premier banc d'essai est effectué sur ce jeu de données fictif, utilisé dans la publication de Trenkel & Berger (2013).

TABLE 2.3 – Modèles de réflecteurs utilisés pour construire les réponses fréquentielles théoriques, issus de SIMFAMI (2005).

Organismes	Modèle	Référence
Copépodes	DWBA - ellipsoïde rempli de fluide	Stanton & Chu (2000)
Petits euphausiacés	DWBA - cylindre courbé rempli de fluide	Stanton & Chu (2000)
Poissons sans vessie (maquereaux)	estimation basée sur des données empiriques	SIMFAMI (2005)
Poissons physostomes	estimation basée sur des données empiriques	SIMFAMI (2005)
Poissons physoclistes	estimation basée sur des données empiriques	SIMFAMI (2005)
Bulles de gaz résonantes à 18 kHz	Ellipsoïde allongé rempli de gaz	Ye (1997)
Bulles de gaz résonantes à 38 kHz	Ellipsoïde allongé rempli de gaz	Ye (1997)
Bulles de gaz résonantes à 70 kHz	Ellipsoïde allongé rempli de gaz	Ye (1997)
Bulles de gaz aux paramètres moyens	Ellipsoïde allongé rempli de gaz	Ye (1997)

in-situ

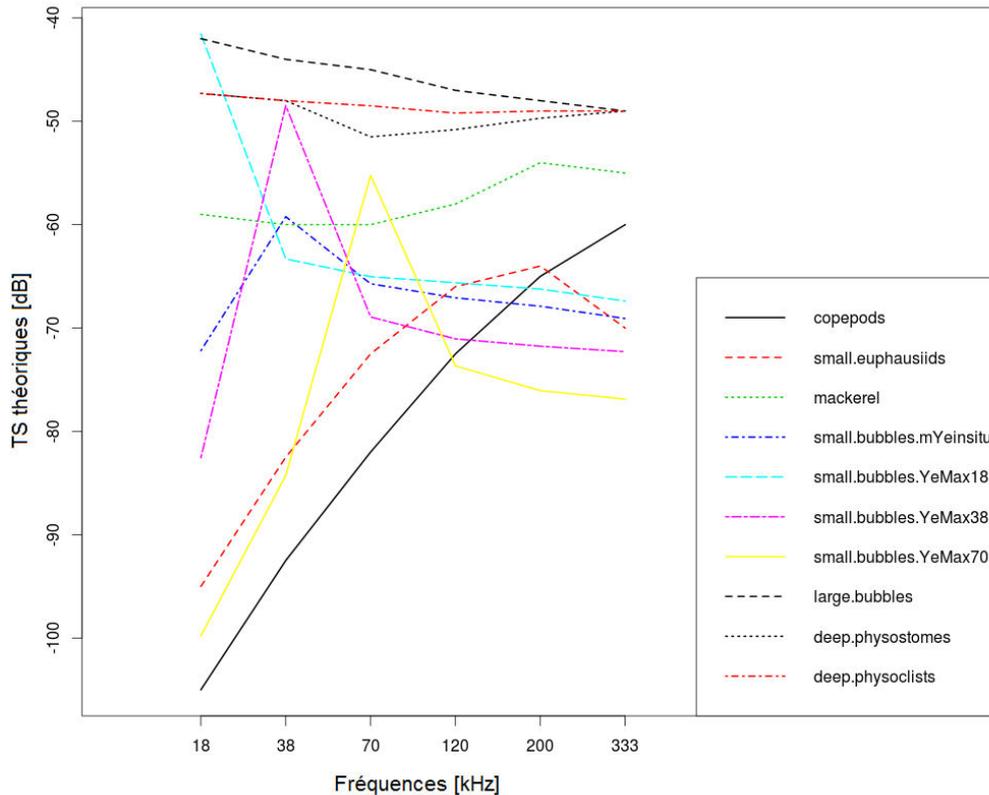


FIGURE 2.1 – Jeu de réponses fréquentielles théoriques des réflecteurs. *copepods* : copépodes, *small.euphausiids* : petits euphausiacés, *mackerel* : maquereaux (poissons sans vessie), *small.bubble.mYeinsitu* : petites bulles de gaz dont les paramètres sont issus de Remond et al. (soumis), *small.bubbles.YeMax18* : petites bulles de gaz résonantes à 18 kHz, *small.bubbles.YeMax38* : petites bulles de gaz résonantes à 38 kHz, *small.bubbles.YeMax70* : petites bulles de gaz résonantes à 70 kHz, *large.bubbles* : grosses bulles de gaz, *deep.physostomes* : poissons physostomes (avec vessie), *deep.physoclists* : poissons physoclistes (avec vessie). D’après Trenkel & Berger (2013); SIMFAMI (2005).

La classification des réponses fréquentielles théoriques par type de réflecteurs peut être validée visuellement, ce qui facilite la validation des résultats obtenus par les différentes méthodes de classification. Ce regroupement visuel est établi à partir des courbes théoriques des modèles de réflecteurs connus dans la littérature. Les réponses fréquentielles correspondent à 4 groupes de réflecteurs :

- Les poissons à vessie : poissons physostomes, poissons physoclistes, grosses bulles de gaz.
- Les poissons sans vessie : maquereaux.
- Les petites bulles de gaz : bulles *in-situ*, bulles résonantes à 18, 38 et 70 kHz.
- Les Fluid-Like (FL) : copépodes et petits euphausiacés.

D’après la comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes sur la classification des réponses fréquentielles théoriques, les méthodes ne répondant pas aux critères recherchés, sont écartées. Les méthodes restantes sont appliquées à un jeu de données *in-situ*, correspondant à 1h de prospection acoustique de la campagne PELGAS 2013. L’objectif principal est de sélectionner la ou les méthodes qui discriminent les différents patrons spatiaux visibles sur les échogrammes multifréquences (couches diffusantes, bancs de poissons), en les plaçant dans des groupes distincts. Les patrons visibles sur des données correspondant à 1h de prospection

acoustique sont essentiellement ceux des couches diffusantes. A cette extension, il est difficile de se rendre compte de la discrimination des bancs de poissons par les différentes méthodes. Leurs échotrases sont des structures très fines et ponctuelles et s'observent mal à l'œil nu. Les méthodes considérées dans ce banc d'essai, ont donc été appliquées sur des données collectées pendant 2 minutes de prospection acoustique au cours desquelles les échotrases des bancs de poissons sont bien marqués et ont été identifiés par des chalutages de validation. Le banc d'essai mis en place sur ces 2 minutes de prospection a pour objectif de sélectionner la ou les méthode qui discrimine les bancs de poissons dans un groupe particulier.

La portion d'1h de prospection acoustique est issue de données *in-situ* collectées pendant la campagne PELGAS 2013, sur la radiale 10, entre 7h et 8h. Les échogrammes présentent une couche diffusante dense de fond (50 m) et une couche diffusante plus faible dans la colonne d'eau (autour de 30 m). Le haut de la colonne d'eau est caractérisée par une très faible abondance de réflecteurs (figure 2.2). L'échogramme moyen des 5 fréquences synthétise les patrons spatiaux dominants de la zone considérée.

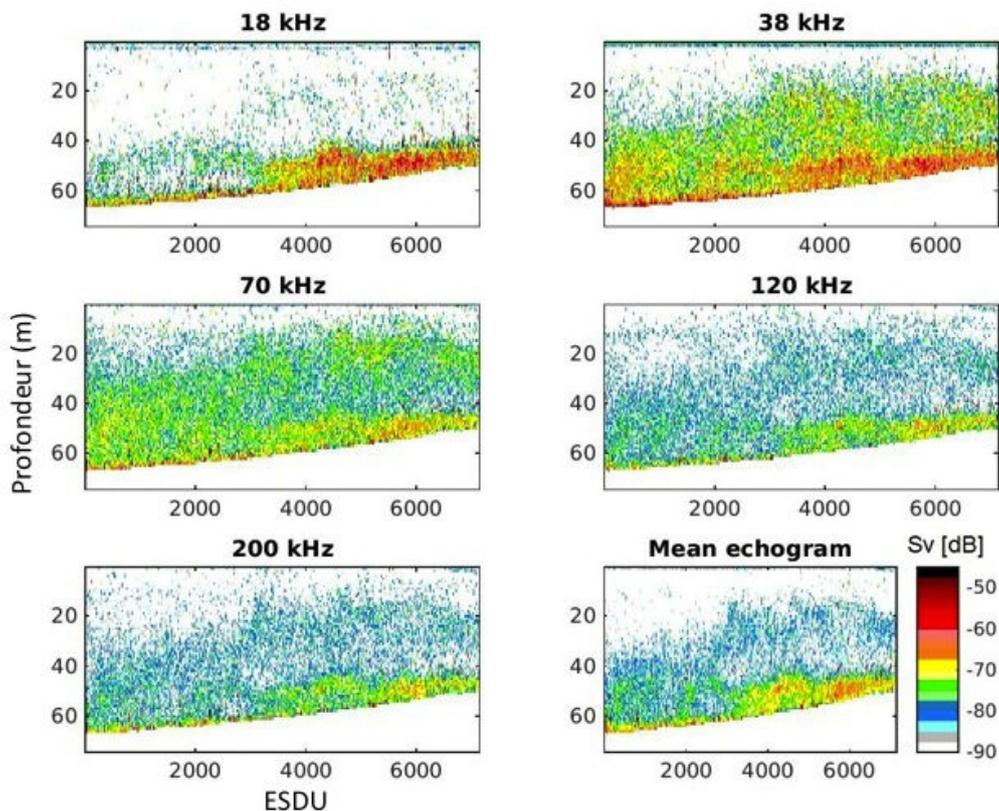


FIGURE 2.2 – Echogrammes multifréquences des données *in-situ* collectées pendant 1h de prospection selon une écho-intégration par cellules (ESDU) de 1 m de profondeur et 1 ping de long. Une couche diffusante dense est située proche du fond (18 kHz) et une couche diffusante plus faible s'étend sur l'ensemble de la colonne d'eau (38-70 kHz). A cette échelle, les échotrases des bancs de poissons sont trop petits pour se dégager des autres structures. L'échogramme moyen des 5 fréquences synthétise les patrons spatiaux dominants.

La sélection de 2 minutes est une sélection de ces données *in-situ*, dans une zone contenant une forte densité de bancs de poissons (figure 2.3).

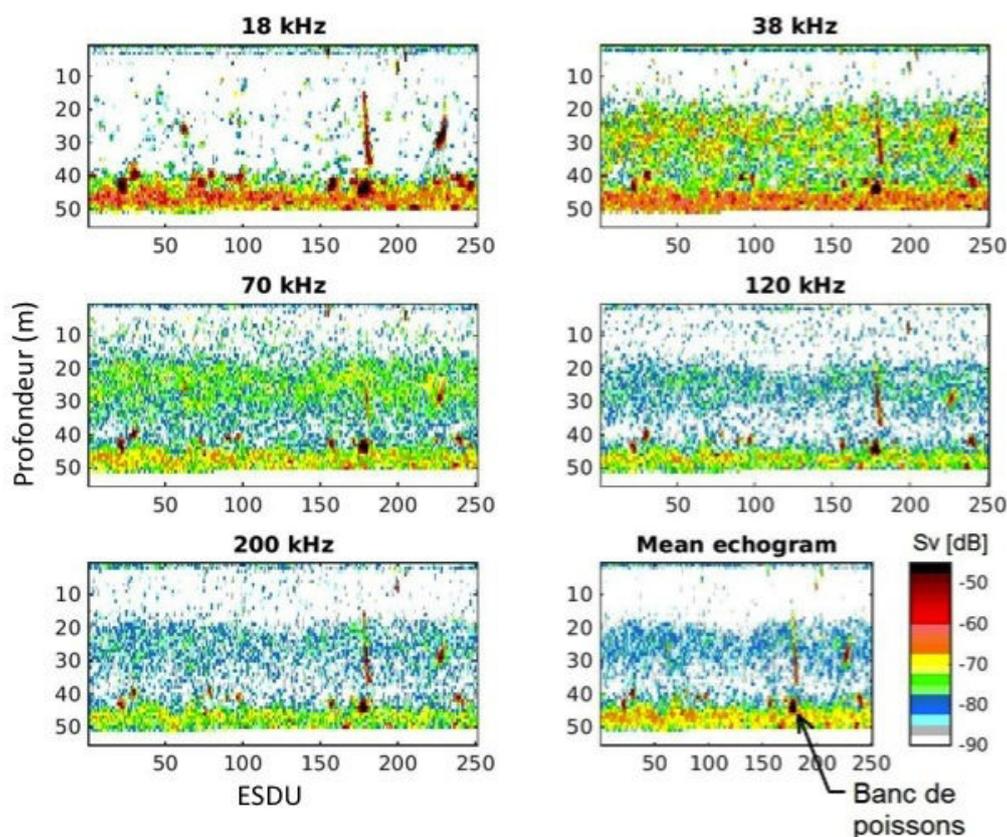


FIGURE 2.3 – Echogrammes multifréquences des données *in-situ* collectées pendant 2 minutes de prospection selon une écho-intégration par cellules (ESDU) de 1 m de profondeur et 1 ping de long. Les tâches sombres sont les écho-traces des bancs de poissons. Une couche diffusante dense est située à 50 m et une plus faible est située autour de 30 m. L'échogramme moyen des 5 fréquences représente les patrons spatiaux dominants.

Pour tester l'effet de l'échelle d'écho-intégration sur les résultats des méthodes de classification, l'application des méthodes à chaque jeu de données *in-situ* a été réalisée sur des données écho-intégrées par cellules de 1 ping de long et de 1 m de profondeur, de 0.01 MN de long et de 1 m de profondeur et de 0.1 MN de long et de 1 m de profondeur.

Les méthodes testées

Les méthodes de classification testées sur le jeu de réponses fréquentielles théoriques sont les suivantes :

- Trenkel & Berger (2013)
- Ballon et al. (2011)
- ACM-KM sur les données référencées à la fréquence 18 kHz
- ACM-KM sur les données référencées à la fréquence 38 kHz
- ACM-KM sur les données référencées à la fréquence 70 kHz
- ACM-KM sur les données référencées à la fréquence 120 kHz
- ACM-KM sur les données référencées à la fréquence 200 kHz
- ACM-KM sur les données brutes
- ACM-KM sur les données centrées
- Classification Kmeans sur les données centrées
- Classification Kmeans sur les données brutes

- Classification Ascendante Hiérarchique (CAH, Kaufman & Rousseeuw (1990)) sur les données brutes

La méthode de Trenkel & Berger (2013) est une classification supervisée des échos utilisant 5 fréquences halieutiques. L'approche détermine 4 groupes de réflecteurs à la réponse fréquentielle particulière et composés de plusieurs types d'organismes. Un indicateur de diversité multifréquence est calculé pour chaque cellules d'écho-intégration. La valeur de l'indicateur permet d'assigner chaque cellule à un groupe de réflecteur. La méthode de Ballon et al. (2011) est paramétrée pour son application à des données collectées dans le golfe de Gascogne (Lezama-Ochoa et al., 2011). Cette méthode utilise la réponse acoustique mesurée aux fréquences 38 et 120 kHz pour distinguer les réponses fréquentielles plates et fortes, catégorisées dans le groupe "Fish", des réponses fréquentielles de pente non-nulle et plus faibles, catégorisées dans le groupe "Fluid-Like". Le reste des échos est catégorisé dans le groupe "Other". Cette méthode utilise une succession de seuillages sur la somme ou la soustraction des intensités acoustiques aux deux fréquences. Ces deux méthodes, dites supervisées, sont basées sur les hypothèses fortes que (i) la réponse acoustique d'un volume écho-intégré est celle d'un seul type de réflecteur et (ii) la communauté de réflecteurs est connue *a priori* et est exclusivement représentée par les groupes de réflecteurs prédéfinis. La paramétrisation des méthodes est détaillée en annexe.

Au lieu de répertorier les réponses fréquentielles mesurées dans des groupes de réflecteurs préalablement définis comme les méthodes supervisées, la méthode ACM-KM crée des groupes de réflecteurs à partir des réponses fréquentielles mesurées. Elle est ainsi basée sur l'hypothèse qu'il est possible d'échantillonner une infinité de réponses fréquentielles différentes. Ce n'est qu'*a posteriori* que les réponses fréquentielles mesurées similaires sont regroupées et que les réponses fréquentielles médianes des groupes sont éventuellement reliées à des types de réflecteurs.

La méthode ACM-KM est appliquée aux "données brutes" qui désignent les Sv résultant de l'écho-intégration ; aux "données centrées" qui désignent les Sv résultant de l'écho-intégration centrés par le Sv moyen pour chaque fréquence j (équation 2.3) ; aux "données référencées" qui désignent les Sv résultant de l'écho-intégration auxquels la valeur de la fréquence de référence est soustraite (exemple de référencement à la fréquence 38 kHz, équation 2.4).

$$Sv^{jcent.} = Sv^j - \bar{Sv}^j \quad (2.3)$$

$$Sv^{jref.} = Sv^j - Sv^{38kHz} \quad (2.4)$$

Les méthodes de classification testées sur les jeux de données d'1h et de 2 minutes de prospection acoustique *in-situ* sont les suivantes :

- Ballon et al. (2011)
- Trenkel & Berger (2013)
- ACM-KM sur les données brutes (plusieurs nombres de groupes)
- ACM-KM sur les données centrées (plusieurs nombres de groupes)

Les critères de bonne classification

Dans le cas de l'application des méthodes au jeu de réponses fréquentielles théoriques, les résultats corrects sont connus *a priori*. Il est alors possible de calculer des indicateurs de performance pour chaque méthode. Les indicateurs choisis sont le taux de bonne classification et le nombre de catégories réelles, dont le résultat s'exprime en pourcentage de bonne classification. Pour les méthodes non supervisées, une matrice de dissimilarité est calculée entre les

identifiants des groupes prédits et réels. Le nombre de différences total est divisé par le nombre de cas possibles pour produire un taux de bonne classification. Le nombre de groupes trouvé par les méthodes supervisées est rapporté au nombre de groupes réels pour évaluer leur capacité à distinguer un nombre de groupes réaliste. Pour comparer les résultats des approches d'une manière globale, la distribution des taux de bonne classification et des taux de nombre de groupes identifiés sont comparées. La justesse et la précision des méthodes par rapport à la diversité des réflecteurs théoriques considérés, sont évaluées en comparant la moyenne et la variance des distributions des taux de bonne classification par méthode, respectivement.

Dans le cas des deux jeux de données *in-situ*, les patrons spatiaux (des couches diffusantes ou des bancs de poissons) sont facilement identifiables, ce qui permet de valider visuellement les segmentations d'échogrammes réalisées par les différentes méthodes. Les critères de bonne classification utilisés pour comparer les résultats des méthodes sont les suivants :

- La méthode de classification la plus pertinente doit pouvoir discriminer les bancs de poissons du reste des échos sur des données *in-situ* à extension réduite (quelques minutes de prospection acoustique).
- Les résultats de classification doivent être relativement insensibles aux changements de l'extension à laquelle ils sont observés.
- Les méthodes de classification doivent isoler des groupes d'échos cohérents par rapport aux patrons spatiaux observés sur les échogrammes multifréquences.
- Les réponses fréquentielles médianes des groupes doivent être cohérentes par rapport aux modèles de réflecteurs acoustiques de la littérature.

2.3.2 Résultats

Jeu de données théorique

Seuls les résultats de l'application des méthodes sur le jeu de données # 3 sont présentés ici. L'ensemble des résultats sont présentés dans l'annexe I. La méthode de classification non supervisée "ACM-KM" présente le meilleur indice de bonne classification (tableau 2.4). Cependant, un bon nombre de méthodes présente des taux de bonne classification satisfaisants (> 0.8).

TABLE 2.4 – Comparaison des taux de bonne classification obtenus par l’application des différentes méthodes de classification au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. L’indice le plus élevé indique la méthode la plus robuste.

Méthode	Indice de bonne classification
CAH sur données brutes	0.822
KM sur données brutes	0.822
KM sur données centrées	0.822
ACM-KM sur données centrées	0.861
ACM-KM sur données brutes	0.911
ACM-KM sur données ref. 18 kHz	0.778
ACM-KM sur données ref. 38 kHz	0.644
ACM-KM sur données ref. 70 kHz	0.733
ACM-KM sur données ref. 120 kHz	0.667
ACM-KM sur données ref. 200 kHz	0.800
Trenkel & Berger (2013)	0.822
Ballon et al. (2011)	0.822

Lorsque l’on observe les résultats de la classification des courbes théoriques par des méthodes qui présentent des indices de bonne classification élevés (table 2.4), on observe que les regroupements sont plus ou moins pertinents. La méthode ACM-KM sur les données brutes regroupe correctement les organismes FL (courbes bleues), les petites bulles formant des pics de résonance aux fréquences halieutiques (courbes vertes), les poissons à vessie (courbes noires) mais classe les maquereaux (poissons sans vessie) avec des bulles résonant à 18 kHz (figure 2.4). La méthode ACM-KM sur les données centrées donne des résultats similaires mais regroupe tous les poissons et différencie les pics de résonance 18-38 kHz d’une part et 70 kHz d’autre part (figure 2.5).

La méthode de classification sur les données référencées à la fréquence 18 kHz (figure 2.6) regroupe les réponses des FL et les petites bulles résonant à 70 kHz. La méthode sur les données référencées à la fréquence 200 kHz (figure 2.7) regroupe les petites bulles résonant à 18-38 kHz et les poissons à vessie. De manière générale, les résultats de classification des méthodes basées sur des données référencées à une fréquence sont sensibles au choix de la fréquence de référence, et aux types de réflecteurs considérés. N’ayant pas de critère objectif pour justifier le choix de la fréquence de référence, nous n’avons pas retenu ce mode de standardisation des données, pourtant très utilisé dans les études de classification automatisées d’échotraces (e.g. De Robertis et al. (2010)).

La méthode de Trenkel & Berger (2013) ne regroupe pas correctement les différentes réponses fréquentielles (assemblage des copépodes et des maquereaux, par exemple, figure 2.8)). L’ajout de réponses fréquentielles non prévues initialement (pics de résonance à 18 et 70 kHz, par exemple) engendre une mauvaise classification de l’ensemble des réponses. Cet exemple illustre bien le problème des méthodes supervisées qui ne sont pas adaptées lorsque des réponses fréquentielles non prévues *a priori* sont présentes dans le jeu de données. La méthode de Ballon et al. (2011) ne considère que 2 groupes : les poissons (avec et sans vessie) et les pics de résonance à 18 et 38 kHz d’une part et le pic de résonance à 70 kHz et les réflecteurs FL d’autre part (figure 2.9). Cependant, cette méthode est basée sur des seuils appliqués à la somme ou à la soustraction des fréquences 38 et 120 kHz. La valeur des seuils est déterminée en fonction de la zone étudiée. Puisqu’il s’agit ici de données fictives qui ne représentent pas des assemblages réels d’organismes, il n’est pas étonnant que la méthode de Ballon et al. (2011) ne donne pas de résultat pertinent.

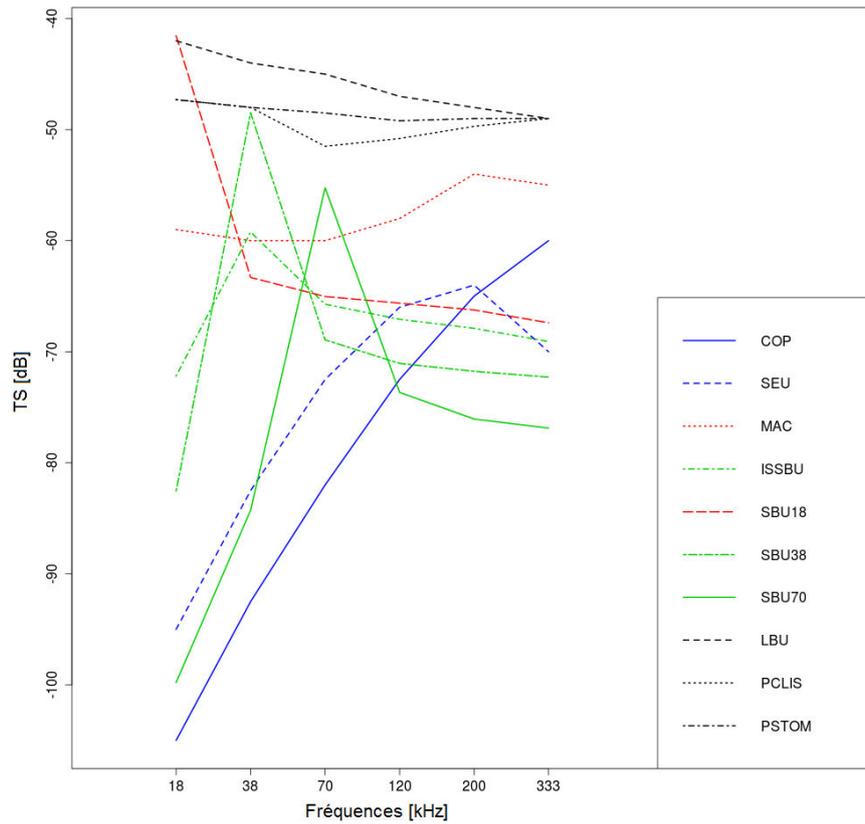


FIGURE 2.4 – Résultats de l’application de la méthode ACM-KM sur les données brutes du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

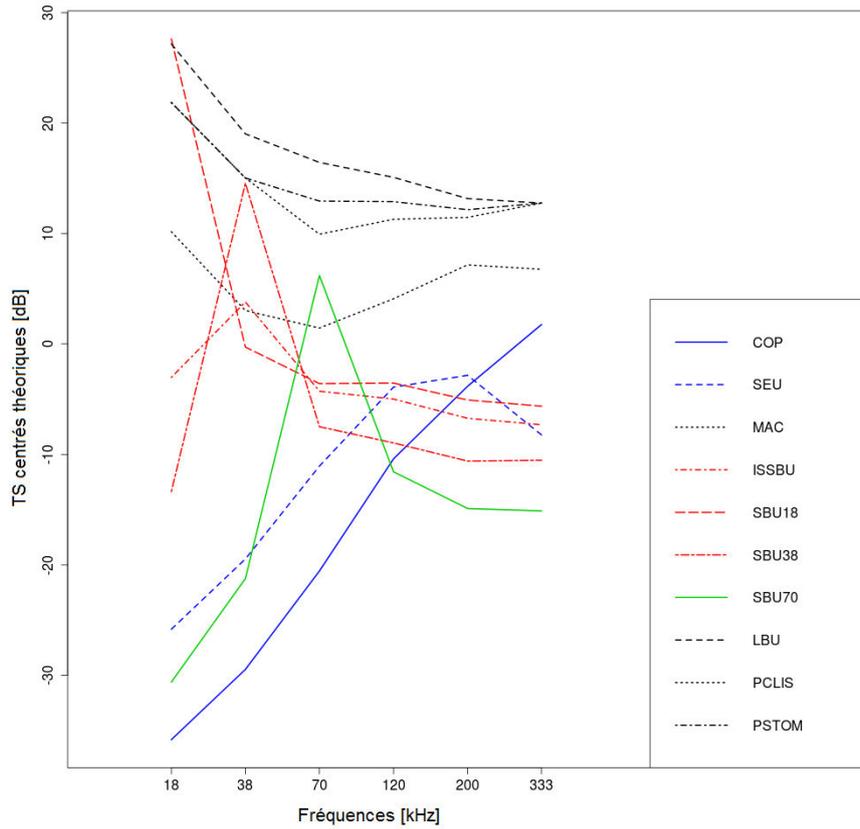


FIGURE 2.5 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

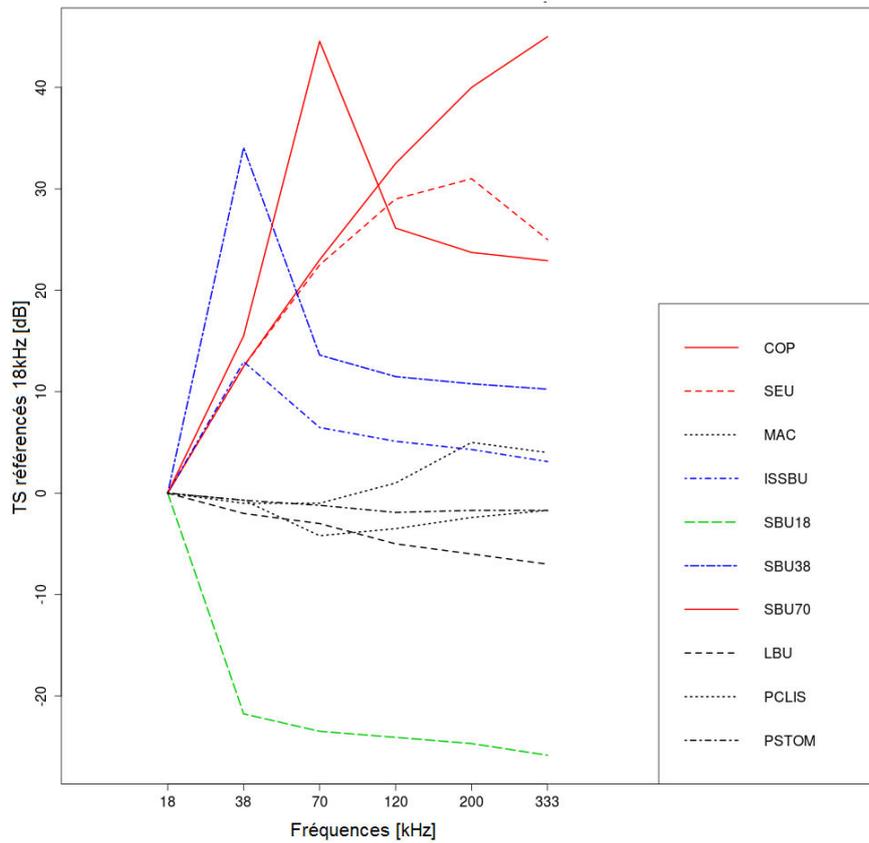


FIGURE 2.6 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM aux données référencées à la fréquence 18 kHz du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

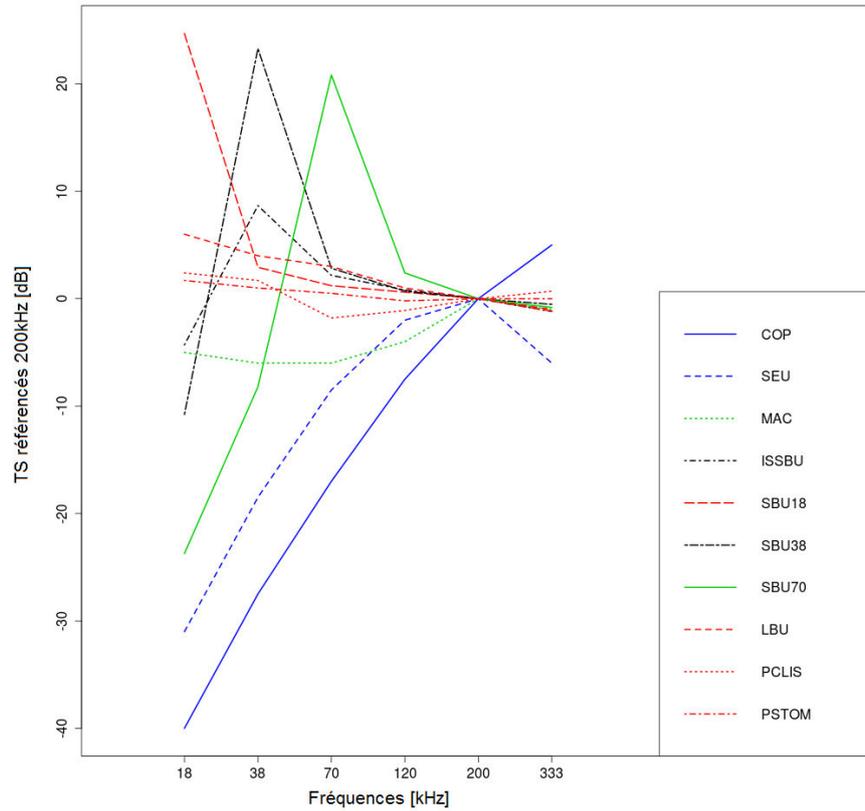


FIGURE 2.7 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM aux données référencées à la fréquence 200 kHz du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

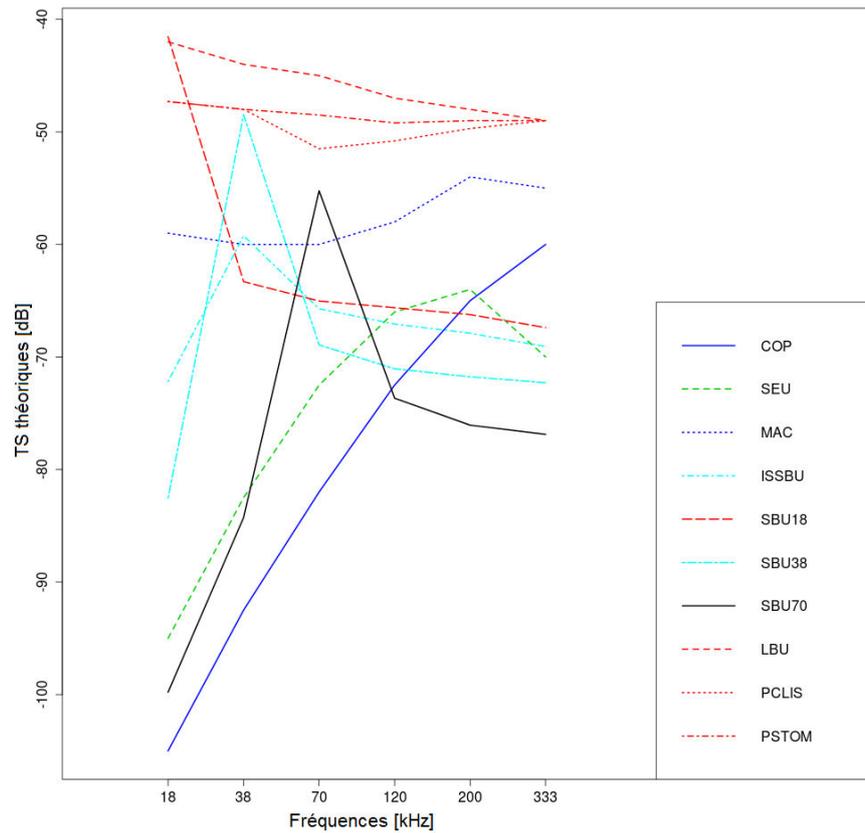


FIGURE 2.8 – Résultats de l'application de la méthode de Trenkel & Berger (2013) au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

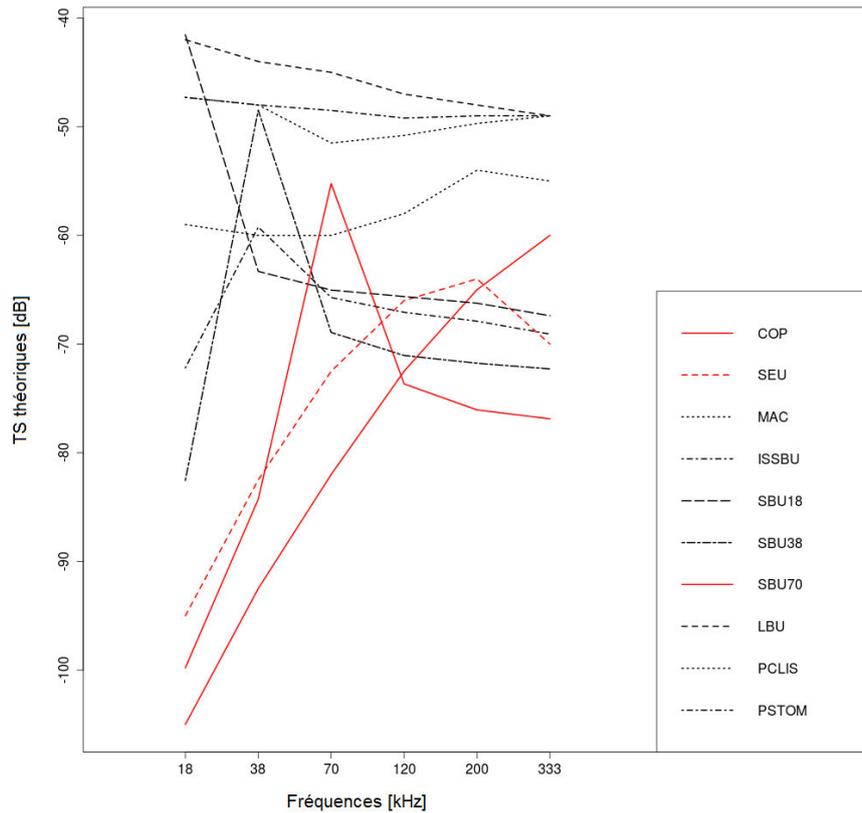


FIGURE 2.9 – Résultats de l’application de la méthode de Ballon et al. (2011) au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. *COP* : copépodes. *SEU* : petits euphausiacés. *MAC* : Maquereaux. *ISSBU* : petites bulles paramètres *in-situ*. *SBU18* : petites bulles résonance à 18 kHz. *SBU38* : petites bulles résonance à 38 kHz. *SBU70* : petites bulles résonance à 70 kHz. *LBU* : grosses bulles. *PCLIS* : poissons physoclistes. *PSTOM* : poissons physostomes.

Si l’on observe la moyenne et la distribution des taux de bonne classification obtenus sur l’ensemble des tests (application de chaque méthode aux 3 jeux de données), la méthode ACM-KM appliquée aux données brutes ou centrées se révèle être la plus robuste pour regrouper les réponses fréquentielles par type de réflecteurs (figure 2.10), selon les courbes théoriques des modèles. Cette méthode présente conjointement un taux de bonne classification moyen élevé et représentatif de la distribution des taux calculés lors des différents tests et une variance faible. Cependant, sur l’ensemble des résultats, les regroupements sont cohérents soit d’un point de vue biologique soit d’un point de vue physique mais n’allient pas toujours les deux. En effet, d’un point de vue biologique, la réponse fréquentielle des poissons sans vessie devrait être classées dans un groupe à part. Or, d’un point de vue physique, il est logique de classer ces organismes avec les copépodes et les euphausiacés puisqu’ils sont tous des réflecteurs de type FL.

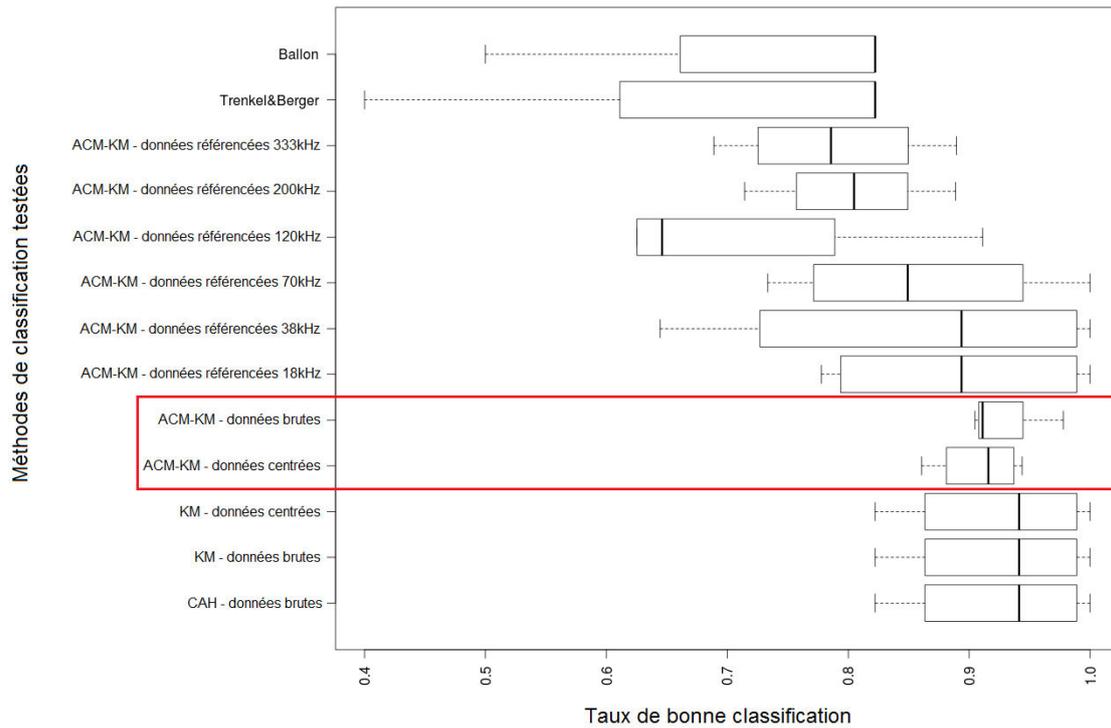


FIGURE 2.10 – Distribution des taux de bonne classification calculés pour l’application de chaque méthode aux 3 jeux de réponses fréquentielles théoriques. Pour chaque méthode, le rectangle représente la distribution du critère entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile). Les ”moustaches” représentent l’étendue des valeurs extrêmes. Le cadre rouge indique les méthodes les plus robustes selon les critères fixés dans le cadre de cette étude.

Nous avons donc mis au banc d’essai les méthodes supervisées et la méthode ACM-KM appliquée sur des données brutes et centrées, sur des données *in-situ*. Les données *in-situ* sont cependant beaucoup plus complexes que ces réponses fréquentielles théoriques, du fait des biais d’observation, car plusieurs types de réflecteurs et/ou classes de tailles peuvent être présents dans chaque volume insonifié. Une comparaison des méthodes sur des données *in-situ* a également été réalisée afin de mieux appréhender leurs performances.

Jeu de données *in-situ* à extension fine : 2 minutes de prospection

Dans cette partie, seuls les résultats obtenus à l’échelle d’écho-intégration (EI) de 1 ping, sont présentés. Le nombre de groupes est celui prévu par la méthode dans le cas des méthodes supervisées ou celui expliquant le plus de réponses fréquentielles différentes dans le cas de la méthode non supervisée.

A l’échelle très fine de 2 minutes de prospection acoustique, la méthode de Ballon et al. (2011) discrimine des zones de la colonne d’eau où il y a des écho-traces de poissons et des zones de la colonne d’eau où il y a des écho-traces plus faibles, mais la distinction poisson/réflecteurs FL n’est pas claire (figure 2.11). Le groupe *other* considère tout le reste. Les réponses fréquentielles correspondent très grossièrement aux groupes de réflecteurs qu’elles représentent.

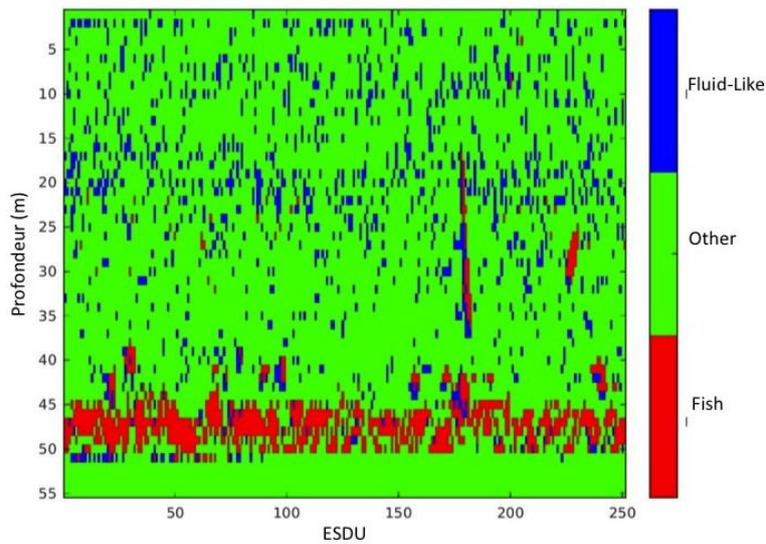
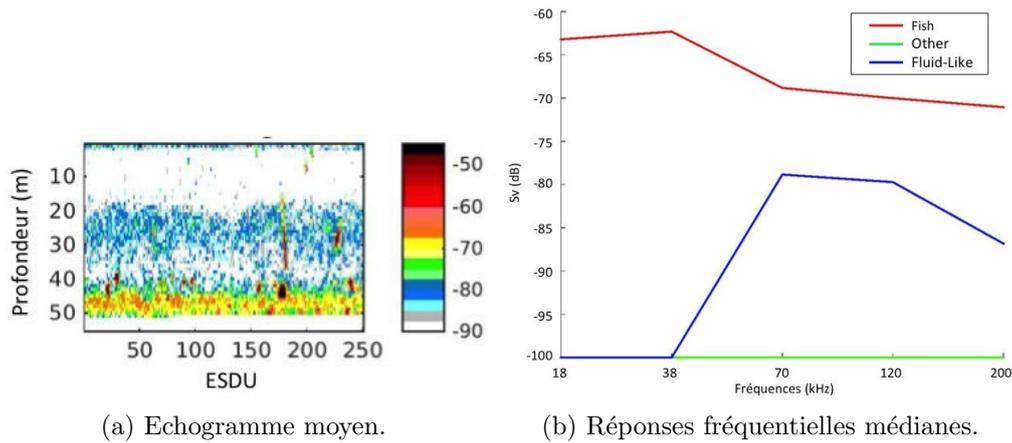
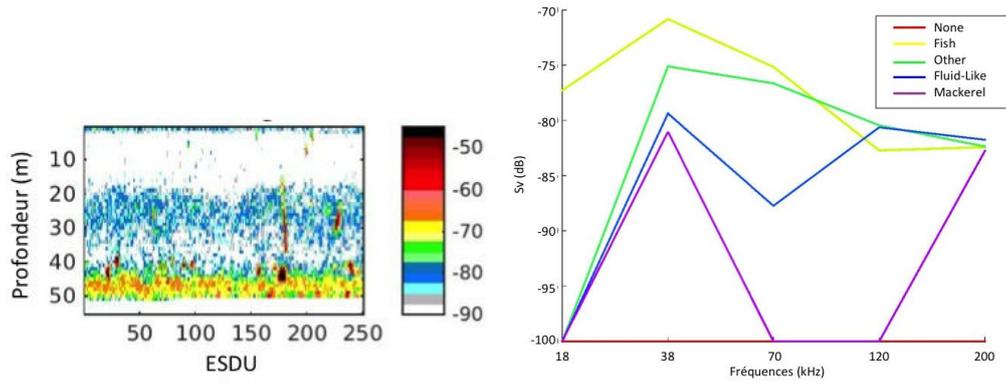


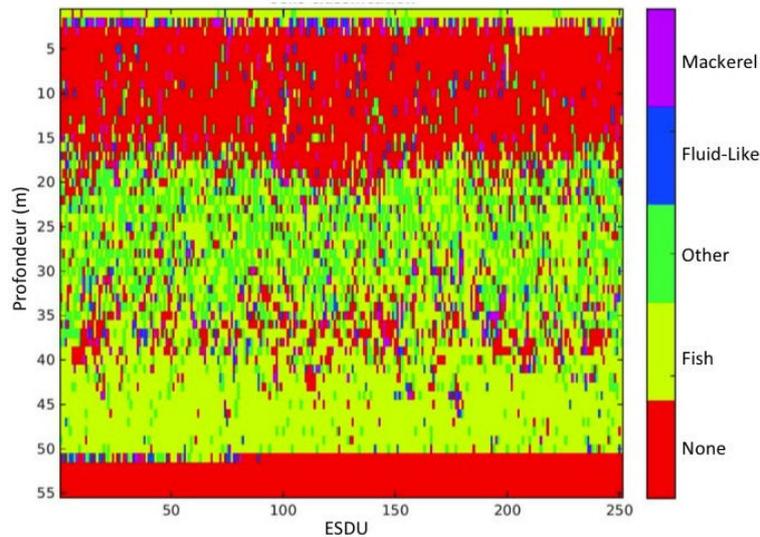
FIGURE 2.11 – Résultats de l’application de la méthode de Ballon et al. (2011) sur les données *in-situ* collectées pendant 2 minutes, comparés à l’échogramme moyen de la zone prospectée selon une résolution d’écho-intégration de 1 ping.

La méthode de Trenkel & Berger (2013) ne discrimine pas correctement les écho-traces des bancs de poissons (figure 2.12). Cette méthode classe de très larges portions des couches diffusantes denses dans le groupe ”poissons à vessies” (groupe jaune). Les réponses fréquentielles médianes des groupes ne correspondent pas aux réflecteurs qu’elles doivent représenter. La réponse fréquentielle des organismes FL (figure 2.12, courbe bleue), par exemple, doit théoriquement augmenter de façon linéaire avec la fréquence pour des fréquences aussi basses (Stanton et al., 1998).



(a) Echogramme moyen.

(b) Réponses fréquentielle médianes.



(c) Classification.

FIGURE 2.12 – Résultats de l’application de la méthode de Trenkel & Berger (2013) sur les données *in-situ* collectées pendant 2 minutes, comparés à l’échogramme moyen de la zone prospectée, selon une échelle d’écho-intégration de 1 ping.

La méthode ACM-KM appliquée sur les données brutes (figure 2.13) et sur les données centrées (figure 2.14) avec 3 groupes de réflecteurs, discrimine les écotraces des deux couches diffusantes et les zones pauvres en réflecteurs. Les écotraces des bancs de poissons sont assemblées avec le groupe de la couche diffusante la plus dense. La méthode ACM-KM appliquée sur des données centrées est la seule qui discrimine les écotraces des bancs de poissons sans les confondre avec les autres structures présentes sur les échogrammes. Avec 5 groupes de cellules (figure 2.16), la méthode ACM-KM sur des données centrées, distingue des réponses fréquentielles médianes cohérentes par rapport aux modèles de réflecteurs théoriques, ce qui n’est pas le cas lors de son application sur des données brutes (figure 2.15).

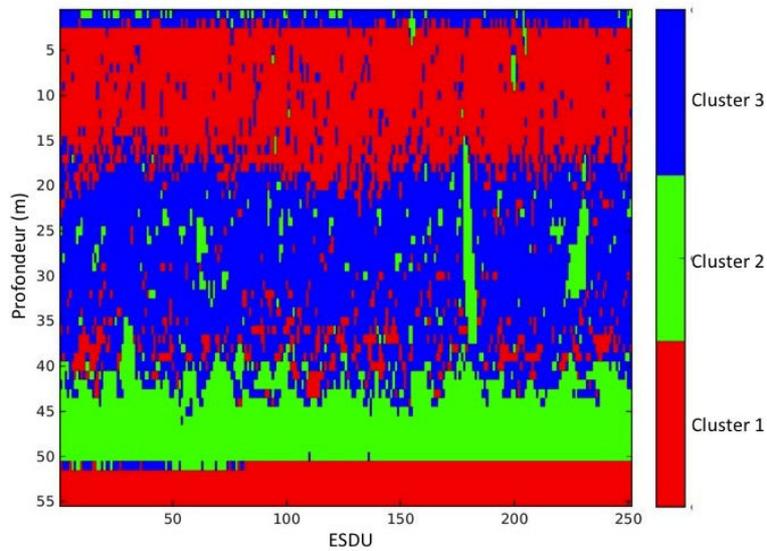
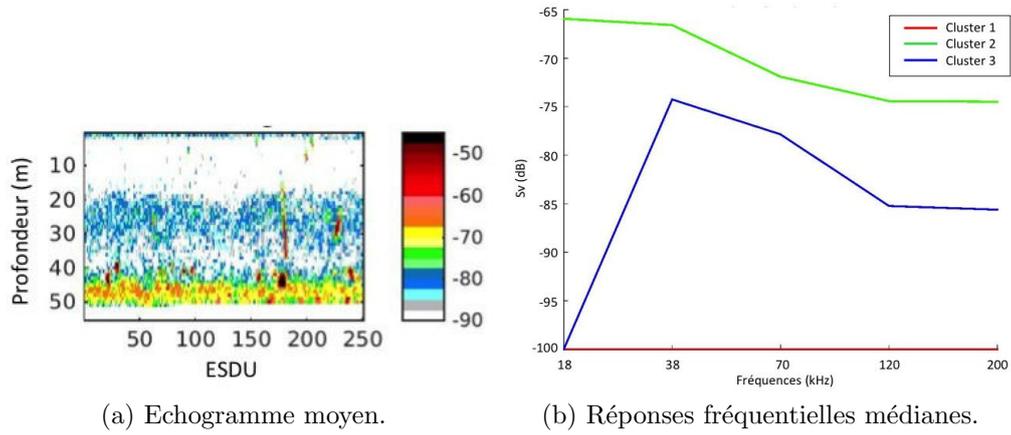


FIGURE 2.13 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.

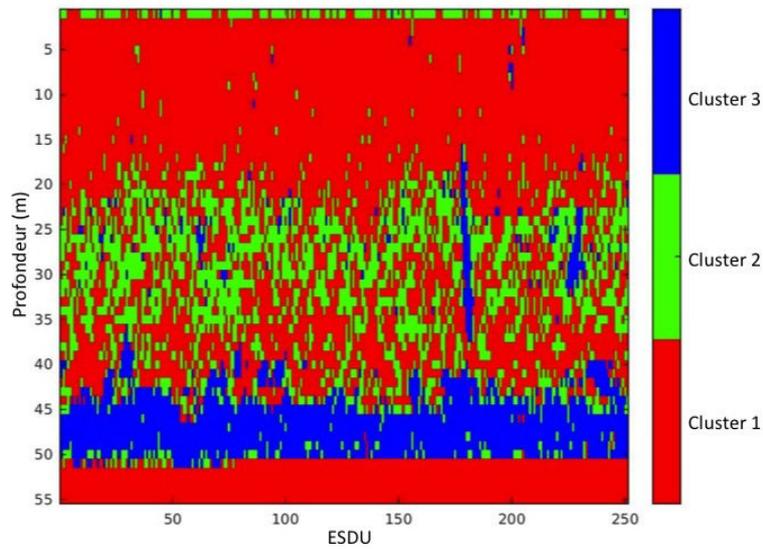
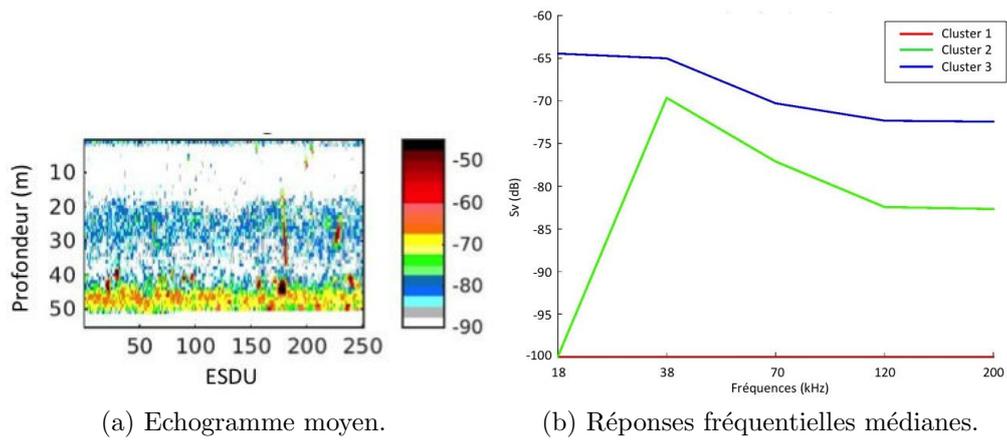


FIGURE 2.14 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.

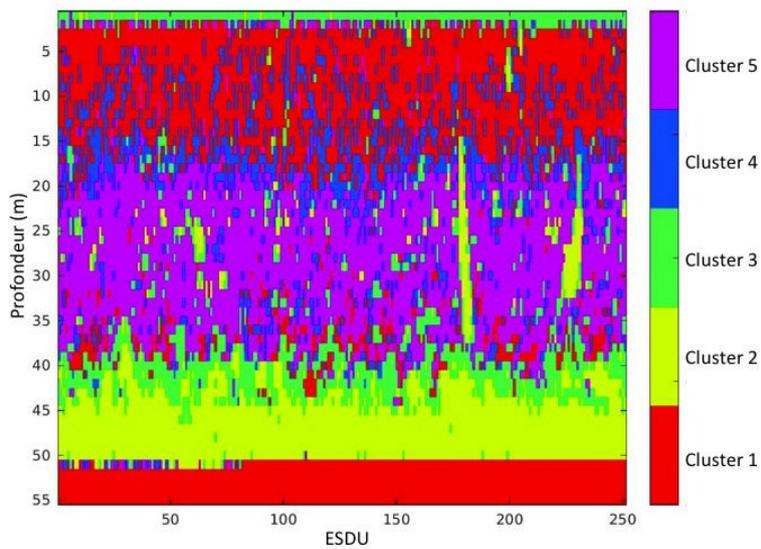
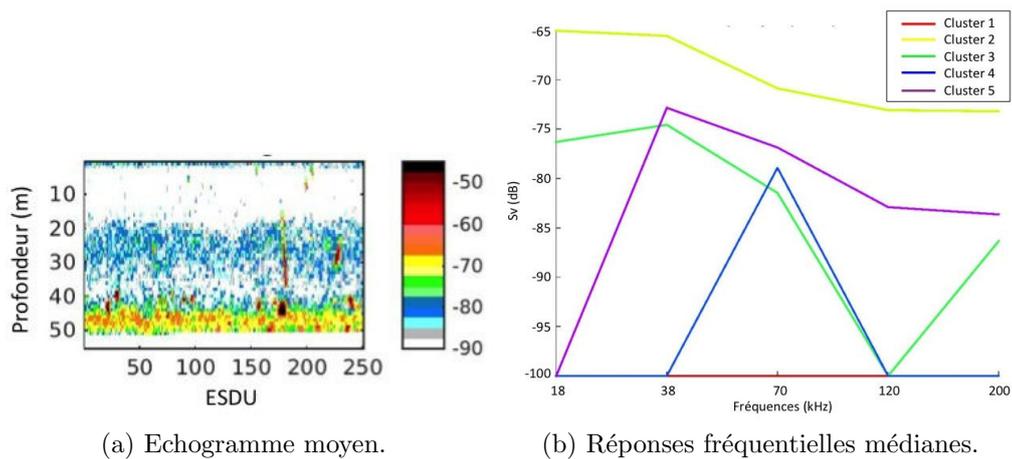
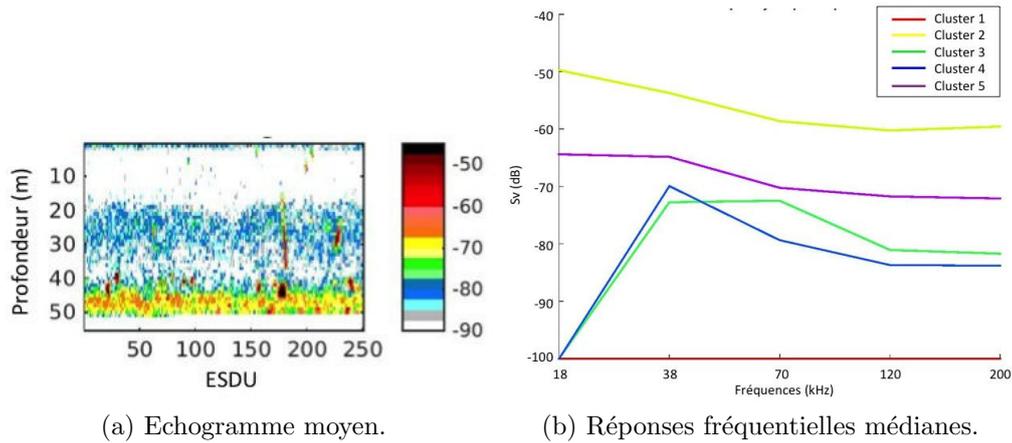
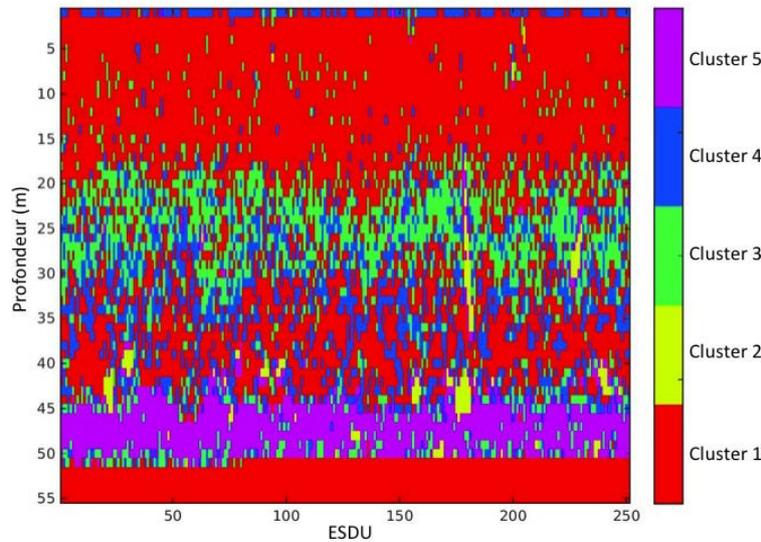


FIGURE 2.15 – Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.



(a) Echogramme moyen.

(b) Réponses fréquentielles médianes.



(c) Classification.

FIGURE 2.16 – Résultats de l’application de la méthode ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d’écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.

A une extension de 2 minutes de prospection acoustique et selon un grain de 1 ping, les méthodes supervisées (Ballon et al., 2011; Trenkel & Berger, 2013) et la méthode non supervisée ACM-KM appliquée sur les données brutes ne discriminent pas les bancs de poissons dans un groupe particulier. Pourtant, ce sont des échotrases qui sont classiquement extraits des échogrammes lors de l’échotypage. Les méthodes supervisées discriminent les autres patrons spatiaux dominants avec peu de clarté. La seule méthode qui discrimine les échotrases des bancs de poissons de manière satisfaisante par rapport à un échotypage manuel, est la méthode ACM-KM appliquée sur les données centrées. Dans leurs approches supervisées, les méthodes de Ballon et al. (2011) et de Trenkel & Berger (2013) prédéfinissent un groupe ”poissons à vessie”. Selon leurs définitions, elles devraient être capables de séparer les échotrases des bancs de poissons des autres structures, mais leur utilisation n’a pas permis une telle séparation. Le choix du nombre de groupes dans la méthode ACM-KM est déterminant pour l’obtention d’une discrimination pertinente des échos. D’autre part, les réponses fréquentielles médianes des groupes obtenus par l’application de la méthode ACM-KM sur des données centrées (figure 2.16 (b)) ne sont qu’en partie différenciées par la signature fréquentielle. Puisque l’effet de la densité des réflecteurs est encore présent dans les résultats, la standardisation par centrage ne

semble pas être la méthode la plus optimale pour s'affranchir de l'effet de la densité.

Jeu de données *in-situ* à fine échelle : 1h de prospection

Dans cette partie, seuls les résultats obtenus à l'échelle d'écho-intégration de 1 ping sont présentés pour comparer les performances de classification des différentes méthodes. Les résultats obtenus sur les données écho-intégrées par cellules de 0.01 MN et 0.1 MN sont présentés dans l'annexe I. Le nombre de groupes est celui prévu dans le cas des méthodes supervisées ou celui expliquant le plus de réponses fréquentielles différentes dans le cas non supervisé.

La méthode de Ballon et al. (2011) discrimine les écho-traces à fortes densités proches du fond (figure 2.17) et les considère comme du poisson. Le groupe des réflecteurs FL présente des zones de la colonne d'eau qui ne correspondent pas à des patrons spatiaux dominants. De plus, la réponse fréquentielle médiane du groupe FL n'est pas représentative d'une réponse de réflecteurs FL pour cette gamme de fréquences. La figure 2.18, illustre la distribution des Sv par fréquence pour chaque groupe. Les réponses fréquentielles médianes des groupes issus de la méthode de Ballon et al. (2011) regroupent des distributions de Sv très étendues.

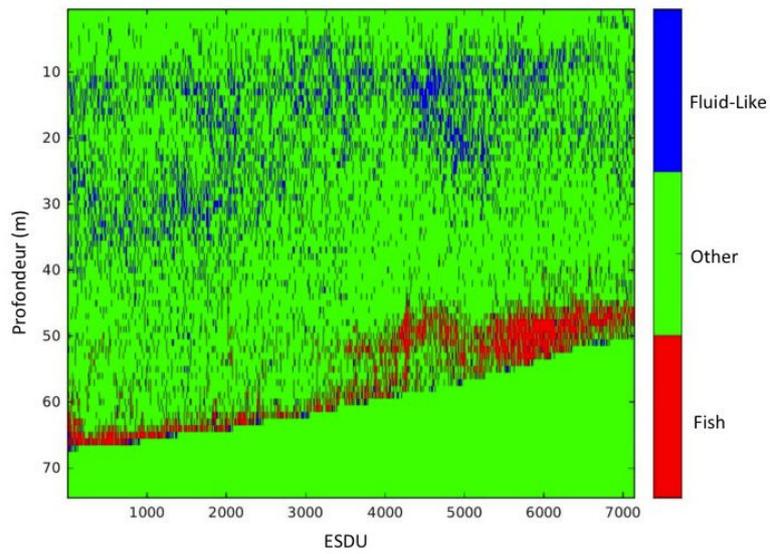
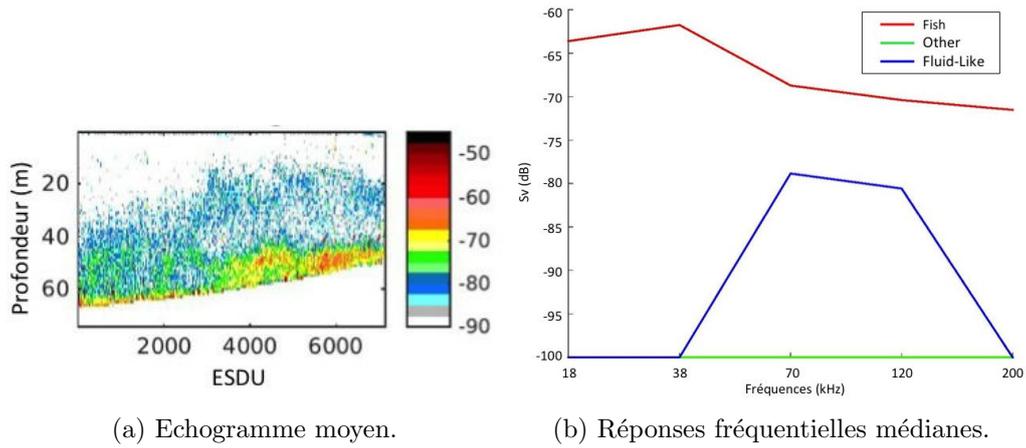


FIGURE 2.17 – Résultats de l’application de la méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011), paramétrée selon Lezama-Ochoa et al. (2011), sur les données *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d’écho-intégration de 1 ping.

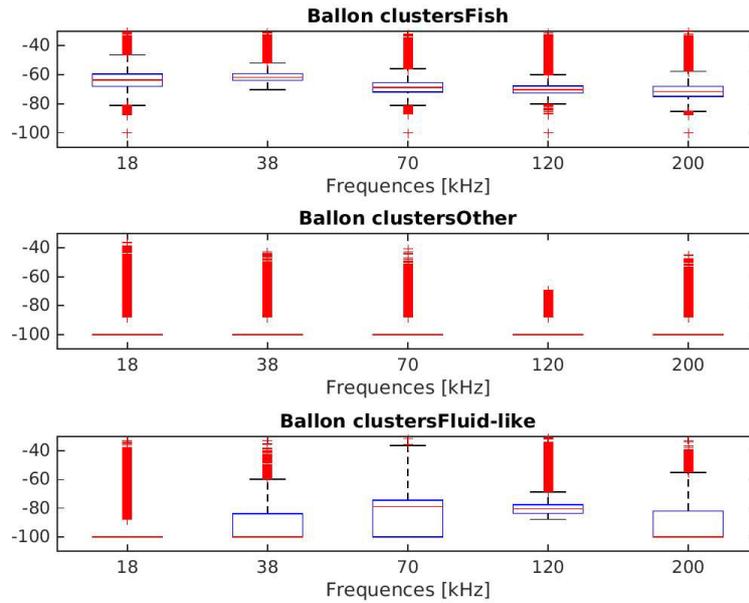


FIGURE 2.18 – Distribution des Sv (croix rouges) par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011), paramétrée selon Lezama-Ochoa et al. (2011), appliquée sur les données *in-situ* collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.

La méthode de Trenkel & Berger (2013), paramétrée selon leur publication et appliquée à 1h de prospection acoustique, ne discrimine aucun patron spatial visible sur les échogrammes multifréquences (figure 2.19). Les groupes sont discriminés dans la partie haute de la colonne d'eau où la détection acoustique est très faible. Les réponses fréquentielles médianes ne représentent pas les réflecteurs de leurs groupes. Les distributions des Sv par fréquence pour chaque groupe sont très étendues (figure 2.20), impliquant que les groupes rassemblent des cellules aux réponses fréquentielles diverses.

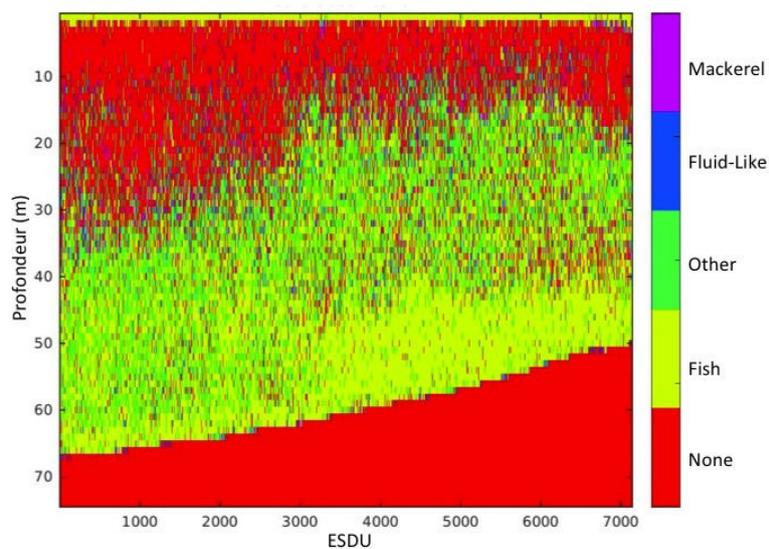
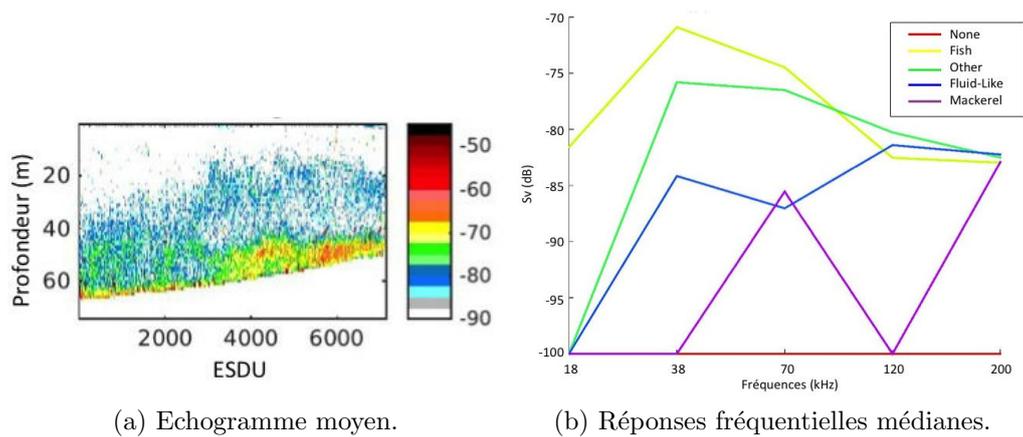


FIGURE 2.19 – Résultats de l'application de la méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013), paramétrée selon leur publication, sur les données *in-situ* collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping.

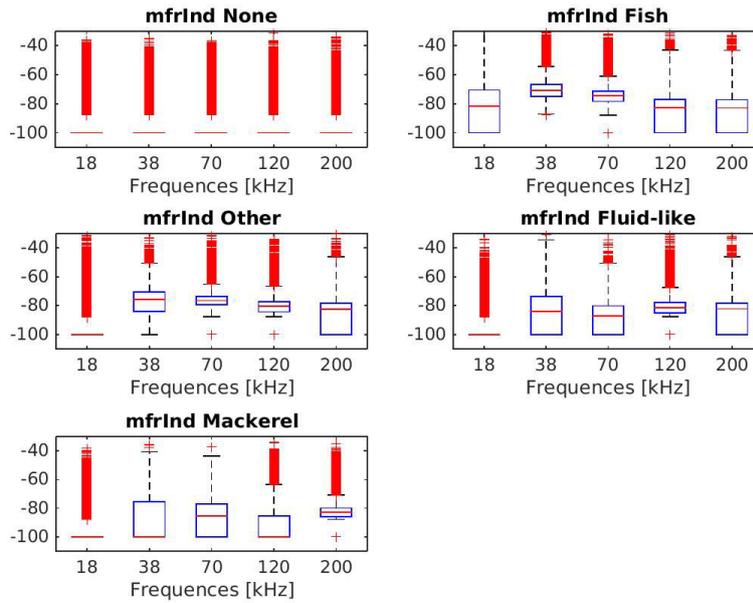


FIGURE 2.20 – Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013), appliquée sur les données *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.

Avec seulement 3 groupes, la méthode non supervisée ACM-KM utilisée sur les données brutes et 1h de prospection selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, discrimine les écho-traces dominants (figure 2.21). Les distributions des Sv par fréquence pour chaque groupe sont plus restreintes que les distribution des méthodes supervisées, mais restent fortement dispersées (figure 2.22).

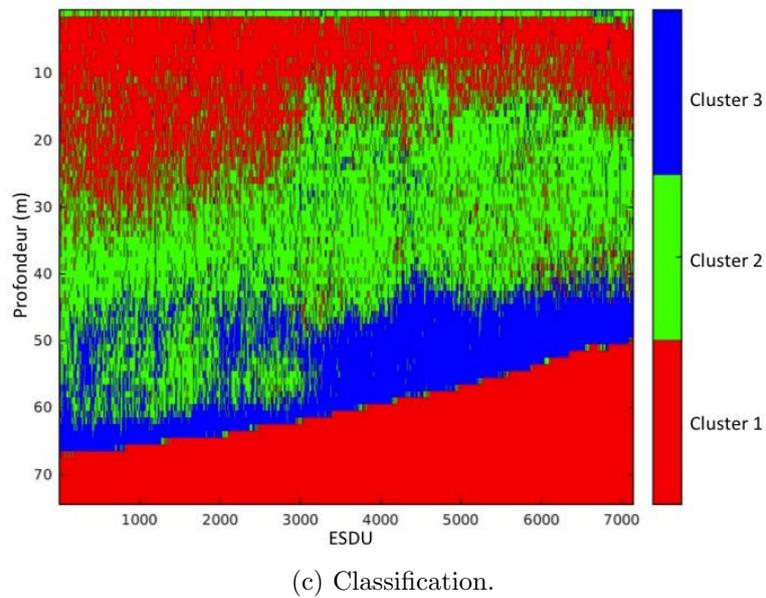
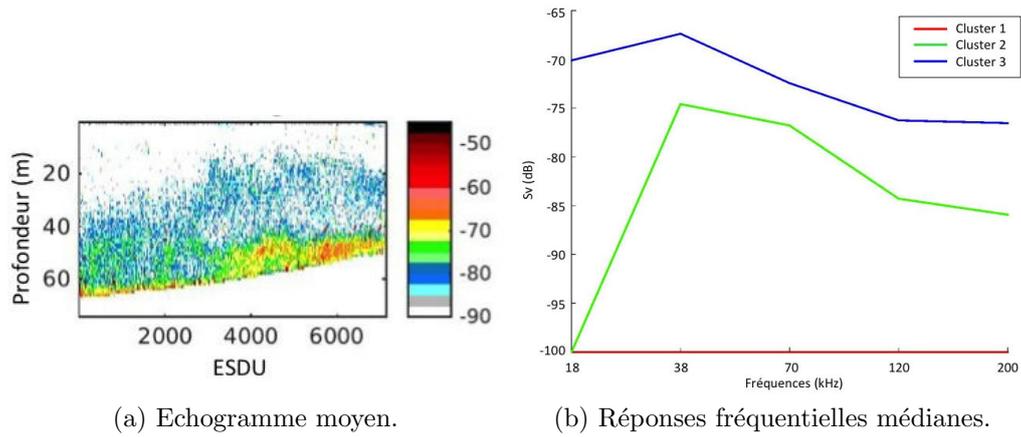


FIGURE 2.21 – Résultats de l’application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 1h selon une échelle d’écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.

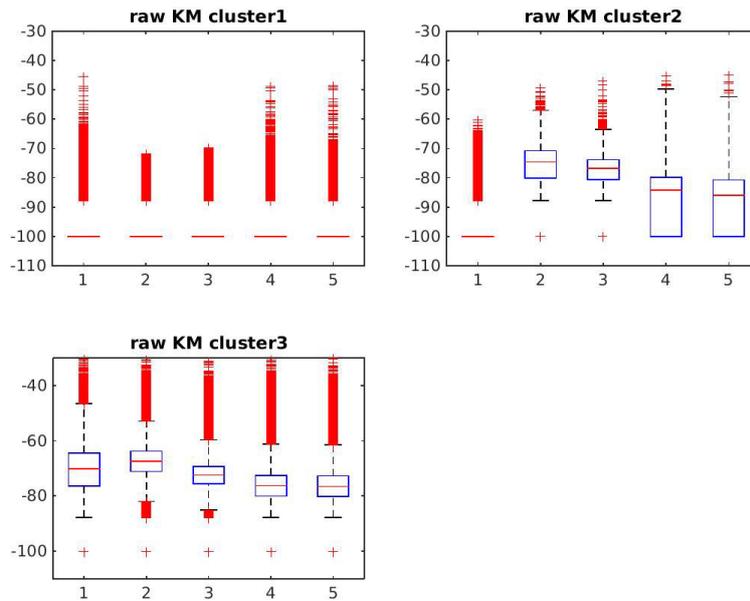


FIGURE 2.22 – Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM appliquée sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.

La même application sur les données centrées discrimine des patrons spatiaux qui sont plus proches de ceux de l'échogramme moyen (figure 2.23). Les distributions des Sv par fréquence dans chaque groupe sont aussi dispersées que pour la méthode ACM-KM appliquée aux données brutes (figure 2.24).

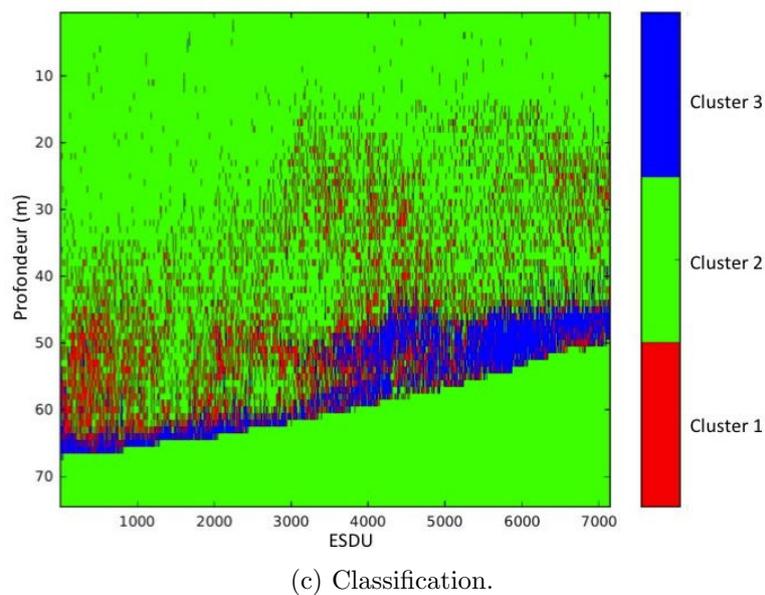
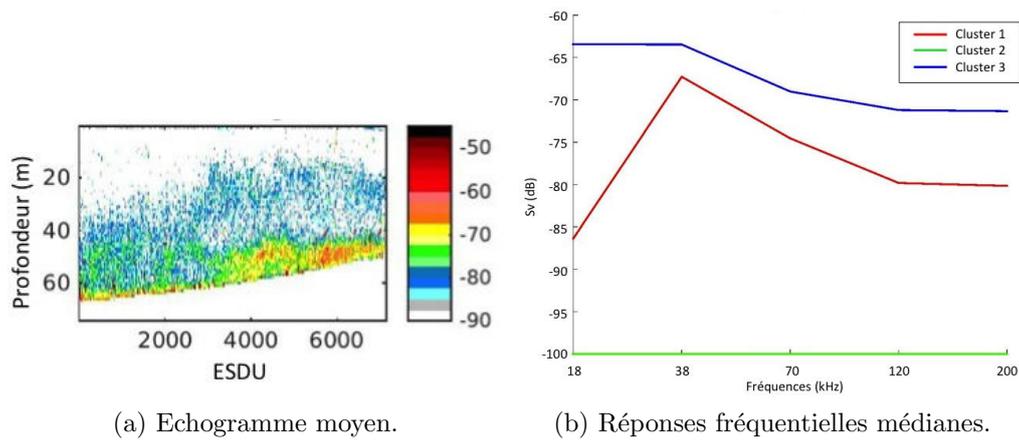


FIGURE 2.23 – Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.

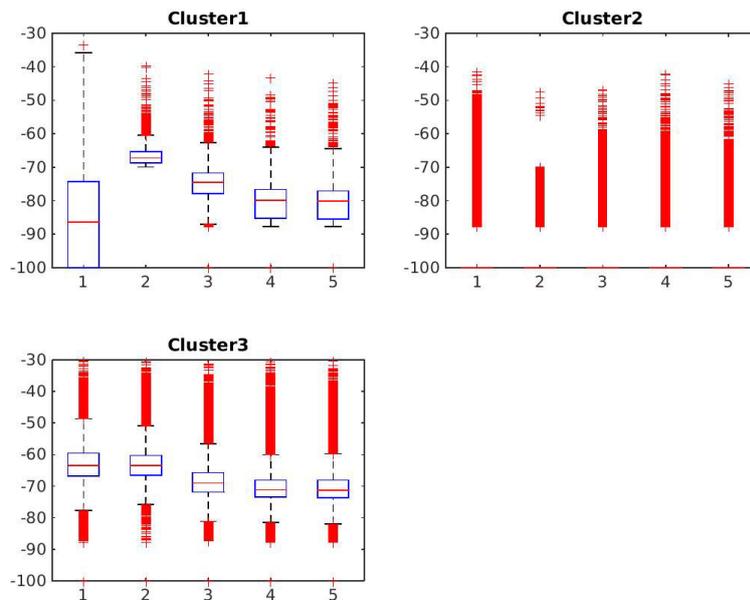


FIGURE 2.24 – Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.

Les méthodes supervisées n'apparaissant pas pertinentes, pour discriminer les patrons spatiaux visibles sur les échogrammes multifréquences de 2 minutes ou d'1h de prospection, elles n'ont donc pas été retenues. Nous nous concentrons désormais sur la méthode non supervisée ACM-KM appliquée sur les données brutes et sur les données centrées, pour déterminer la méthode la plus robuste. L'augmentation du nombre de groupes engendre une diminution de la dispersion des Sv par fréquence dans les différents groupes (figures 2.22 & 2.26 et figures 2.24 & 2.28). Cependant, les réponses fréquentielles médianes par groupe deviennent redondantes à partir de 5 groupes pour les deux approches (cf. annexe I). Les résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur des données centrées contiennent un résidu de l'effet de la densité des réflecteurs. Il apparaît ici encore, que la méthode de standardisation par centrage ne permet pas de s'affranchir de la totalité de l'effet de la densité. Les réponses fréquentielles médianes par groupe issues de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées ont des formes cohérentes par rapport à la forme des modèles de réflecteurs, ce qui n'est pas le cas lorsque la méthode est appliquée sur les données brutes (figure 2.27 (b)) peuvent être interprétées comme des combinaisons de pics de résonance qui représentent la réponse fréquentielles de réflecteurs de type Gas-Bearing. 2.25). En effet, les courbes obtenues (figure) peuvent être De plus, les distributions des Sv par fréquence dans les différents groupes sont moins étendues pour la méthode AMC-KM appliquée sur les données centrées que sur les données brutes.

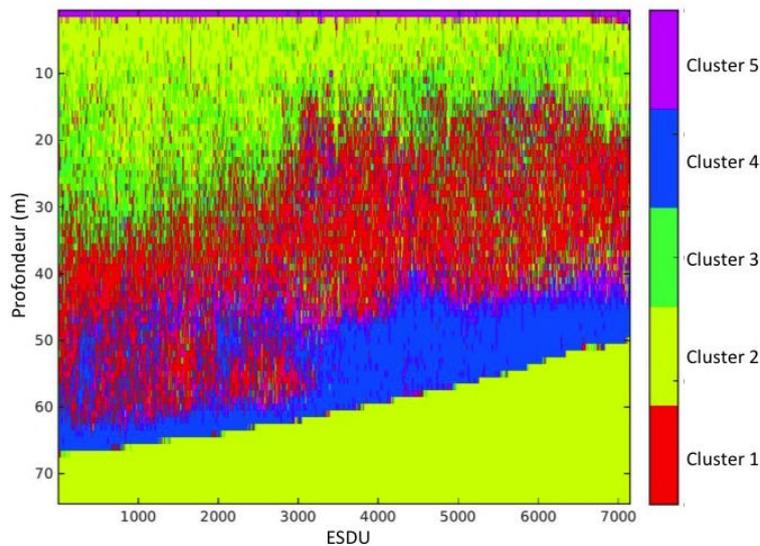
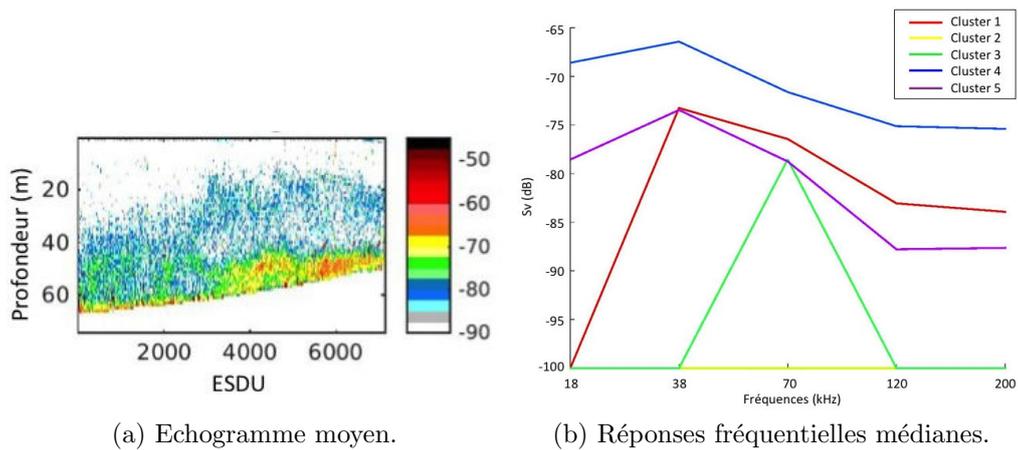


FIGURE 2.25 – Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.

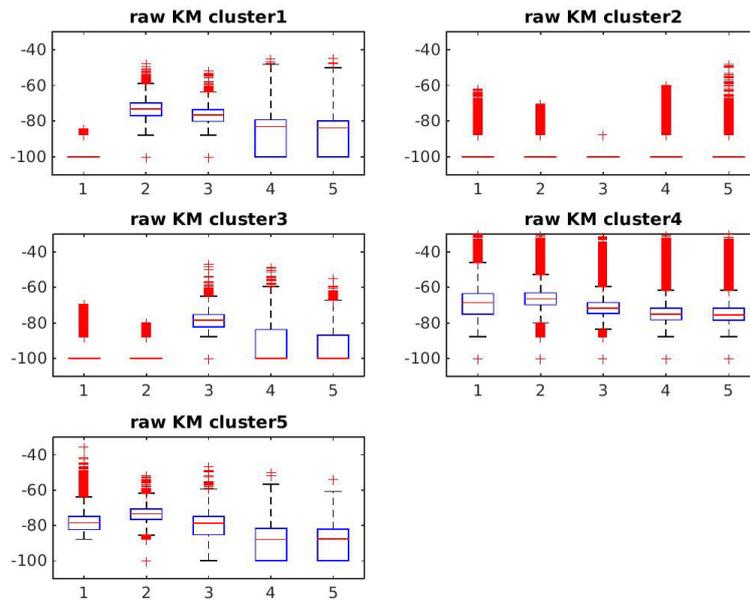
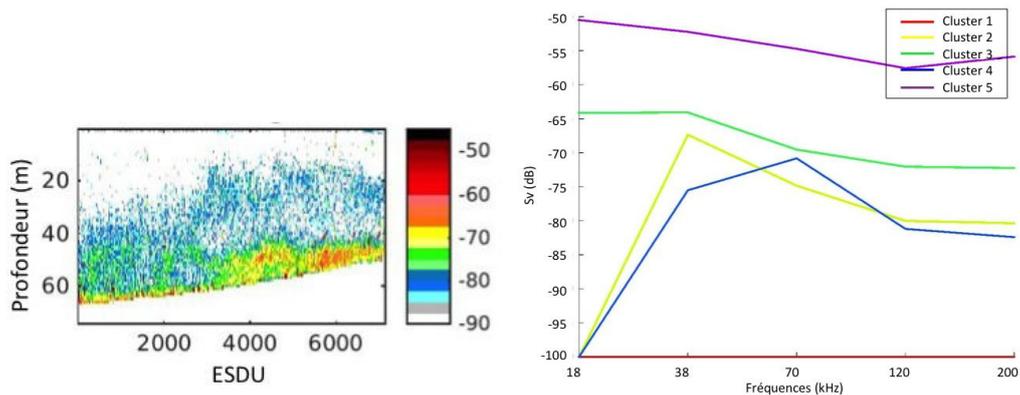
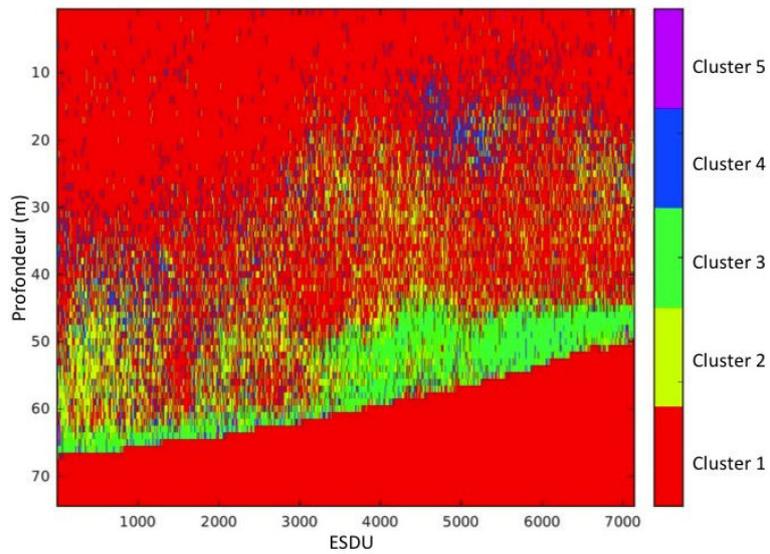


FIGURE 2.26 – Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.



(a) Echogramme moyen.

(b) Réponses fréquentielles médianes.



(c) Classification.

FIGURE 2.27 – Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.

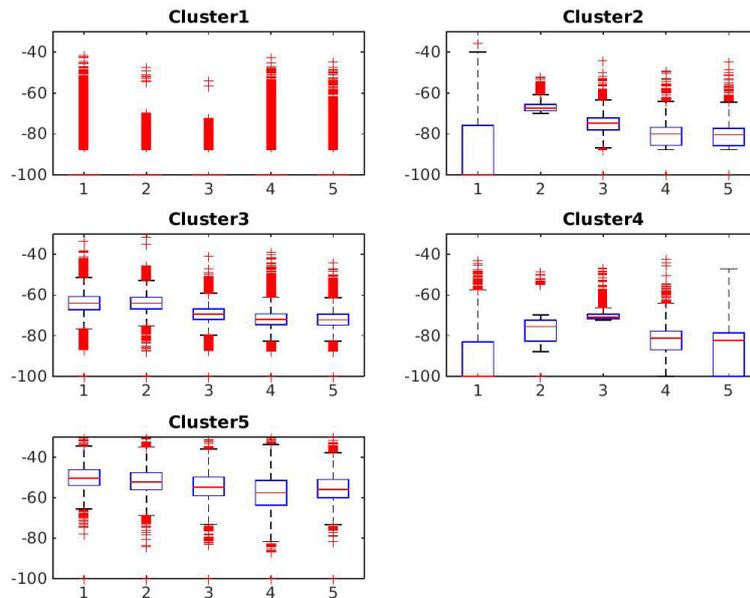
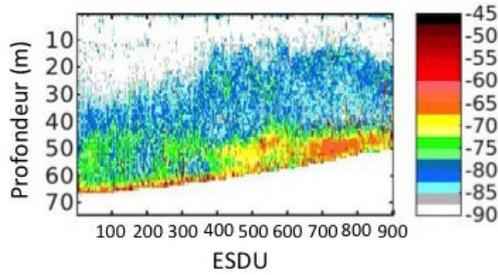
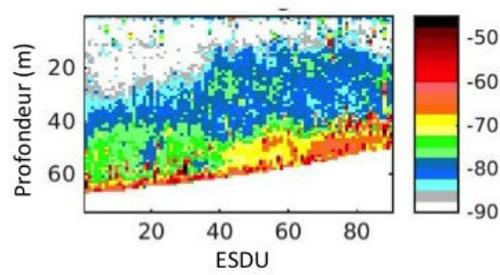


FIGURE 2.28 – Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.

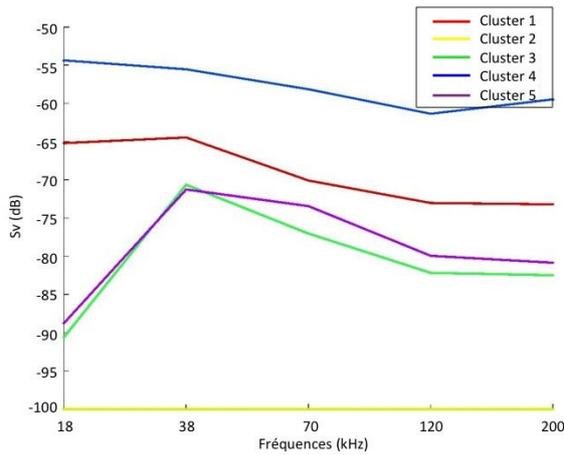
A une extension fine de 2 minutes de prospection acoustique, on observe que la méthode ACM-KM appliquée sur des données centrées, différencie les bancs de poissons dans un groupe particulier. Cette différenciation n'est plus visible sur une extension plus large (1h de prospection acoustique) car les échos des bancs de poissons sont alors des structures très ponctuelles et de petite taille par rapport aux couches diffusantes. Aux deux extensions considérées, on observe que la méthode ACM-KM discrimine les cellules d'écho-intégration de manière cohérente par rapport aux échos des couches diffusantes que l'on observe sur les échogrammes. L'application de cette méthode sur le jeu de données d'1h de prospection pour des grains plus grossiers (0.01 MN et 0.1 MN), montre les mêmes résultats de classification (figure 2.29). Les réponses fréquentielles médianes des groupes peuvent être interprétées comme des combinaisons ou des parties de pics de résonance. Dès l'échelle d'écho-intégration de 0.01 MN, les bancs de poissons ne sont plus différenciables du reste car ils sont mélangés avec des portions de couches résonnantes d'intensité similaire.



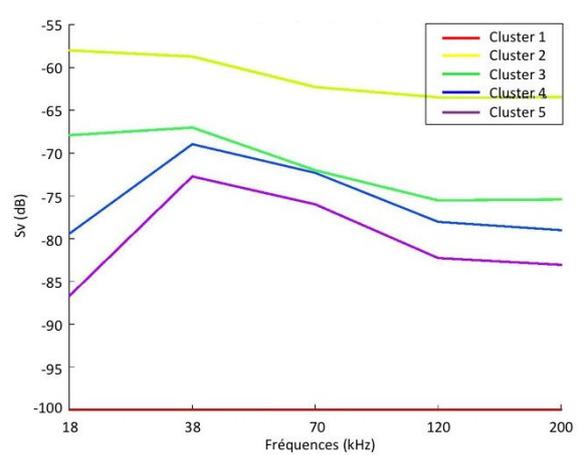
(a) Echogramme moyen (0.01 MN)



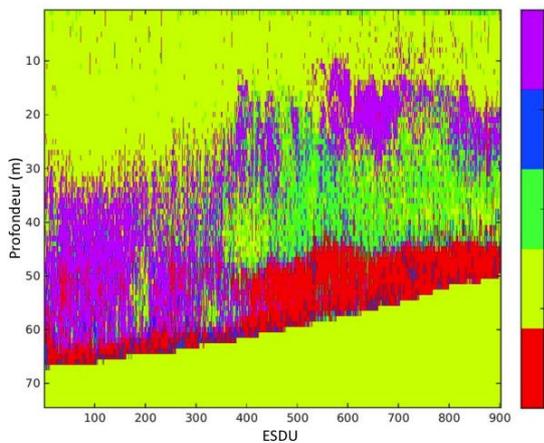
(b) Echogramme moyen (0.1 MN)



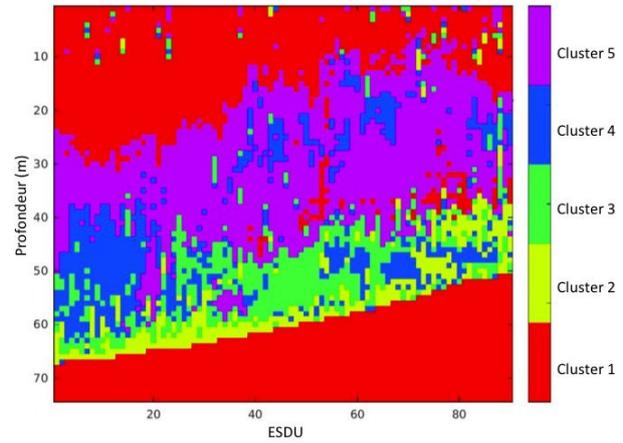
(c) Réponses fréquentielles médianes (0.01 MN)



(d) Réponses fréquentielles médianes (0.1 MN)



(e) Classification (0.01 MN)



(f) Classification (0.1 MN)

FIGURE 2.29 – Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées *in-situ* collectées pendant 1h , selon des échelles d'écho-intégration plus grossières : 0.01 MN (a, c, e) et 0.1 MN (b, d, f).

2.3.3 Discussion

La comparaison des performances des méthodes sur le jeu de réponses fréquentielles théoriques représentant les réflecteurs acoustiques biologiques majeurs, permet déjà de faire une sélection au sein des méthodes testées. La méthode AMC-KM se révèle être une approche plus robuste que les autres car elle considère la réponse fréquentielle de toutes les structures observées sur les échogrammes collectés. Il y a peu de différence entre son application sur les données brutes ou centrées car les différences de densités des réflecteurs ne sont pas considérés dans ce jeu

de réponses fréquentielles. Si l'on ajoute l'effet des différences de densités entre organismes, les réponses fréquentielles des différents réflecteurs devraient être mieux discriminées car plus séparées en termes de niveaux absolus.

La standardisation des données avant la classification doit permettre de limiter l'effet de la densité des organismes, afin de se focaliser sur la forme des réponses fréquentielles. La méthode ACM-KM, appliquée à des données relatives à une fréquence de référence donne, dans notre cas, des résultats pertinents seulement lorsque la fréquence de référence est basse (18 ou 38 kHz). Ce conditionnement des résultats de classification au choix de la fréquence de référence nous a poussé à ne pas utiliser ce mode de standardisation, pourtant couramment utilisé dans la littérature (e.g. De Robertis et al. (2010); Woillez et al. (2012)). La standardisation par centrage, proposée dans cette étude, apparaît plus robuste concernant la reproduction des résultats. Cependant, l'effet de la densité est toujours présent dans les résultats et cela démontre que le centrage des données n'est pas la méthode la plus optimale pour s'affranchir de l'ensemble de cet effet. Le centrage des données soustrait une valeur globale et commune par fréquence à l'ensemble des cellules d'écho-intégration. Cette technique implique de considérer les cellules de manière similaire en terme de densité des organismes, ce qui n'est pas le cas réel puisque chaque cellule représente une densité d'organismes qui lui est propre. Ainsi, il serait plus juste de réfléchir à une méthode de standardisation qui utilise une valeur de référence propre à chaque cellule.

Les méthodes supervisées (Ballon et al., 2011; Trenkel & Berger, 2013), testées sur nos jeux de réponses fréquentielles théoriques et de données *in-situ*, apparaissent moins performantes que les méthodes non supervisées pour segmenter les échogrammes multifréquences. La méthode bifréquentielle (Ballon et al., 2011), ne permet de distinguer que trois groupes de réflecteurs très grossiers, qui renseignent peu sur la nature des réflecteurs composant les couches diffusantes. Cette méthode montre qu'avec seulement deux fréquences, il n'est pas possible de caractériser la distribution spatiale des bancs de poissons ou des couches diffusantes du golfe de Gascogne. La méthode basée sur le calcul d'un "indicateur multifréquence de diversité spécifique" (Trenkel & Berger, 2013), apparaît peu pertinente pour répondre à nos objectifs. Les tentatives d'optimisation de la paramétrisation avec d'autres modèles de réflecteurs théoriques n'ont pas abouti. Les performances de classification de la méthode diminuent drastiquement lorsque d'autres modèles théoriques sont ajoutés à son jeu de données de définition. En calculant un indice très global sur les réponses multi-fréquentielles, l'approche de Trenkel & Berger (2013) ne permet pas de mettre en évidence des patrons spatiaux cohérents avec ceux observés sur les échogrammes multifréquences.

Lorsque la résolution de l'écho-intégration augmente, la réponse acoustique moyenne par cellule intègre un volume plus important et donc, un plus grand nombre de réflecteurs. Les résultats de la classification ACM-KM à des échelles d'écho-intégration plus larges qu'un ping (0.01 et 0.1 MN) ne montrent pas de différences importantes entre les réponses fréquentielles médianes. La forme des réponses fréquentielles médianes de la majorité des groupes est analogue à la réponse fréquentielle théorique de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse (parties de pics de résonance à différentes fréquences de résonance, Ye (1997)). Les réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse induisant une réponse acoustique très forte, il peut suffire d'un seul réflecteur porteur d'inclusion gazeuse dans une cellule d'écho-intégration pour que la réponse fréquentielle moyenne de la cellule soit fortement influencée par celle du réflecteur porteur d'inclusion gazeuse, masquant la quasi-totalité de la contribution des autres réflecteurs plus faibles. La réponse fréquentielle des réflecteurs FL n'est pas visible dans les réponses fréquentielles médianes des groupes obtenus, qui semblent être toutes dominées par la réponse fréquentielle

des réflecteurs GB. Cette observation pose un problème important puisqu'en terme d'abondance, ce sont les organismes de type FL qui sont dominants dans la colonne d'eau. Même à un grain 1 ping, les cellules peuvent intégrer une grande quantité de réflecteurs de petites tailles, surtout si elles se trouvent loin du transducteur, ce qui peut expliquer l'omniprésence des réponses fréquentielles de type bulle de gaz résonante.

2.4 Application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM aux données de la campagne PELGAS 2013

La méthode de classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées se révèle comme la plus pertinente des méthodes de classification testées, pour discriminer les patrons spatiaux des structures détectées par acoustique. Dans cette partie, elle est appliquée aux données centrées de l'ensemble de la campagne PELGAS 2013, pour définir les paysages acoustiques du golfe de Gascogne et décrire les patrons spatiaux des couches diffusantes à méso-échelle.

2.4.1 Matériel et méthodes

Définition des paramètres optimaux de la méthode de classification non supervisée ACM-KM

La méthode de classification non supervisée ACM-KM a été appliquée à l'échelle du golfe de Gascogne. Les résultats obtenus sont dépendants de plusieurs paramètres : l'échelle horizontale des cellules d'écho-intégration, le nombre et la taille des classes pour la construction du tableau disjonctif complet, le nombre de groupes de la classification. Une analyse de sensibilité a donc été menée sur ces paramètres pour sélectionner les valeurs optimales. 3, 4, 5, 10 classes de Sv centrés de tailles inégales et égales et 3 à 10 groupes de cellules ont été testées. Pour chaque valeur testée, la totalité de l'analyse a été réalisée dans le but de calculer les réponses fréquentielles médianes par groupe. Les tests ont été menés pour des données écho-intégrées par cellules de 0.01 MN, 0.05 MN et 0.1 MN. Les valeurs des paramètres ont été choisies de façon à minimiser les variations de la réponse fréquentielle des cellules au sein d'un groupe et maximiser les variations entre les réponses fréquentielles médianes. Les écho-intégrations ont toutes été réalisées avec un seuil de -80 dB dans le but de s'affranchir du bruit de fond. L'application de la méthode de classification ACM-KM sur l'ensemble des données multifréquences collectées pendant la campagne PELGAS 2013 est optimale pour un tableau disjonctif complet composé de 5 classes de Sv centrés égaux et 6 groupes de cellules. D'après les résultats du banc d'essai, une classification appliquée à des données écho-intégrées par cellules de 1 ping de long permettrait sûrement de maximiser le nombre de réflecteurs détectés et les différences entre les réponses fréquentielles médianes de chaque groupe. Cependant, les moyens techniques dont nous disposons pour cette étude, n'ont pas permis de réaliser ce calcul en temps abordable. Ainsi, pour répondre à notre objectif de développer une méthode de classification pouvant être mise en oeuvre avec des moyens informatiques standard, nous avons réalisé des essais sur des données écho-intégrées selon des grains plus grossiers (0.01, 0.05 et 0.1 MN de long pour 1 m de profondeur). A l'issue de ces essais, il s'est avéré qu'un grain horizontal de 0.01 MN n'apportait pas une meilleure différenciation des échos qu'un grain de 0.1 MN. Nous avons donc sélectionné le grain horizontal le plus grossier (0.1 MN pour 1 m de profondeur) pour réaliser la classification de l'ensemble des données de la campagne PELGAS 2013.

Paramétrisation de l'algorithme Kmeans

La classification des individus par la méthode *K-means* a été mise en œuvre au moyen de la *Statistics Toolbox* de Matlab (The MathWorks, 2012). L'algorithme comprend deux phases itératives qui cherchent à minimiser la somme des distances entre chaque point et le centroïde, sommée sur l'ensemble des k groupes. Le résultat est obtenu lorsque l'algorithme converge vers le minimum global de la somme des distances. La première phase ré-assigne chaque point au centroïde le plus proche et recalcule les centroïdes de chaque groupe. Cette étape peut converger vers un minimum qui n'est que local. Elle est pertinente pour les petits jeux de données. Dans la seconde phase, chaque point est ré-assigné individuellement au centroïde le plus proche et les centroïdes de chaque groupe sont recalculés après chaque ré-assignation. Pour que l'algorithme converge vers le minimum global, il doit pouvoir choisir des points de départ parmi un grand nombre d'individus et utiliser plusieurs réplicats avec des points de départ aléatoires. Le jeu de données utilisé dans ce travail compte plus de 2 700 000 cellules d'écho-intégration et 6 variables (le nombre de composantes principales qui expliquent jusqu'à 96 % de la variance). Pour que l'algorithme converge vers le minimum global, 14 nombres d'itérations ont été testés : 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200. Pour chaque nombre d'itérations, le minimum où l'algorithme a convergé est enregistré. A partir d'un certain nombre d'itérations, ce minimum atteint un plateau, qui correspond au minimum global. Les tests réalisés ont montré que, 100 points de départ aléatoires et 40 itérations étaient nécessaires pour que l'algorithme trouve le minimum global.

Représentation des résultats de la classification

L'appartenance des cellules d'écho-intégration aux groupes est représentée en 2D au moyen d'un code couleur le long de chaque radiale (profondeur \times distance à la côte). Dans un second temps, des cartes des positions géographiques de chaque ESDU de 0.1 MN, sont produites sur lesquelles chaque point représente une ESDU de 0.1 MN et la taille des points représente l'occurrence des cellules du groupe considéré parmi les tranches de profondeur de l'ESDU considérée. Sur chaque carte, les axes d'inertie maximale et minimale sont représentées pour la distribution des ESDU (*sample inertia*) et la distribution des occurrences du groupe considéré (*variable inertia*). La position du centre de gravité renseigne sur la position moyenne de la distribution et les axes d'inertie renseignent sur l'isotropie et la direction de la dispersion de l'occurrence du groupe considéré. Un variogramme (Cressie, 2003) est calculé pour la distribution spatiale des cellules de chaque groupe. L'ordonnée à l'origine donne la part de variance non spatialisée du jeu de données (composante aléatoire de la dispersion des points, et/ou agrégation spatiale non résolue à l'échelle d'échantillonnage). La forme du variogramme indique la présence d'agrégats dans la distribution considérée. La/les portée(s) du variogramme indique la dimension des agrégations à petite et/ou large échelle. Des co-variogrammes sont calculés pour toutes les paires de distributions spatiales des paysages acoustiques. Un co-variogramme positif indique la co-occurrence de deux paysages acoustiques à une échelle donnée. Un co-variogramme négatif indique l'antagonisme de deux paysages acoustiques à une échelle donnée.

Les cellules d'écho-intégration et leurs appartenances aux différents groupes sous la forme d'un code couleur sont également représentées dans le logiciel Globe, afin d'explorer en 3D, la classification.

Globe est un logiciel de représentation cartographique, développé par l'Ifremer, dont l'objectif initial est de visualiser les données acoustiques de la bathymétrie et reconstituer les fonds marins. Le logiciel a récemment évolué pour permettre la visualisation en 3-dimensions de toutes données acoustiques géo-référencées, dont les bancs de poissons détectés par le sondeur

multifaisceaux. Des évolutions sont en cours de développement pour y ajouter les profils des données hydrologiques et de la distribution du plancton.

2.4.2 Résultats

Classification des cellules en fonction de leur réponse fréquentielle

Les résultats présentés sont ceux de l'analyse réalisée sur les Sv centrés avec les paramètres déterminés comme optimaux dans l'analyse de sensibilité : cellules d'écho-intégration de dimension horizontale de 0.1 MN, 5 classes de Sv centrés de longueurs égales, collectés aux fréquences 18, 38, 70, 120 et 200 kHz, et 6 groupes de cellules. La méthode de classification *K-means* est appliquée sur les résultats de l'ACP en considérant les 6 premières composantes principales (CP) qui expliquent 96 % de la variance totale (figure 2.30).

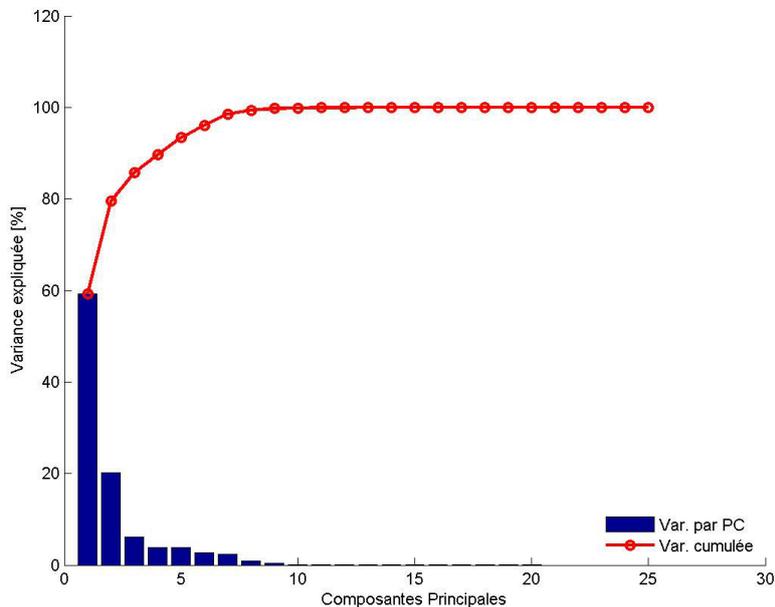


FIGURE 2.30 – Pourcentage de la variance totale expliquée par les composantes principales de l'ACP appliquée au tableau disjonctif complet des Sv centrés.

Pour un nombre de cellules d'écho-intégration total de 2.7 millions, les cellules assemblées dans le groupe 1 (valeurs de Sv factices sous la ligne de fond) représentent presque la moitié des cellules (1.5 millions). Le groupe 6 comprend 2 fois moins de cellules que le groupe 5 (180000 *vs.* 330000). Les nombres de cellules des groupes 2, 3 et 4 sont similaire (290000, 260000 et 270000, respectivement) et proche du nombre de cellules du groupe 5 (figure 2.31).

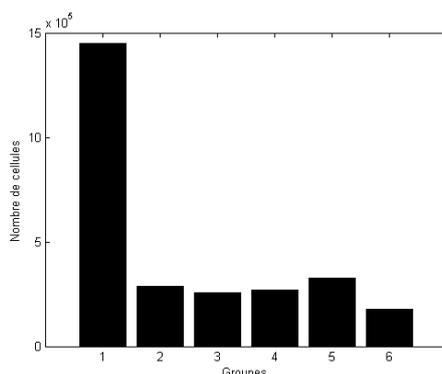


FIGURE 2.31 – Répartition du nombre de cellules total dans les différents groupes issus de la classification ACM-KM.

Les deux premiers plans factoriels de l'ACP représentent 79 % de la variance totale. Cette représentation des résultats de l'ACP renseigne sur deux points : la potentielle redondance entre les variables et les relations entre les groupes d'individus et les variables. Seules 13 variables sur 25 contribuent aux deux premières composantes. Elles sont influencées par les mêmes variables (figure 2.32) : les classes 1 et 2 de toutes les fréquences et les classes 3 des fréquences 70, 120 et 200 kHz. Les fréquences 18 et 38 kHz ont une influence similaire puisque la projection de leurs classes 1 et 2 sont proches. De la même manière, les classes 1 et 2 des fréquences 70 et 120 kHz sont projetées dans des directions similaires. La fréquence 200 kHz se démarque par ses classes 1 et 2. Dans tous les cas, les classes 1 et 2 de chaque fréquence ont des influences opposées. Les classes 3 des fréquences 70, 120 et 200 kHz ont des projections proches et ne sont pas opposées à d'autres variables. Les classes 1 et 2 du tableau disjonctif complet regroupent les valeurs de Sv centrés les plus faibles (-40 à -20 dB pour la classe 1 et -20 à 0 dB pour la classe 2). Cet espace factoriel est influencé par les différences entre les faibles valeurs de Sv des classes 1 et celles des classes 2. Ce sont donc les Sv faibles qui influencent majoritairement la classification.

Dans le plan factoriel des composantes principales 1 et 2, un fort recouvrement est observé entre les groupes 5 et 6 d'une part et entre les groupes 3 et 4 d'autre part. Les groupes 5 et 6 sont influencés par les classes 1 des hautes fréquences (70, 120 et 200 kHz). Ces deux groupes sont donc plus influencés par la faible réponse de leurs cellules aux hautes fréquences que par la forte réponse aux basses fréquences. Les groupes 3 et 4 sont influencés par les classes 1 des basses fréquences (18 et 38 kHz). De la même façon que pour les groupes 5 et 6, la distinction des groupes 3 et 4 repose sur la faible réponse de leurs cellules aux basses fréquences. Le groupe 4 se distingue en étant faiblement influencé par les classes 2 des hautes fréquences (70, 120, 200 kHz). Il s'agit du groupe qui présente les plus faibles valeurs médianes aux basses fréquences. Le groupe 2 est une situation intermédiaire entre ces deux binômes de groupes.

D'après les réponses fréquentielles médianes par groupe, les groupes 2 et 3 semblent représenter les mêmes réflecteurs mais à des densités différentes (figure 2.33). Les caractéristiques multi-fréquentielles qui différencient ces deux groupes sont présentes mais ne sont pas visibles par la seule observation des réponses fréquentielles médianes par groupe. La projection des individus et des variables dans l'espace factoriel des CP 2 et 3 n'explique que 6% de variance supplémentaire et n'apporte pas d'information complémentaire.

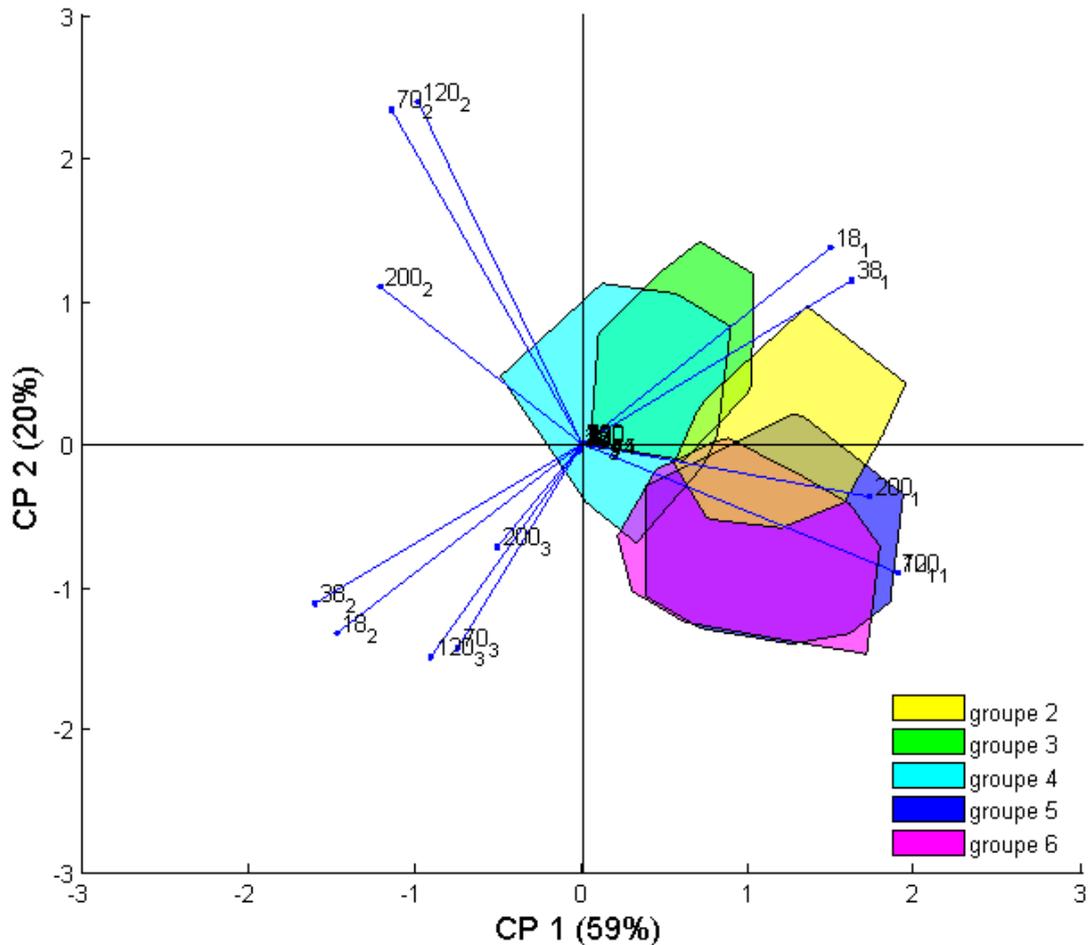


FIGURE 2.32 – Projection de l’aire des groupes de cellules issus de la classification ACM-KM dans les deux premiers plans factoriels.

Les réponses fréquentielles médianes sont calculées par groupe (figure 2.33). Le groupe 1 regroupe les cellules dans lesquelles la réponse acoustique est très faible, ce qui correspond principalement aux cellules en-dessous de la ligne de fond qui ont été seuillées à -100 dB, pour que les analyses statistiques aient pu être réalisées. Ce groupe comprend également les cellules de la colonne d’eau qui ont une réponse acoustique inférieure au seuil d’écho-intégration (-80 dB). Les cellules du groupe 1 sont donc soit des valeurs factices, soit des parties de la colonne d’eau où les échos sont confondus avec le bruit. Les résultats du groupe 1 ne sont pas décrits puisque ce groupe ne présente pas d’autre intérêt que celui de filtrer les cellules qui ne contiennent pas d’information acoustique. Ce groupe représente 52% du nombre total des cellules d’écho-intégration.

La réponse fréquentielle médiane du groupe 4 croit jusqu’aux fréquences 38 et 70 kHz, puis décroît. Elle est caractérisée par une faible densité acoustique sur l’ensemble des fréquences, particulièrement à la fréquence 18 kHz dont la réponse est quasi-absente. Ce groupe représente 10% du nombre total des cellules d’écho-intégration.

La réponse fréquentielle médiane du groupe 5 est globalement plus élevée que celles des groupes 1 et 2 et est dominée par la fréquence 38 kHz. Il représente 12% du nombre total des cellules d’écho-intégration. Les groupes 2 et 3 présentent des réponses fréquentielles médianes de

formes similaires mais de niveaux d'intensités différents. Elles sont caractérisées par une contribution des fréquences 18 et 38 kHz, avec un maxima à 38 kHz. Le groupe 2 représente 10% et le groupe 3 9% du nombre total des cellules d'écho-intégration. La réponse fréquentielle médiane du groupe 6 est également plus importante aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences mais son intensité globale est supérieure à celle des autres groupes. Le groupe 6 représente 6% du nombre total des cellules d'écho-intégration.

Les spectres fréquents des groupes peuvent être reliés à de grands types de réflecteurs. Une réponse plus forte à une fréquence bien déterminée (groupe 5), suggère la présence de réflecteurs dont la fréquence de résonance est proche de 38 kHz (e.g. des bulles de gaz). Les groupes 2, 3 et 6 ont des réponses fréquentielles similaires, plus fortes aux fréquences 18 et 38 kHz. La réponse fréquentielle de ces groupes est vraisemblablement dominée par des organismes porteurs de bulles de gaz dont la fréquence de résonance serait comprise entre 18 et 38 kHz. D'après sa réponse fréquentielle, le groupe 6 comprendrait une grande partie des échos des bancs de poissons. Plus la fréquence de résonance est basse, plus la taille de la bulle de gaz détectée est élevée (Ye, 1997). La réponse fréquentielle du groupe 5 serait dominée par la réponse acoustique de réflecteurs gazeux de plus petite taille que dans le cas des groupes 2, 3 et 6. Ces organismes sont présents à des densités variables, ce qui explique les différences de niveau de réponse acoustique entre les 3 groupes. La réponse acoustique des cellules du groupe 4 pourrait être produite par des réflecteurs du type "Fluid-Like", combinés à des organismes porteurs de bulles de gaz de taille plus réduite que dans les groupes précédents, qui induiraient un pic de résonance entre 38 et 70 kHz. Cependant, l'ensemble de ces observations ne sont que des interprétations de courbes qui s'appuient sur les modèles de réflecteurs théoriques mais qui doivent être comparées à des données biologiques pour être validées.

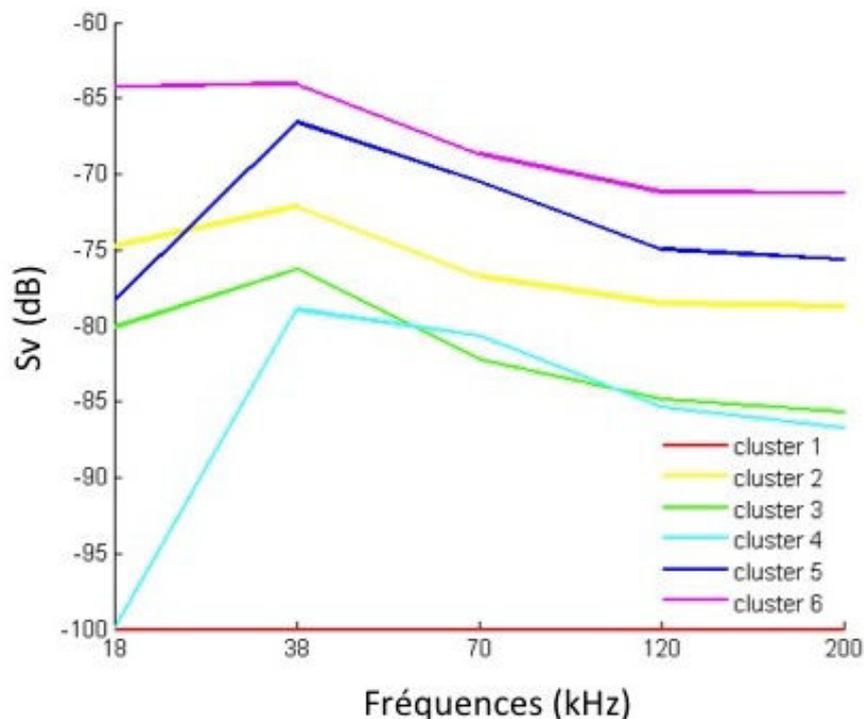


FIGURE 2.33 – Réponses fréquentielles médianes calculées sur les cellules des groupes issus de la classification ACM-KM.

Les distributions de Sv par fréquence et par groupe sont monomodales, relativement symétriques

et peu étendues (figure 2.34). Elles sont donc correctement représentées par leurs médianes pour construire les courbes de réponses en fréquence par groupe.

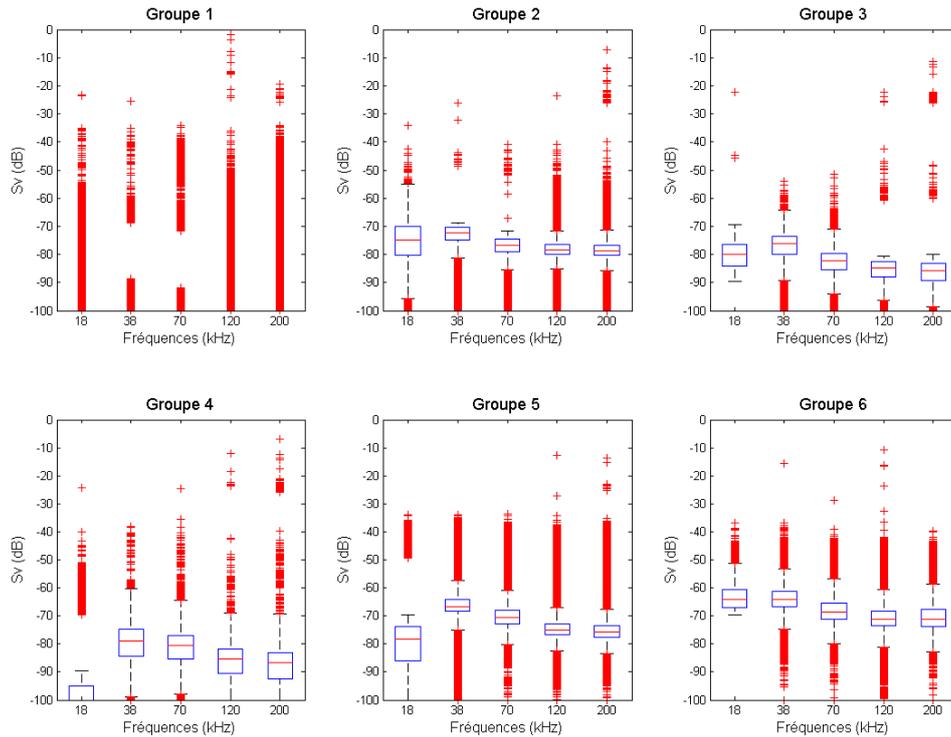


FIGURE 2.34 – Distribution des valeurs de Sv des cellules de chaque groupe (croix rouges) à chaque fréquence. Les boîtes représentent la distributions des Sv entre le 25^e et le 75^e pourcentiles. La barre rouge dans les boîtes représente la médiane de la distribution considérée. Les moustaches des boîtes représentent les valeurs extrêmes de chaque distribution.

Distribution verticale des paysages acoustiques

Nous présentons ici l'exemple des couches diffusantes mises en évidence par la classification ACM-KM à l'échelle d'une radiale (radiale 17). La comparaison entre l'échogramme des cellules classifiées et les échogrammes multifréquences montre que la méthode permet de mettre en évidence des couches diffusantes aux patrons spatiaux structurés, qui évoluent de la côte vers le large (figure 2.35).

Dans la zone des échogrammes dominée par des cellules du groupe 4 (zone I, figure 2.35) les densités acoustiques rétro-diffusées à toutes les fréquences sont très faibles, avec néanmoins un maximum à la fréquence 38 kHz. La zone des échogrammes dominée par des cellules du groupe 6 (zone L) fait partie d'une couche diffusante de surface dont la réponse est globalement forte, avec un maximum en 38 kHz, ce qui correspond également à la réponse fréquentielle médiane du groupe. La zone des échogrammes dominée par des cellules du groupe 3 (zone K) correspond à une zone où la réponse est très faible à toutes les fréquences mais légèrement plus forte au 38 kHz. La zone des échogrammes dominée par des cellules du groupe 2 (zone M) correspond à une zone où la réponse est faible à toutes les fréquences, mais néanmoins plus fortes que la zone K et légèrement plus forte au 38 kHz. La zone des échogrammes dominée par des cellules du groupe 5 (zone J) correspond bien à une zone où l'intensité acoustique est plus forte en 38 kHz et au centre d'une couche diffusante plus dense que la quasi-totalité du reste de la colonne

d'eau. L'échogramme représentant les résultats de la classification synthétise correctement l'information multifréquence des données. La méthode de classification ACM-KM construit des groupes de cellules dont les réponses fréquentielles sont distinctes et qui représentent des structures cohérentes par rapport aux échogrammes multifréquences.

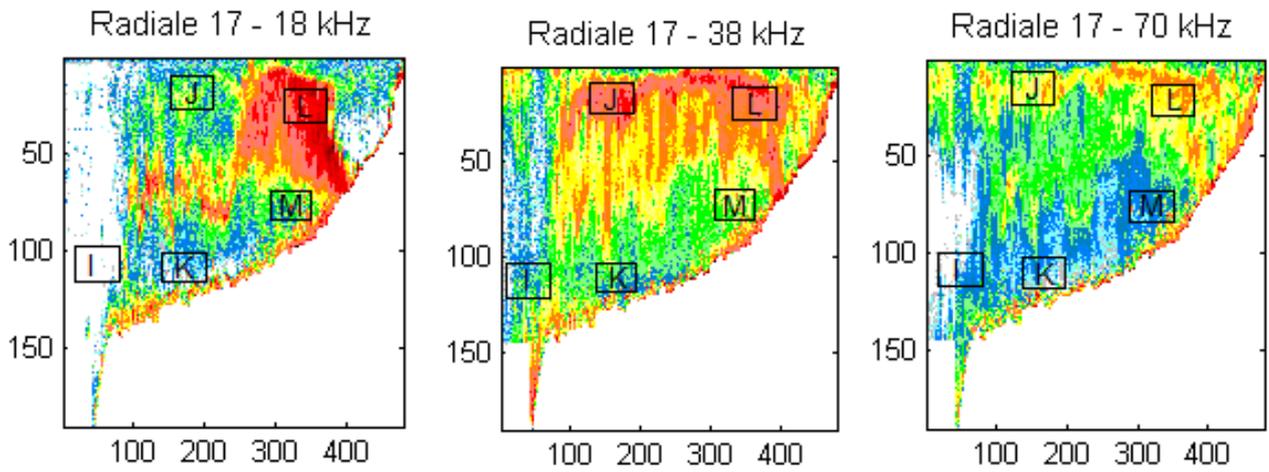
Les résultats des autres radiales sont présentés dans les figures 2.36, 2.37 et 2.38. Les couches diffusantes du groupe 6 sont toujours situées près du fond dans le sud du golfe (radiales < 11). Elles sont bien décollées du fond et toujours dans ou avec les couches diffusantes du groupe 5 dans la partie nord du golfe (radiales ≥ 11).

Les couches diffusantes du groupe 5 sont principalement situées dans la colonne d'eau. Elles sont au large sur les radiales 1 à 5 et plus proches de la côte sur les autres radiales. Dans les zones côtières, les couches diffusantes du groupe 5 s'étalent sur l'ensemble de la colonne d'eau. Plus au large, elles sont proches du fond sur les radiales 1 et 2 mais plutôt en surface sur le reste des radiales.

Les couches diffusantes des groupes 2 et 3, se situent en surface dans les zones côtières du sud du golfe (radiales 1 à 12) et s'étalent entre 80 m et le fond sur les radiales 12 à 21. Sur les radiales du nord (22 à 24), elles occupent la grande majorité de la colonne d'eau. Au milieu du golfe, pour des sondes de 100 m, les groupes 2 et 3 sont situés près du fond.

Les couches diffusantes du groupe 4 sont positionnées partout ailleurs, dans les eaux du large. Elles sont plus importantes sur les radiales du sud du golfe (1 à 11).

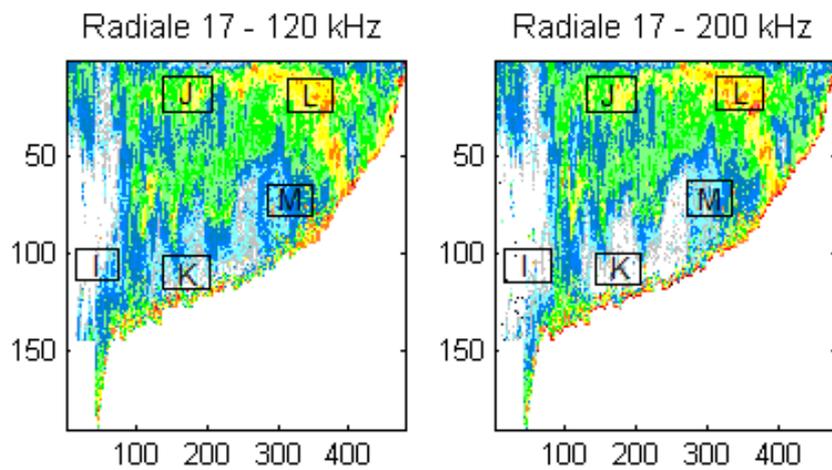
Les couches diffusantes aux patrons spatiaux verticaux cohérents dessinent des paysages acoustiques du golfe de Gascogne. La distribution verticale des groupes de cellules est intéressante lorsque l'on s'intéresse à une radiale en particulier, mais cette visualisation n'est pas optimale lorsque l'on souhaite observer les variations inter-radiales des couches.



(a) Echogramme 18 kHz

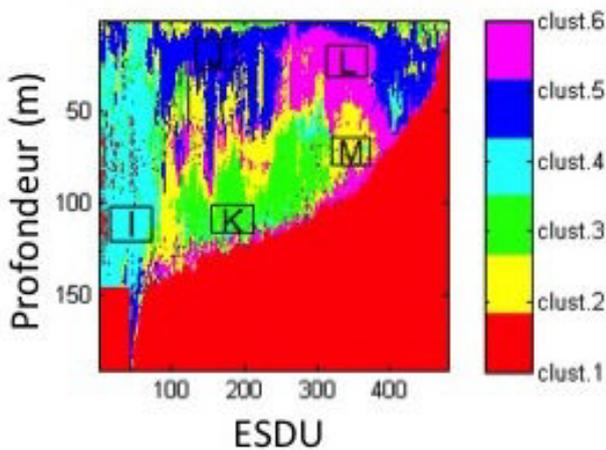
(b) Echogramme 38 kHz

(c) Echogramme 70 kHz

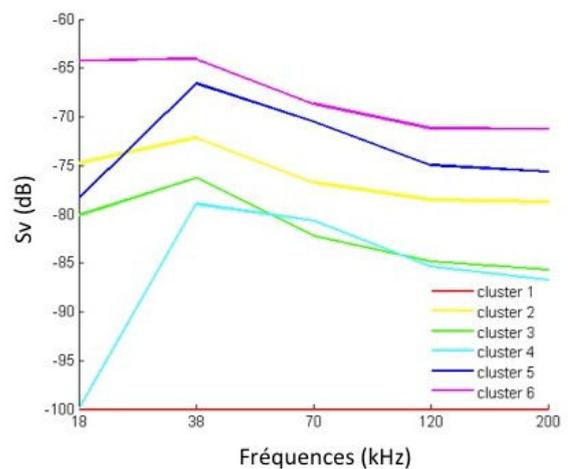


(d) Echogramme 120 kHz

(e) Echogramme 200 kHz



(f) Résultats de la classification des cellules



(g) Réponses fréquentielles médianes

FIGURE 2.35 – Comparaison de l'échogramme des cellules classifiées selon la méthode ACM-KM (f) aux échogrammes multifréquences (a) à (e). Les couleurs de la figure (f) correspondent aux différents groupes de cellules. Les cadres noirs montrent des zones caractéristiques de chaque groupe. zone I : groupe 4, zone J : groupe 5, zone K : groupe 3, zone L : groupe 6, zone M : groupe 2.

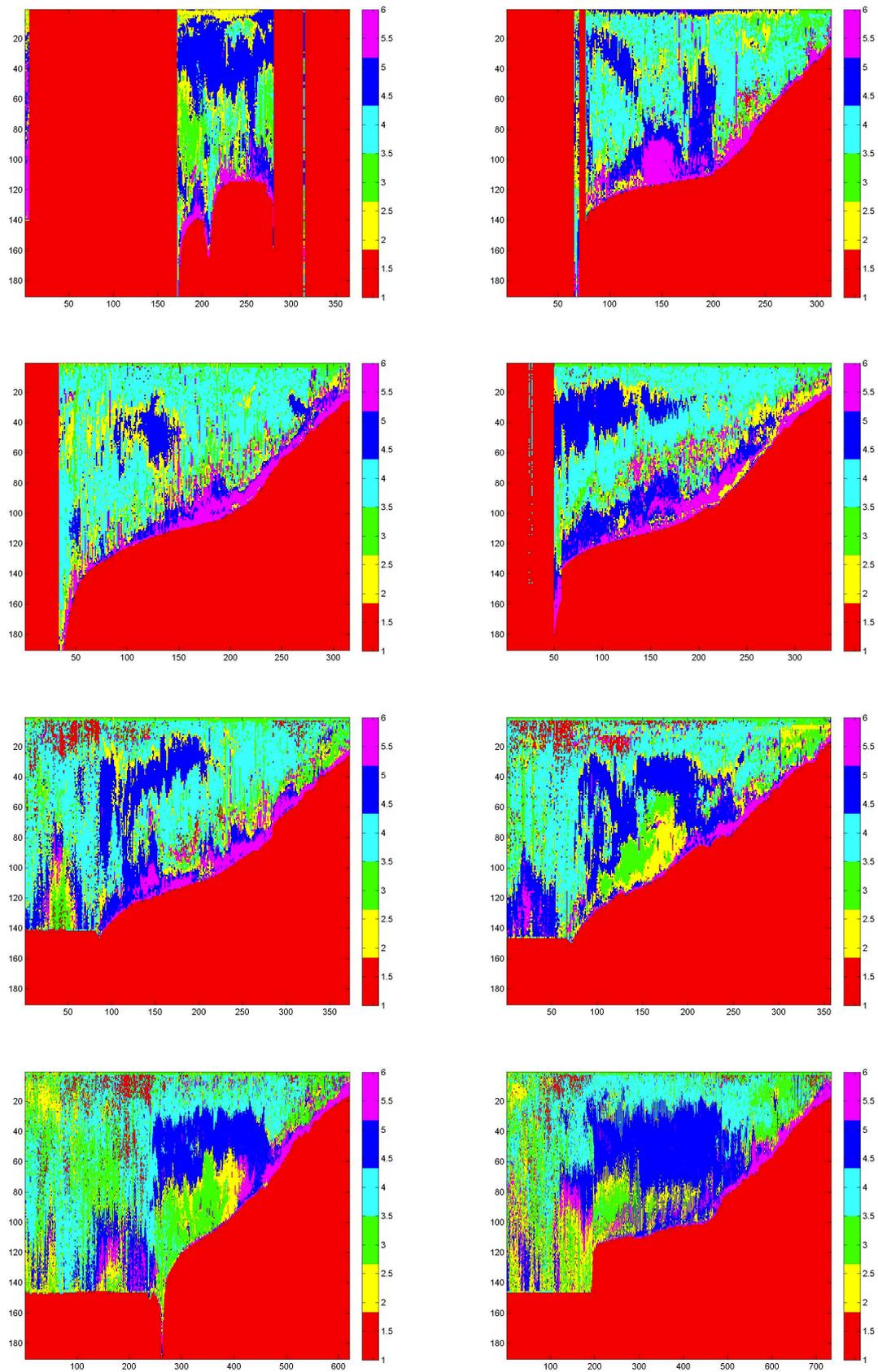


FIGURE 2.36 – Cartographie des cellules le long des radiales 1 à 8, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.

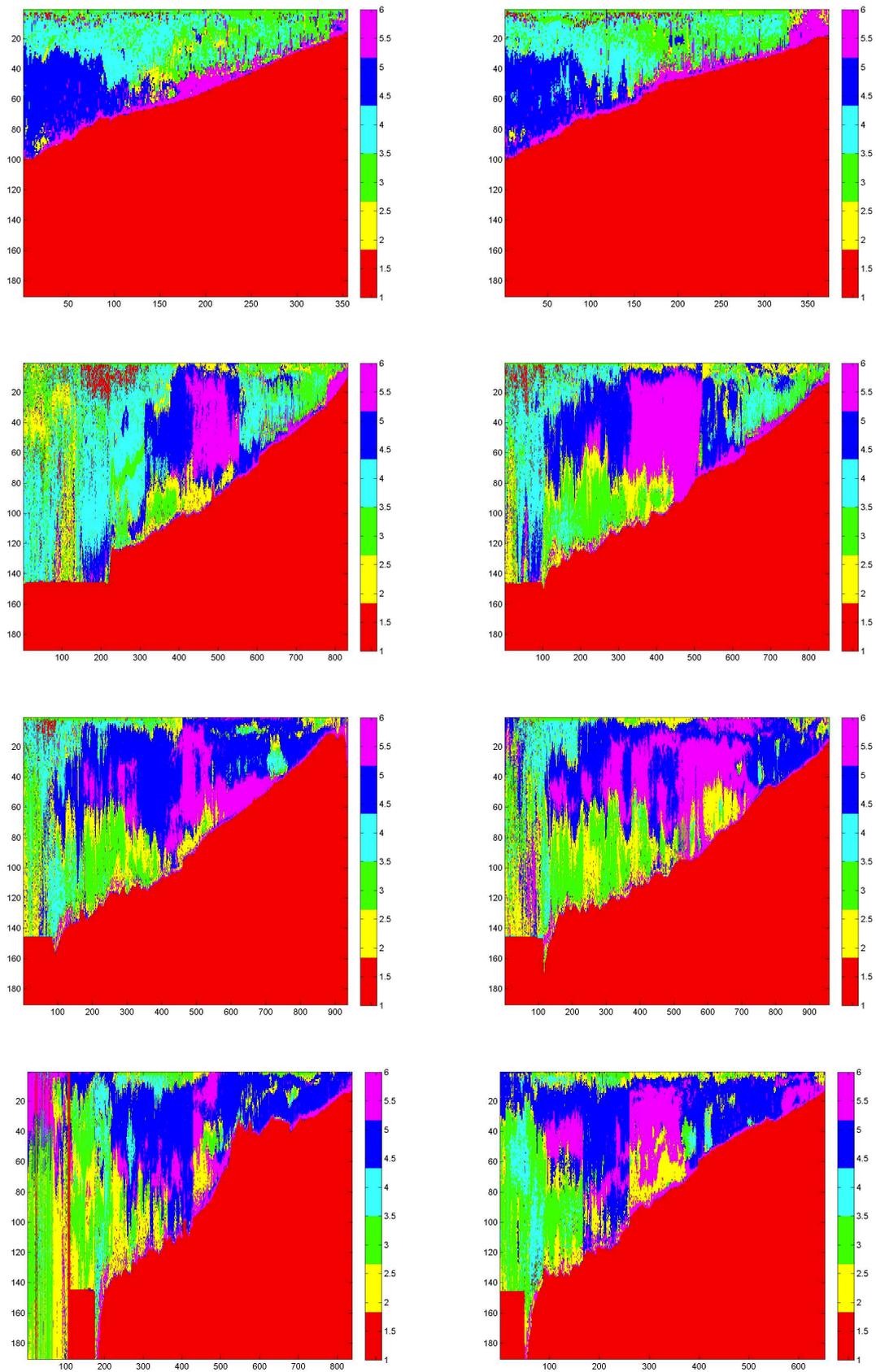


FIGURE 2.37 – Cartographie des cellules le long des radiales 9 à 16, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.

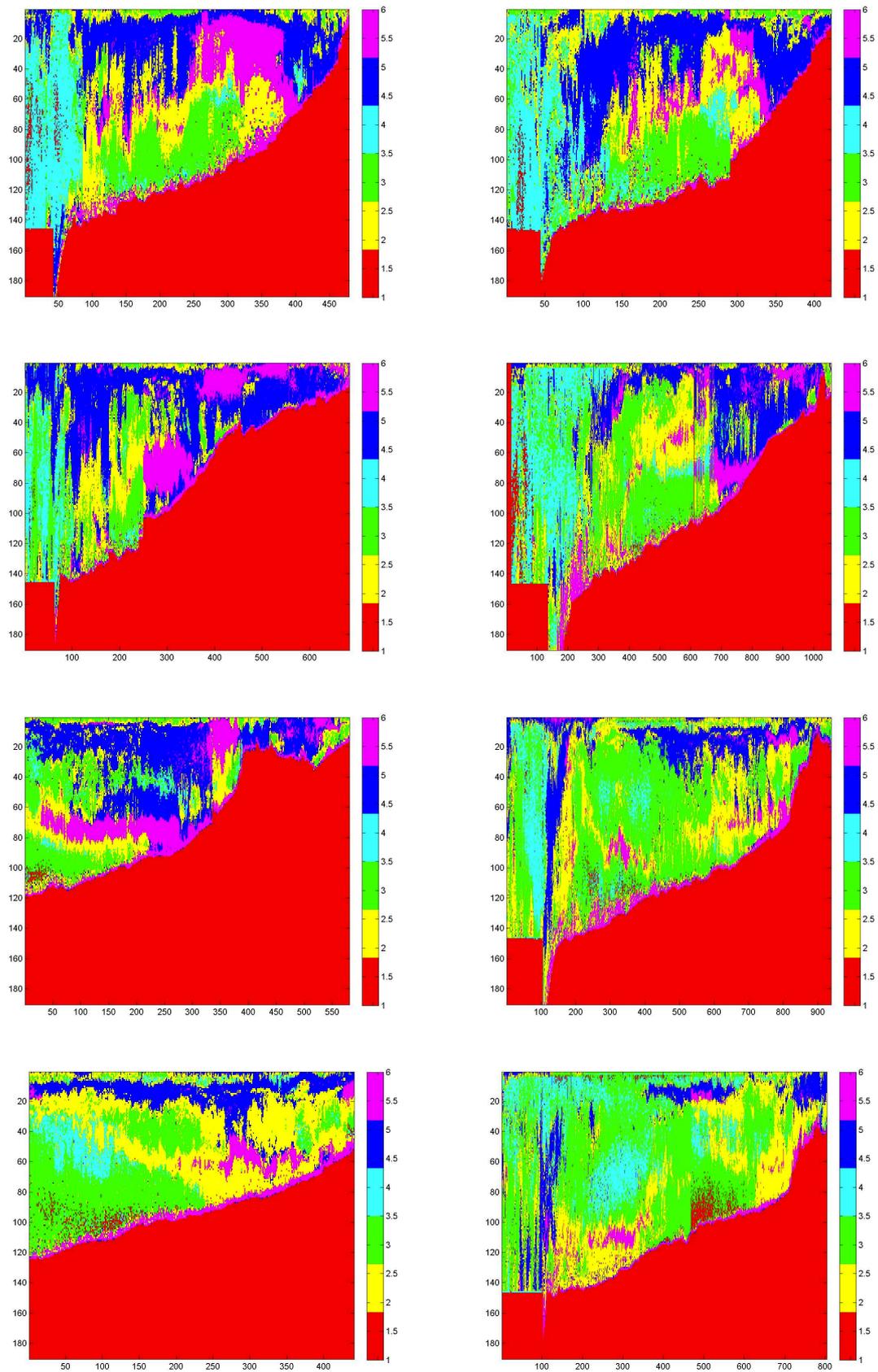


FIGURE 2.38 – Cartographie des cellules le long des radiales 17 à 24, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.

Distribution horizontale des paysages acoustiques

Après intégration de l'information sur la dimension verticale, le groupe 2 est présent sur l'ensemble du golfe avec des maxima d'occurrence dans le nord du golfe près de la côte et proche du talus (figure 2.39). Ce groupe représente 21% des cellules d'écho-intégration de la colonne d'eau. D'après le décalage des centres de gravité, la distribution spatiale du groupe 2 est dominée par une plus forte occurrence dans la partie nord du golfe. Le variogramme de la distribution spatiale du groupe 2 (figure 2.40) est croissant, aucune échelle spatiale ne peut être déterminée avec cette échelle d'échantillonnage.

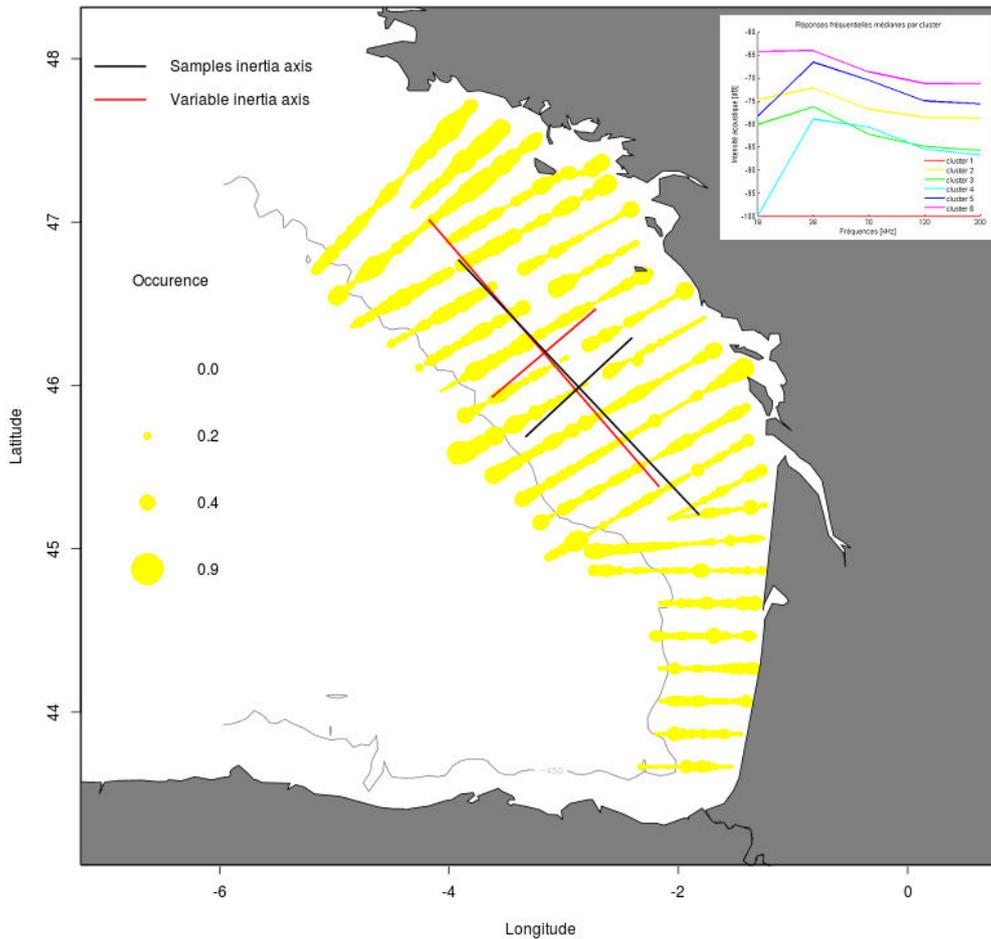


FIGURE 2.39 – Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 2. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.

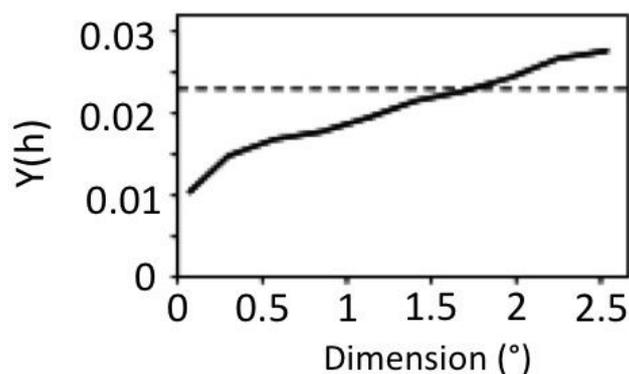


FIGURE 2.40 – Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 2.

Comme observé sur les coupes 2D des radiales, le groupe 3 est moins omniprésent que le groupe 2 sur l'ensemble du golfe (figure 2.41). Il présente des maxima d'occurrence dans le nord du golfe, aux mêmes endroits que les maxima du groupe 2. Dans le reste du golfe le groupe 3 présente des maxima près du talus dans le milieu du golfe et près de la côte à la latitude de l'embouchure de la Gironde. La distribution globale des cellules du groupe 3 est plutôt au nord et en direction du talus. Ce groupe représente 19% des cellules de la colonne d'eau. Le variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence des cellules du groupe 3 montre un premier palier autout de 0.8° , indiquant que ce groupe présente des agrégations dont la taille moyenne est proche de 50 MN. A plus large échelle, le variogramme est croissant, aucune échelle de structuration spatiale ne peut être déterminée avec cet échantillonnage.

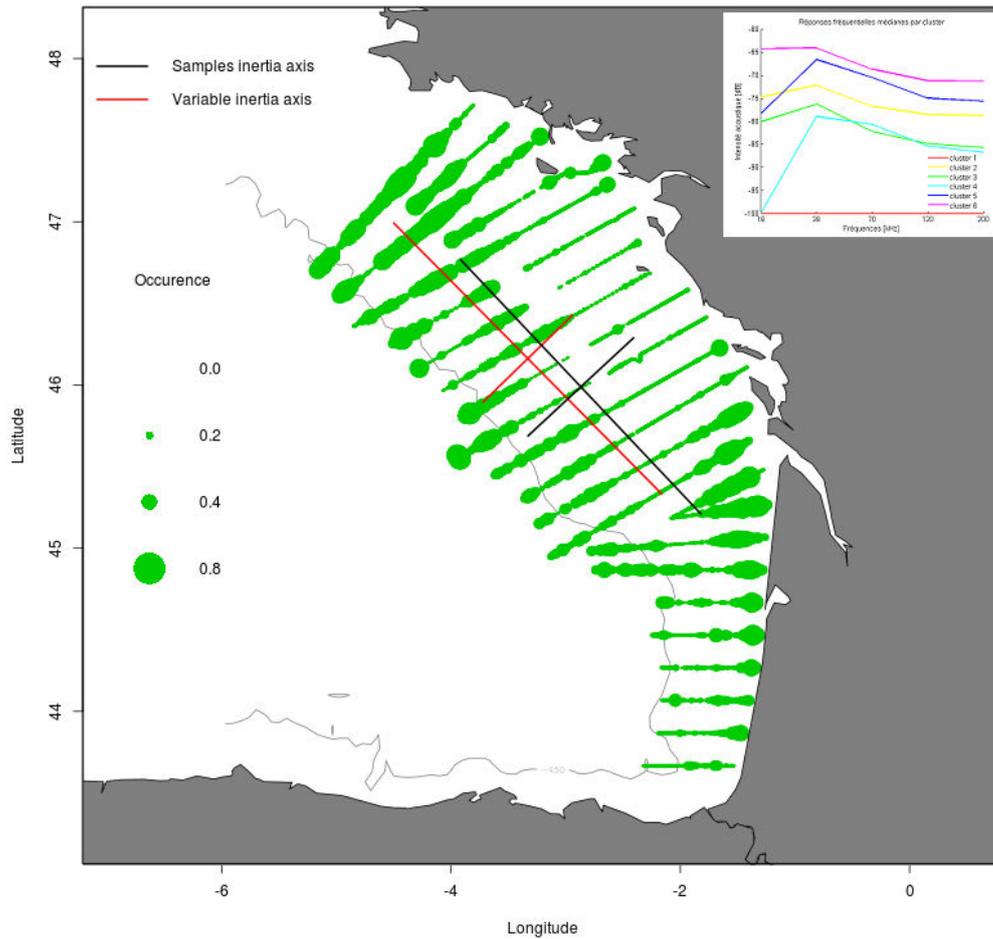


FIGURE 2.41 – Distribution spatiale de l’occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 3. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.

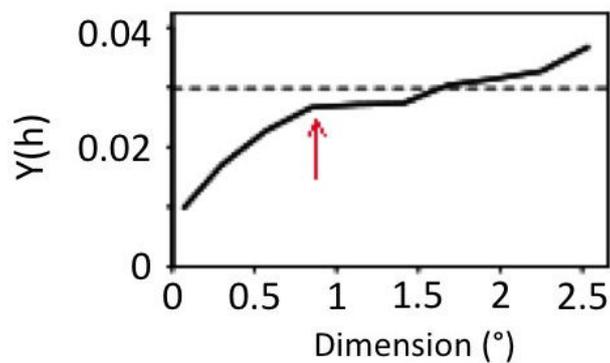


FIGURE 2.42 – Variogramme de la distribution spatiale de l’occurrence du groupe 3. La flèche rouge indique une portée à 0.8° .

Les cellules appartenant au groupe 5 sont distribuées sur la partie côtière du plateau continental entre les embouchures de la Gironde et de la Loire et près du talus du sud au nord du golfe (figure 2.43). Le centre de gravité des axes d’inertie de la distribution spatiale du groupe

sont proches de ceux des échantillons. Ce groupe représente 24% des cellules de la colonne d'eau. Le variogramme de la distribution spatiale des cellules du groupe 5 identifie une première portée à 0.5° indiquant des agrégations dont la taille moyenne est de l'ordre de 30 MN et une seconde portée autour de 2° indiquant des agrégations à plus large échelle dont la taille moyenne est l'ordre de 120 MN.

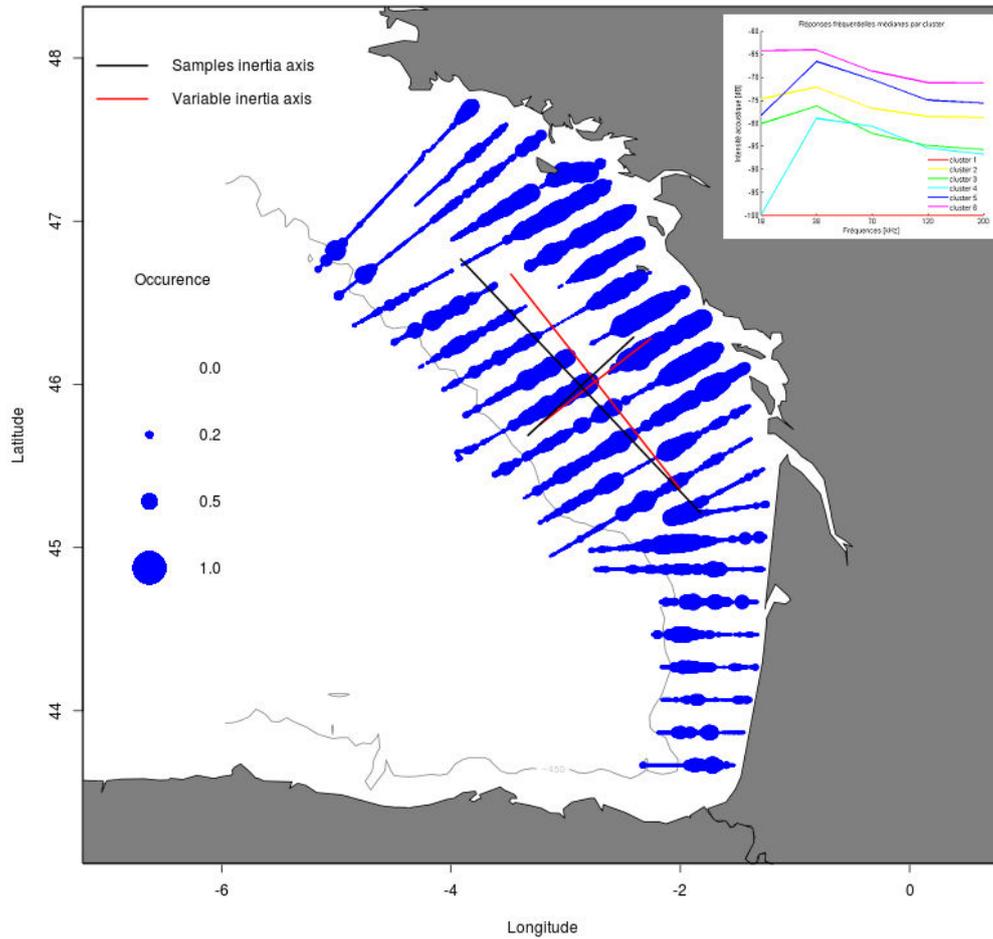


FIGURE 2.43 – Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 5. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.

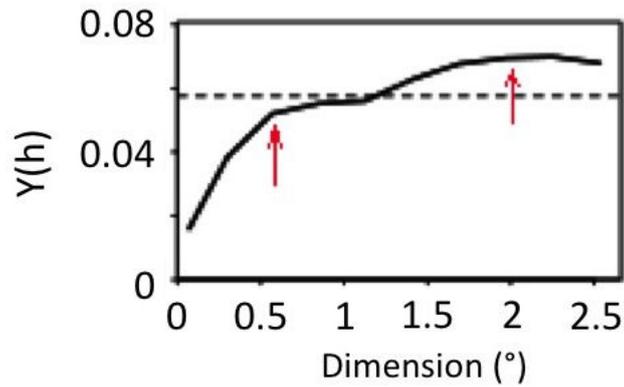


FIGURE 2.44 – Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 5. Les flèches rouges indiquent des portées à 0.5° et à 2° .

Le groupe 6 présente une distribution en agrégats de plus petites dimensions que ceux du groupe 5. Les agrégations des cellules du groupe 6 sont localisées très près de la côte du nord de l'embouchure de la Loire au sud de l'embouchure de la Gironde (figure 2.45). Un deuxième maximum d'occurrence est situé au centre du golfe en milieu de plateau continental. La distribution spatiale de ce groupe est globalement plus méridionale et côtière. Ce groupe ne représente que 13% des cellules de la colonne d'eau. Le variogramme présente une portée à 0.5° indiquant des agrégations de cellules dont la taille moyenne est de l'ordre de 30 MN.

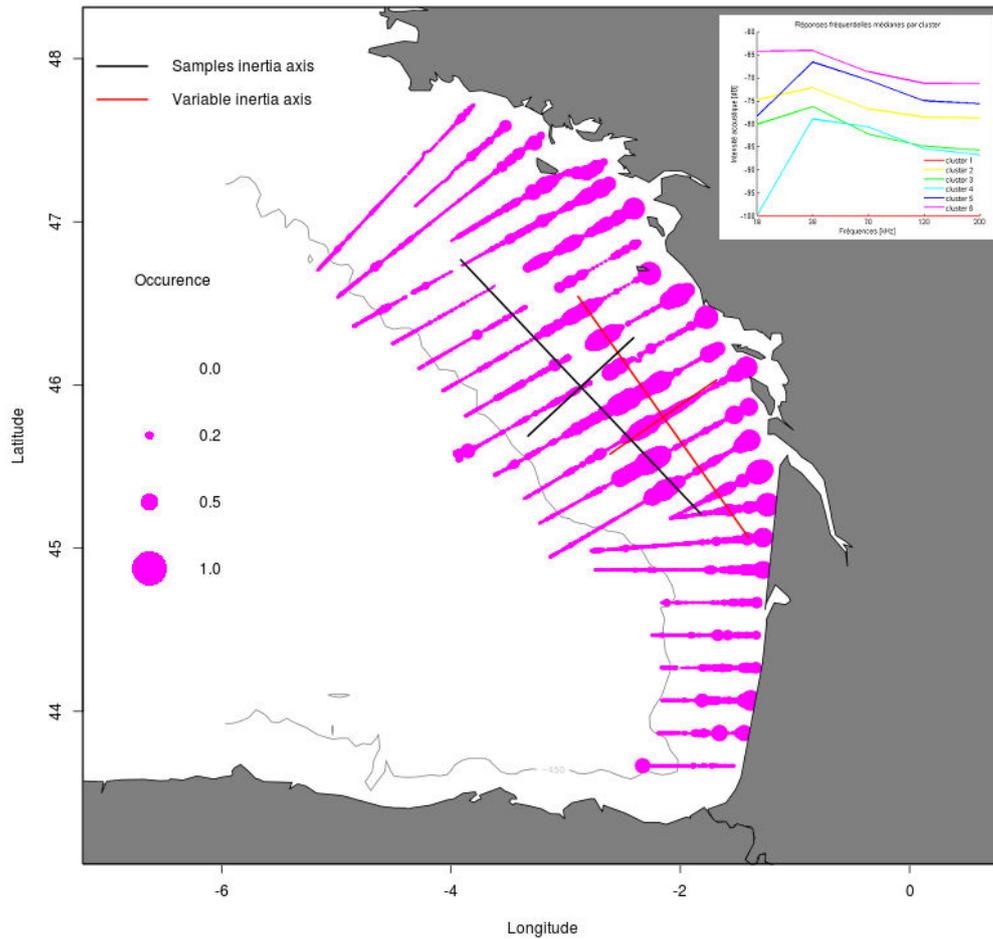


FIGURE 2.45 – Distribution spatiale de l’occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 6. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.

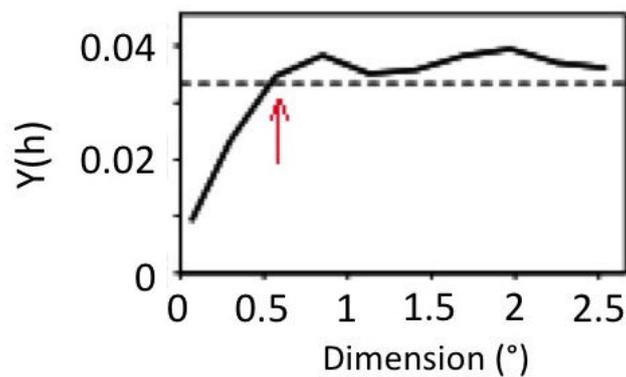


FIGURE 2.46 – Variogramme de la distribution spatiale de l’occurrence du groupe 6. La flèche rouge indique une portée à 0.5° .

La distribution des cellules du groupe 4 est clairement restreinte à la partie sud du golfe (de l’extrême sud jusqu’à nord de l’embouchure de la Gironde), avec des maxima locaux qui

suivent le talus continental jusqu'au nord du golfe (figure 2.47). La distribution spatiale de ce groupe est globalement plus au large et légèrement décalée vers le sud. Les cellules de ce groupe représentent 20% des cellules de la colonne d'eau. Le variogramme de la distribution spatiale du groupe 4 n'identifie pas de structure agrégative aux échelles échantillonnées.

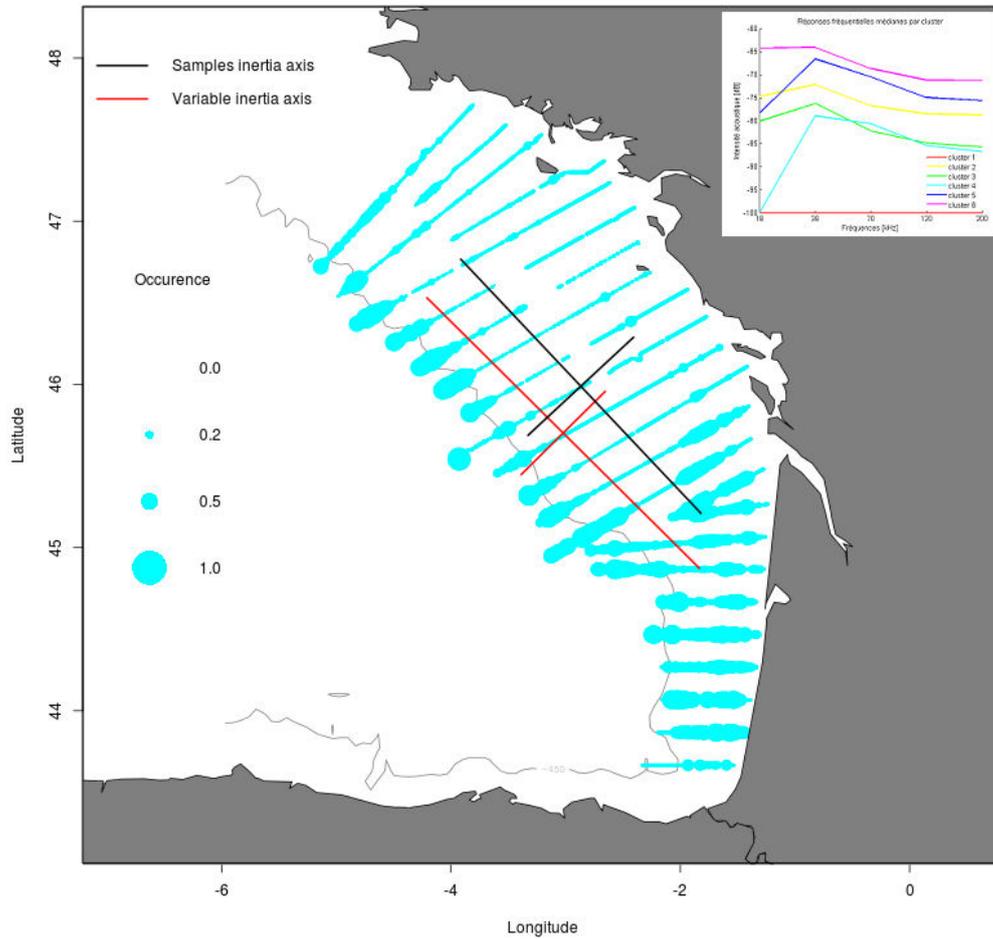


FIGURE 2.47 – Distribution spatiale de l'occurrence des cellules du groupe 4. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.

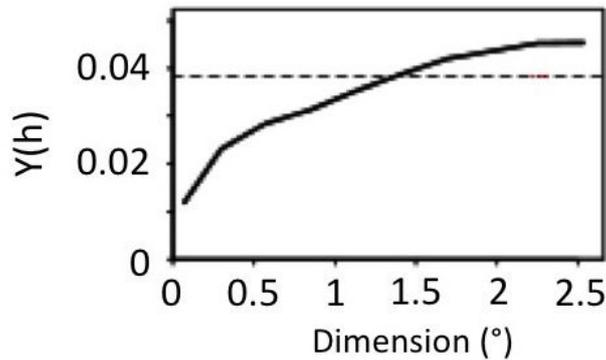


FIGURE 2.48 – Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 4.

Le co-variogramme des groupes 2 et 3 montre un antagonisme entre les distributions des groupes à petite échelle (< 60 MN) mais une co-occurrence des groupes à plus large échelle (120 MN). Cela indique que les agrégations des cellules de ces deux groupes à petite échelle ne sont pas positionnées aux mêmes endroits mais qu'à l'échelle d'une radiale acoustique (ou l'équivalent en inter-radiale), les groupes 2 et 3 sont présents ou absents de la même manière. Le co-variogramme des groupes 3 et 4 montre une relation similaire : un antagonisme entre les distributions des deux groupes à petite échelle (< 30 MN) mais une co-occurrence à plus large échelle (100 MN). Ces trois co-variogrammes montrent qu'à large échelle, le groupe 3 est similaire aux groupes 2 et 4, mais pas de la même manière. L'observation des réponses fréquentielles médianes indiquait un potentiel rassemblement des cellules du groupe 2 et du groupe 3. Or, l'antagonisme des distributions spatiales de ces groupes à petite échelle valide la séparation de ces deux groupes.

Le co-variogramme des groupes 5 et 6 montre que les deux groupes sont antagonistes jusqu'à 100 MN et qu'au-delà ils sont co-occurents. Cela signifie qu'à l'échelle d'une radiale les groupes 5 et 6 ne sont pas situés aux mêmes endroits mais à échelle plus large, leurs patrons spatiaux sont similaires. Les autres co-variogrammes indiquent un antagonisme entre les autres groupes à toutes les échelles.

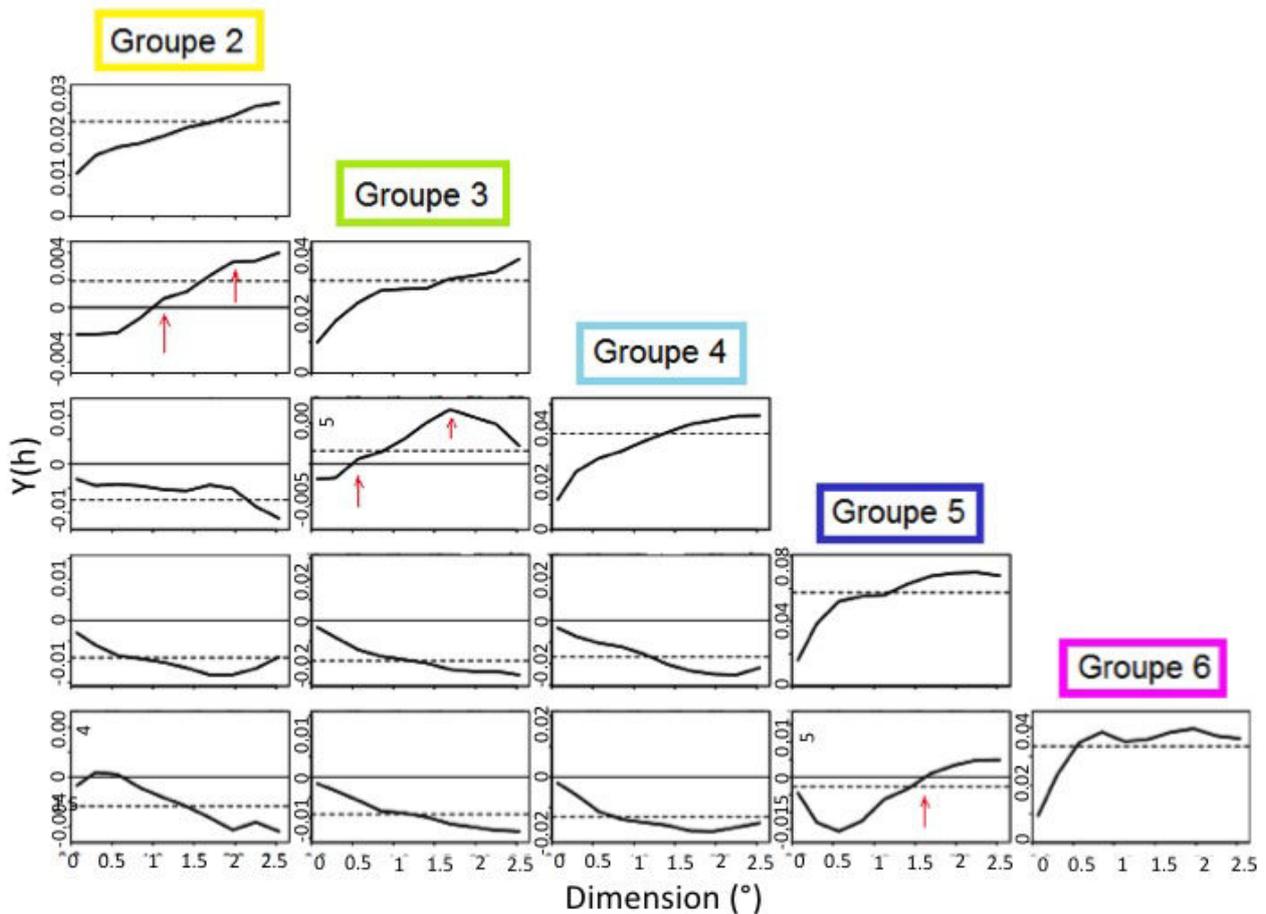


FIGURE 2.49 – Co-variogrammes pour toutes les paires des distributions spatiales des groupes. Le premier graphique de chaque colonne est un rappel du variogramme expérimental du groupe. Les co-variogrammes sont positionnés aux croisements des lignes et des colonnes. Les flèches rouges indiquent les portées des co-variogrammes.

D'après les formes des réponses fréquentielles médianes, une forte densité de réflecteurs porteurs de bulle de gaz de différentes tailles, serait présente dans le centre du golfe, en milieu de plateau et près de la côte (groupes 5 et 6). De plus faibles densités de réflecteurs porteurs de bulle de gaz s'observeraient dans les panaches, dans la partie sud et à l'extrême nord du golfe (groupe 3). La partie sud du golfe serait dominée par des réflecteurs plus faibles ou des réflecteurs porteurs de bulles de gaz de plus petite taille. Ces résultats traduisent l'omniprésence de couches diffusantes dominées par des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse.

Distribution en 3D des groupes

Le logiciel Globe permet d'explorer en 3D et à plusieurs échelles la répartition des cellules d'écho-intégration en fonction de leur appartenance aux groupes de la classification ACM-KM (figure 2.50). Cependant, cette représentation n'apporte pas d'information supplémentaire lorsqu'elle est considérée sur papier.

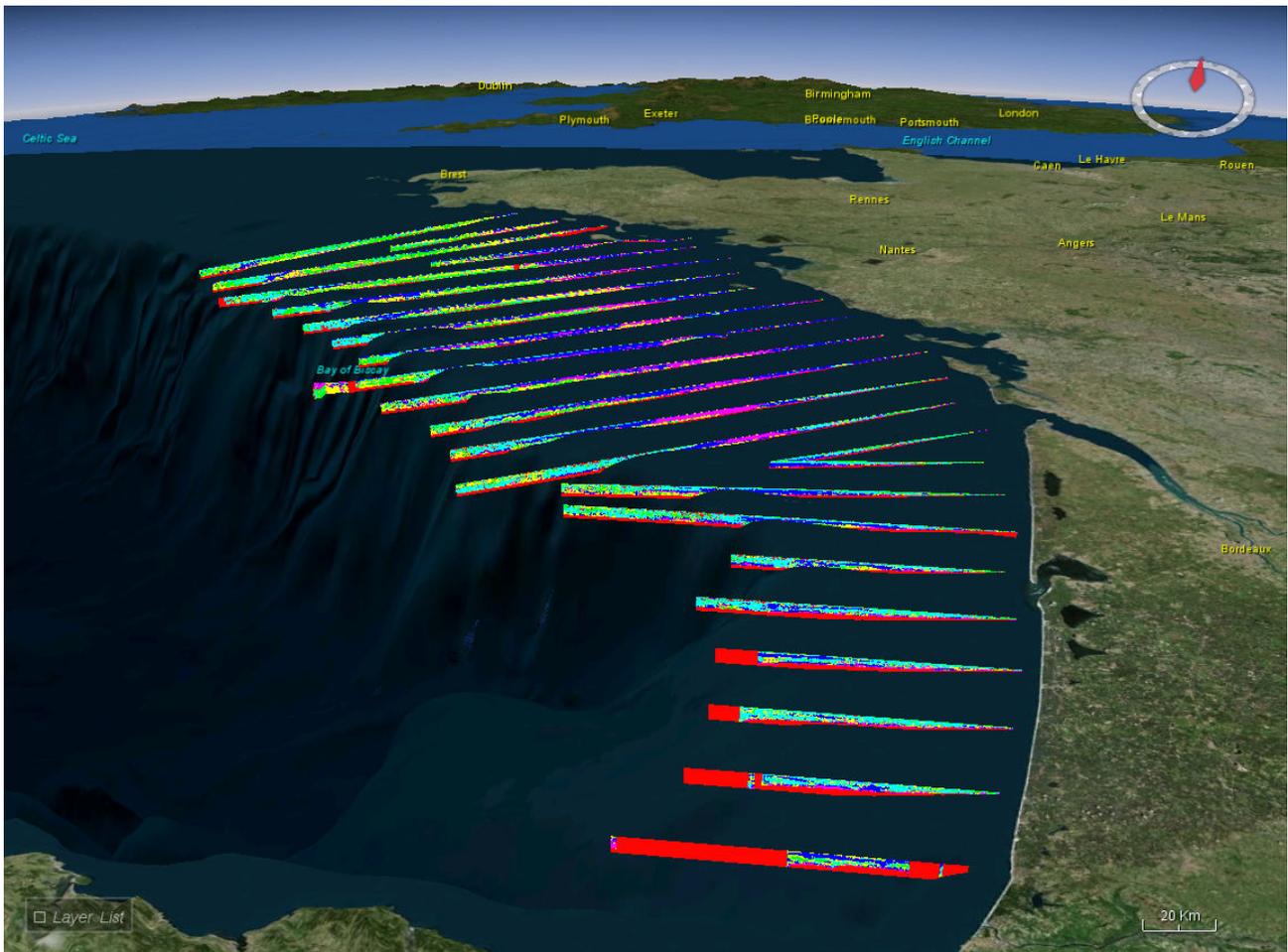


FIGURE 2.50 – Cartographie des cellules en 3 dimensions dans le logiciel Globe, selon les groupes issus de la classification.

Dans le nord du golfe de Gascogne, les cellules du groupe 2 sont plus nombreuses près de la côte (figure 2.51). Dans le milieu du golfe, la distribution des cellules du groupe 2 est restreinte à une zone proche du fond, entre 80 et 120 m de sonde. Dans le sud du golfe, les cellules du groupe 2 sont encore moins présentes mais équi-réparties sur la longueur des radiales.

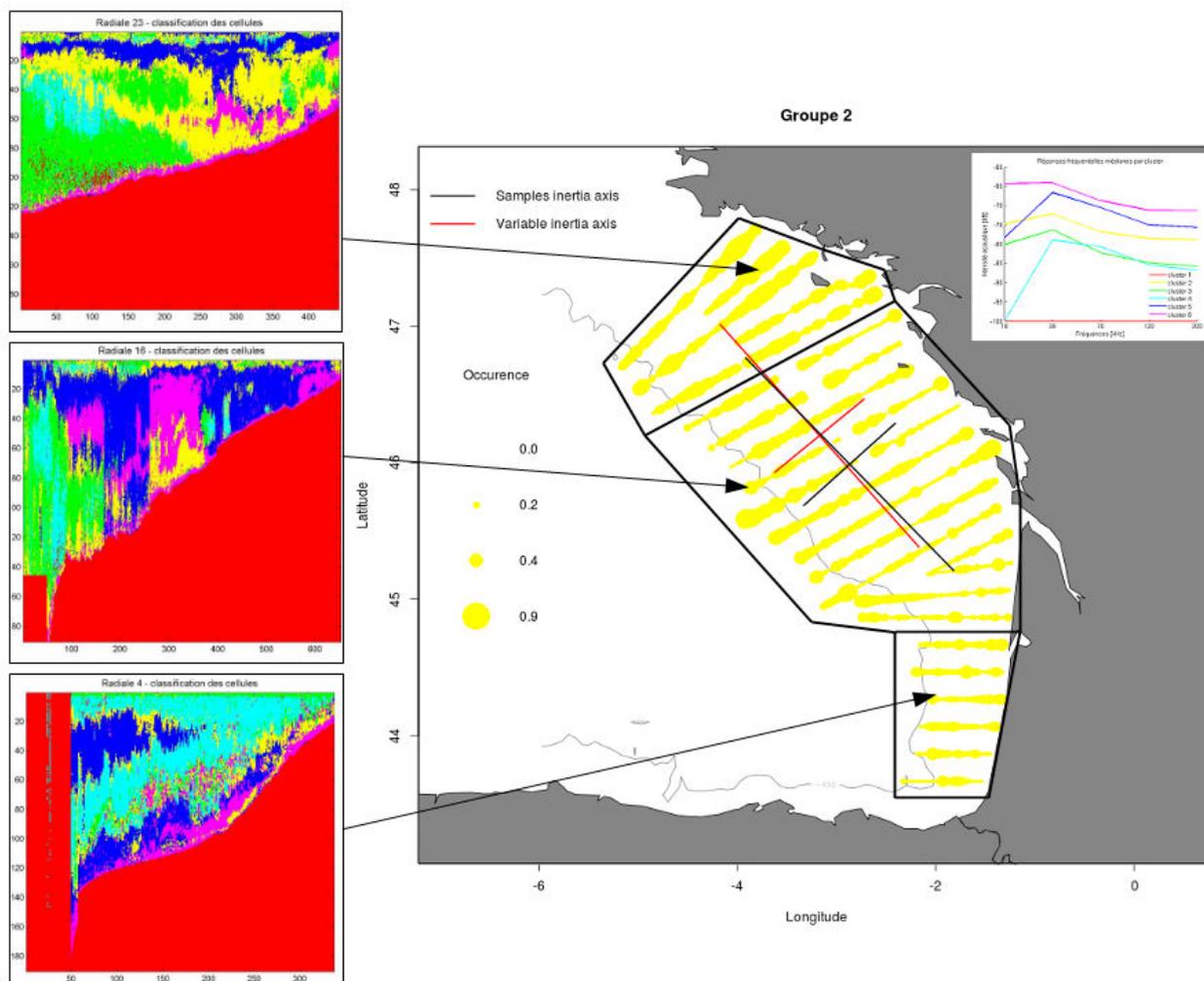


FIGURE 2.51 – Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 2 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 2 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrent les patrons verticaux rencontrés dans chaque zone.

Dans le nord du golfe de Gascogne, les cellules du groupe 3 occupent une grande partie de la colonne d'eau (figure 2.52) le long des radiales. Plus au sud, les cellules du groupe 3 sont présentes sur une grande partie de la colonne d'eau mais dans la partie des radiale qui est proche du talus. Aux latitudes autour de l'embouchure de la Gironde, le groupe 3 est très présent près de la côte mais très peu vers le talus. Dans le sud du golfe, les cellules du groupe 3 sont très peu présentes.

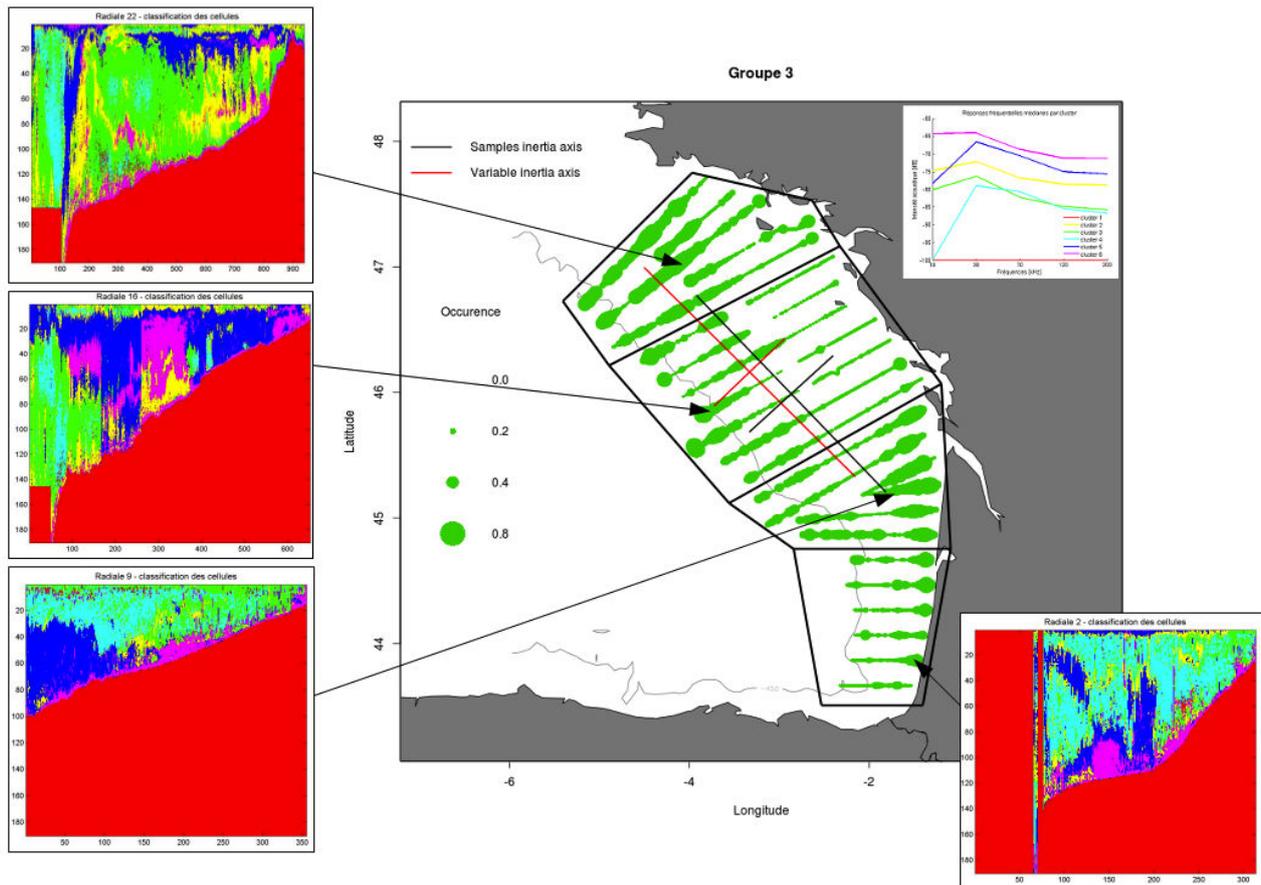


FIGURE 2.52 – Carte de la distribution de l’occurrence des cellules du groupe 3 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 3 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrent les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.

Du nord du golfe de Gascogne, jusqu’à au nord de l’embouchure de la Gironde, les cellules du groupe 4 sont présentes sur l’ensemble de la colonne d’eau mais dans la partie des radiales situées au-delà du talus (figure 2.53). A partir de l’embouchure de la Gironde et jusqu’au sud du golfe, le groupe 4 est très présent tout le long des radiales et sur l’ensemble de la colonne d’eau.

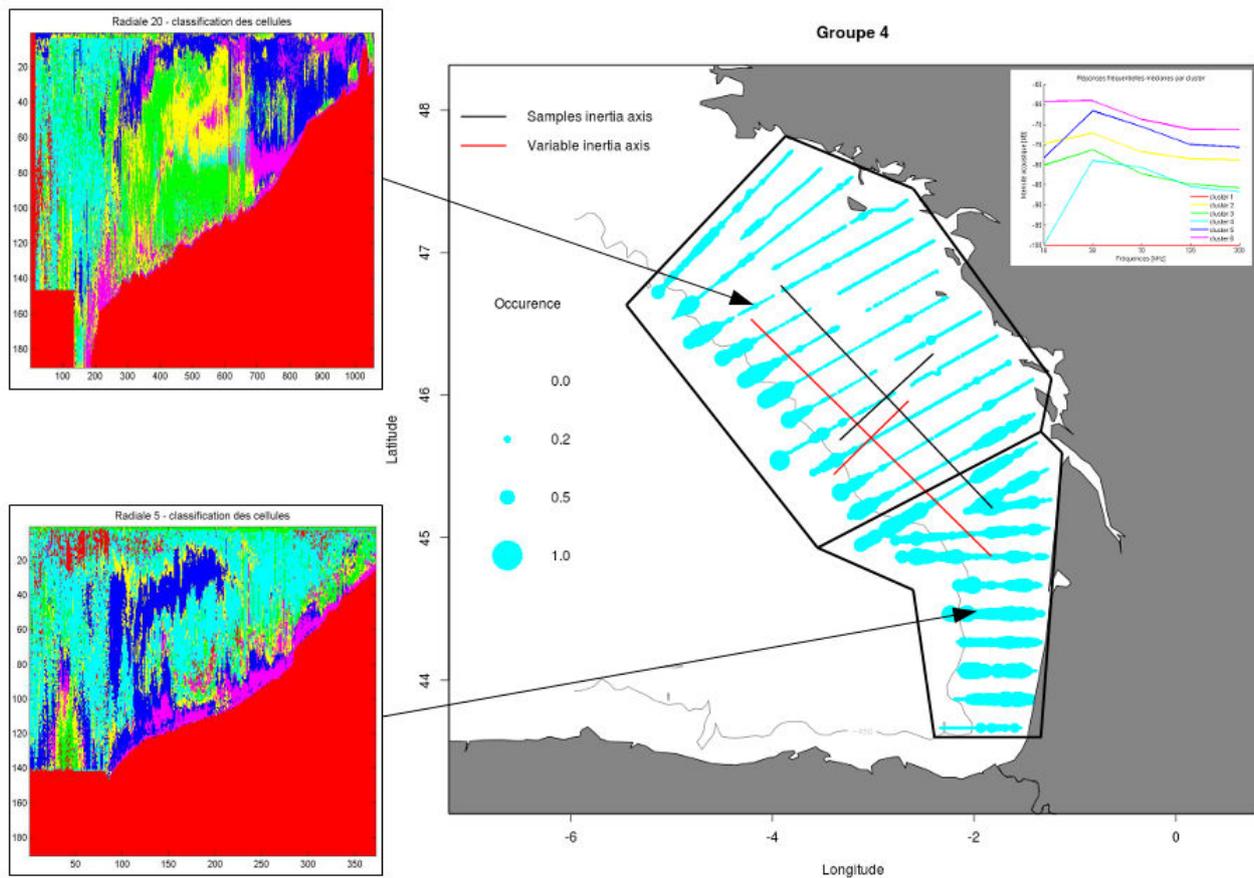


FIGURE 2.53 – Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 4 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 4 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.

Du sud du golfe de Gascogne au nord de l'embouchure de la Gironde, et le long des trois radiales du nord du golfe, les cellules du groupe 5 sont regroupées en agrégats de petite dimension, localisés soit à la côte, soit près du talus. Dans la partie centrale du golfe de Gascogne près de la côte, les cellules du groupe 5 sont très présentes dans la colonne d'eau. En milieu de plateau, le groupe 5 est présent jusqu'au talus, sur d'importantes parties de la colonne d'eau et sont mélangées avec les cellules du groupe 6. Au nord, les cellules du groupe 6 sont regroupées en agrégats de petite dimension et proches de la côte.

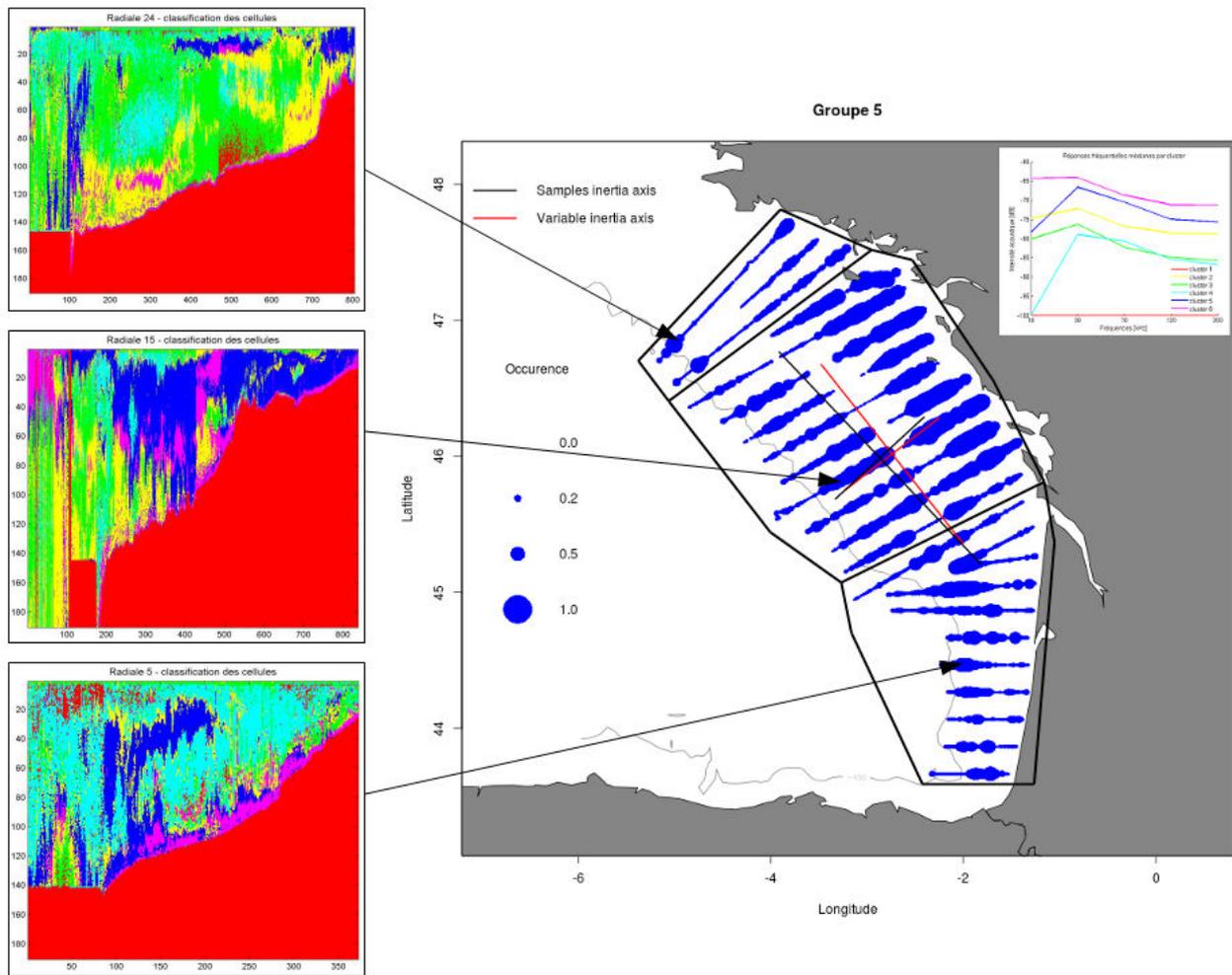


FIGURE 2.54 – Carte de la distribution de l’occurrence des cellules du groupe 5 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 5 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.

Les cellules du groupe 6 sont essentiellement distribuées près du fond et près de la côte. Entre le nord de l’embouchure de la Gironde et le sud de l’embouchure de la Loire, les cellules du groupe 6 sont, en plus, présentes près de la côte sous la forme d’agrégations très étendues dans la colonne d’eau, mélangées aux cellules du groupe 5.

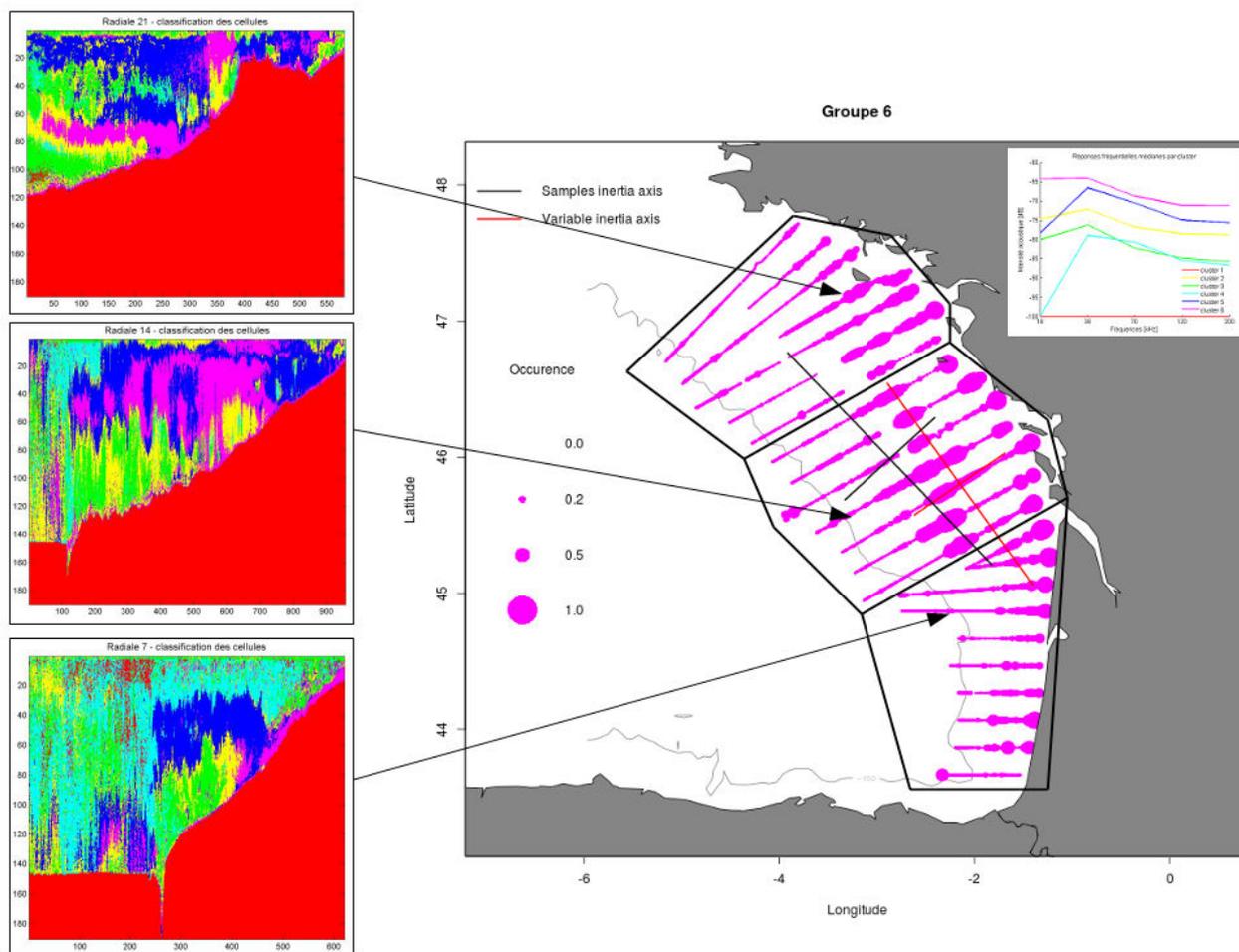


FIGURE 2.55 – Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 6 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 6 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.

2.4.3 Discussion

La caractérisation acoustique des couches diffusantes à toutes les profondeurs est limitée par l'augmentation du volume du faisceau des échosondeurs avec la profondeur, ce qui réduit la résolution de l'échantillonnage spatial des couches loin du transducteurs. Cette perte de résolution bruite les données multifréquences collectées dans les couches diffusantes les plus profondes, en augmentant la probabilité de mélanger plusieurs types de réflecteurs différents dans le même volume d'échantillonnage. Cet effet est particulièrement sensible dans un écosystème dominé par les réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse (GB), dont la réponse acoustique peut masquer celle des FL. Les GB atteignent même parfois des densités acoustiques équivalentes à celles des bancs de poissons dans le golfe de Gascogne. Les GB peuvent donc influencer sur la réponse fréquentielle des poissons s'ils sont intégrés dans la même unité d'échantillonnage. Pour s'affranchir du bruit dans les données acoustiques, la méthode la plus utilisée dans la littérature consiste à : (i) sélectionner des zones "sans cible" sur les échogrammes, (ii) considérer les réponses acoustiques de ces zones comme le "bruit", (iii) déterminer un seuil sur le ratio signal/bruit et (iv) supprimer les échos inférieurs au seuil sur l'ensemble des données (Korneilussen, 2000). Cette méthode est appliquée à la détection des vessies de poissons à de grandes profondeurs. Dans ce cas, le contraste entre le signal et le bruit est fort et la suppression des

Sv inférieurs au seuil permet de mieux accéder à l'information des échos d'intérêt. Le principal inconvénient est que le bruit ambiant peut fortement varier en fonction des conditions de mer et de navigation. L'idéal serait de disposer de mesures de bruit régulières réalisées par les écho-sondeurs en mode "passif" (hydrophones). Mais un tel échantillonnage n'était pas disponible dans le cadre de notre étude. Ainsi, nous nous sommes contenté de considérer le seuil minimal pour lequel la portée de la plus haute fréquence est maximale. Pour ne pas risquer d'analyser des données bruitées, seules les valeurs supérieures à -80 dB ont été considérées. Cela n'a pas d'influence sur la détection des cibles sur le plateau continental, dont la profondeur maximale est de l'ordre de grandeur de la portée maximale des écho-sondeurs utilisés.

Le groupe 4 est le groupe à la réponse fréquentielle la plus faible à toutes les fréquences. Les réflecteurs de ce groupe sont probablement majoritairement de type FL, et doivent donc être largement masqués par les réflecteurs porteurs de bulle de gaz des autres groupes. Le groupe 4 semble ainsi apparaître là où les autres groupes sont absents. Sa distribution spatiale ne doit donc pas être représentative de la distribution spatiale réelle des organismes FL qui le composent éventuellement.

La méthode de classification ACM-KM sur des données référencées à la fréquence 18 kHz a été appliquée aux données *in-situ* à l'extension du golfe de Gascogne. L'algorithme de classification *K-means* n'a cependant pas réussi à converger vers un minimum global, même avec un grand nombre d'itérations (800). Les résultats obtenus avec cette méthode de standardisation ne sont pas robustes puisqu'ils diffèrent à chaque réplicat. Le centrage des données avant l'application de l'ACM-KM nous semble être une méthode de standardisation plus générique et robuste que le référencement à une fréquence. Le centrage filtre une partie de l'effet densité, sans l'éliminer totalement. Ceci ne nuit pas à l'efficacité de la classification, qui atteint son objectif initial : séparer des groupes de cellules cohérents spatialement, avec des réponses fréquentielles médianes distinctes. Cependant, les différences de densités d'organismes subsistent dans les données centrées. Nous avons ici la confirmation que la standardisation par centrage n'est pas la méthode la plus optimale pour s'affranchir de l'ensemble de l'effet de la densité et présente une des limites de la méthode ACM-KM.

Les cellules d'écho-intégration situées sous la ligne de fond ont été affectées à -100 dB. Dans le cadre de cette étude, nous avons fait le choix de garder ces valeurs fictives de Sv dans les analyses. Ce choix présente l'avantage de pouvoir filtrer les cellules de la colonne d'eau qui ne contiennent pas d'information acoustique en les regroupant avec les Sv fictifs. Cela nous a également permis de réaliser les analyses statistiques simplement en considérant des matrices de Sv régulières. Cependant, l'intégration des Sv fictifs dans la classification peut influencer l'analyse. Nous n'avons néanmoins pas pu qualifier cette influence dans le cadre de cette étude. L'identification de l'influence de ces valeurs dans l'analyse reste à étudier avant une potentielle application de la méthode ACM-KM sur d'autres données multifréquences.

La forme des réponses fréquentielles est ici étudiée pour émettre des hypothèses sur les types de réflecteurs présents dans les couches diffusantes observées. Les résultats de cette analyse montrent que les réflecteurs avec inclusion gazeuse dominant la réponse acoustique dans la quasi-totalité du golfe de Gascogne, avec des tailles et des densités très variables. La sensibilité de la position et de l'amplitude du pic de résonance à la fréquence et à la taille de l'organisme (cf. section 4.5), peut expliquer une grande part de la variabilité observée, même si la fréquence de résonance majoritaire semble être proche de 38 kHz. Cependant, les réponses fréquentielles *in-situ* sont des combinaisons de réponses individuelles induites par une variété de types et de tailles d'organismes. Pour les relier à une composition spécifique, il est nécessaire de les valider par des données biologiques. De plus, la présence d'organismes porteurs d'inclusion ga-

zeuse peut induire une réponse acoustique très forte en présence d'organismes de petite taille à faibles densités et peut masquer la réponse des réflecteurs plus faibles, même si ces derniers sont dominants en terme d'abondance (cf. section 1.1 sur le phénomène de résonance).

2.5 Discussion

La question fondamentale n'est pas de trouver la bonne échelle d'observation, mais de comprendre comment l'information passe d'une échelle à l'autre, quels sont les détails qui subsistent aux changements d'échelles et quels sont ceux qui constituent le bruit (Levin, 1992). Dans ce chapitre, les échos des couches diffusantes ont été analysés sur des extensions de 2 minutes et d'1h de prospection acoustique, selon différents grains et sur une extension de 30 jours de prospection acoustique (mésos-échelle du golfe de Gascogne), selon un grain horizontal de 0.1 MN. Les résultats montrent que pour tous les grains observés, les réponses fréquentielles peuvent être interprétées comme des combinaisons de pics de résonance. Cela montre la dominance de la réponse acoustique des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse dans la réponse acoustique observée. Cette dominance est en partie due au biais de l'échantillonnage acoustique. En effet, le faisceau acoustique s'évase fortement avec la distance au transducteur et rapidement le volume insonifié comprend un grand nombre d'organismes. Ainsi, la probabilité d'inclure quelques réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse dans une cellule d'écho-intégration augmente fortement avec la profondeur. La présence de ces réflecteurs a pour conséquence de masquer la réponse acoustique des réflecteurs plus faibles et présents dans les mêmes cellules d'écho-intégration. L'application de la méthode ACM-KM sur des données écho-intégrées plus finement (cellules de 1 ping de long) permettrait de s'affranchir en partie de ce biais mais uniquement dans le cas où les organismes porteurs d'inclusion gazeuse sont présents à une densité inférieure à celle d'un organisme par ping.

Les écotraces des bancs de poissons, aisément identifiables visuellement par écotypage, sont isolées à fine échelle par la méthode ACM-KM. Les écotraces des bancs de poissons sont agrégées à échelle plus large, dans les couches diffusantes des groupes 5 et 6, dont l'occurrence et la distribution spatiale est beaucoup plus large. L'effet de leurs fortes densités à toutes les fréquences sur les résultats de la classification est vraisemblablement filtré par le centrage des données, et l'utilisation de la médiane pour représenter les réponses fréquentielles des groupes. La méthode ACM-KM permet de décrire des "paysages acoustiques" correspondant aux grands patrons des couches diffusantes dans les domaines spatiaux et fréquentiels. Cependant, cette analyse reste purement statistique et acoustique et ne permet pas de déterminer la composition de ces paysages avec certitude. Pour cela, il est nécessaire de comparer ces paysages acoustiques à des données biologiques.

La méthode ACM-KM présente d'autres limites, notamment au niveau de son échelle d'application. Cette méthode de classification est sensible à l'ajout ou au retrait de cellules dans le jeu de données sur lequel elle est appliquée, à la sélection du grain et au choix du nombre de groupe dans la classification Kmeans. Dans le cadre de l'application de cette méthode sur d'autres données multifréquences, il est nécessaire de passer par une étape d'analyse de sensibilité sur ces paramètres qui sont déterminants pour la pertinence des résultats.

La classification n'a pas vocation à détecter l'ensemble des types de réflecteurs présents dans la colonne d'eau. Les réponses fréquentielles médianes obtenues par groupe ne peuvent nous renseigner que sur les types de réflecteurs qui dominent la réponse acoustique observée. Dans le golfe de Gascogne, les réflecteurs GB semblent être présents à une densité assez importante pour dominer la réponse acoustique sur l'ensemble de la zone. Cette observation pose un problème

car la réponse acoustique des réflecteurs plus faibles n'est plus visible, or ce sont des organismes dominants en abondance dans la colonne d'eau.

Nous avons également vu à plusieurs reprises que la standardisation par centrage proposée dans cette étude, n'est pas la meilleure méthode pour s'affranchir de la totalité de l'effet de la densité des réflecteurs. Une approche considérant une valeur de référence par cellule pour l'ensemble des fréquences reste à étudier.

La méthode ACM-KM est aisée à mettre en œuvre d'un point de vue algorithmique. Les données de base doivent cependant être pré-traitées à toutes les fréquences avant l'analyse, afin de vérifier la détection du fond sur le plateau et éviter les échos multiples de fond au large. Ces pré-traitements sont coûteux en temps et n'ont pas pu être réalisés sur toutes les campagnes de la série dans le cadre de cette thèse. L'application de la méthode ACM-KM aux données collectées pendant les autres campagnes PELGAS permettra d'étudier la variation interannuelle des grands types de réponses fréquentielles et de leurs patrons spatiaux, et de consolider les résultats présentés ici pour l'année 2013.

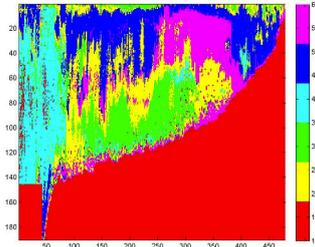
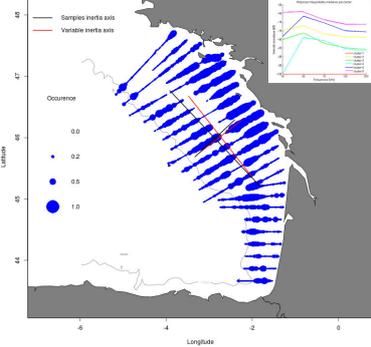
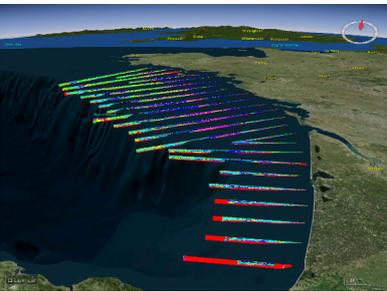
2.6 Bilan

La méthodologie présentée dans ce chapitre pour la classification des échos des couches diffusantes, présente les avantages suivants :

- Elle ne nécessite pas une connaissance *a priori* des types de réflecteurs présents dans le volume échantillonné.
- Elle discrimine les écho-traces des bancs de poissons à grain fin.
- Elle discrimine pertinemment les patrons spatiaux des échogrammes multifréquences.
- Elle identifie des groupes dont les réponses fréquentielles médianes sont pertinentes par rapport aux modèles de réflecteurs de la littérature.
- Elle est facile à mettre en œuvre et peut être appliquée avec des moyens informatiques standards.

La méthode ACM-KM est une application de l'analyse des correspondances à la caractérisation multifréquentielle des couches diffusantes. Son application sur l'ensemble des données multifréquences de la campagne PELGAS 2013, a permis d'identifier différents types de couches diffusantes dans le golfe de Gascogne au printemps 2013, dont les distributions spatiales ne sont pas aléatoires. L'analyse de la distribution spatiale de ces différents groupes de réponses fréquentielles a permis de définir des "paysages acoustiques" tridimensionnels à partir des données collectées dans le golfe de Gascogne au printemps 2013. La nature et les fonctions écologiques des organismes produisant ces paysages acoustiques restent cependant à déterminer.

TABLE 2.5 – Synthèse des représentations des résultats de la classification qui apportent des informations complémentaires.

Type de représentation	Résultats
2D Verticale	 <p data-bbox="1018 371 1401 629">Synthèse des échogrammes bruts de toutes les fréquences. Description de l'organisation des différentes couches diffusantes sur la dimension verticale.</p>
2D Horizontale	 <p data-bbox="1018 797 1401 987">Distribution spatiale des différents types de couches diffusantes. Qualification de la répartition, étendue ou en agrégats.</p>
3D	 <p data-bbox="1018 1211 1401 1357">Distribution spatiale des différentes couches diffusantes avec le détail de la distribution verticale.</p>

Chapitre 3

Les paysages acoustiques dans l'écosystème pélagique du golfe de Gascogne au printemps 2013

*"And what is the use of a book", though Alice, "without pictures
or conversations?"*

Alice's Adventures in Wonderland,
- Lewis Carroll -

3.1 Introduction

Dans la section 2.4, nous avons mis en évidence plusieurs types de couches diffusantes présentant des patrons de distribution spatiale distincts, qui dessinent des paysages acoustique dans le golfe de Gascogne. Les résultats de cette section montrent que les réponses fréquentielles comportant des pics de résonance sont présentes sur la quasi-totalité du golfe et forment des patrons spatiaux structurés.

Des couches diffusantes d'apparence similaire sur les échogrammes peuvent cependant être produites par des réflecteurs très différents. Sous certaines conditions, les microstructures océaniques peuvent rétro-diffuser les ondes acoustiques à un niveau proche de la réponse acoustique du zooplancton (Lavery et al., 2003; Ross & Lueck, 2003). Les vagues internes, par exemple, sont des structures physiques courantes dans l'océan qui se propagent le long de gradients de densité. Elles concentrent les organismes et sont détectées comme des couches diffusantes (Warren et al., 2003). D'autres types de couches diffusantes sont d'origine biologique, produites par des agrégations de zooplancton (e.g. Lawson et al. (2004); Greene et al. (1998)), de micronecton (Peña et al., 2014; Béhagle et al., 2014), de macrozooplancton gélatineux (Warren & Smith, 2007) ou même de phytoplancton (Churnside et al., 2012; Bok et al., 2013; Benoit-Bird et al., 2010). L'ensemble de ces couches diffusantes apparaissent selon des épaisseurs diverses à des profondeurs variées et peuvent être stables ou dynamiques dans la colonne d'eau.

Quelques études ont caractérisé la composition des couches diffusantes en analysant conjointement des données acoustiques et hydro-biologiques sur des centaines de km² (mésos-échelle). Béhagle et al. (2014) ont étudié la distribution verticale de couches diffusantes denses principalement composées de myctophidés, montrant que la répartition de ces organismes et la réponse acoustique qu'ils induisent étaient dépendantes de la distance au plateau continental et de la direction des tourbillons locaux. Dans la baie de Monterey, Benoit-Bird et al. (2010) ont étudié l'interaction entre le phytoplancton, formant de fines couches diffusantes et le zooplancton, distribué sous la forme de couches diffusantes plus larges observées dans la même zone. Les deux types de couches se superposaient lorsque le zooplancton consommait le phytoplancton mais étaient séparés d'une dizaine de mètres lorsque la concentration en phytoplancton dans la couche représentait moins de 20% de la concentration intégrée sur la colonne d'eau. En Polynésie française, Bertrand et al. (1999) ont étudié la distribution du micronecton en relation avec la circulation océanique, la distribution de la production primaire et des concentrations en nutriments, oxygène et zooplancton. Ces auteurs ont montré que le micronecton est distribué dans des zones préférentielles influencées par la concentration en oxygène et la quantité de nourriture disponible. Dans les eaux côtières péruviennes, Ballon et al. (2011) ont distingué des couches diffusantes de deux types : les couches diffusantes d'organismes FL et les couches diffusantes des autres réflecteurs. A l'aide de pêches planctoniques, les auteurs ont identifié les grands euphausiacés comme les organismes les plus contributifs à la réponse acoustique des couches diffusantes FL, détectées par les fréquences 38 et 120 kHz. Malheureusement, ces auteurs n'ont pas pu valider la composition des couches diffusantes des autres réflecteurs, faute de matériel adapté. A l'ouest de la péninsule Antarctique, Lawson et al. (2004) ont comparé la détection acoustique de couches diffusantes à des variables hydrologiques, bathymétriques et hydrodynamiques. Ces auteurs ont montré que les différences de distribution des couches diffusantes entre l'automne et l'hiver, étaient en partie dues au transport des organismes planctoniques par les courants dominants de la zone. La combinaison de données acoustiques et biologiques a permis à ces auteurs de montrer l'hétérogénéité de la composition spécifique des couches diffusantes, qui ne sont pas composées uniquement d'euphausiacés mais également de copépodes, de ptéropodes et de siphonophores physonectes. L'ensemble de ces études ont per-

mis d'identifier la nature des organismes composant les couches diffusantes en comparant les données acoustiques aux pêches d'identification, et de replacer ensuite les couches diffusantes dans le contexte de l'écosystème pélagique.

Dans le golfe de Gascogne, Lezama-Ochoa et al. (2011) et Trenkel & Berger (2013) ont cherché à caractériser la distribution spatiale des couches diffusantes et ont formulé des hypothèses sur la nature des organismes qui les composaient, et leurs fonctions écologiques. Ces études n'ont, cependant, analysé que les données acoustiques, sans effectuer de validation terrain permettant de caractériser sans ambiguïté la composition des couches. Les hypothèses émises sur la nature des couches étaient uniquement basées sur l'allure des réponses fréquentielles *in-situ*, et sur l'hypothèse forte que les volumes insonifiés ne contenaient qu'un seul type d'organismes.

Afin de déterminer avec certitude la composition des couches diffusantes du golfe de Gascogne au printemps, il convient de comparer les données acoustiques à des données collectées simultanément avec d'autres échantillonneurs. Nous allons comparer dans ce chapitre la caractérisation acoustique des couches diffusantes du golfe de Gascogne au printemps présentée dans le chapitre 2, avec les données collectées par d'autres outils d'échantillonnage sur les compartiments de l'écosystème pélagique, afin de détecter d'éventuelles corrélations qui pourraient renseigner sur la nature et le rôle écologique des couches diffusantes.

Dans la première partie, la distribution spatiale des groupes de couches diffusantes issus de la méthode non supervisée ACM-KM, appliquées aux données de l'ensemble de la campagne PELGAS 2013 (cf. 2.4), est comparée à la distribution de l'abondance des organismes de différents compartiments : micro-zooplancton (20-200 μm), méso-zooplancton (0.2-200 mm), macronecton (> 2 cm) et aux structures des paramètres hydrologiques sur l'ensemble du golfe de Gascogne. Dans la seconde partie, la structure verticale des couches diffusantes est comparée à la structure verticale des paramètres hydrologiques à l'échelle d'une radiale acoustique.

3.2 Comparaison des paysages acoustiques aux indicateurs des compartiments de l'écosystème pélagique collectés pendant PELGAS 2013, à l'échelle du golfe de Gascogne

3.2.1 Matériel et méthodes

Indices hydrologiques et biomasse phytoplanctonique

Pendant les campagnes PELGAS, des données hydro-biologiques sont collectées pendant la nuit lors de stations hydrologiques réalisées sur l'une des deux radiales qui ont été échantillonnées par acoustique et chalutage durant la journée. A chaque station, une bathysonde (ou CTD) mesure des profils verticaux de température, de salinité et de fluorescence. L'information contenue dans ces profils est synthétisée sous forme d'indices hydrologiques développés par Huret et al. (2010). La température et la salinité de surface (*SurfTemp* et *SurfSal*) ainsi que la température de fond (*BotTemp*) et la profondeur de la pycnocline (le maximum du gradient de densité, *ProfPycn*) sont utilisés comme indices de la nature des masses d'eau. A partir des données de salinité, la hauteur d'eau douce équivalente (*Heq*) est calculée pour quantifier de façon robuste les apports d'eau douce des panaches fluviaux. Plus la *Heq* est élevée plus les apports d'eau douce ont été importants. Le déficit d'énergie potentielle (*DefEpot*) est l'énergie nécessaire à l'obtention d'une densité homogène sur l'ensemble de la colonne d'eau et est un indice de stra-

tification verticale. Plus l'énergie nécessaire pour homogénéiser la colonne d'eau est élevée et plus la stratification est forte. Les profils de fluorescence renseignent sur la concentration en chlorophylle-a qui est un proxy de la production primaire. La concentration de la chlorophylle-a intégrée sur la profondeur (*Chloroint*) est l'indice retenu pour quantifier la biomasse de phytoplancton. La fluorescence, mesurée à 3 m de profondeur est également incluse dans l'analyse comme un indice de la production primaire de surface.

Indicateurs zooplanctoniques

Sur la bathysonde est fixé un compteur de particules planctoniques laser (L-OPC, *Laser Optical Plankton Counter* Herman et al. (2004), figure 3.1). Le L-OPC est un instrument optique qui mesure les particules passant au travers de son faisceau laser. Il mesure des objets allant de environ 100 μm à quelques cm. Néanmoins, la limite supérieure de la taille des particules détectées est contrainte par la section du tunnel d'échantillonnage de 46 cm^2 . Les données du L-OPC sont des spectres de tailles de particules en fonction de la profondeur. Les résultats considèrent indifféremment les particules vivantes et inertes. Le travail de Vandromme et al. (2014) présente une méthode qui détermine la fraction vivante du spectre de tailles des particules détectées par le L-OPC en combinant l'identification des échantillons de méso-zooplancton collectés par le filet *Work Party 2* (WP2) et la structure en tailles du L-OPC. La pente du spectre de taille corrigée par cette méthode (*slopecor*) est un indicateur de la structure en tailles des communautés méso-zooplanctoniques de la zone. Lorsque la pente est positive, cela signifie que les grandes tailles de zooplancton sont dominantes tandis que si la pente est négative, ce sont les petites tailles de zooplancton qui dominent. La position de l'intersection entre la pente du spectre de taille et l'axe des ordonnées (*intercor*) indique la quantité globale des particules vivantes détectées, pour des pentes similaires.

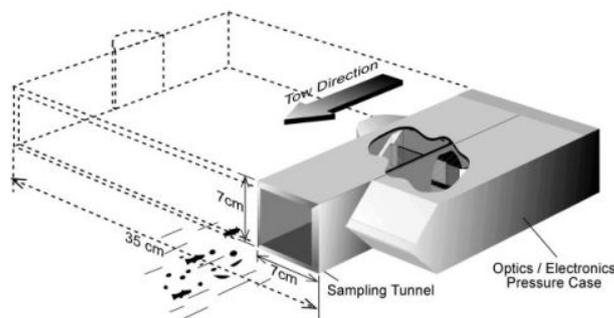


FIGURE 3.1 – D'après Herman et al. (2004), schéma du L-OPC illustrant le flux de l'eau dans le tunnel d'échantillonnage.

Un filet à plancton, *Work Party 2* (WP2, figure 3.2) est également utilisé à chaque station. Il s'agit d'un échantillonneur composé de trois filets identiques disposés en triangle. Sa maille filtrante étant de 200 μm , il collecte essentiellement les organismes du méso-zooplancton (200 μm - 20 mm). L'instrument est rapidement plongé près du fond et lentement remonté en surface à une vitesse de 0.5 m/s. Les échantillons collectés renseignent sur l'abondance et la composition du méso-zooplancton intégrées sur l'ensemble de la colonne d'eau. Les échantillons du WP2 sont déterminés visuellement au laboratoire de l'université de La Rochelle jusqu'à la résolution taxonomique maximale. La composition de la communauté méso-zooplanctonique des échantillons WP2 est synthétisée par un indice de biomasse (en poids sec) par classe de

tailles : la biomasse totale des organismes de taille supérieure à $200\ \mu\text{m}$; la biomasse des organismes dont la taille est comprise entre 200 et $500\ \mu\text{m}$; entre 500 et $1000\ \mu\text{m}$; entre 1000 et $2000\ \mu\text{m}$ et $> 2000\ \mu\text{m}$.



FIGURE 3.2 – L'échantillonneur WP2 est composé de 3 filets identiques de maille $200\ \mu\text{m}$. Il est utilisé en profil vertical pour décrire la communauté méso-zooplanktonique.

Indicateurs ichthyologiques

Lors des prospections acoustiques diurnes, un chalutage d'identification pélagique est réalisé lorsque des échos intéressants de bancs de poissons sont observés sur les échogrammes. Les poissons collectés sont triés par espèce, pesés, mesurés et comptés. La combinaison des densités acoustiques issues de l'échotypage et de ces données biologiques, permet d'évaluer et de cartographier l'abondance et la biomasse des petits poissons pélagiques par espèce dans le golfe de Gascogne (figure 3.3, Doray et al. (2014)). Les biomasses par espèce sont des indicateurs du compartiment des petits poissons pélagiques. Nous considérons ici les espèces suivantes : les anchois (*Engraulis encrasicolus*), les sardines (*Sardina pilchardus*), les sprats (*Sprattus sprattus*), les maquereaux (*Scomber scombrus*) et les chinchards (*Trachurus trachurus*).

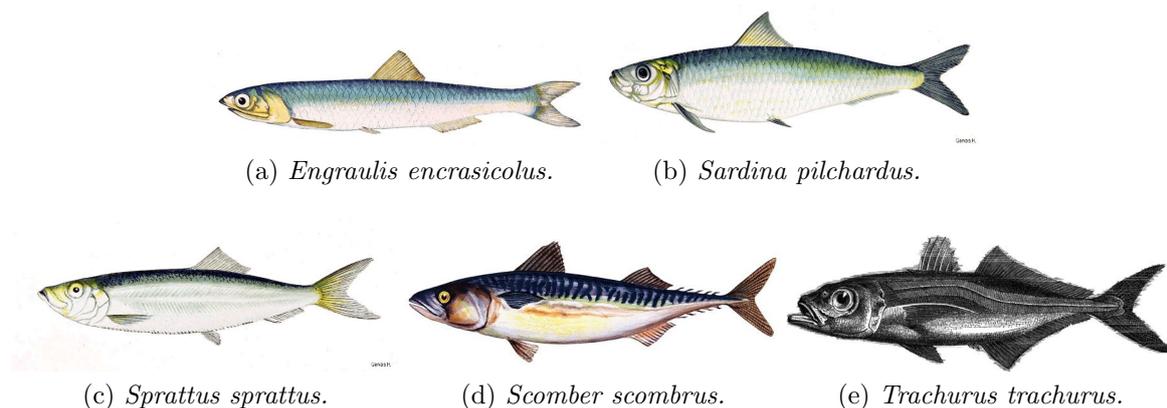


FIGURE 3.3 – Illustration des espèces de petits poissons pélagiques les plus présentes dans le golfe de Gascogne et échantillonnées pendant la campagne PELGAS.

Les couches diffusantes

Dans ce chapitre, les couches diffusantes sont représentées par les résultats de la section 2.4. Il s'agit des résultats de la méthode de classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées de l'ensemble de la campagne PELGAS 2013. Les patrons de distribution des groupes de cellules 2 à 6 sont considérés dans cette étude.

Méthode

Les indicateurs des différents compartiments, intégrés sur la colonne d'eau, sont moyennés par bloc et représentés spatialement sur une même grille, au moyen du package R "EchoR"¹, selon la méthode décrite dans ICES (2008). La taille de la maille spatiale résulte d'un compromis entre une résolution spatiale élevée et un nombre suffisant de valeurs à moyenner dans chaque cellule. La position de l'origine de la grille conditionne la moyenne calculée par cellule. Pour atténuer cet effet, l'origine de la grille est positionnée aléatoirement dans une cellule plus large composée de 4 cellules. Cela effectue un lissage local et rend le calcul de la moyenne par cellule, indépendant de la position de l'origine de la grille. La méthodologie appliquée est la suivante :

- 200 grilles sont générées avec des origines différentes ;
- pour chaque grille, le calcul des moyennes par cellule est mis en œuvre ;
- toutes les grilles sont superposées en étant placées sur la même origine ;
- la moyenne de chaque cellule est calculée sur les valeurs de toutes les grilles.

La taille des cellules de la grille a été fixée à $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, pour disposer d'au moins deux valeurs afin de calculer une moyenne des données hydro-biologiques, qui sont collectées avec la résolution d'échantillonnage la plus grossière (en station). Le coin inférieur gauche de la grille est positionné à $10^\circ 2'W$ et $35.8^\circ N$. Cette procédure permet d'analyser la variabilité interannuelle d'une série de cartes représentant différents compartiments de l'écosystème pélagique.

Les cartes des indicateurs des différents compartiments sont comparées visuellement. Un coefficient de corrélation de Pearson (Adler et al., 2011) est calculé entre les différentes cartes d'indicateurs en appariant les cellules, afin de valider l'analyse visuelle.

1. <https://forge.ifremer.fr/plugins/mediawiki/wiki/echor/index.php/Accueil>

3.2.2 Résultats

Les paramètres hydrologiques et phytoplanctoniques

Les patrons spatiaux des indicateurs du compartiment hydrologique sont représentés dans les figures 3.5a à 3.5f. En surface (figure 3.5 a & c), la zone proche de la frontière franco-espagnole au sud du golfe présente une eau relativement chaude ($\sim 15^\circ\text{C}$) et salée (~ 34 psu). Le panache de la Gironde est marqué par un gradient de salinité de la côte vers le milieu de plateau, correspondant à une température moyenne de $\sim 14^\circ\text{C}$. La zone centrale du golfe est caractérisée par des masses d'eau relativement chaudes ($\sim 15.5^\circ\text{C}$) et très salées (36 psu) qui s'étendent au-delà du talus. Le panache de la Loire est marqué par une très faible salinité (30 psu) et des eaux froides (13°C). Le nord du golfe, autour de la pointe sud de la Bretagne, présente des eaux de salinité moyenne (~ 34.5 psu) et froides ($11-12^\circ\text{C}$). Près du fond (figure 3.5b), la température dessine un gradient nord-sud clair avec au sud des eaux à 13°C et au nord à 11°C . Les panaches ont un effet sur la stratification verticale (figure 3.5d) puisque le maximum du gradient de densité est rencontré à des profondeurs faibles dans les zones des panaches (entre 5 et 10 m). Les zones intermédiaires présentent une pycnocline plus profonde (entre 25 et 35 m).

Dans la partie nord du golfe (de l'embouchure de la Gironde à la Bretagne), le milieu de plateau est caractérisé par un fort déficit d'énergie potentielle, qui correspond à la lentille d'eau de surface plus chaude, et qui induit une stratification plus prononcée (figure 3.5e). L'apport du panache de la Loire est plus important et l'influence des panaches de tous les fleuves s'observe jusqu'en milieu de plateau sur l'ensemble du golfe (figure 3.5f).

La fluorescence de surface (figure 3.5g), est relativement plus forte au niveau des panaches et autour de la pointe de Bretagne. La concentration en chlorophylle-a intégrée sur l'ensemble de la colonne d'eau (figure 3.5h), est plus forte dans le nord du golfe et à proximité du talus, avec un maximum en bord de plateau à 46° de latitude Nord.

Le méso-zooplancton

Les organismes méso-zooplanctoniques de petites tailles (200 à $500\ \mu\text{m}$) sont situés du nord au sud près de la côte et sont particulièrement concentrés dans le panache de la Gironde et près de la pointe sud de la Bretagne (figure 3.6a). La classe de tailles supérieure (500 à $1000\ \mu\text{m}$) présente une distribution spatiale différente, plus localisée dans le nord du golfe, près de la pointe sud de la Bretagne et le long de la latitude 46° Nord (figure 3.6b). Les organismes méso-zooplanctoniques dont les tailles sont comprises entre 1000 et $2000\ \mu\text{m}$ sont clairement localisés dans le nord du golfe et dans la partie ouest du plateau continental (figure 3.6c). L'absence de ces organismes est remarquable dans le panache de la Loire. Le méso-zooplancton de plus grande taille ($> 2000\ \mu\text{m}$) est nettement localisé dans le nord du golfe (figure 3.6d). La répartition spatiale de la biomasse totale du méso-zooplancton (figure 3.6e) est clairement influencée par celle des plus grandes classes de tailles puisque l'on observe des agrégats de concentration au centre du golfe proche du talus et au nord du golfe près de la côte bretonne. Cependant, la concentration marquée du petit méso-zooplancton dans le panache de la Gironde est également visible lorsque l'on considère la biomasse totale. L'intersection de la pente du spectre de tailles du L-OPC est positivement élevée près de la côte, négative sur le plateau continental proche du talus mais nulle au-delà du talus (figure 3.6f). La pente du spectre est quand à elle moins marquée dans le nord du golfe près du talus qu'au sud près de la côte (figure 3.6g). La combinaison de ces informations montre que les petites tailles de méso-zooplancton sont très nombreuses mais représentent une biomasse plus faible par rapport aux grandes tailles. Le petit méso-zooplancton est situé près de la côte, tandis que le gros méso-zooplancton se

concentre dans le nord du golfe et plus au large.

Les petits poissons pélagiques

La biomasse des anchois (*Engraulis encrasicolus*) est classiquement concentrée dans le sud du golfe, principalement dans le panache de la Gironde (figure 3.6h). Celle des sardines (*Sardina pilchardus*) est localisée près de la côte des Landes, aux accores et à l'embouchure de la Loire (figure 3.6i). Les sprats sont concentrés dans les panaches de la Loire et de la Gironde (figure 3.6j). Les maquereaux sont absents près de la côte mais se concentrent dans le nord du golfe sur le plateau continental et vers le talus (figure 3.6k). Mis à part les anchois et les sprats qui semblent être spatialement répartis de la même manière, les différentes espèces se partagent les zones du golfe avec un faible recouvrement. L'ensemble des petits poissons pélagiques se rassemblent près de la côte dans le sud du golfe et en milieu de plateau dans le nord du golfe. Un maxima de biomasse de petits poissons pélagiques s'observe dans le panache de la Loire (figure 3.6l). La distribution spatiale de la biomasse des petits poissons pélagiques en 2013 semble être influencée par celle de la sardine et du maquereau essentiellement.

Les couches diffusantes

La distribution de l'occurrence des différents groupes de couches diffusantes sur la verticale de chaque ESDU, est présentée dans les figures 3.5i à 3.5m. Les patrons spatiaux de chaque groupe sont les mêmes que ceux présentés dans la section 2.4. Le groupe 2 est observé plus fréquemment dans l'extrême nord du golfe (figure 3.5i). Le groupe 3 est présent en plus grande quantité dans l'extrême nord du golfe et présente un maximum local d'occurrence près de la côte dans le sud du golfe (figure 3.5j). Le groupe 4 est nettement localisé dans le sud du golfe avec un maximum local dans le panache de la Loire (figure 3.5k). Le groupe 5 est observé plus fréquemment au centre du golfe et proche du talus (figure 3.5l). Le groupe 6 présente des maximum d'occurrence locaux au nord des embouchures de la Loire et de la Gironde de la côte au talus (figure 3.5m).

Comparaison

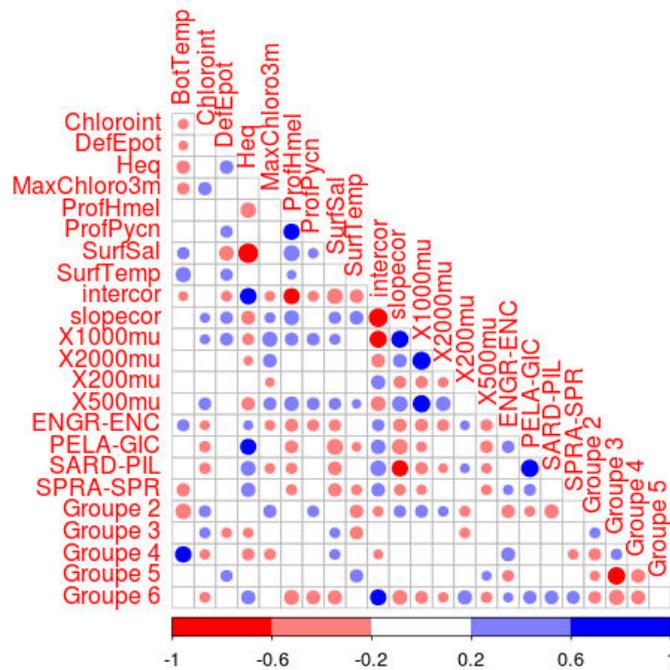


FIGURE 3.4 – Coefficients de corrélation entre les cartes de distribution des indicateurs et des groupes de couches diffusantes. La valeur du coefficient est représentée par la dimension et la couleur du point à l’intersection des indicateurs des deux cartes considérées par le calcul.

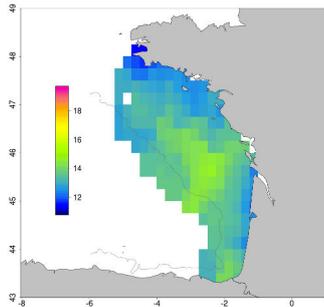
La figure 3.4 présente les coefficients de corrélation entre les cartes d’indicateurs. La seule corrélation linéaire significative (valeur absolue du coefficient supérieure ou égale à 0.6) entre une carte de couche diffusante et une carte d’indicateur est obtenue entre le groupe 4 et la température de fond et le groupe 6 et l’ordonnée à l’origine du spectre de tailles LOPC. Le groupe 4 et la température de fond sont corrélées positivement car le groupe 4 est distribué préférentiellement dans le sud du golfe, où la température de fond est plus élevée. Il est difficile de fournir une interprétation écologique à cette corrélation, d’autant plus que le groupe 4 est le groupe le plus proche des organismes FL, qui doivent être masqués par les organismes GB dominants les autres groupes. La distribution du groupe 4 ne doit donc pas être représentative de la distribution réelle des FL, ce qui limite les interprétations écologiques des similitudes entre les distributions de ce groupe et celles des autres indicateurs.

Le groupe 6 et l’ordonnée à l’origine du spectre de tailles LOPC, proxy de l’abondance totale du méso-zooplancton, présentent une corrélation linéaire significativement positive, qui traduirait la ressemblance de leurs distributions spatiales, à majorité côtière, avec un maximum secondaire proche du talus au centre du golfe. La réponse fréquentielle médiane du groupe 6 est la plus forte de tous les groupes et présente une forme caractéristique de réflecteur porteur de bulle de gaz. Les réflecteurs produisant les couches diffusantes du groupe 6 ne sont donc vraisemblablement pas des organismes FL du méso-zooplancton. La corrélation positive entre le groupe 6 et un indicateur de l’abondance du méso-zooplancton ne signifie donc probablement pas que les réflecteurs du groupe 6 font partie du méso-zooplancton. La similitude des cartes traduit peut-être le fait que certains réflecteurs du groupe 6 pourraient se nourrir de méso-zooplancton.

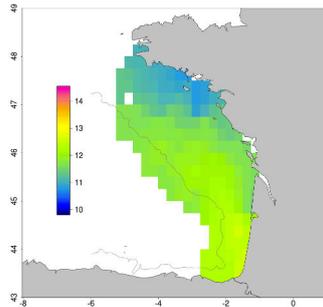
Des corrélations linéaires significatives sont observées entre des cartes d’indicateurs décrivant

la même variable d'état (salinité de surface et hauteur d'eau douce équivalente, par exemple). Aucun patron spatial commun traduisant le fait que les organismes surveillés par PELGAS aient pu produire les paysages acoustiques observés dans le golfe de Gascogne au printemps 2013 n'a pu être mis en évidence par cette analyse des corrélations linéaires (figures 3.5 et 3.6). L'étude présentée ici ne prend pas en compte les autres types de relations mathématiques qui pourraient exister entre les distributions spatiales considérées.

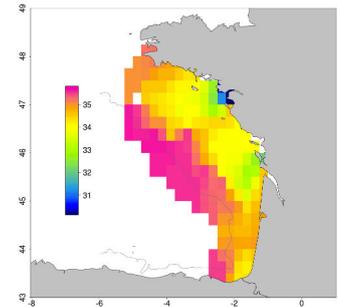
Cette absence de corrélation entre les paysages acoustiques et les cartes des indicateurs des autres compartiments de l'écosystème vu par la campagne PELGAS, peut suggérer que les paysages acoustiques sont produits par des réflecteurs qui sont peu ou pas échantillonnés par les outils utilisés jusqu'alors en routine pendant cette campagne. L'absence de corrélation linéaire peut également suggérer que les groupes formés par la classification rassemblent des organismes aux préférences environnementales différentes. En observant leur distribution groupée, il est logique de ne trouver aucune corrélation linéaire avec les paramètres environnementaux. Cette interprétation implique que la classification n'aurait été effectuée que sur les organismes dont la réponse acoustique domine la réponse acoustique observée. Dans ce cas, les distributions spatiales des paysages acoustiques ne peuvent pas être mises en relation avec la distribution spatiale des réflecteurs faibles (crustacés, gélatineux à faible abondance). L'absence de corrélation qui résulte de cette étude, montre peut être la limite des comparaisons sur la dimension horizontale et met en avant que l'information sur les relations entre les paysages acoustiques et les indices hydro-biologiques se trouveraient sur la dimension verticale.



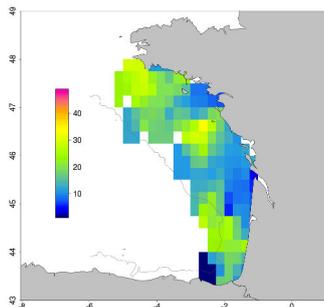
(a) Température de surface ($^{\circ}\text{C}$)



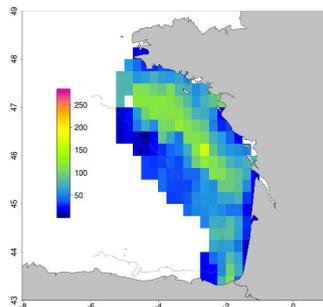
(b) Température de fond ($^{\circ}\text{C}$)



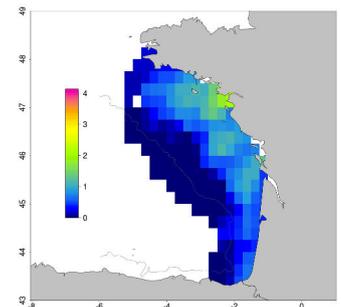
(c) Salinité de surface (psu)



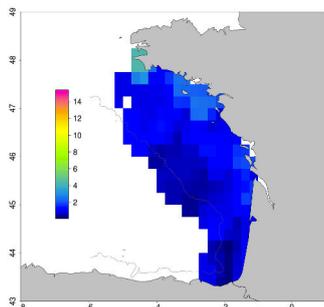
(d) Profondeur de la pycnocline (m)



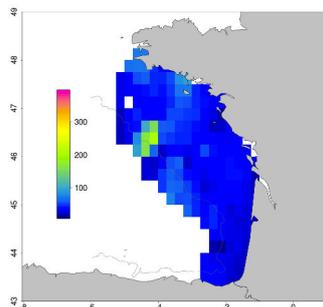
(e) Déficit d'énergie potentielle ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)



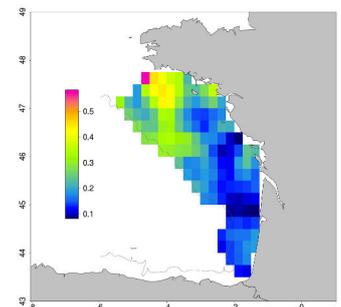
(f) Hauteur d'eau douce équivalente (m)



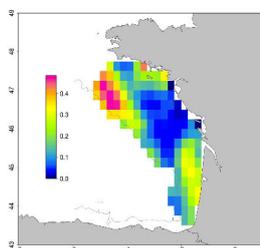
(g) Fluorescence de surface ($\text{mgChla}\cdot\text{m}^{-3}$).



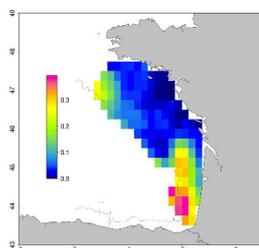
(h) Biomasse de phytoplancton intégrée sur la verticale ($\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}$).



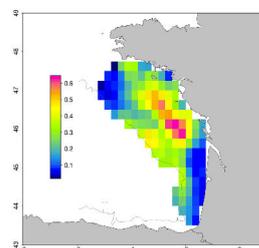
(i) Groupe 2.



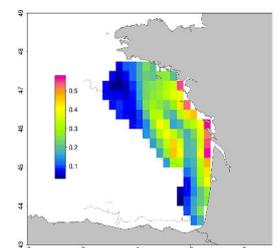
(j) Groupe 3.



(k) Groupe 4.

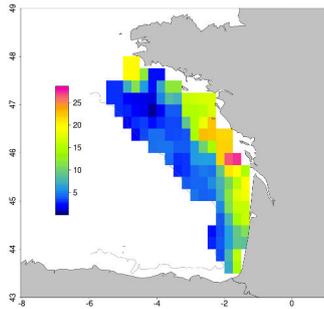


(l) Groupe 5.

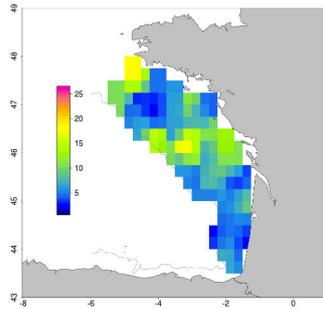


(m) Groupe 6.

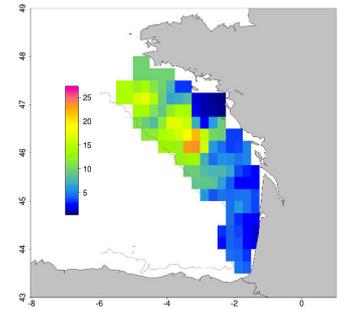
FIGURE 3.5 – Cartes de distribution des indices hydrologiques (a à f), de la biomasse phytoplanctonique (g & h) et des paysages acoustiques issus de la classification ACM-KM (i à m).



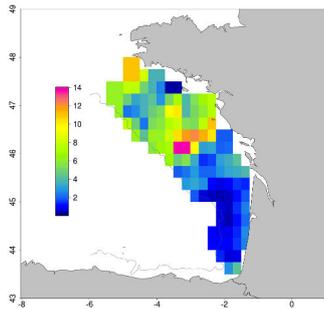
(a) Biomasse (200-500 μm).



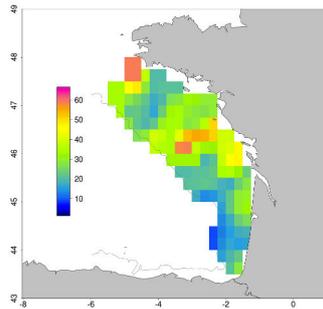
(b) Biomasse (500-1000 μm).



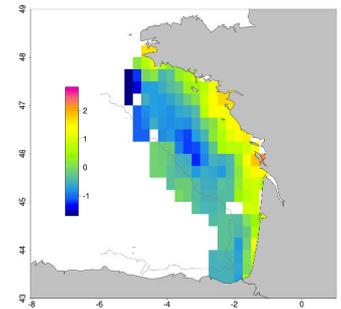
(c) Biomasse (1000-2000 μm).



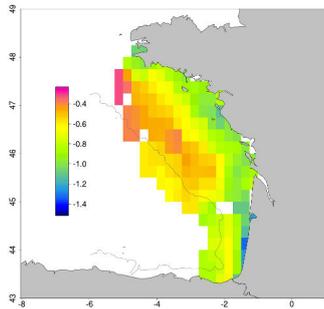
(d) Biomasse (> 2000 μm).



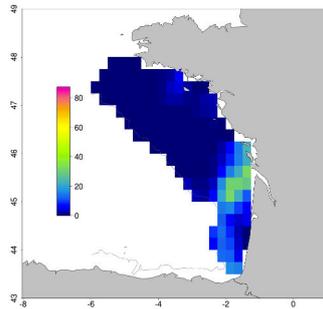
(e) Biomasse totale (> 200 μm).



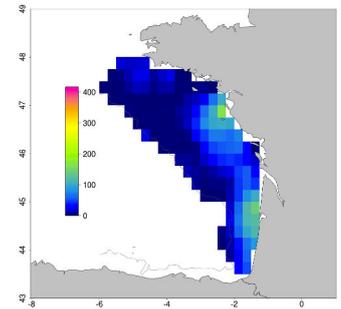
(f) Intersection de la pente corrigée.



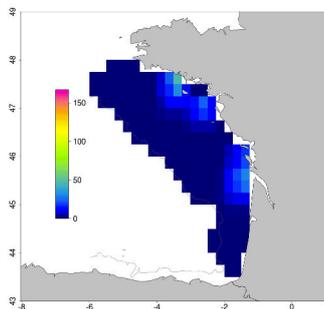
(g) Pente corrigée.



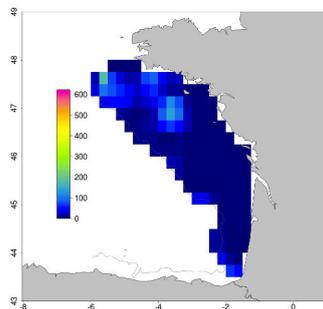
(h) Biomasse des anchois (*Engraulis encrasicolus*).



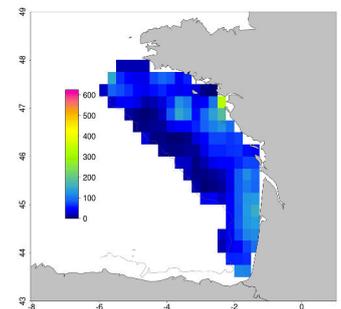
(i) Biomasse des sardines (*Sardina pilchardus*).



(j) Biomasse des sprats (*Sprattus sprattus*).



(k) Biomasse des maquereaux (*Scomber scombrus*).



(l) Biomasse de l'ensemble des poissons pélagiques.

FIGURE 3.6 – Cartes de distribution des indicateurs du méso-zooplancton (a à g) et des petits poissons pélagiques (h à l).

3.3 Comparaison des distributions verticales des couches diffusantes et des paramètres hydrologiques à l'échelle d'une radiale

Afin d'étudier les corrélations potentielles à plus fine échelle entre les distributions spatiales des couches diffusantes et celles des indicateurs des autres compartiments de l'écosystème pélagique, les patrons spatiaux des groupes de couches diffusantes et des indices hydro-biologiques ont ensuite été comparés à l'échelle plus réduite d'une radiale acoustique.

3.3.1 Matériel et méthode

La zone d'étude

La radiale acoustique sélectionnée pour effectuer la comparaison entre la distribution verticale des couches diffusantes et celles des paramètres hydrologiques a été prospectée lors des 10 derniers jours de la campagne PELGAS 2013, qui étaient classiquement dédiés à l'étude de processus écologiques spécifiques. En 2012 et 2013, l'échantillonnage du leg 3 s'est majoritairement concentré sur la détermination de la composition des couches diffusantes. Pour cela, une zone d'étude réduite a été sélectionnée sur plusieurs critères afin de répondre aux besoins de plusieurs études menées simultanément. La zone devait présenter un gradient marqué de température et de salinité, une abondance intéressante d'oeufs d'anchois et de sardine, des larves de sardine, et des couches diffusantes denses. Le plateau continental en face de l'embouchure de la Gironde, de la côte aux accores est la zone qui répondait à tous ces critères (figure 3.7).

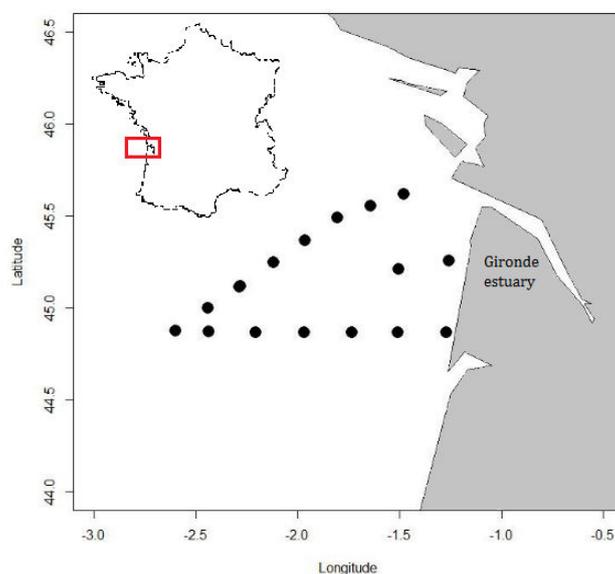


FIGURE 3.7 – Positions géographiques des stations dans la zone d'étude au large de l'embouchure de la Gironde, échantillonnées pendant les 10 derniers jours des campagnes PELGAS 2012 et 2013.

Analyse des données acoustiques

Les radiales nord et sud ont été prospectées par acoustique sans interruption pour : (i) acquérir des données le long d'une radiale en continu ; (ii) repérer les couches diffusantes denses de la zone. La radiale à laquelle nous nous intéressons ici est la radiale nord.

Les intensités acoustiques (Sv) ont été collectées par les sondeurs EK60 selon le protocole décrit dans la section 2.2. L'écho-intégration des Sv a été effectuée par cellule de 1 m de profondeur et de 0.1 MN de long, dans le but de comparer les résultats à ceux obtenus dans le chapitre 2. Les données écho-intégrées de la radiale nord du leg 3 ont été incorporées au jeu de données collectées sur les radiales des legs 1 et 2 et la méthode de classification non supervisée des échos ACM-KM (cf. section 2.4) a été appliquée à ce nouveau jeu de données, afin de tester l'effet de l'inclusion de nouvelles données sur la classification. Les patrons spatiaux verticaux des groupes de couches diffusantes issus de la classification des cellules de la radiale acoustique ont été étudiés le long de la radiale.

Les données hydro-biologiques

Dès la fin de la prospection acoustique d'une radiale, la radiale considérée a de nouveau été échantillonnée en stoppant le navire tous les 10 MN afin de réaliser une station hydro-biologique, d'une durée moyenne de 2 heures. A chaque station, un profileur pélagique mesurant la température, la salinité, la fluorescence et la charge particulaire totale (turbidimètre) tous les mètres de profondeur, était déployé (figure 3.7). Les communautés méso-zooplanctoniques étaient échantillonnées au WP2 ou au filet ouvrant/fermant à 5 nappes (Multinet, Hydro-Bios) à chaque station. La résolution verticale d'échantillonnage de ces prélèvements étant trop grossière par rapport à la résolution des données acoustiques et des données hydro-biologiques du profileur, seules ces dernières ont été comparées à la distribution des couches diffusantes dérivée des données acoustiques.

Krigeage des données hydrologiques

Les données acoustiques se présentent sous la forme d'une matrice, où chaque individu est une cellule d'écho-intégration caractérisée par des intensités acoustiques (Sv) mesurée aux différentes fréquences.

Les stations d'échantillonnage ont été positionnées tous les 10 MN sur une radiale d'environ 80 MN. La méthode de krigeage a été utilisée pour estimer la structure verticale des paramètres hydrologiques sur l'ensemble de la radiale (entre les stations). Le krigeage est une méthode d'interpolation linéaire qui garantit l'obtention d'une variance d'estimation minimale. Le principe est de modéliser la variabilité spatiale d'une variable d'intérêt et d'utiliser le modèle pour estimer la valeur de la variable à une position où elle n'a pas été mesurée (Petitgas, 2001). Dans cette étude, le krigeage a été effectué dans le logiciel R à l'aide du package *RGeostats* (Renard et al., 2014). La méthode se décline en plusieurs étapes :

- Mise en forme de la donnée.
- Calcul du variogramme expérimental à partir des données.
- Choix d'un modèle de variogramme.
- Choix d'un voisinage dans lequel l'algorithme considère les données.
- Définition de la grille du krigeage.
- Krigeage des données et calcul d'erreurs d'estimation.

Les profils de température, de salinité, de fluorescence et de turbidité de l'ensemble des stations de la radiale nord ont été assemblés dans une base de données où le nombre d'individus correspond au nombre de tranches de 1 m. Chaque individu y est caractérisé par ses valeurs de paramètres hydrologiques ainsi que par sa profondeur, le numéro de la station à laquelle il appartient et les coordonnées géographiques de la station. Un variogramme expérimental

anisotropique a été calculé par variable (figure 3.9), avec les paramètres mentionnés dans le tableau 3.1, selon les directions horizontales et verticales.

TABLE 3.1 – Paramètres utilisés dans le packages R *RGeostats* (Renard et al., 2014), pour le calcul des variogrammes expérimentaux des quatre variables hydrologiques.

Paramètre	Horizontal	Vertical
Directions	0 °	90 °
Angles de tolérance	10 °	10 °
Distances de tolérance	1	0.5
Pas	2	1
Nombre de pas	20	20

Le pas est plus petit sur la dimension verticale que sur la dimension horizontale car la résolution verticale est beaucoup plus fine qu'à l'horizontale. Des modèles linéaires ont été ajustés aux variogrammes de chaque variable (figure 3.8). Même si l'ajustement du modèle n'est bon que pour l'une des deux dimensions, dans le cas d'une anisotropie zonale, il est préférable d'avoir un même modèle pour les deux directions, par souci de continuité spatiale de l'estimateur de krigeage.

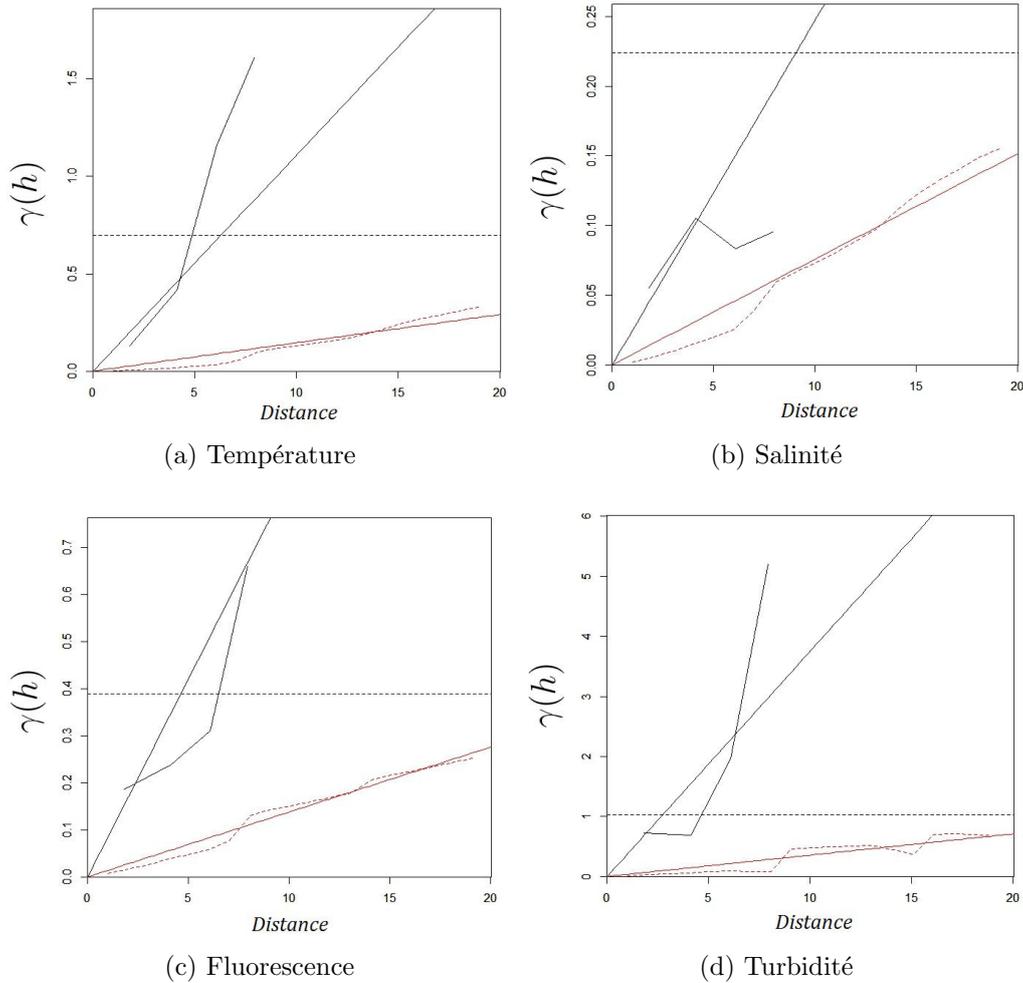


FIGURE 3.8 – Application d’un modèle linéaire aux deux dimensions des variogrammes expérimentaux des variables hydrologiques. Directions : horizontale (courbes noires) et verticale (courbes rouges).

Le voisinage est calculé selon les paramètres synthétisés dans le tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Paramètres utilisés dans le package R *RGeostats* (Renard et al., 2014) pour calculer le voisinage utilisé dans le krigeage. Les valeurs entre parenthèses correspondent respectivement à la valeur appliquée à la direction horizontale et à la valeur appliquée à la direction verticale.

Paramètre	Valeur
Type de voisinage	<i>Moving with anisotropy</i>
Nombre d’échantillons minimum	2
Nombre d’échantillons maximum	30
Distance isotropique maximale	1.5
Coefficients d’anisotropie	(1,0.5)
Matrice de rotation	(0,90)

La grille de krigeage est déterminée par la grille des résultats de l’écho-intégration. Il s’agit d’une grille composée de 586 cellules de 0.0186 unité sur la dimension horizontale et de 100 cellules de 1 unité sur la dimension verticale. La différence de dimensions horizontale et verticale

des cellules est due au fort contraste entre l'écartement des stations (10 MN = 185,2 m) et la résolution des mesures dans les profils (1 m).

3.3.2 Résultats

Krigeage

La variabilité spatiale est beaucoup plus forte le long de la direction verticale sur le variogramme expérimental (figure 3.9).

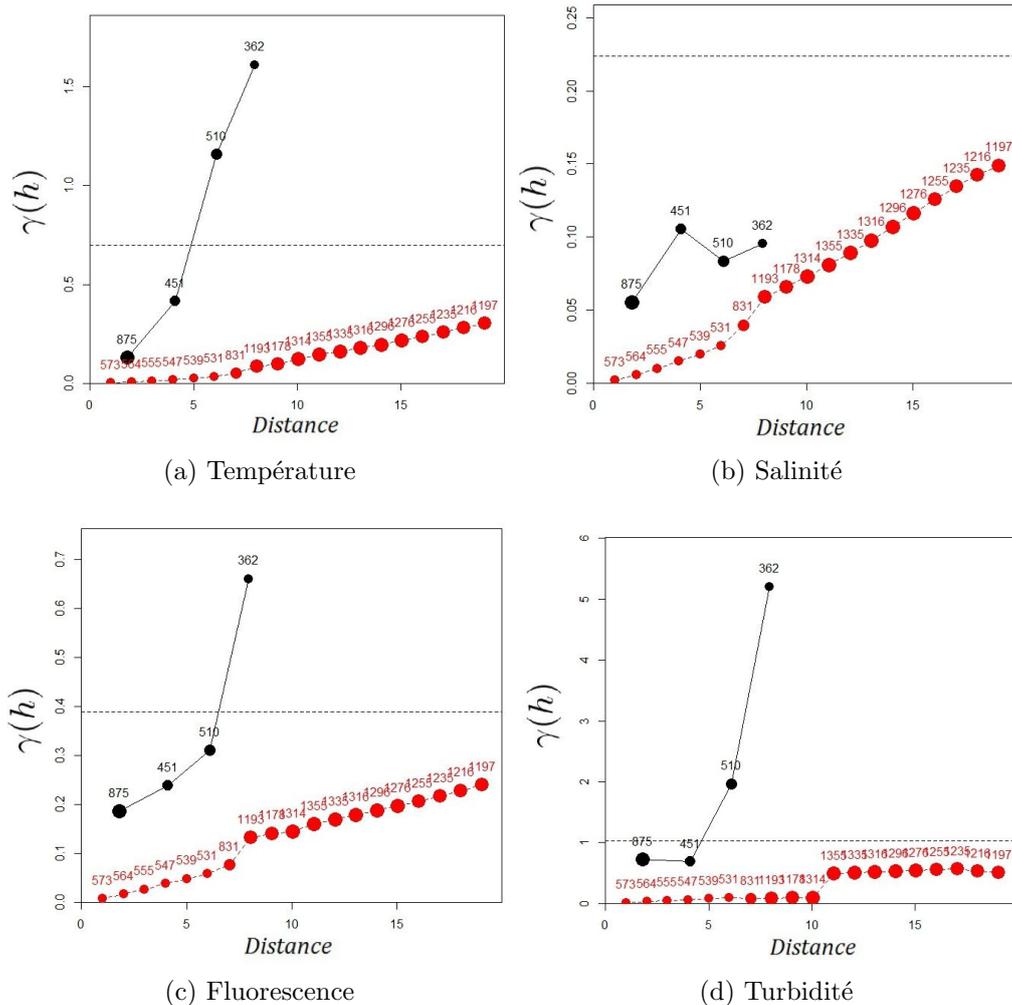


FIGURE 3.9 – Variogrammes expérimentaux pour les variables hydrologiques des stations de la radiale nord selon deux directions : horizontale (courbes noires) et verticale (courbes rouges).

Distribution verticale des paramètres hydrologiques

La structure verticale hydrologique de la radiale nord du leg 3 de la campagne PELGAS 2013 est caractérisée par une lentille d'eau chaude (15 °C) et désalée (~ 34 psu) s'étendant de la surface jusqu'à 30 m de profondeur de 1° 8 à 2° 4 de longitude Ouest (figure 3.10a). Près de la côte, une bulle d'eau froide (12 °C) venant du fond, remonte vers la surface, en suivant la bathymétrie, sous la lentille (figure 3.10a). La fluorescence est maximale en surface (0-20 m) près de la côte (1° 4 Ouest), mais reste élevée de 0 à 40 m de profondeur jusqu'à 2° 4 Ouest

(figure 3.10c). Les particules en suspension sont concentrées près de la côte et au fond (figure 3.10d).

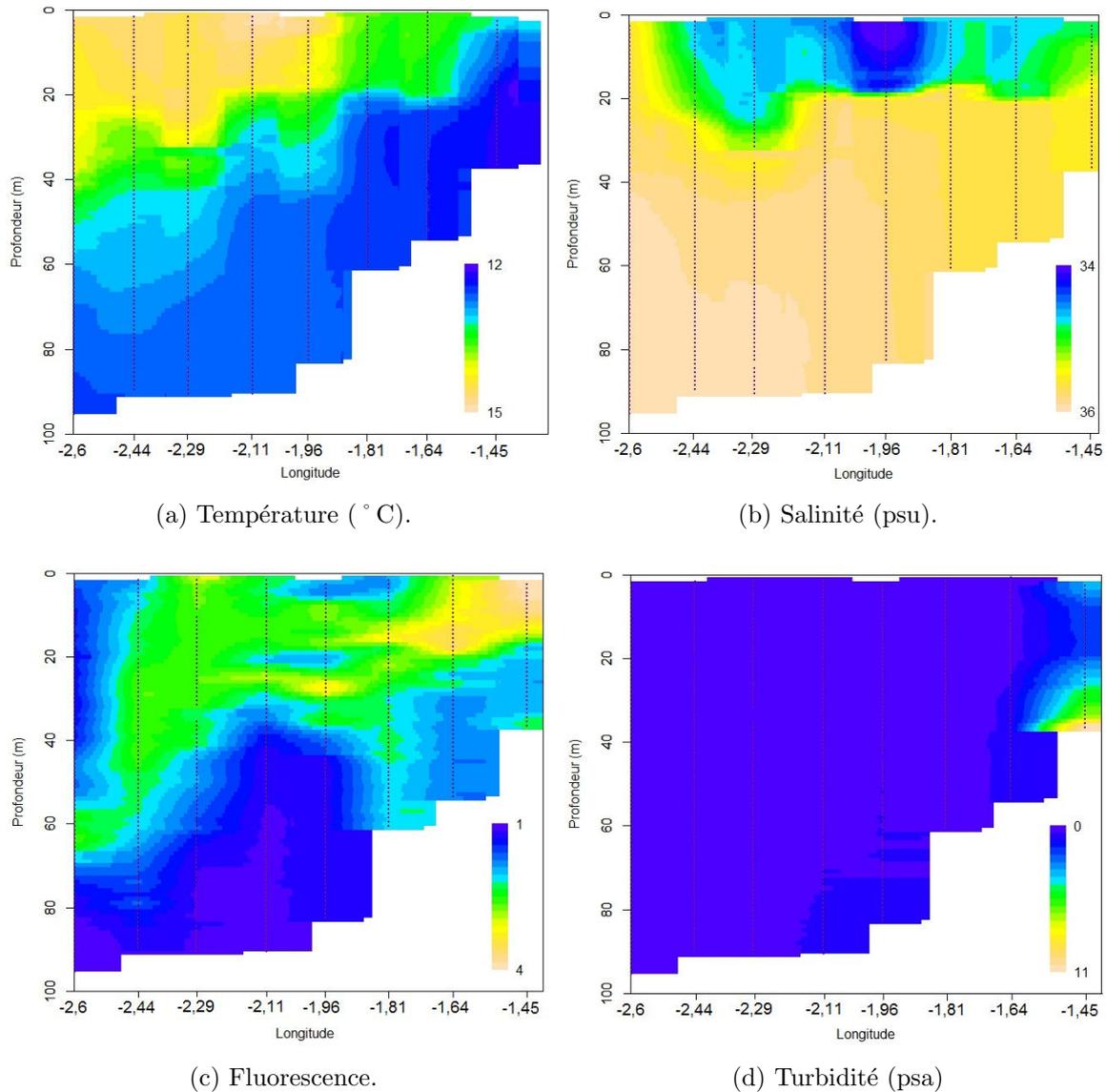
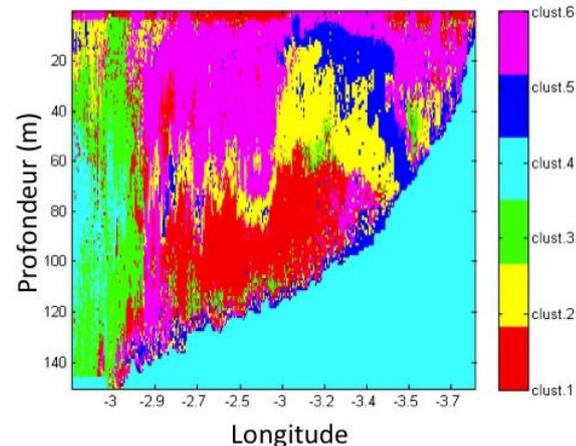
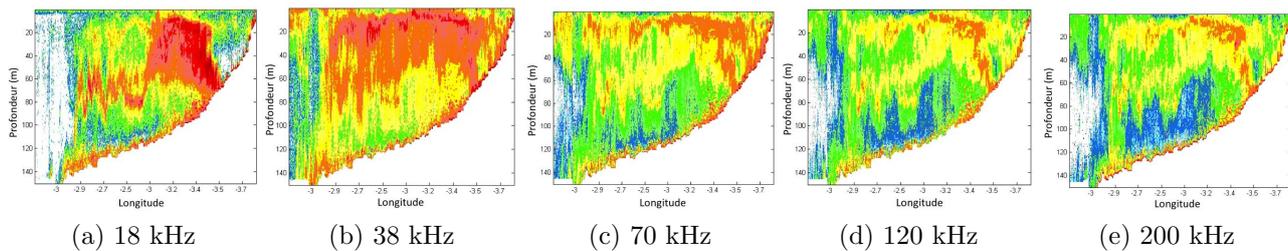


FIGURE 3.10 – Distribution verticale des paramètres hydrologiques et de la charge en particules totale, estimée par la méthode de krigeage. Les points noirs représentent les données.

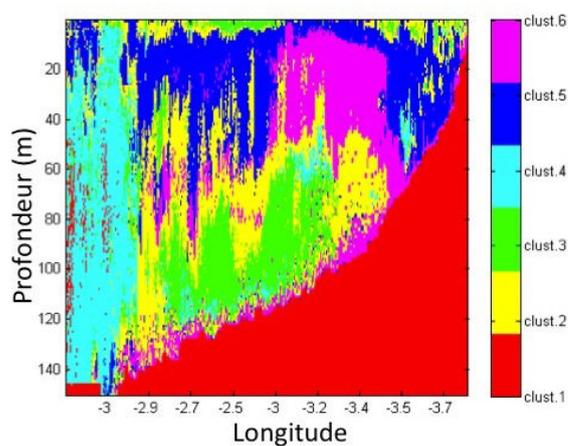
Distribution verticale des couches diffusantes

L'ajout des cellules d'écho-intégration de la radiale du leg 3 au jeu de données centrées comprenant l'ensemble des données de la campagne PELGAS 2013, utilisé dans la section 2.4, induit un léger changement des résultats de la classification (exemple de la radiale 17, figure 3.11). Les réponses fréquentielles des groupes 1, 3, 4 et 6 restent les mêmes mais changent de numéro et deviennent respectivement les réponses fréquentielles des groupes 4, 1, 3 et 5. La différence réside dans la distribution des Sv de la fréquence 18 kHz pour les nouveaux groupes 2 et 6 (anciennement 2 et 5). Si l'on observe la distribution des Sv pour le groupe 2 à la fréquence 18 kHz (figure 3.12b), on s'aperçoit que la médiane représente une distribution de Sv beaucoup plus étendue et comprenant des valeurs beaucoup plus fortes. Cela engendre un changement dans la réponse fréquentielle médiane du groupe 2 (figure 3.11e) qui représente

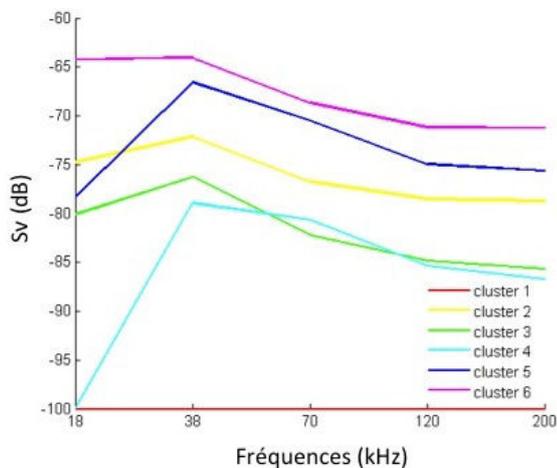
des parties de la colonne d'eau où la réponse acoustique est forte aux basses fréquences, mais dont l'intensité globale est relativement plus faible que le groupe 5 (anciennement 6) à toutes les fréquences. C'est d'ailleurs ce que l'on observe pour la couche diffusante dense en 18 kHz (figure 3.11 (a)). Cette couche diffusante est catégorisée dans le groupe 5 dans l'application de la méthode sur les données des legs 1 et 2 (figure 3.11 (f)). Dans le cas de l'application de la méthode sur le jeu de données comprenant la radiale du leg 3, cette même couche diffusante est catégorisée dans les groupes 2 et 5. A l'échelle de la radiale, les nouveaux groupes rassemblent les mêmes cellules d'écho-intégration. Les nouvelles réponses fréquentielles médianes représentent les mêmes grands types de réflecteurs, à savoir des organismes GB dont la taille des inclusions gazeuses varie. La seule différence réside dans la séparation d'une partie des Sv de la fréquence 18 kHz de l'ancien groupe 5 vers le nouveau groupe 2.



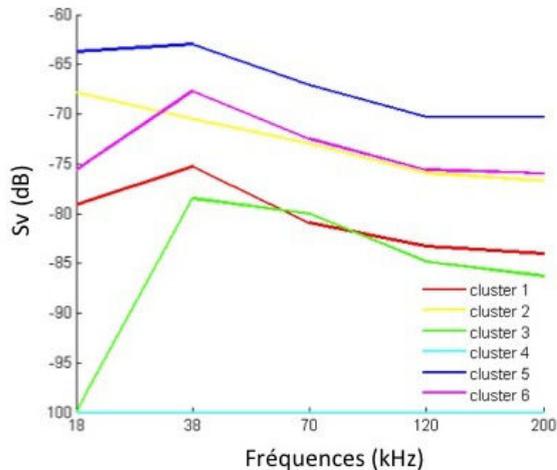
(f) Résultats sur la radiale 17 sans les cellules de la radiale du leg 3 (section 2.4).



(g) Résultats sur la radiale 17 avec les cellules de la radiale du leg 3.

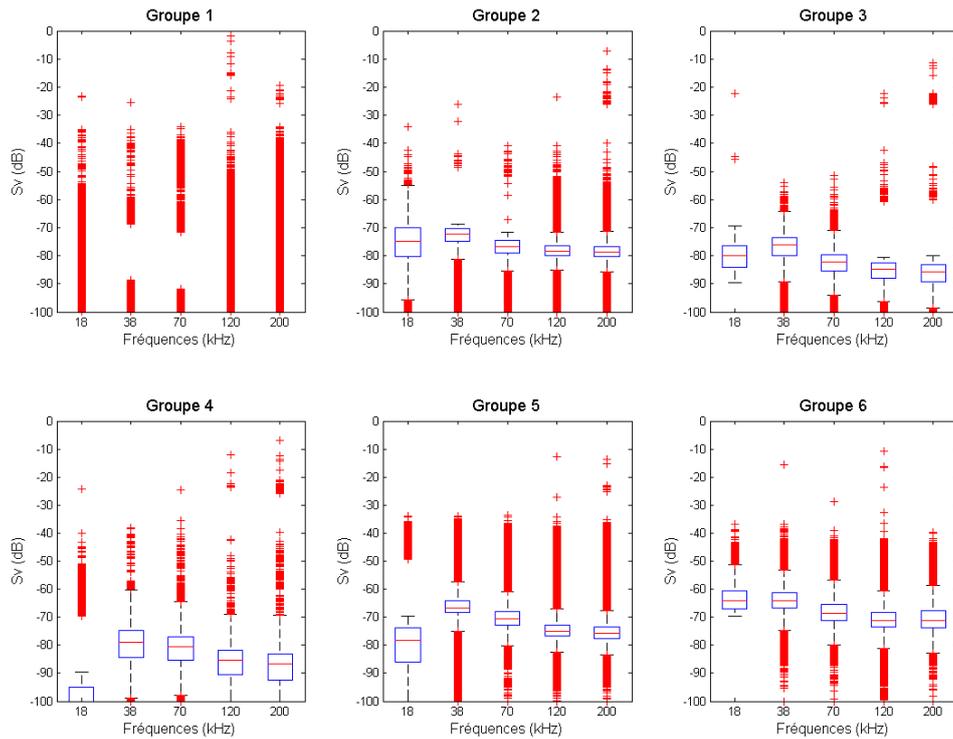


(h) Réponses fréquentielles médianes sans les cellules de la radiale du leg 3.

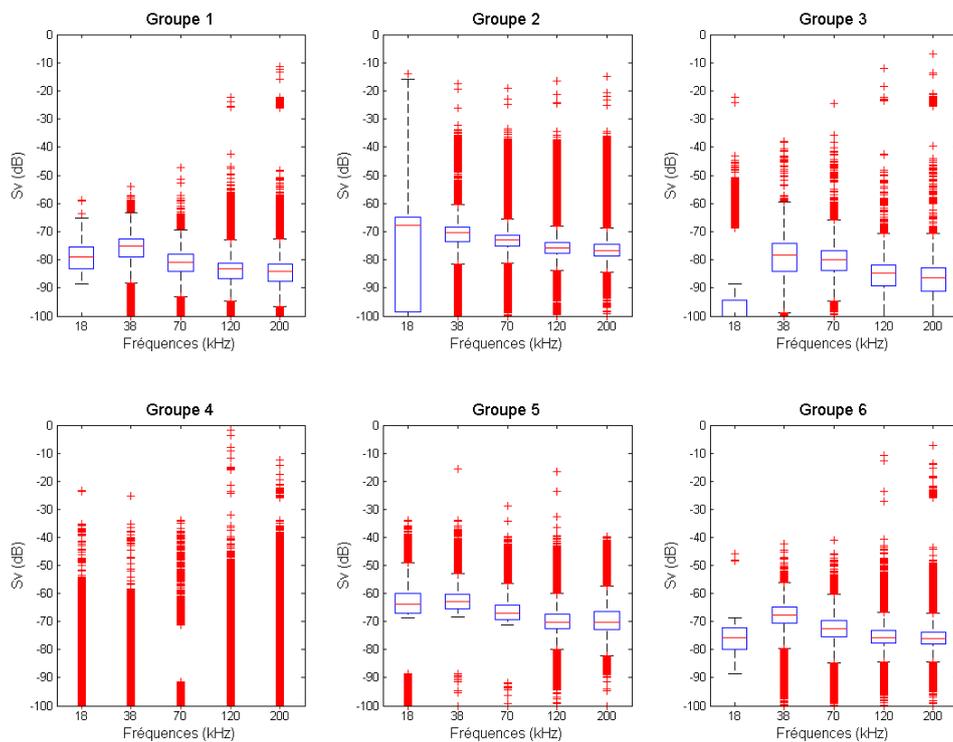


(i) Réponses fréquentielles médianes avec les cellules de la radiale du leg 3.

FIGURE 3.11 – Comparaison des résultats de la classification des échos ACM-KM appliquée sur les données du réseau d'échantillonnage des legs 1 et 2 (a) & (c) et sur les données des legs 1 et 2 avec les cellules d'écho-intégration de la radiale nord du leg 3 (b) & (d), sur la radiale 17.



(a) Données legs 1 et 2.



(b) Données legs 1, 2 et radiale nord du leg 3.

FIGURE 3.12 – Comparaison de la distribution des Sv (croix rouges) par fréquence pour chaque groupe entre les résultats obtenus par la méthode de classification ACM-KM appliquée aux données des legs 1 et 2 de la campagne PELGAS 2013 et aux mêmes données auxquelles s’ajoutent les cellules de la radiale nord du leg 3. Les rectangles représentent la distribution des Sv entre le 1^e et le 3^e quartile, séparés par la médiane (2^e quartile, barre rouge). Les moustaches des boîtes représentent les valeurs extrêmes des distributions.

Les résultats de la classification des cellules de la radiale nord du leg 3, selon la méthode de classification non supervisée ACM-KM, montrent une bonne discrimination des structures observées sur les échogrammes multifréquences (figure 3.13). C'est-à-dire que les structures que forment les échos sont catégorisées dans des groupes distincts dont la réponse fréquentielle médiane nous renseigne sur le type de réflecteurs qui les domine. Les patrons spatiaux des couches dominantes sur l'échogramme 18 kHz (figure 3.13a) correspondent aux groupes 2 et 5 (figure 3.13b). Les zones où l'intensité acoustique est très faible à toutes les fréquences (zones blanches sur tous les échogrammes) correspondent au groupe 3. Les zones autour du groupe 3, où la réponse acoustique est faible, correspondent au groupe 1. Le groupe 6 correspond aux zones les plus denses de l'échogramme 38 kHz.

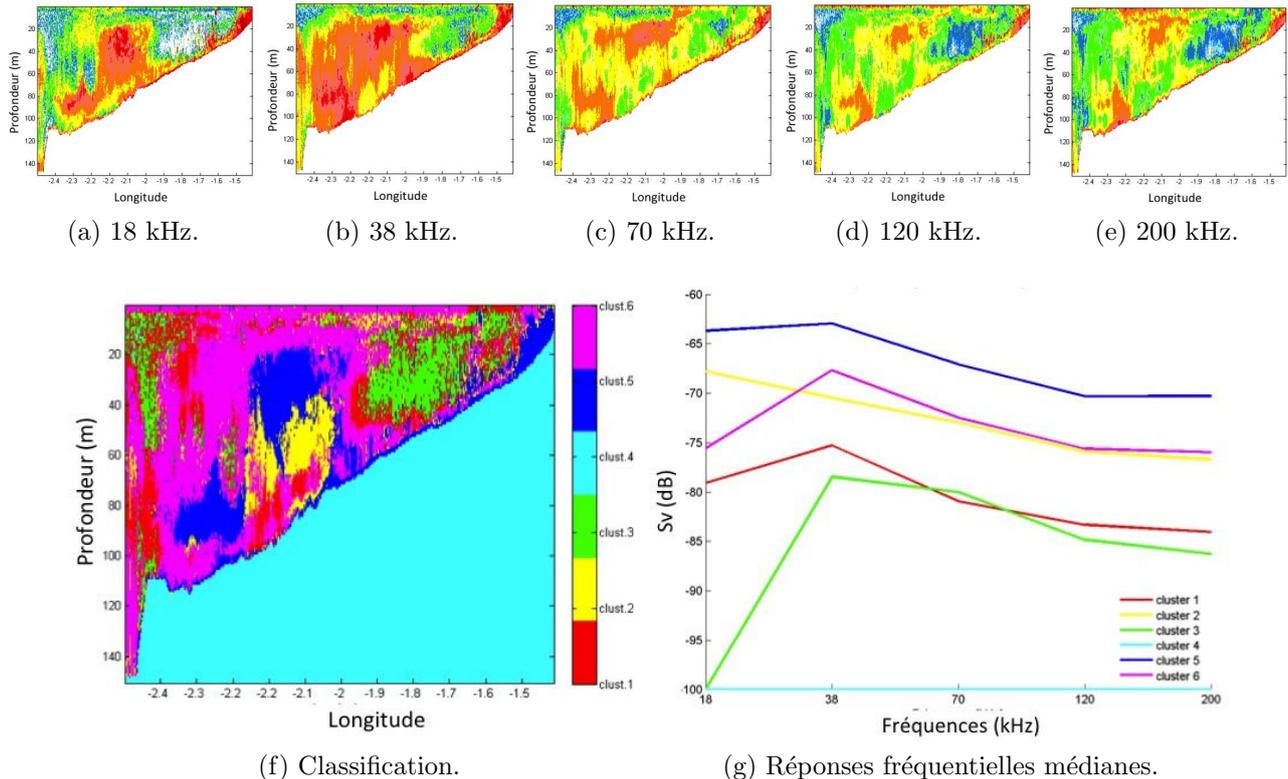
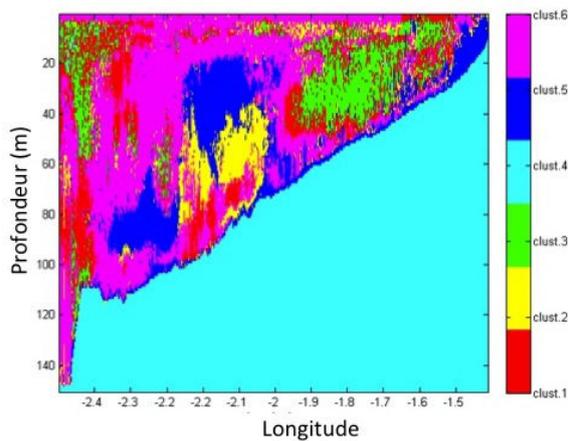
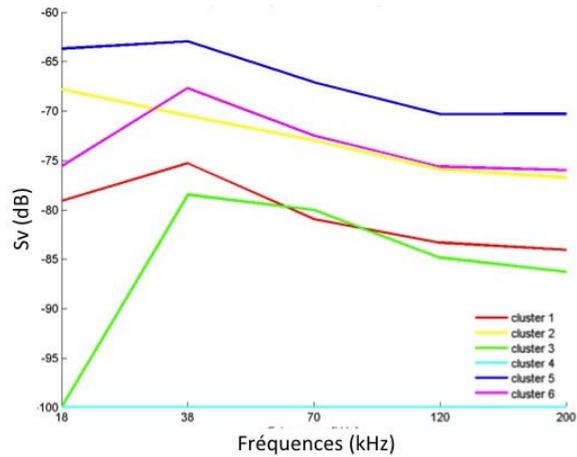


FIGURE 3.13 – Résultats de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données des legs 1 et 2 avec les cellules d'écho-intégration de la radiale nord du leg 3, pour les cellules de la radiale nord du leg 3.

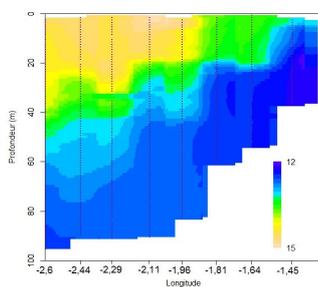
La comparaison des distributions spatiales des groupes de couches diffusantes sur l'échogramme synthétique issu de la classification (figure 3.14a) et des variables hydro-biologiques krigeées (figures 3.14c à 3.14f), ne montrent aucune correspondance entre les patrons spatiaux des couches diffusantes et les structures hydro-biologiques. Aucune couche diffusante n'est restreinte à la zone de forte turbidité située près du fond dans la zone côtière (figure 3.14f). L'hydrologie de la zone côtière est caractérisée par un upwelling local apportant une eau froide et riche du fond, qui supporte une production primaire élevée (maximum de fluorescence en surface, figure 3.14e)). Cependant, aucune couche diffusante ne semble être circonscrite à cette zone de forte production phytoplanctonique. Plus au large, la couche diffusante du groupe 5 est située dans le gradient de température entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides du fond, et à cheval sur une zone de faible et forte production primaire (figure 3.14c). Dans la partie centrale de la zone, la bulle d'eau chaude et dessalée ne semble pas non plus influencer sur la distribution des couches diffusantes des groupes 5 et 6 (figure 3.14d).



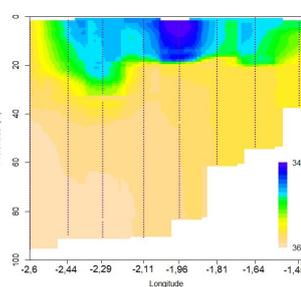
(a) Classification.



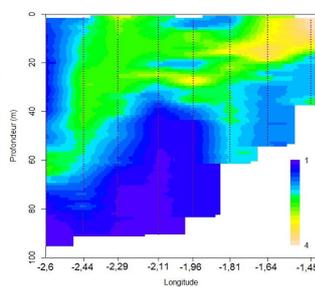
(b) Réponses fréquentielles médianes.



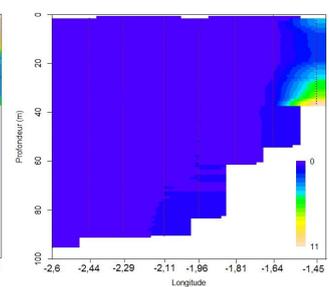
(c) Température (° C).



(d) Salinité (psu).



(e) Fluorescence.



(f) Turbidité (psa).

FIGURE 3.14 – Comparaison de la distribution verticale des paramètres hydrologiques (c à f) et des distributions verticales des groupes de couches diffusantes issus de la classification ACM-KM (a et b), le long de la radiale nord du leg 3 de la campagne PELGAS 2013.

3.4 Discussion

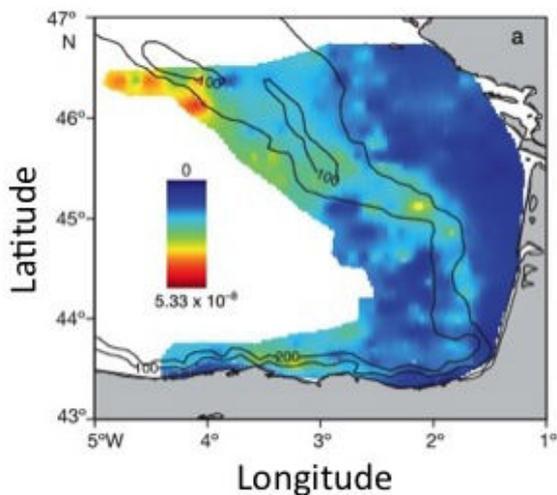
Des indices de l'état de l'écosystème pélagique construits à partir des données collectées pendant la campagne PELGAS 2013, ont été moyennés sur une grille spatiale standardisée, afin de comparer à méso-échelle (centaines de km) leurs distributions spatiales avec celles des couches diffusantes. Une comparaison similaire a été réalisée entre les couches diffusantes et les structures hydro-biologiques observées à l'échelle grossière (100 m à 100 km) d'une radiale, afin d'étudier la concordance de leurs patrons spatiaux verticaux. Aucune ressemblance pouvant indiquer une origine commune entre les distributions spatiales des couches diffusantes et des indicateurs de l'écosystème pélagique n'a été constatée aux deux échelles. Cela peut vouloir dire que les couches diffusantes observées dans le golfe de Gascogne sont produites par des organismes peu ou pas échantillonnés par les campagnes écosystémiques PELGAS. Mais cela peut signifier que les groupes constitués par la méthode ont des compositions hétérogènes incluant des organismes aux préférences environnementales différentes. Ces hypothèses ne pourront être départagées que par des vérités terrain collectées dans la même échelle spatio-temporelle que l'échantillonnage acoustique des couches diffusantes.

Sur la base de données acoustiques, Lezama-Ochoa et al. (2011) et Trenkel & Berger (2013) avaient, à l'inverse, fait l'hypothèse que les couches diffusantes du golfe de Gascogne étaient produites par des organismes déjà échantillonnés par les campagnes écosystémiques du type PELGAS, mais sans valider cette hypothèse avec des données collectées simultanément sur les

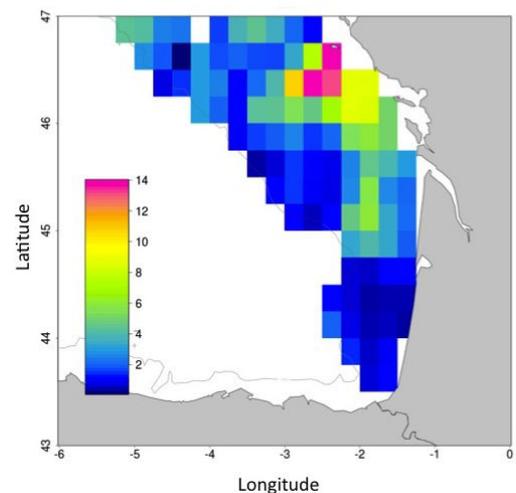
organismes en question. Nous comparons ici les résultats de leur classification acoustique des couches diffusantes avec des données collectées avec d'autres capteurs lors des campagnes PELGAS, afin de tester la robustesse de leurs hypothèses et des résultats présentés dans ce chapitre.

Lezama-Ochoa et al. (2011) classent les échos observés dans le golfe de Gascogne au printemps 2009 en trois groupes : les poissons (*Fish*), les faibles réflecteurs (*Fluid-Like*) et les autres cibles (*Others*), à partir de la méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011). Ils font l'hypothèse forte que le groupe *Fish* représente les bancs de poissons à vessie, que le groupe *FL* représente la communauté du "macrozooplancton", et que la catégorie *Other* est constituée de "larves de poissons, de gélatineux et de siphonophores porteurs de bulles de gaz". A partir des résultats de classification, les auteurs dressent des cartes de distribution du Sv, assimilé à de la "biomasse", des poissons et du macrozooplancton à partir des échos des groupes *Fish* et *FL*. D'après les cartes produites par ces auteurs, le "macrozooplancton" était essentiellement présent près du talus dans le sud du golfe de Gascogne au printemps 2009 (figure 3.15a), alors que les poissons à vessie étaient surtout distribués près des côtes charentaises et sur le bord externe du plateau continental, entre les latitudes 45 et 46 ° N (figure 3.16a).

Les organismes planctoniques les plus proches de la définition de "macrozooplancton" de Lezama-Ochoa et al. (2011), collectés pendant la campagne PELGAS 2009, sont les individus du gros mésozooplancton ($> 2000 \mu\text{m}$), pêchés au filet WP2 dans la même zone, 15 jours avant l'échantillonnage acoustique de Lezama-Ochoa et al. (2011). La distribution du gros mésozooplancton, collecté pendant PELGAS, a une distribution opposée à celle du "macrozooplancton acoustique" de Lezama-Ochoa et al. (2011), avec un maximum de densité près de la côte charentaise (figure 3.15b).



(a) "Macrozooplancton acoustique" (Sv, m^{-1}), Lezama-Ochoa et al. (2011)



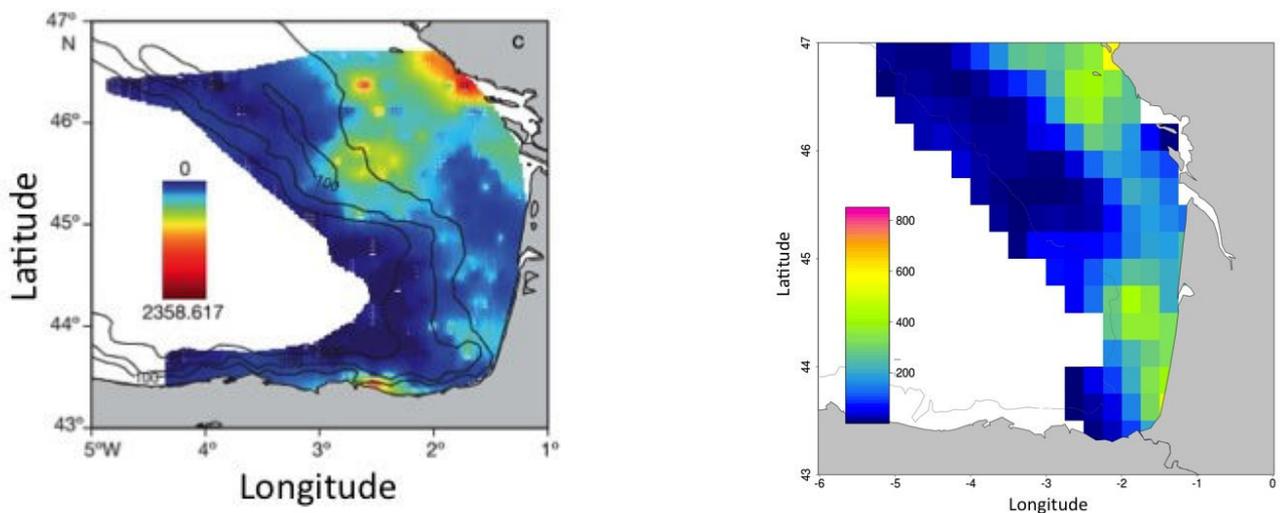
(b) Biomasse du mésozooplancton ($> 2000 \mu\text{m}$), données PELGAS 2009

FIGURE 3.15 – Comparaison de la distribution du "macrozooplancton" issue de Lezama-Ochoa et al. (2011) d'après des données acoustiques (a) et de la distribution spatiale de la biomasse du gros mésozooplancton issue de données biologiques de la campagne PELGAS 2009 (b), dans le sud du golfe de Gascogne au printemps 2009.

De même, la distribution spatiale des densités acoustiques attribuées à des poissons à vessie lors de l'échotypage de PELGAS 2009, validée par des chalutages d'identification, diffère de la carte des "poissons acoustique" de Lezama-Ochoa et al. (2011). Les maximum de densité situés le long de la côte vendéenne et entre le bassin d'Arcachon et la frontière espagnole se

retrouvent sur les deux cartes (figure 3.15). En revanche, Lezama-Ochoa et al. (2011) prédisent, à partir des données acoustiques, une forte occurrence de poissons à vessie au-dessus du talus, à la latitude de l’embouchure de la Gironde, qui n’a pas été observée dans les échantillons biologiques. Même si le groupe ”*Fish*” de la méthode utilisée par ces auteurs peut inclure les échos des poissons à vessie, il semble que ce groupe inclus d’autres échos dont la réponse acoustique bifréquentielle est similaire à celles des poissons.

La troisième partie de PELGAS a généralement lieu depuis 2007 devant l’embouchure de la Gironde. La mission revient dans cette zone généralement 1 mois après y être passé pour la première fois, en début de campagne, et y retrouve des distributions de poissons et de mésozooplancton comparables à celles observées lors du premier passage. Ces observations répétées de 2007 à 2014 indiquent que les distributions spatiales de petits poissons pélagiques et de mésozooplancton sont relativement stables à l’échelle d’une quinzaine de jours dans le golfe de Gascogne au printemps. Les différences entre les distributions de poisson et de macrozooplancton prédites par Lezama-Ochoa et al. (2011) et observées par PELGAS 2009 à 15 jours d’intervalle, ne sont donc vraisemblablement pas dues à un déplacement des organismes, mais démontrent le manque de précision de la méthode de classification de Lezama-Ochoa et al. (2011) pour distinguer les poissons du macrozooplancton, à partir des seules données acoustiques bi-fréquences.



(a) ”Poissons acoustiques” (NASC, $m^2.n.mile^{-2}$), Lezama-Ochoa et al. (2011)

(b) Densité acoustique des poissons à vessie (NASC), données PELGAS 2009.

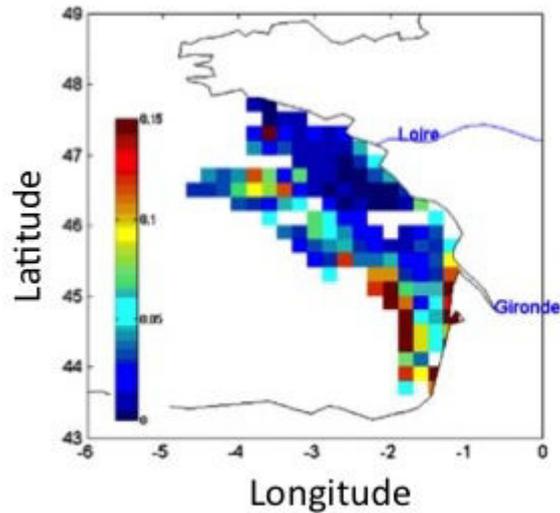
FIGURE 3.16 – Comparaison de la distribution spatiale du ”poisson acoustique” issue de Lezama-Ochoa et al. (2011) à partir de densités acoustiques (a) et la distribution spatiale de la densité acoustique attribuée aux poissons à vessie selon les données acoustiques validées par des chalutages d’identification de la campagne PELGAS 2009 (b), dans le sud du golfe de Gascogne au printemps 2009.

Les résultats de cette comparaison de distributions d’organismes prédites et observées confirment les résultats de la comparaison des méthodes de classification de données acoustiques multifréquences, présentée dans la section 2.3. Avec seulement deux fréquences, la méthode de classification de Ballon et al. (2011) appliquée aux échos du golfe de Gascogne par Lezama-Ochoa et al. (2011), permet, au mieux, de discriminer des échos selon leur intensité (forts *vs.* faibles), mais n’est pas assez précise pour discriminer efficacement les poissons à vessie des organismes FL, dans l’écosystème pélagique printanier du golfe de Gascogne.

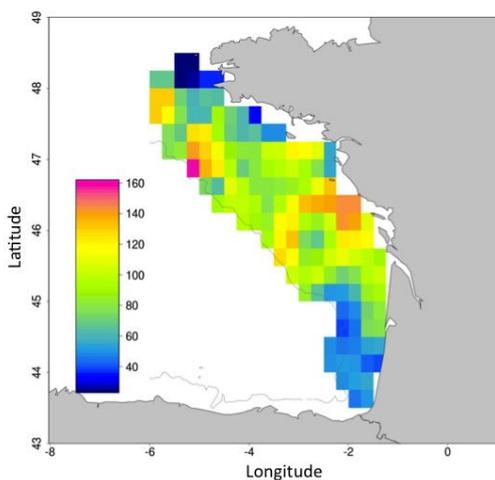
D'autre part, d'après les résultats de la méthode de classification non supervisée ACM-KM (cf. section 2.4), utilisée en 2013, et l'échotypage des échogrammes réalisé chaque année, les couches diffusantes du golfe de Gascogne sont dominées, au printemps, par la réponse acoustique de réflecteurs de type gazeux résonants. Ces échos sont théoriquement classés dans le groupe *Others* de l'étude de Lezama-Ochoa et al. (2011), qui est considéré comme du "bruit bleu" par ces auteurs, et exclu de l'analyse et des interprétations. Sachant que la réponse acoustique des réflecteurs gazeux résonants masque celle des réflecteurs FL, et parfois celle des bancs de poissons, la non prise en compte du groupe *Other* et des réflecteurs résonants au sens large, revient à n'interpréter que des portions très minoritaires des échogrammes dans le golfe de Gascogne au printemps. Les distributions de "biomasse acoustique" de macrozooplancton et de poissons à vessie, présentées par Lezama-Ochoa et al. (2011) sont donc peu informatives, étant donnée la prédominance des réflecteurs résonants gazeux dans le golfe de Gascogne au printemps. Ceci est confirmée par la comparaison avec les données de validation terrain issues de PELGAS 2009.

Trenkel & Berger (2013) proposent une méthode de classification des échos dans des groupes préalablement déterminés en fonction de la valeur d'un indicateur multifréquence. Ces auteurs affirment que leur méthode permet de distinguer les poissons sans vessie (maquereau commun dans la zone), le zooplancton FL, les petites bulles résonantes et les poissons à vessie et grosses bulles. Ils l'ont appliquée sur des données acoustiques multifréquences collectées dans le golfe de Gascogne pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 et ont produit des cartes de la distribution spatiale moyenne de chaque groupe, dans les 30 premiers mètres de la colonne d'eau.

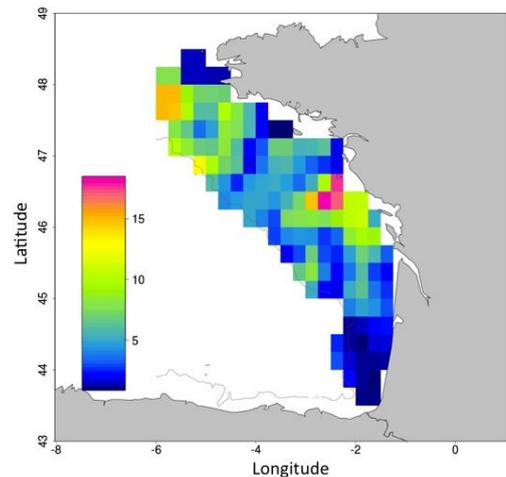
La distribution spatiale moyenne des réflecteurs identifiés comme appartenant au gros mésozooplancton (FL), par Trenkel & Berger (2013) a été comparée aux cartes moyennes de biomasse totale du méso-zooplancton (50 à 2000 μm , figure 3.17) et à la biomasse totale du gros mésozooplancton ($> 2000 \mu\text{m}$), issues des captures du filet WP2 réalisées pendant les campagnes PELGAS 2008 à 2010 (en 2006 et 2007, les stations d'échantillonnage ne couvraient pas tout le golfe et ne permettent pas la comparaison). Les données WP2 sont réalisées sur toute la colonne d'eau, mais le zooplancton étant distribué préférentiellement dans la zone euphotique superficielle, nous considérons que ces données sont représentatives de l'abondance et de la biomasse du mésozooplancton située dans la tranche de profondeur étudiée par Trenkel & Berger (2013). Ces auteurs prédisent des maxima de densité de gros mésozooplancton dans le sud du golfe de Gascogne et aux accores (figure 3.17a). Leur distribution prédite présente des patrons opposés à celle de la biomasse de l'ensemble du mésozooplancton (figure 3.17b) ou de sa fraction la plus grande (figure 3.17c), observée en moyenne lors de la campagne PELGAS entre 2008 et 2010, dont les maximum d'occurrence se situent le long de la côte vendéenne si l'on ne considère que la zone étudiée par Trenkel & Berger (2013).



(a) Occurrence du zooplancton, Trenkel & Berger (2013)



(b) Biomasse Zooplancton (200-2000 μm), données PELGAS



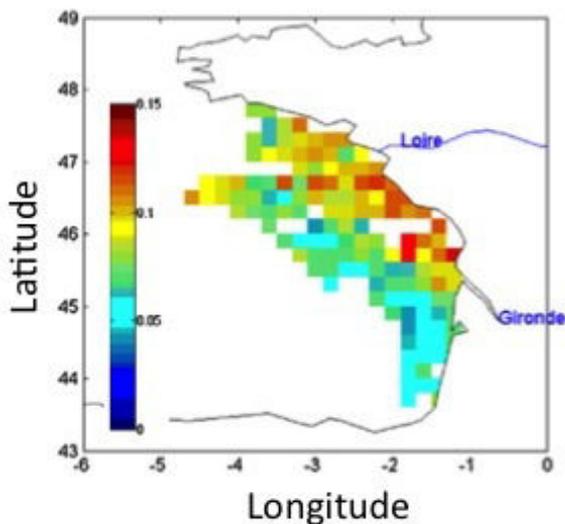
(c) Biomasse Zooplancton (> 2000 μm), données PELGAS

FIGURE 3.17 – Comparaison de la distribution spatiale du macrozooplancton issue de données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, d'après Trenkel & Berger (2013) (a), celle de la biomasse du mésozooplancton total (200-2000 μm , b) et celle de la biomasse du gros mésozooplancton (> 2000 μm , c) d'après les données biologiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2008 à 2010.

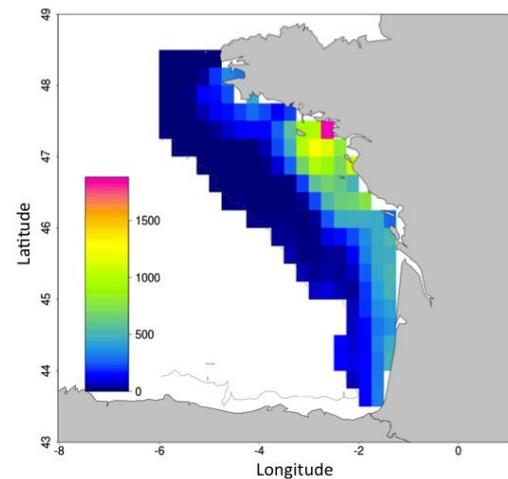
Des cartes de la distribution spatiale moyenne des densités acoustiques de poissons à vessie et de maquereaux communs (*Scomber scombus*) sans vessie, ont été produites à partir des résultats de l'échotypage de PELGAS 2006 à 2010. Au-delà de 50 m de profondeur, seules les densités acoustiques attribuées à des poissons situés dans la tranche de profondeur 10-30 m ont été considérées. En deçà de 50 m de profondeur, la distinction entre poissons proches de la surface et proches du fond n'étant plus possible dans les résultats d'échotypage, toutes les densités acoustiques de poissons à vessie ont été considérées. Ce mode de calcul peut entraîner une légère surestimation de la densité de poissons à vessie pour des profondeurs comprises entre 30 et 50 m. Ces cartes de distributions moyennes validées par des chalutages d'identification ont été comparées aux distributions prédites par Trenkel & Berger (2013), à partir des données acoustiques multifréquences.

Les résultats de la méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013) montrent une plus forte occurrence des poissons à vessie dans le nord du golfe, avec une large couverture spatiale sur le plateau continental jusqu'aux accores (figure 3.18a), et des maxima locaux entre les embouchures de la Loire et de la Gironde. Les observations de PELGAS 2006 à 2010 indiquent que les poissons à vessie étaient distribués beaucoup plus près de la côte, du sud au nord du golfe de Gascogne, avec une zone de concentration maximale en face de l'embouchure de la Loire (figure 3.18b).

La comparaison entre les distributions moyennes des densités acoustiques des maquereaux prédites par la méthode supervisée de Trenkel & Berger (2013) et observées lors des campagnes PELGAS 2006 à 2010, montre également des patrons spatiaux peu cohérents avec des décalages entre les maxima locaux de ces distributions marquées par des valeurs très fortes (figure 3.19).

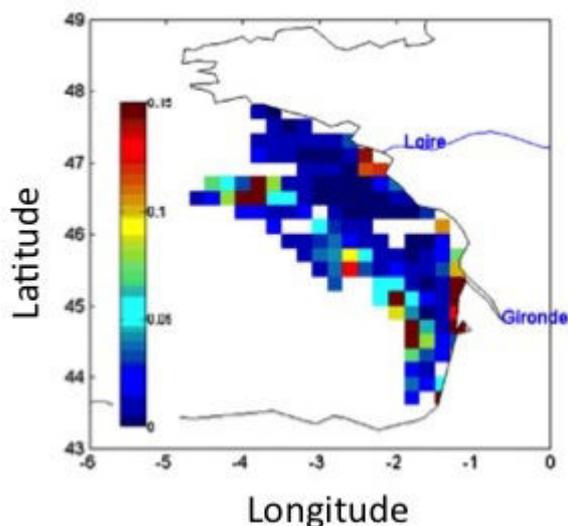


(a) Occurrence des poissons à vessie, Trenkel & Berger (2013)

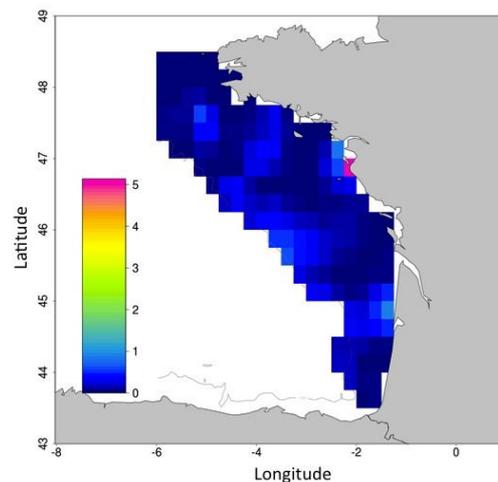


(b) Densité acoustique des poissons à vessie, données PELGAS

FIGURE 3.18 – Distribution des poissons à vessie dans le golfe de Gascogne, d'après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon Trenkel & Berger (2013) (a) et d'après les estimations de biomasses réalisées en combinant les données acoustiques et les chalutages d'identification collectées et effectuées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 selon la méthode décrite dans Doray et al. (2010) (b).



(a) Occurrence de maquereaux, Trenkel & Berger (2013)

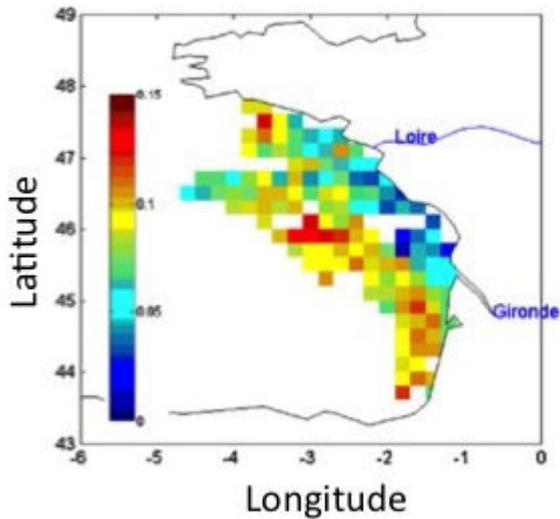


(b) Densité acoustique des maquereaux, données PELGAS

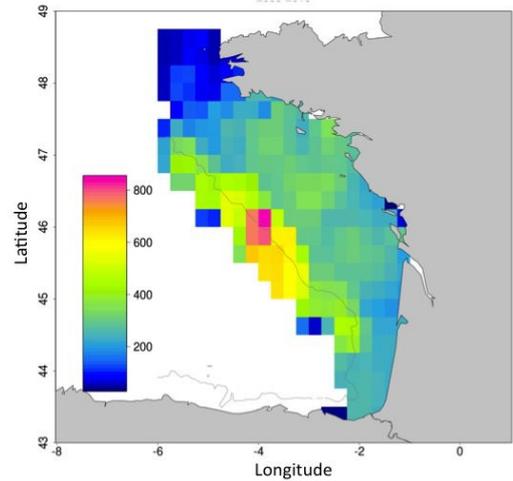
FIGURE 3.19 – Distribution des poissons sans vessie (maquereau) dans le golfe de Gascogne d’après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 selon Trenkel & Berger (2013) (a) et d’après les estimations de biomasses réalisées en combinant les données acoustiques et les chalutages d’identification collectées et effectués pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon la méthode décrite dans Doray et al. (2010) (b).

Trenkel & Berger (2013) estiment que le groupe des petites bulles résonantes, pourrait être constitué de phytoplancton ou de larves de poissons. L’hypothèse des larves de poissons ne peut pas être vérifiée avec les données biologiques disponibles pour les années 2006 à 2010. En revanche, s’il s’agit de phytoplancton, la distribution spatiale de ce groupe devrait suivre les variations de la concentration en chlorophylle-a. La carte de la distribution de la concentration en chlorophylle-a considère des données intégrées sur la verticale. Cependant, la majorité de la chlorophylle-a se trouvant dans la couche euphotique, qui se situe généralement dans les 50 premiers mètres de la colonne d’eau, nous considérons que la chlorophylle-a intégrée est un proxy acceptable pour la concentration de chlorophylle-a entre 10 et 30 m de profondeur. La distribution spatiale de la densité acoustique prédite appartenant au groupe des petites bulles résonantes de Trenkel & Berger (2013), présente un gradient côte-large similaire à la distribution de la chlorophylle-a observée dans la colonne d’eau pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 (figure 3.20). Trenkel & Berger (2013) prédisent cependant une occurrence de bulles très forte en face de la côte des Landes, ainsi qu’un maximum près de la côte de Bretagne sud, qui ne correspondent que grossièrement à la distribution de la chlorophylle-a *in-situ*.

Globalement, les distributions des densités acoustiques attribuées aux différents réflecteurs par Trenkel & Berger (2013) diffèrent des distributions observées lors des campagnes PELGAS, dans la fenêtre spatio-temporelle considérée par Trenkel & Berger (2013), pour les paramètres se rapprochant le plus des définitions des groupes de réflecteurs. Ces résultats confirment le faible pouvoir discriminant de la méthode de Trenkel & Berger (2013), mis en évidence dans la section 2.3.



(a) Occurrence de petites bulles résonantes ("e.g. phytoplankton") d'après Trenkel & Berger (2013)



(b) Chlorophylle-a intégrée PELGAS

FIGURE 3.20 – Distribution des petites bulles de gaz estimées être du phytoplancton, d'après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon Trenkel & Berger (2013) et de la concentration en chlorophylle-a d'après des données biologiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010.

Les larges différences entre les distributions de réflecteurs prédites par Lezama-Ochoa et al. (2011) et Trenkel & Berger (2013) à partir de données acoustiques sans validation terrain et les observations *in-situ*, illustrent le fait qu'il est nécessaire de valider les résultats d'une méthode multifréquence de segmentation d'échogramme, à l'aide de données collectées par d'autres instruments d'échantillonnage.

3.5 Bilan

Au chapitre précédent, nous avons vu que les différents types de couches diffusantes observés dans le golfe de Gascogne et assemblés par la méthode de classification non supervisée ACM-KM, présentent des patrons spatiaux structurés et non aléatoires dans notre zone d'étude. Dans le présent chapitre, nous avons observé que ces structures spatiales ne sont pas linéairement corrélées à celles des paramètres hydro-biologiques échantillonnés, en routine, pendant la campagne PELGAS. Nous avons fait cette observation sur les dimensions horizontale et verticale. L'absence de corrélation linéaire entre les distributions spatiales corrélées peut être induite par différents facteurs : (i) les distributions spatiales peuvent être corrélées par des relations non linéaires qui n'ont pas été considérées dans cette analyse ; (ii) les groupes obtenus par la méthode de classification ACM-KM peuvent assembler des organismes à la réponse acoustique similaire mais aux préférences environnementales variées ; (iii) la réponse acoustique observée correspond à des organismes non échantillonnés par la campagne PELGAS.

Deux autres méthodes de classification des échos ont été utilisées dans le golfe de Gascogne (Trenkel & Berger, 2013; Lezama-Ochoa et al., 2011). Les auteurs de ces deux études déterminent des distributions spatiales à partir de données acoustiques et les relient à des groupes d'organismes sans réelle validation biologique (macro-zooplancton, poissons à vessie, poissons sans vessie, ...), puisque les comparaisons sont effectuées avec des observations d'autres études réalisées dans des objectifs différents à des années différentes. Nous avons comparé les résultats de

ces deux méthodes à des données biologiques collectés dans le golfe de Gascogne aux mêmes années que les données acoustiques utilisées dans ces études. Les distributions spatiales des assemblages détectés par les méthodes de classification supervisées et celles des données biologiques s'avèrent peu similaires. Ces résultats montrent que la méthode ACM-KM, comme les méthodes supervisées, détectent des assemblages de réflecteurs qui ne peuvent pas être validés avec les données biologiques disponibles. Devant l'impossibilité de conclure sur la composition des groupes obtenus par la méthode ACM-KM notre étude s'est contentée de dresser des cartes d'occurrence des différents assemblages. A ce même point, les études utilisant des méthodes supervisées s'avancent à relier les distributions spatiales obtenues par acoustique à des groupes d'organismes (macro-zooplankton, poissons à vessie, ...) et à calculer des distributions de biomasse pour ces différents compartiments.

La comparaison de ces différentes interprétations des échos montre que les résultats des différentes méthodes de classification des échos souffrent encore de subjectivité. Puisque les méthodes de classification des échos ont toutes pour objectif de segmenter les échogrammes collectés, il serait intéressant de développer les approches par bancs d'essai (*benchmark*) pour parvenir à une entente sur l'identité acoustique des assemblages détectés. L'application des différentes méthodes sur des données communes, collectées sur des extensions et selon des grains communs, donnerait des résultats qui pourraient être interpréter avec des critères prédéfinis et communs. Un mode de représentation commun des résultats ajouterait à la standardisation de l'interprétation. De telles approches sont essentielles à la mise en place d'une "expertise" des échos des couches diffusantes comme il en existe pour les bancs de poissons.

Chapitre 4

Etude de la composition des couches diffusantes du panache de la Gironde

Nous voyons qu'un petit mouvement presque imperceptible du gouvernail a le pouvoir de faire virer un navire merveilleusement grand et très lourdement chargé en dépit du poids d'eau qui fait pression sur chacune de ses planches et malgré les vents impétueux qui gonflent ses puissantes voiles.

- Léonard de Vinci -

4.1 Introduction

Dans la littérature, les travaux s'intéressant spécifiquement aux agrégations de plancton par détection acoustique peuvent être classés en deux catégories : les études qui observent la réponse individuelle des organismes planctoniques en laboratoire et les études qui cherchent à décrire la composition taxonomique des couches diffusantes observées *in-situ*.

Dans le premier cas, des organismes planctoniques sont placés dans des dispositifs *in-vitro* afin d'observer l'effet de leurs orientation, taille, forme et composition sur leur propension à rétro-diffuser les ondes acoustiques de une ou plusieurs fréquences. De telles études sont essentiellement menées sur les réflecteurs *Fluid-Like* comme les euphausiacés (Chu et al., 1993; Martin Traykovski, 1998; Miyashita et al., 1996; Foote, 1990; McGehee et al., 1998), les méduses (Brierley et al., 2001) ou les salpes (David et al., 2001; Wiebe et al., 2010). Elles mènent au développement de modèles de réflecteurs qui, en considérant la forme simplifiée d'un organisme, estiment l'énergie qu'il peut rétro-diffuser en fonction de sa taille et de son orientation (Stanton & Chu, 2000; Chu et al., 1993; Stanton et al., 1994a; Monger et al., 1998). En revanche, si l'on écarte le cas des poissons à vessie, ce genre d'étude s'est très peu porté sur les organismes de petite taille porteurs d'inclusion gazeuse. On peut néanmoins citer le travail de Warren et al. (2001) dans lequel les auteurs ont mesuré la réponse individuelle de siphonophores physonesctes, mais *in-situ*. Cependant, dans le domaine de l'acoustique, les physiciens s'interrogent sur la rétro-diffusion des ondes acoustiques par des bulles de gaz présentes dans l'eau (Leroy, 2004; Love, 1978, 2013; Ainslie & Leighton, 2011; Kloser et al., 2002) et ce sont ces travaux qui servent aux études des réflecteurs biologiques gazeux.

Dans le second cas, la composition des agrégations observées n'est pas connue *a priori*. L'objectif commun de ces études est de déterminer la composition spécifique des couches et de déterminer quels sont les organismes qui induisent la réponse acoustique mesurée. Pour étudier la réponse acoustique d'une communauté plurispécifique de plancton, la seule analyse des réponses acoustiques multifréquences ne suffit pas et les hypothèses émises doivent être corroborées par la collecte d'organismes.

Les données acoustiques et les données biologiques des échantillons d'organismes sont de natures très différentes. Pour mettre en relation les informations qu'elles apportent et valider leur potentiel recoupement, deux approches sont possibles : l'approche directe (Greenlaw, 1979; Wiebe et al., 1996) et l'approche inverse (Holliday, 1977, 1992). Dans les deux cas, les modèles de réflecteurs développés à partir de l'étude de la réponse individuelle des organismes sont indispensables. L'approche directe cherche à estimer un spectre de fréquences à partir d'un échantillon d'organismes. La réponse acoustique théorique de chaque type de réflecteurs présent dans l'échantillon est estimée par le modèle de réflecteur correspondant en utilisant la taille et l'abondance mesurée dans l'échantillon. La somme des résultats de tous les modèles estime une réponse acoustique globale de l'échantillon. Cette réponse théorique est comparée à la réponse mesurée (Greenlaw & Johnson, 1983). Réciproquement, l'approche inverse cherche à estimer une combinaison de tailles et d'abondances à partir d'une réponse multifréquentielle mesurée. Dans ce cas, un seul modèle de réflecteur est considéré. La sélection du modèle utilisé est basée soit sur la composition d'un échantillon d'organismes, soit sur la forme de la courbe de la réponse fréquentielle mesurée (Greenlaw & Johnson, 1983). Un algorithme cherche ensuite la combinaison de tailles et d'abondances de ce réflecteur qui produirait la réponse fréquentielle la plus proche de la réponse mesurée (Lebourges-Dhaussey & Balle-Beganton, 2004). Cette combinaison de réflecteurs peut être comparée à la composition des échantillons de filets.

Ces approches ne donnent des résultats pertinents que lorsque les modèles de réflecteurs sont adaptés aux organismes présents dans les couches diffusantes et lorsque les échantillonnages acoustiques et biologiques sont réalisés avec des instruments adaptés. Dans le cas de couches diffusantes composées d'organismes FL (mészo-zooplancton), les approches directe et inverse permettent de mettre en évidence de bonnes corrélations entre l'échantillonnage acoustique et biologique (Costello et al., 1989; Greenlaw, 1979; Holliday & Pieper, 1995). Les modèles de réflecteurs FL sont en effet pertinents pour représenter les organismes de ces couches et les méthodes d'échantillonnage du mészo-zooplancton sont aujourd'hui bien validées (Harris et al., 2000).

Dans le cas des couches "fantômes", les couches diffusantes sont vraisemblablement provoquées par la résonance des inclusions gazeuses des organismes *Gas-Bearing* (GB) présents dans le faisceau acoustique (Lawson et al., 2004; Lavery et al., 2007; Mair et al., 2005; Peña et al., 2014). Une faible abondance de bulles de gaz peut engendrer une réponse acoustique très forte et masquer la réponse acoustique des réflecteurs plus faibles, mêmes s'ils sont très nombreux. Lorsque la méthode directe est appliquée à la réponse acoustique d'une couche "fantôme", si les organismes gazeux résonants ne sont pas ou sous-représentés dans l'échantillon initial, alors la réponse fréquentielle estimée sera très différente de celle que l'on mesure (Mair et al., 2005). En revanche, si les organismes résonants sont correctement échantillonnés, les résultats peuvent être probants (Lavery et al., 2007). Le succès de ces études repose donc essentiellement sur le choix des instruments de collecte des organismes. Cependant, les organismes pourvus d'une inclusion gazeuse, sont capables de nager rapidement sur de petites distances, ce qui leur permet d'éviter les filets (Roger, 1994). De ce fait, même si des engins adaptés sont utilisés, l'évitement reste un problème (Peña et al., 2014).

Lezama-Ochoa et al. (2011) et Trenkel & Berger (2013) ont menés des analyses de données acoustiques multi-fréquences collectées dans le golfe de Gascogne. Leurs résultats rapportent l'omni-présence de couches diffusantes "fantôme" dans la colonne d'eau du plateau continental. Ces auteurs font l'hypothèse que ces couches sont composées de "[...] *mainly fish larvae and gelatinous and gas-bearing siphonophores* (Lezama-Ochoa et al., 2011) ou de "[...] *larval fish or phytoplankton* (Trenkel & Berger, 2013). Cependant, les conclusions de ces deux études restent spéculatives puisqu'elles n'ont pas été comparées à des données biologiques collectées au même moment que les données acoustiques.

L'objectif de l'étude, présentée dans ce chapitre, est de déterminer quels sont les organismes qui composent les couches diffusantes résonantes observées dans le golfe de Gascogne. Le travail s'est concentré sur les couches diffusantes observées dans une zone d'étude réduite où un échantillonnage exploratoire a été mené sur un réseau de stations pendant les campagnes PEL-GAS 2012 et 2013. Dans un premier temps, seules les données acoustiques sont considérées pour établir un contexte global des couches diffusantes dominantes de la zone. A partir de cette analyse exploratoire, une première approche par inversion est menée pour comparer des abondances estimées de réflecteurs à des abondances mesurées par différents échantillonneurs. Finalement, une analyse combinant l'approche directe et l'approche inverse est appliquée pour comparer les données acoustiques et biologiques et estimer la taille et la densité des organismes porteurs d'inclusion gazeuse qui provoquent ces couches résonantes. Le cheminement de ce chapitre suit l'avancement chronologique des travaux. Chaque étape mène à des conclusions, des limites et de nouveaux objectifs auxquels l'étape suivante tente de répondre.

4.2 Étude du contexte acoustique multifréquence intégré sur la profondeur

L'étude présentée dans cette partie ne considère que les données collectées pendant le troisième leg de la campagne PELGAS 2012. Il s'agit d'une étape exploratoire dont le but est de discriminer des groupes de stations ayant des réponses fréquentielles différentes, à partir de données acoustiques sur les couches diffusantes à échelle grossière.

4.2.1 Matériel et méthodes

Les données acoustiques

Lors d'un premier passage, les deux radiales (nord et sud, figure 3.7) ont été prospectées par acoustique pour collecter des données continues avec les échosondeurs halieutiques de coque EK60 (cf. section 2.4).

Echo-intégration des données des échosondeurs halieutiques. Les données ont été sélectionnées dans un périmètre de 5 MN avant et après la position de la station pour représenter l'information acoustique multi-fréquences de chaque station. Les Sv ont été écho-intégrés finement, dans des cellule de 1 ping de long sur 1 m de profondeur. Les résultats de l'écho-intégration se présentaient sous forme de matrices de dimensions : n ESDUs $\times p$ tranches de profondeur $\times f$ fréquences. Une fois reconstitués, les échogrammes illustrant les stations présentaient des détections acoustiques indésirables (figure 4.1). Lorsque le navire coupe le sillage d'un autre navire ou le sien ou lorsque la houle est très importante, des bulles d'air passent devant les transducteurs situés sous la coque du navire entraînant une sous-détection du reste de la colonne d'eau. Sur les échogrammes, ces pings apparaissent blancs car ils ne contiennent pas d'information. Ces mêmes sillages ou traces de houle provoquent une réponse très intense en surface qui doit également être filtrée (sur-détection des bulles qui masquent les autres cibles). Les échos des bancs de poissons ont été considérés comme des sur-détections puisqu'ils masquent la réponse des couches diffusantes aux endroits où ils sont présents. Un filtre a été développé pour s'affranchir des sous- et sur-détections.

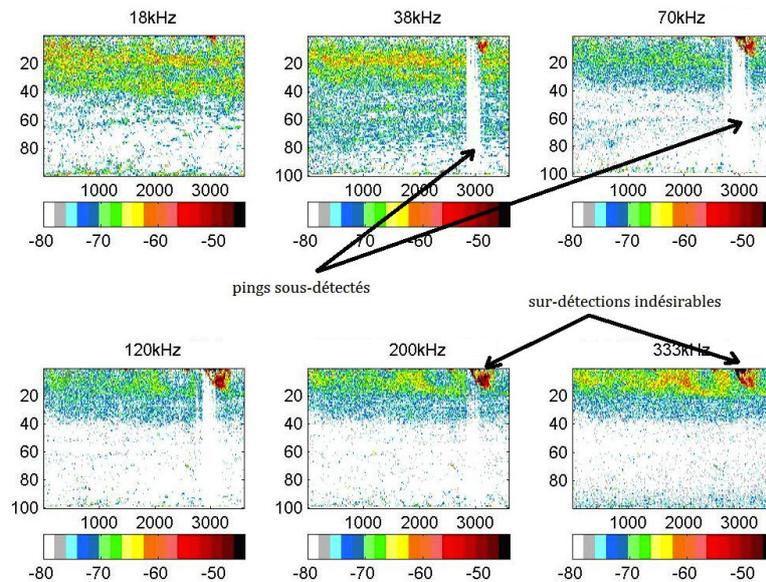


FIGURE 4.1 – Exemple des échogrammes d’une station présentant des anomalies de détection acoustique. La présence de bulles devant les transducteurs engendrée par le sillage d’un navire ou par une houle importante provoque une atténuation anormale de la détection acoustique sur le reste du ping (les sous-détectés). La grande quantité de bulles en surface provoquée par les mêmes phénomènes engendre des détections denses mais indésirables (les sur-détectés).

Filtre des pings sous-détectés. Les sous-détectés ont été retirés (figure 4.2, échogramme du haut) du résultat de l’écho-intégration. La variance a été calculée pour chaque ping sur l’ensemble de ses tranches de profondeur (figure 4.2, graphique du bas). En cherchant la zone homogène où les variances par ping sont minimales, un intervalle a été sélectionné sur la plus grande portion de l’échogramme sans anomalie, pour calculer une variance moyenne de référence (l’intervalle de contrôle). Une variance résiduelle a été définie pour chaque ping comme le carré de la différence entre la variance du ping et la variance moyenne de référence. Ces résidus ont été standardisés par centrage et réduction pour accentuer le contraste entre les pings normaux et les pings pourvus d’anomalies.

Les pings ayant des résidus standardisés inférieurs à un seuil ont été considérés comme pourvus d’anomalies et supprimés de l’ensemble des fréquences. La valeur du seuil est déterminée à partir de la distribution des variances résiduelles par ping afin que seuls les pings anormaux soit filtrés. Le filtre a été appliqué séquentiellement sur chaque fréquence.

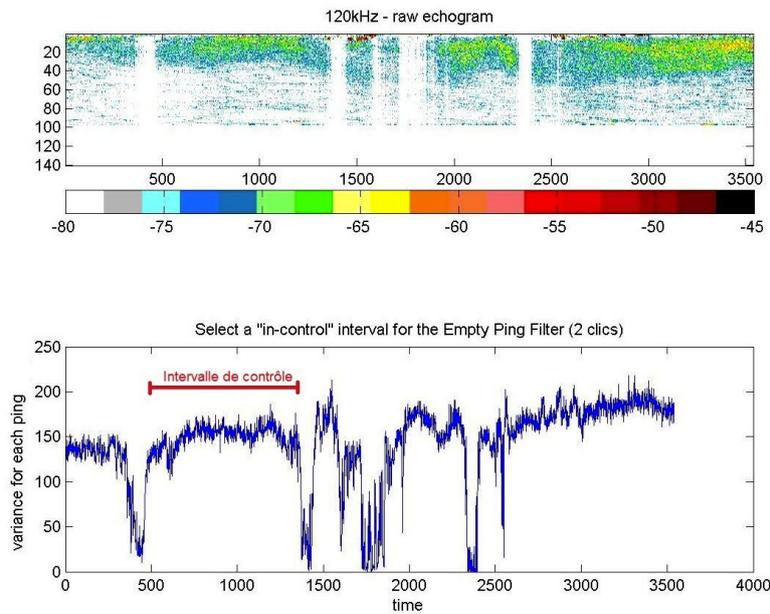
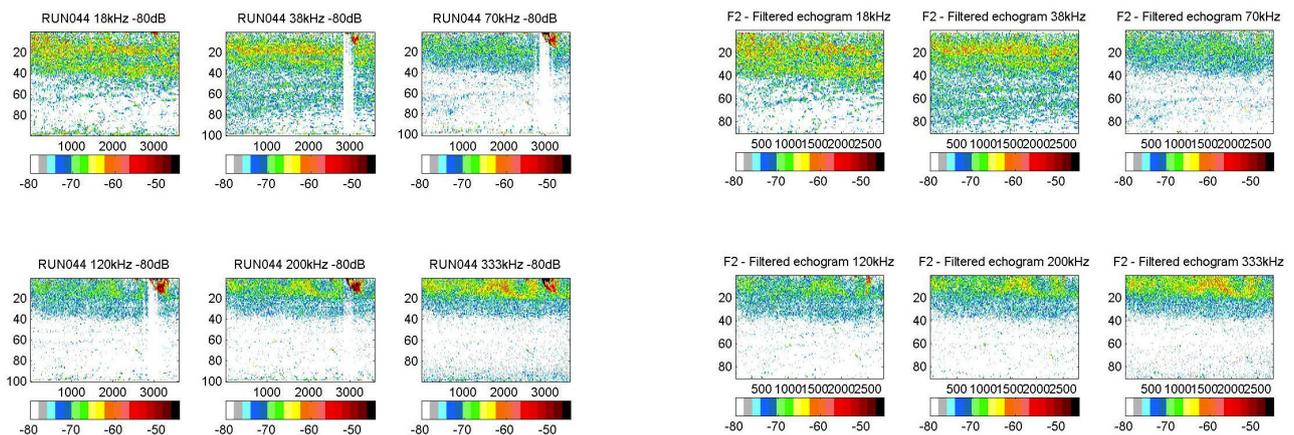


FIGURE 4.2 – Exemple du filtre des sous-détections sur la fréquence 120 kHz. Graphique inférieur : variance par ping. L'intervalle de contrôle (en rouge) est l'intervalle sur lequel la variance moyenne de référence est calculée.

Filtre des pings sur-détectés. Les Sv étant en échelle logarithmique, ils ont préalablement été convertis en échelle arithmétique sv , afin de calculer une somme des densités acoustiques sur l'ensemble des tranches de profondeur, par ping. Les pings qui présentaient une somme arithmétique supérieure à un seuil ont été considérés comme "sur-détectés" et supprimés de l'ensemble des fréquences. Le seuil a été défini afin que seuls les pings contenant une intensité acoustique "anormale" soient filtrés. Le filtre a été appliqué séquentiellement sur chaque fréquence.

Dans les deux cas, le filtre est subjectif. Le seuil est déterminé par l'opérateur en fonction de la question de l'étude et des données, mais ne doit pas varier d'une station à l'autre dans le cas d'une étude sur plusieurs points d'échantillonnage.

Après filtrage des sur- et/ou sous-détections sur l'ensemble des fréquences, il restait une quantité de pings suffisante pour que la réponse acoustique des couches diffusantes puisse être interprétée (figure 4.3). L'ordre des fréquences sur lesquelles sont appliqués les filtres n'a pas d'importance.



(a) Echogrammes contenant des anomalies.

(b) Echogrammes dont les anomalies ont été filtrées.

FIGURE 4.3 – Exemple des échogrammes d’une station (aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz) avant (a) et après (b) filtrage.

Les données filtrées des sondeurs EK60 ont été synthétisées par leurs profils d’intensités acoustiques médianes par tranche de profondeur et par fréquence. La médiane présente l’avantage d’être moins affectée par les valeurs extrêmes que la moyenne. Le calcul d’un profil vertical médian par fréquence et par station complète le filtrage des échos indésirables en excluant les valeurs extrêmes des distributions de Sv par tranche de profondeur.

Le profileur acoustique hautes fréquences (TAPS) Lors d’un second passage sur la zone d’étude, la prospection acoustique était ponctuée de stations hydro-biologiques espacées de 10 MN. A chaque station, un profileur acoustique à hautes fréquences (*Tracor Acoustic Profiling System*, Pieper et al. (2001); Roman et al. (2001)) était opéré en profil vertical.

Le TAPS (figure 4.4) est un instrument de mesure acoustique équipé de 6 écho-sondeurs hautes fréquences dont le but est de détecter des cibles zooplanctoniques de petite taille. Les faisceaux du TAPS émettent des ondes acoustiques à 265, 420, 710, 1100, 1850 et 3000 kHz. Cependant, l’énergie des faisceaux acoustiques aux hautes fréquences connaît une absorption beaucoup plus importante qu’aux basses fréquences. Les échos des cibles biologiques situées à plus de 30 m du TAPS sont du même niveau que le bruit de fond et donc indétectables (Holliday et al., 2003). En pratique, cette limite est contournée en rapprochant les transducteurs des organismes planctoniques. Pour cette étude, le TAPS est fixé à la structure d’une bathysonde afin d’échantillonner la colonne d’eau horizontalement au fur et à mesure de la descente en mode ”cast” (Pieper et al., 1990). Les ondes acoustiques sont émises à raison de 5 pings/s. Le volume échantillonné est assez faible (0.005 m^3) pour que l’on puisse exclure toute contribution des réflecteurs de grandes tailles comme le macro-zooplancton, ou le necton. Le faible volume échantillonné et la grande taille du profileur pélagique utilisé sont des éléments pouvant induire l’évitement du faisceau acoustique par les organismes planctoniques.

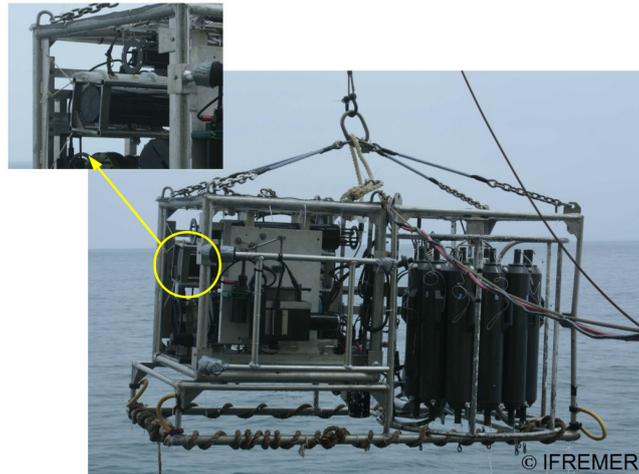


FIGURE 4.4 – Photographie du TAPS fixé à la bathysonde. Les transducteurs du TAPS sont placés légèrement en dehors de la structure pour que cette dernière n'entre pas dans le volume insonifié par les faisceaux acoustiques.

Les Sv enregistrés par les transducteurs du TAPS étaient automatiquement écho-intégrés par l'instrument à raison d'un Sv moyen par mètre. Cependant, cette résolution verticale reste trop fine pour que les profils soient lisibles (figure 4.5). Pour lisser les courbes, une moyenne mobile a été effectuée par mètre en considérant les 4 Sv voisins (moyenne sur 5 Sv avec la valeur de la profondeur considérée). Un profil vertical (de résolution 1 m) par fréquence et par station était alors disponible.

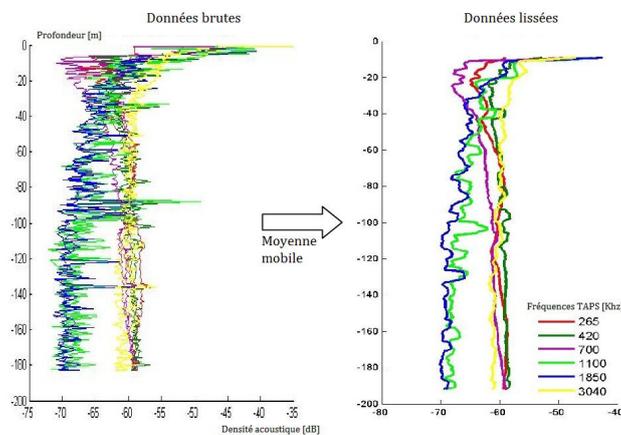


FIGURE 4.5 – Exemple du lissage des profils verticaux multi-fréquences du TAPS collectés à une station.

Dans cette analyse, les données acoustiques des sondeurs de coque EK60 aux basses fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz ont été utilisées sous forme de profils verticaux médians par station. Les données acoustiques du profileur TAPS aux hautes fréquences 265, 420, 710, 1100, 1850 et 3000 kHz ont été utilisées sous forme de profils verticaux lissés par station.

La méthode STATIS

La méthode STATIS (Lavit et al., 1994) a été utilisée ici, pour détecter des groupes de stations aux profils acoustiques similaires. Il s'agit d'une méthode exploratoire d'analyse conjointe

de plusieurs tableaux de données. Cette méthode est divisée en trois étapes ayant chacune un objectif particulier : (i) l'interstructure cherche à déceler les tableaux similaires ; (ii) le compromis fournit un tableau résumé ; (iii) l'intrastructure décrit les écarts entre les tableaux et le compromis. Seule la première partie de la méthode STATIS (l'interstructures) est utilisée pour répondre à notre objectif. Dans l'analyse interstructures de la méthode STATIS, trois cas de figures sont possibles. Nous sommes ici dans la situation où k tableaux de mesure X (correspondant aux k stations, figure 4.6 (1)) résultent de l'observation des mêmes variables (les p fréquences) sur des individus communs (les n tranches de profondeur). L'analyse interstructure comprend trois étapes :

- Calcul de la matrice de covariance pour chaque station i (figure 4.6(2)) :

$$C_i = X_i' X_i \quad (4.1)$$

où les dimensions de C_i , X_i' et X_i sont (p, p) , (p, n) , (n, p) , respectivement.

- Calcul des corrélations vectorielles entre les stations i et j (figure 4.6(3)) :

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^p \text{diag}(C_i \times C_j) \quad (4.2)$$

- Diagonalisation de la matrice $[S]$, dont les éléments sont les S_{ij} . $[S]$ est de dimensions (k, k) .

La diagonalisation de la matrice S crée un système d'axes associés à des valeurs propres. Il est donc possible de calculer le pourcentage d'inertie représenté par chaque axe et les coordonnées des tableaux dans l'espace construit par ces axes. Cette représentation s'apparente à celle d'une analyse des composantes principales. Le premier axe représente souvent une forte majorité de l'inertie. La projection graphique des axes et des tableaux dans l'espace des deux premiers axes permet de se rendre compte de la similarité entre les tableaux : si les points des tableaux sont proches de l'axe principal, alors il y a peu de changements entre les différents tableaux. L'analyse interstructure de la méthode STATIS compare des tableaux dont le nombre de variables p peut varier, mais dont le nombre d'individus n doit être constant. Dans notre cas, il est possible de comparer des stations échantillonnées par un nombre différent de fréquences, mais sur des tranches de profondeur communes (figure 4.6). Pour vérifier la similarité entre les stations, une Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) utilisant le calcul des distances de Ward (Saporta, 2011) a été appliquée aux résultats de la diagonalisation de la matrice S . Des réponses fréquentielles moyennes sont calculées par groupe de stations pour identifier les différences inter-groupes détectées par la CAH.

Cette analyse a été appliquée aux données EK60 et TAPS séparément, puis aux deux jeux de données joints.

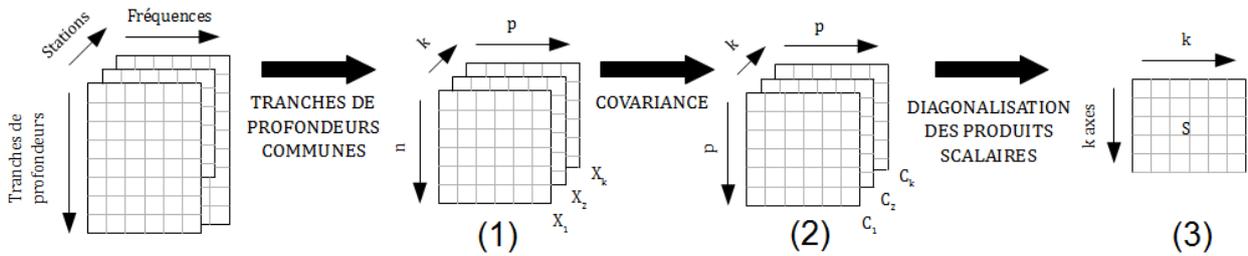
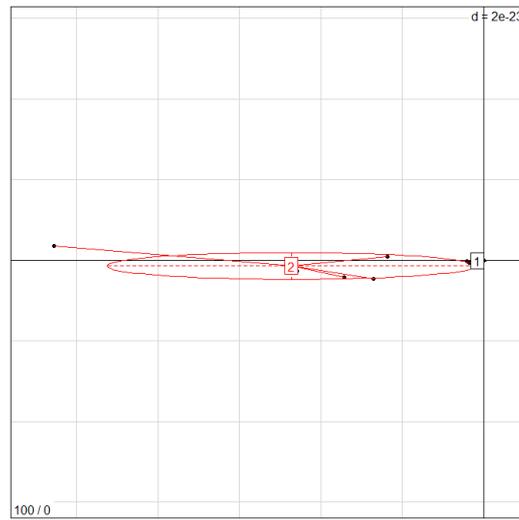


FIGURE 4.6 – Schéma conceptuel des étapes de l’analyse interstructures de la méthode STATIS utilisé dans notre cas d’étude. Les tranches de profondeur communes à toutes les stations sont sélectionnées (1) ; une matrice de covariance C_i est calculée par station (2) ; la diagonalisation de la matrice des corrélations vectorielles (3) permet de calculer les coordonnées des tableaux dans un système d’axes en relation avec ses valeurs propres.

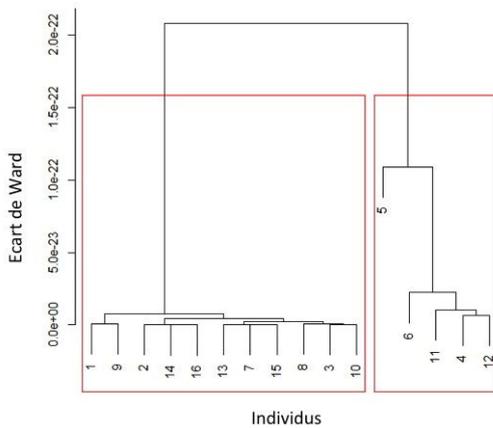
4.2.2 Résultats

Analyse des profils médians EK60

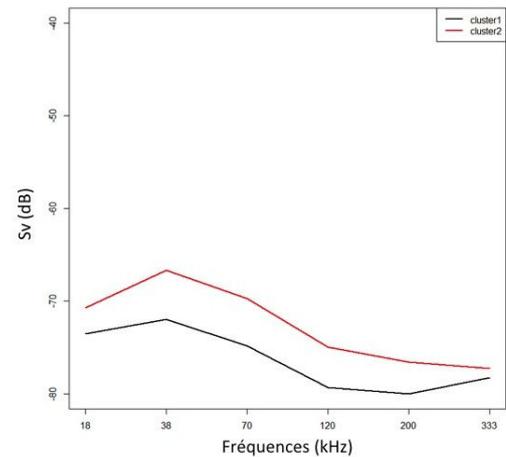
Le premier axe issu de l’analyse interstructures de la méthode STATIS appliquée sur les profils EK60, explique 100 % de l’inertie (figure 4.7 (a)). La projection des matrices de covariance des stations C_i dans le plan factoriel sont toutes très proches du premier axe. Cela indique que les stations ont des profils multifréquences très similaires. D’après le dendrogramme de la CAH, 2 groupes de stations peuvent être définis (figure 4.7 (b)). Les réponses fréquentielles moyennes de ces groupes montrent, en revanche, que la réponse acoustique de l’ensemble des stations est similaire (figure 4.7 (c)). Les deux réponses fréquentielles moyennes ont des formes similaires et ne se différencient que par leurs intensités. Une réponse acoustique plus forte à une certaine fréquence (ici 38 kHz) traduit la présence de pics de résonance dans la combinaison de réponses acoustiques qui s’assemblent pour produire l’écho enregistré (Ye, 1997). Lorsque l’on considère les profils des sondeurs EK60 collectés pendant la campagne PELGAS 2012, l’analyse interstructure de la méthode STATIS ne détecte pas de différence entre les stations.



(a) Projection des C_i dans l'espace factoriel. L'axe 1 représente 100 % de l'inertie.



(b) Dendrogramme de la CAH.

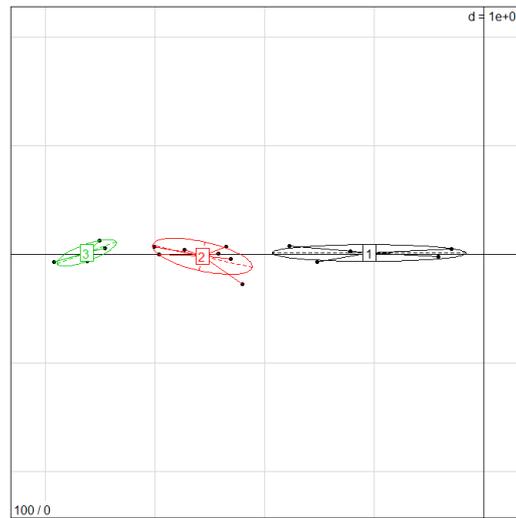


(c) Réponses fréquentielles moyennes par groupe.

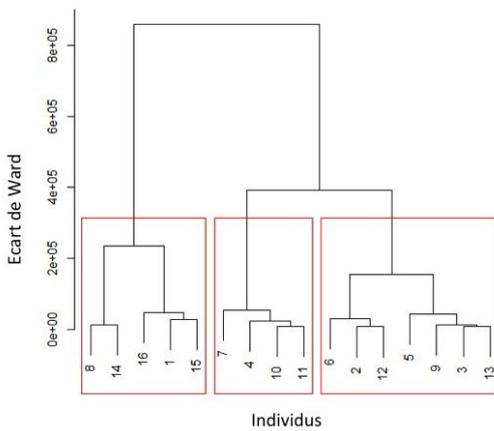
FIGURE 4.7 – Résultats de l'analyse interstructure de la méthode STATIS et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) sur les profils médians verticaux collectés par les échosondeurs EK60 pendant la campagne PELGAS 2012.

Analyse des profils TAPS

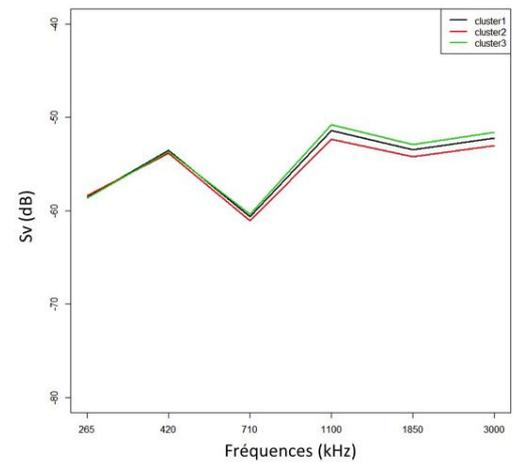
L'analyse interstructures de la méthode STATIS appliquée sur les profils collectés par le TAPS pendant la campagne 2012 donne le même type de résultats que pour les profils de l'EK60. Le premier axe représente 100 % de l'inertie (figure 4.8 (a)). Les projections des matrices de covariance se trouvent toutes sur cet axe, signifiant une forte similarité entre leurs profils multifréquences. Le dendrogramme de la CAH permet de définir 3 groupes de stations (figure 4.8 (b)) mais les réponses fréquentielles moyennes quasiment identiques des groupes montrent que les profils multifréquences de l'ensemble des stations sont similaires (figure 4.8 (c)). Les réponses fréquentielles moyennes présentent une réponse acoustique fluctuante en fonction de la fréquence. Les réponses fréquentielles caractérisées par des oscillations aux hautes fréquences sont assimilées à la réponse acoustique des organismes *Fluid-Like* (Stanton et al., 1998).



(a) Projection des C_i dans le plan factoriel. L'axe 1 représente 100 % de l'inertie.



(b) Dendrogramme de la CAH.



(c) Réponses fréquentielles moyennes par groupe.

FIGURE 4.8 – Résultats de l'analyse interstructures de la méthode STATIS et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les profils médians verticaux collectés par le TAPS pendant la campagne PELGAS 2012.

Analyse conjointe des fréquences EK60 et TAPS

L'analyse interstructures de la méthode STATIS appliquée aux 12 fréquences (EK60 et TAPS) conjointes aboutit comme dans les autres cas à des stations très proches de l'axe principal qui explique l'ensemble de l'inertie et à la définition de deux groupes de stations aux réponses fréquentielles moyennes similaires. On observe cependant que les réponses fréquentielles moyennes de fréquences du TAPS sont supérieures à celles de l'EK60 de 10 dB en moyenne (figure 4.9).

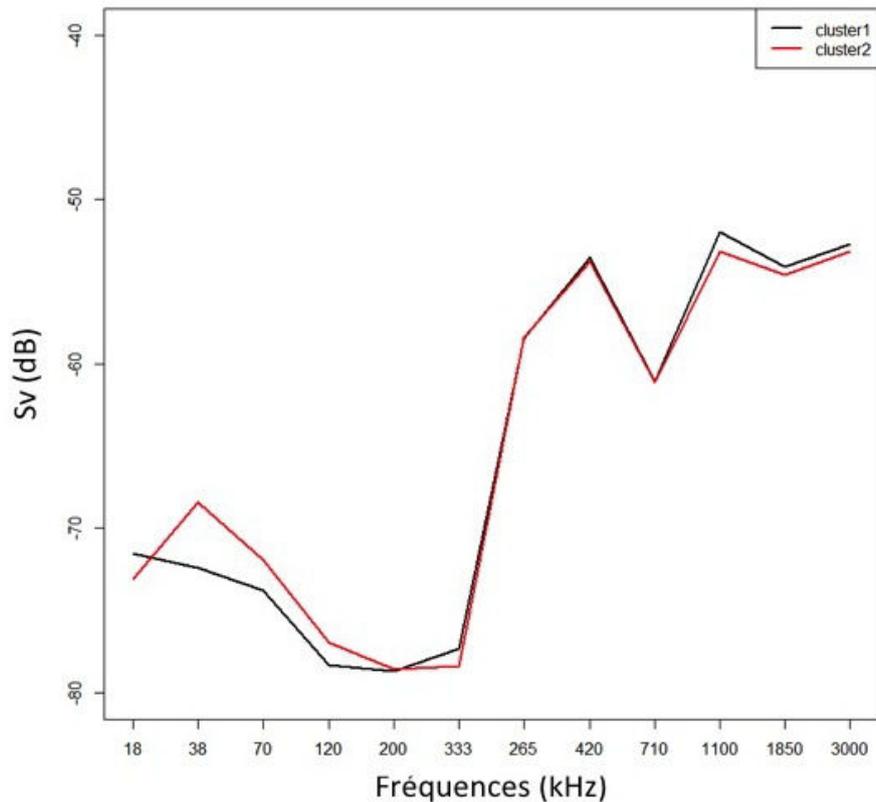


FIGURE 4.9 – Réponses fréquentielles moyennes calculées par groupe issus de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) sur les résultats de l’analyse interstructures de la méthode STATIS appliquées sur la combinaison des profils médians verticaux collectés par les échosondeurs EK60 et des profils verticaux collectés par le TAPS, pendant PELGAS 2012.

4.2.3 Discussion, limites et perspectives

Le filtre des pings contenant des anomalies acoustiques, développé dans le cadre de ce travail, présente l’avantage de s’appliquer à n’importe quel jeu de données mono ou multifréquence. En revanche, il ne concerne que les études qui s’intéressent aux structures acoustiques dispersées dans l’espace, comme les couches diffusantes, car les échos des bancs de poissons y sont considérés comme des anomalies (échos ponctuels très intenses).

L’analyse conjointe des données multifréquences des sondeurs EK60 et du TAPS a mis en évidence la forte différence de niveaux d’intensité acoustique entre les données TAPS et EK60. Cette différence pourrait provenir des larges différences entre les volumes insonifiés par les deux types de sondeur, qui pourraient être beaucoup trop différents pour que les données puissent être analysées conjointement. Cette différence d’échantillonnage s’ajoute au fait que les deux types d’échosondeurs ne détectent pas les mêmes cibles, du fait du décalage de leurs bandes fréquentielles. D’après les réponses fréquentielles moyennes par groupes issues des analyses séparées, les fréquences du TAPS ”voient” des réflecteurs plutôt faibles tandis que les fréquences de l’EK60 ”voient” des réflecteurs forts porteurs d’inclusion gazeuse (Stanton et al., 1998). L’analyse appliquée aux basses (EK60) et aux hautes (TAPS) fréquences apporte une vision complémentaire de la zone étudiée.

Bien que cette analyse de données acoustiques ne montre pas de résultat flagrant, elle constitue un point de départ de la réflexion menée sur la caractérisation acoustiques des couches

diffusantes. Dans le cas de cette étude, les analyses qui ont été réalisées sur les profils verticaux des stations, ne permettent pas de mettre en évidence des réponses fréquentielles contrastées. Il s'avère nécessaire de réduire l'échelle d'étude et de considérer l'information de la dimension verticale selon son résolution d'échantillonnage et sans intégration sur l'ensemble de la colonne d'eau.

4.3 Etude du contexte acoustique multifréquence résolu sur la verticale

L'étude présentée dans cette partie est menée sur le même jeu de données que la précédente mais considère l'information de la dimension verticale sans l'intégrer sur la colonne d'eau. L'objectif est le même, à savoir, décrire des zones de la colonne d'eau dont les réponses acoustiques multi-fréquentielles sont différentes. L'analyse développée est une classification des tranches de profondeur des profils médians.

4.3.1 Matériel et méthodes

Les données acoustiques

Les données acoustiques utilisées sont les mêmes que pour la classification des stations. Chaque station est caractérisée par 6 profils médians des basses fréquences EK60 et 6 profils lissés des hautes fréquences TAPS.

L'analyse interstructures de la méthode STATIS utilisée dans la partie précédente, a comparé des stations ayant des profondeurs identiques. Or, dans cette étude nous souhaitons prendre en compte les données acoustiques en considérant l'information à toutes les tranches de profondeur qui ont été échantillonnées. L'analyse interstructure de la méthode STATIS ne se révèle pas optimale pour atteindre l'objectif de cette étude.

Les tranches de 1 m de profondeur de l'ensemble des profils sont considérées comme des individus indépendants. L'analyse a été menée indépendamment sur les fréquences des sondeurs EK60 et celles du TAPS. Pour un type de sondeur donné, les profils de toutes les stations ont été regroupés dans une matrice X (figure 4.10) de dimensions $n \times p$ (où n est le nombre total de tranches de 1 m et p le nombre de fréquences). Les S_v ont été centrés et réduits par fréquence.

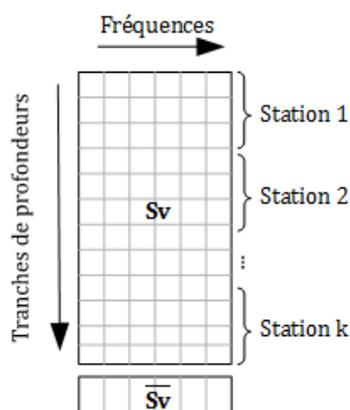


FIGURE 4.10 – Structure de la matrice X regroupant les profils médians multifréquences des k stations. Les n tranches de profondeurs sont considérées comme des individus indépendants.

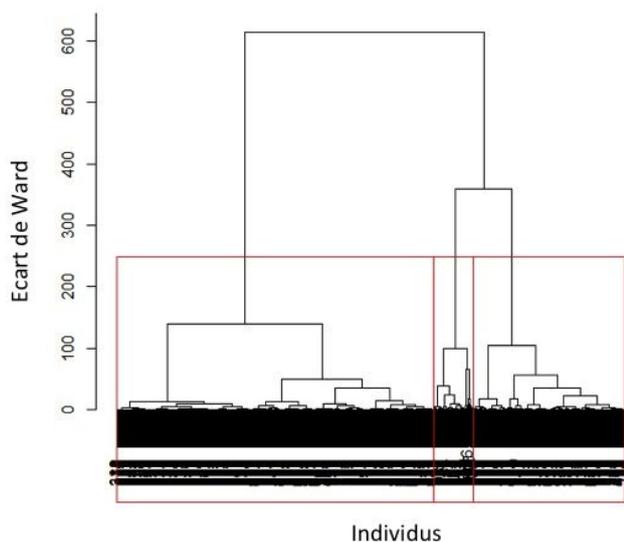
ACP et classification

Une ACP a été appliquée à la matrice et deux méthodes de classification (CAH et Kmeans) ont été appliquées aux composantes principales de l'ACP pour grouper les tranches de profondeur. L'opérateur sélectionne un premier nombre de groupes optimal de manière subjective à partir du dendrogramme de la CAH. Les résultats des classifications par la méthode Kmeans, obtenus avec plusieurs nombres de groupes, sont ensuite comparés en terme de variance intergroupe au moyen du critère "ssi" (critère de minimisation de la somme des moindres carrés, fonction *cascadeKmeans* du package R *Vegan* Oksanen et al. (2013)), afin de déterminer un nombre de groupes optimal plus objectif. L'ensemble des nombres de groupes compris entre les nombres de groupes optimaux issus de la CAH et des Kmeans ont été testés. Pour chaque nombre de groupes, les patrons spatiaux horizontaux et verticaux des appartenances des tranches de profondeur aux groupes ont été étudiés, et une réponse fréquentielle moyenne par groupe a été calculée. Le choix final dépendait de la réponse en fréquence par groupe : les variations du spectre en fréquences devaient être minimisées pour les tranches appartenant à un même groupe mais les groupes devaient présenter des différences maximales entre leurs réponses fréquentielles.

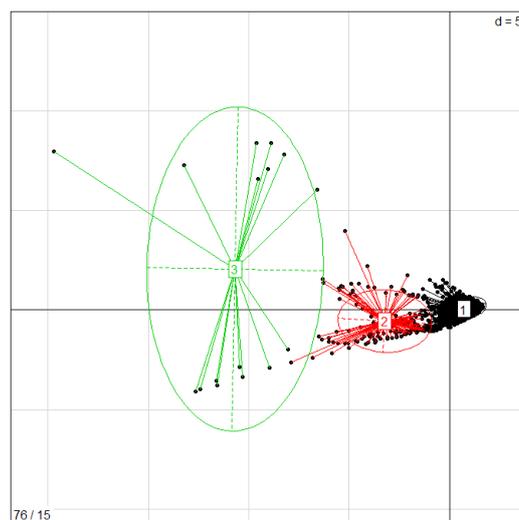
4.3.2 Résultats

Analyse des données EK60 collectées en 2012

Les deux premières composantes principales de l'ACP appliquée aux données EK60 de la campagne PELGAS 2012 expliquent respectivement 76 et 15 % (soit 91 %) de la variance totale. La projection des tranches de profondeur dans l'espace factoriel montre un gradient sur l'axe 1, qui est dominant (figure 4.11 (b)). La méthode de sélection du nombre de groupes le plus pertinent appliquée aux résultats de l'ACP aboutit à la définition de 3 groupes de tranches de profondeur (figure 4.11 (a)).



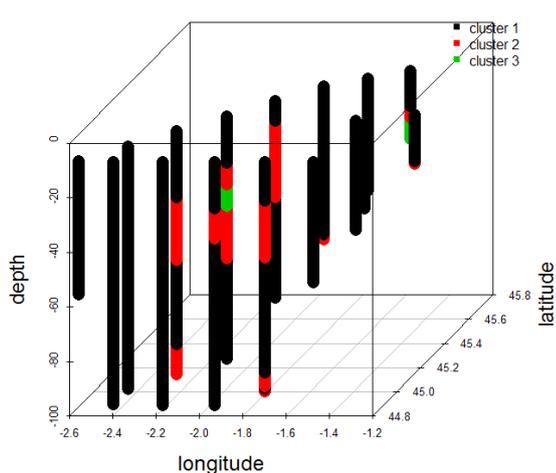
(a) Dendrogramme de la CAH.



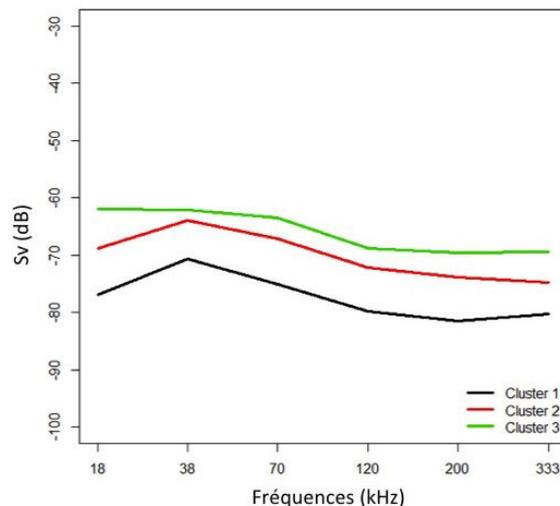
(b) Projection des tranches de 1m de profondeur dans le premier espace factoriel. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 76 et 15 % de la variance. Les couleurs correspondent aux groupes issus de la CAH.

FIGURE 4.11 – Résultats de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectées par l'EK60 pendant PELGAS 2012.

Lorsque l'on représente l'ensemble des tranches de profondeur dans l'espace selon leur appartenance aux groupes, une cohérence spatiale se dessine (figure 4.12 (a)). Le groupe 3 rassemble un faible nombre de tranches très localisées au milieu de la colonne d'eau, au centre de la zone étudiée et près du fond près de la côte. Les tranches du groupe 2 entourent celles du groupe 3 d'une part et sont situées à la base de certains profils d'autre part. Le groupe 1 comprend le reste des tranches de profondeur. Le gradient de distribution des tranches de profondeur sur l'axe de la première composante principale (CP1) traduit une combinaison entre des gradients de profondeur et d'intensité globale de la réponse fréquentielle.



(a) Distribution spatiale des tranches de profondeur selon leur appartenance aux groupes.



(b) Réponses fréquentielles moyennes par groupe.

FIGURE 4.12 – Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2012.

Les formes globales des réponses fréquentielles des groupes sont similaires à celles obtenues avec la méthode STATIS, mais avec plus de contraste entre les réponses fréquentielles (figure 4.12). Les groupes 1 et 2 ont des réponses fréquentielles moyennes similaires avec une réponse acoustique relativement plus importante à 38 kHz, mais se distinguent par leur intensité globale. Le groupe 1 présente une réponse fréquentielle moyenne qui augmente légèrement aux hautes fréquences (200 et 333 kHz). Le groupe 3 présente une réponse fréquentielle moyenne globalement plus forte que celles des autres groupes et qui décroît avec l'augmentation de la fréquence.

La rétro-diffusion d'un objet gazeux est particulièrement forte à la fréquence de résonance (cf. 1.1.3). Les réponses fréquentielles moyennes des 3 groupes peuvent être interprétées comme celles d'organismes porteurs de bulle de gaz, dont la fréquence de résonance ne ferait pas partie des fréquences d'échantillonnage. Pour les groupes 1 et 2 le réflecteur dominant serait porteur d'une inclusion gazeuse avec une fréquence de résonance autour de 38 kHz et pour le groupe 3, la fréquence de résonance serait plutôt vers 18 kHz. Des pics larges et très atténués obtenus par la moyenne de plusieurs réponses fréquentielles peut aussi être la somme de pics de résonance qui ont lieu à des fréquences différentes. Plus l'objet gazeux est gros, plus sa fréquence de résonance est basse. Les objets gazeux présents dans les tranches de profondeur du groupe 3 seraient donc plus gros que ceux présents dans les tranches des groupes 1 et 2.

Les tranches de profondeurs des groupes 1 et 3 sont positionnées dans le patch de fluorescence où les cellules du groupe 3 correspondent au maximum de fluorescence (figure 4.13).

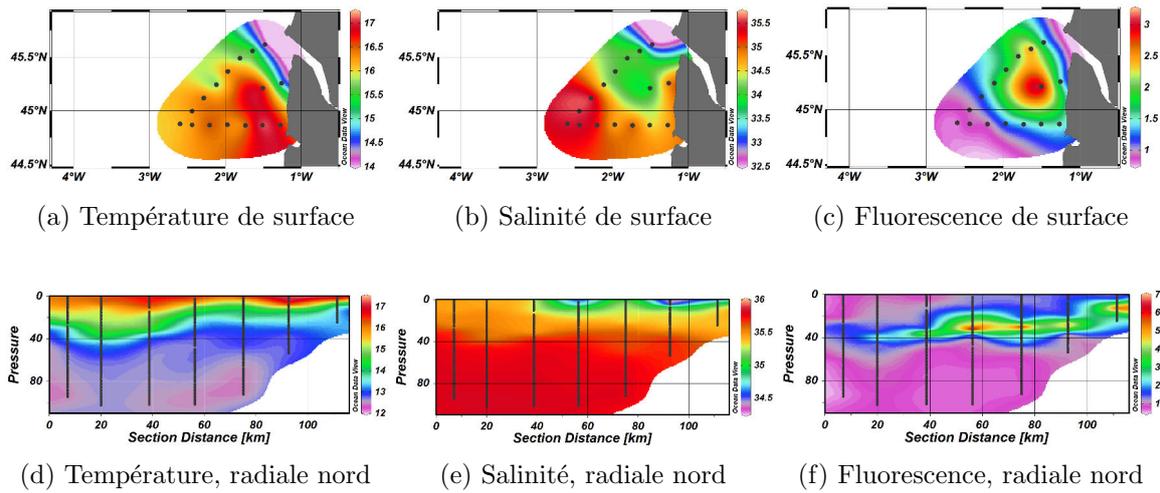
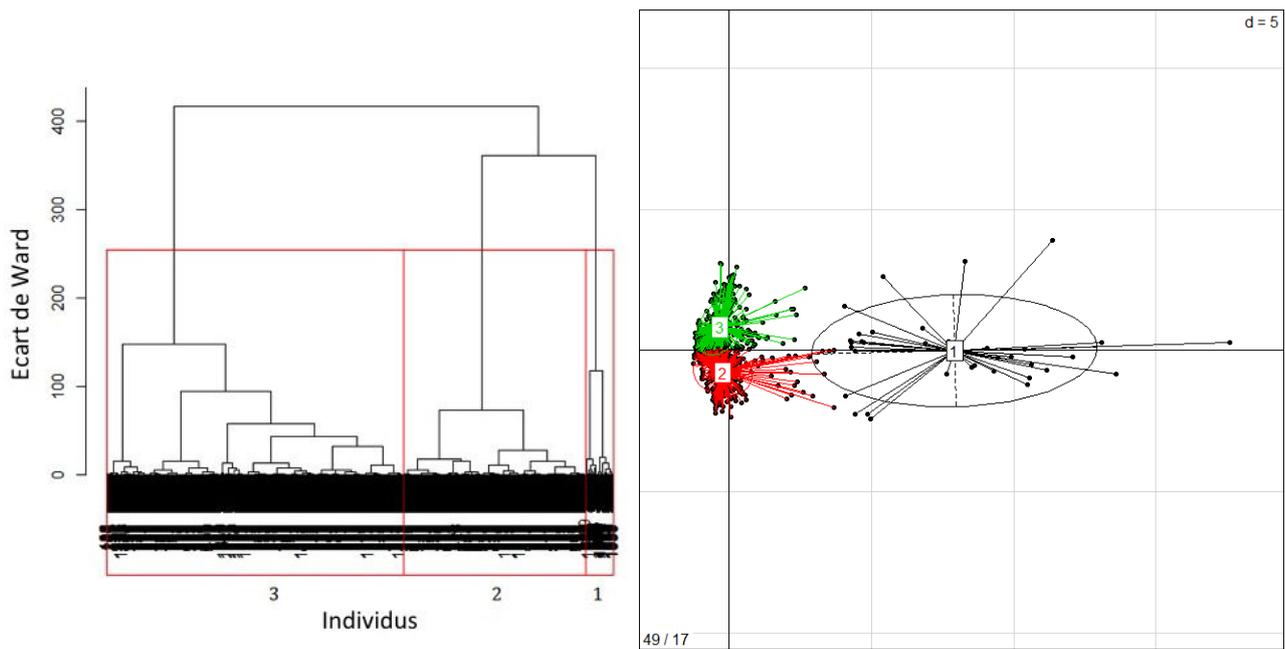


FIGURE 4.13 – Contexte hydrologique de la zone d'étude du leg 3 de la campagne PELGAS 2012 située dans le panache de la Gironde.

Analyse des données TAPS collectées en 2012

Les deux premières composantes principales de l'ACP appliquée aux profils TAPS collectés en 2012 expliquent respectivement 49 et 17 % (soit 66 %) de la variance totale. La projection des tranches de profondeur dans l'espace factoriel montre un gradient sur l'axe 1 qui est dominant (figure 4.14 (b)). La méthode de sélection du nombre de groupes le plus pertinent identifie 3 groupes (figure 4.14 (a)).

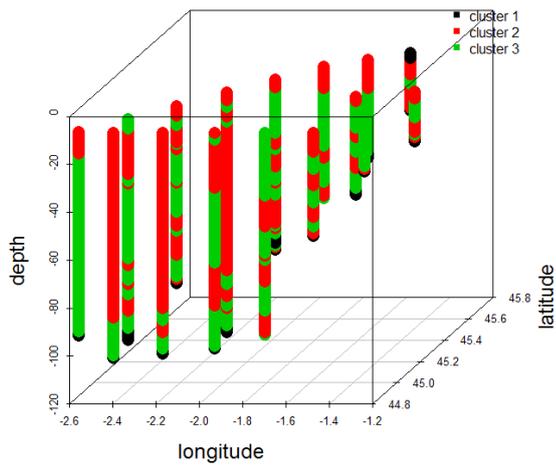


(a) Dendrogramme de la CAH.

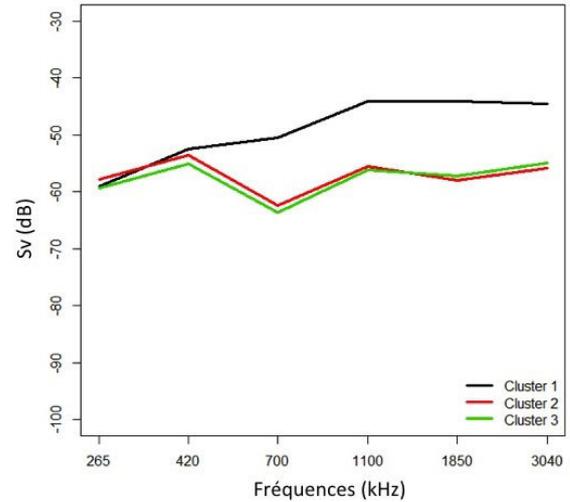
(b) Projection des tranches de profondeur dans le premier espace factoriel. Les axes 1 et 2 représentent respectivement 49 et 17 % de la variance.

FIGURE 4.14 – Résultats de l’Analyse de Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeur des profils du TAPS collectés pendant PELGAS 2012.

Les distributions spatiales des tranches de profondeur en fonction de leur appartenance aux 3 groupes ne montrent pas de structures spatiales claires (figure 4.15, a). Les tranches des groupes 2 et 3 semblent être réparties dans la colonne d’eau sans cohérence spatiale et sont présentes sur l’ensemble des stations. Le groupe 1, comprend un faible nombre de tranches de profondeur proches du fond dans la plupart des profils et en surface à la station côtière nord. Les groupes 2 et 3 qui semblaient être distribués de la même manière dans la colonne d’eau ont exactement la même réponse fréquentielle moyenne (figure 4.15b). Ces deux groupes pourraient être considérés comme un seul, mais si l’on ne sélectionne que 2 groupes, le groupe 1 n’apparaît plus. Le gradient de distribution des individus sur l’axe de la première composante principale correspond à la différence des réponses fréquentielles mais pas à la stratification verticale. Une réponse fréquentielle qui oscille aux hautes fréquences comme celles des groupes 2 et 3 est similaire à la réponse acoustique des réflecteurs dont l’impédance acoustique est proche de celle de l’eau environnante, les organismes dits ”*Fluid-Like*” (FL, Stanton et al. (1998)).



(a) Distribution spatiale des tranches de profondeur selon leur appartenance aux groupes.



(b) Réponses fréquentielles moyennes par groupe.

FIGURE 4.15 – Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils collectés par le TAPS pendant PELGAS 2012.

Analyse des données EK60 collectées en 2013

Les deux premières composantes de l'ACP appliquée aux profils multi-fréquences de l'EK60 collectés pendant la campagne PELGAS 2013, expliquent respectivement 82 et 9 % (soit 91 %) de la variance totale. La projection des individus dans l'espace factoriel montre un gradient le long du premier axe qui est très dominant (figure 4.16). La procédure de sélection du nombre de groupes identifie 3 groupes.

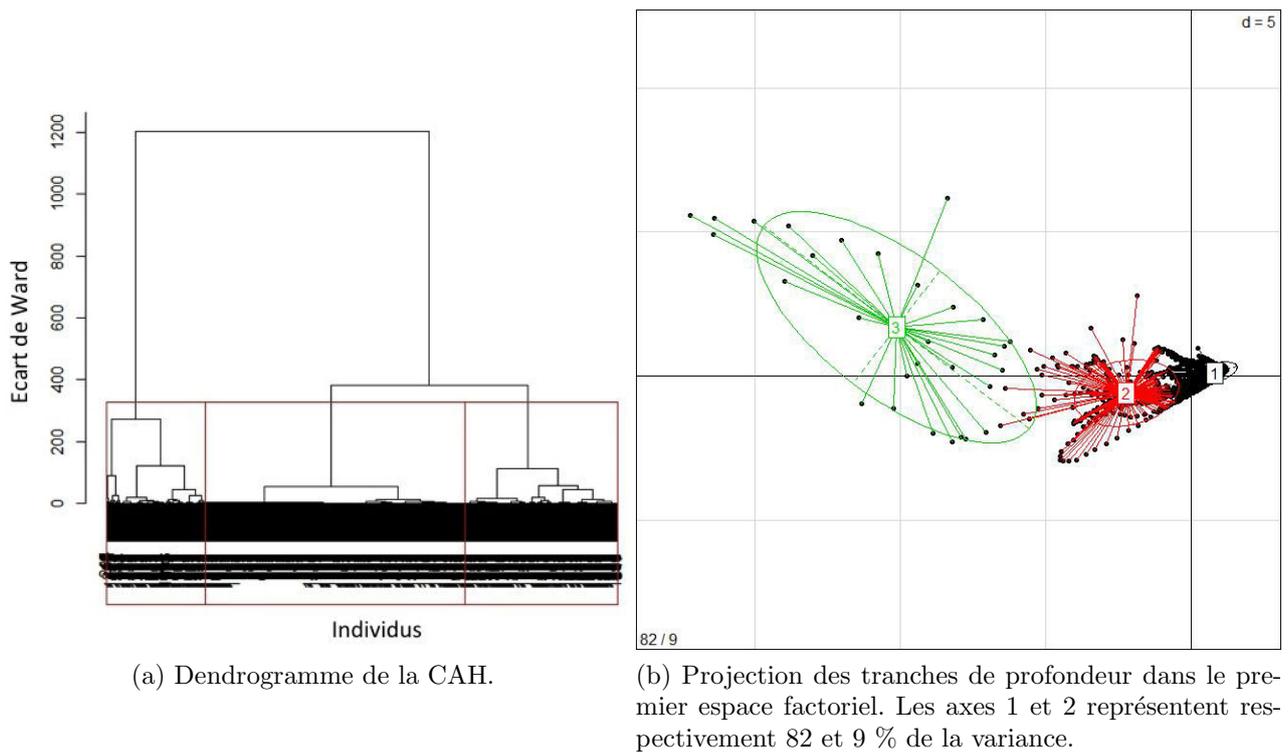
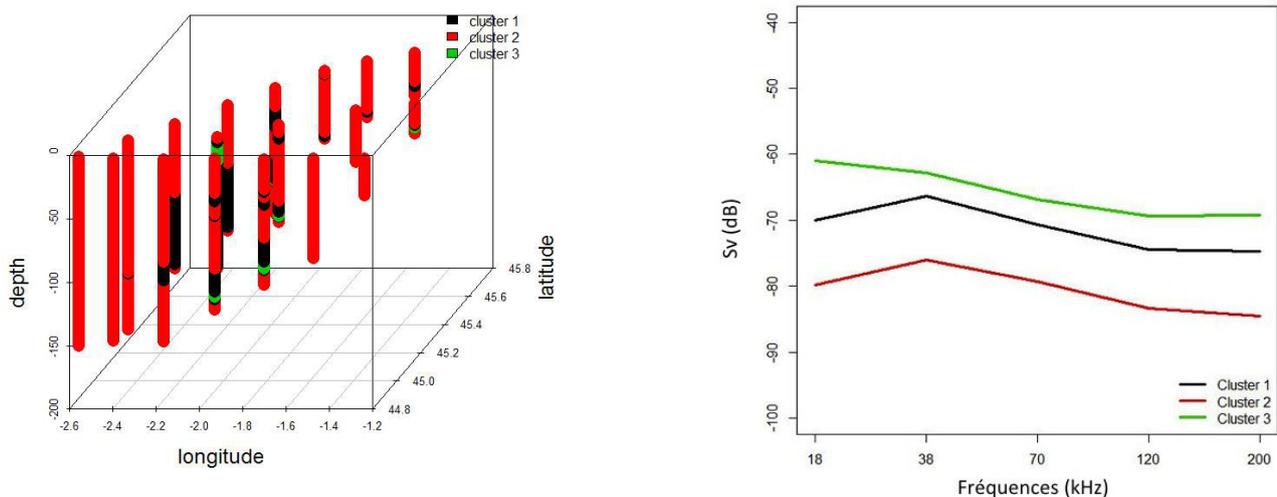


FIGURE 4.16 – Résultats de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2013.

Les tranches de profondeur appartenant au groupe 3 sont peu nombreuses et précisément localisées dans les profils de certaines stations (figure 4.17a). Elles sont toujours entourées des tranches de profondeur du groupe 1. Les tranches du groupe 2 remplissent l'espace restant. Lorsque l'on considère les réponses fréquentielles moyennes calculées par groupe (figure 4.17b), celles des groupes 1 et 2 sont identiques mais diffèrent par leur intensité, les tranches du groupe 2 ayant une intensité moyenne plus faible que celles du groupe 1. Cette forme de réponse fréquentielle peut être interprétée comme la réponse fréquentielle d'organismes résonants dont la fréquence de résonance serait différente des fréquences d'échantillonnage. Pour les groupes 1 et 2, cette fréquence de résonance serait située autour de 38 kHz. La réponse fréquentielle moyenne du groupe 3 peut être interprétée de la même manière : comme un pic de résonance qui apparaîtrait à une fréquence située entre 18 et 38 kHz. Les tranches de profondeur des groupes 1 et 2 seraient composées de cibles gazeuses plus petites que celles du groupe 3. Le groupe 2 présente une réponse fréquentielle moyenne très proche du seuil de l'écho-intégration (-80 dB). Les tranches de profondeur de ce groupe seraient composées d'une très faible quantité de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse mais seraient surtout groupées parce qu'elles ne contiennent pas d'information suffisamment remarquable pour faire partie des autres groupes. Ces résultats sont similaires aux résultats de la classification des tranches de profondeur appliquée aux données 2012, en termes de typologie des réponses fréquentielles et de distribution spatiale des groupes.



(a) Distribution spatiale des tranches de profondeurs selon leur appartenance aux groupes.

(b) Réponses fréquentielles moyennes par groupe.

FIGURE 4.17 – Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2013.

La distribution verticale des groupes de tranches de profondeur n'est corrélée à aucun patron de structure hydrologique (figure 4.18).

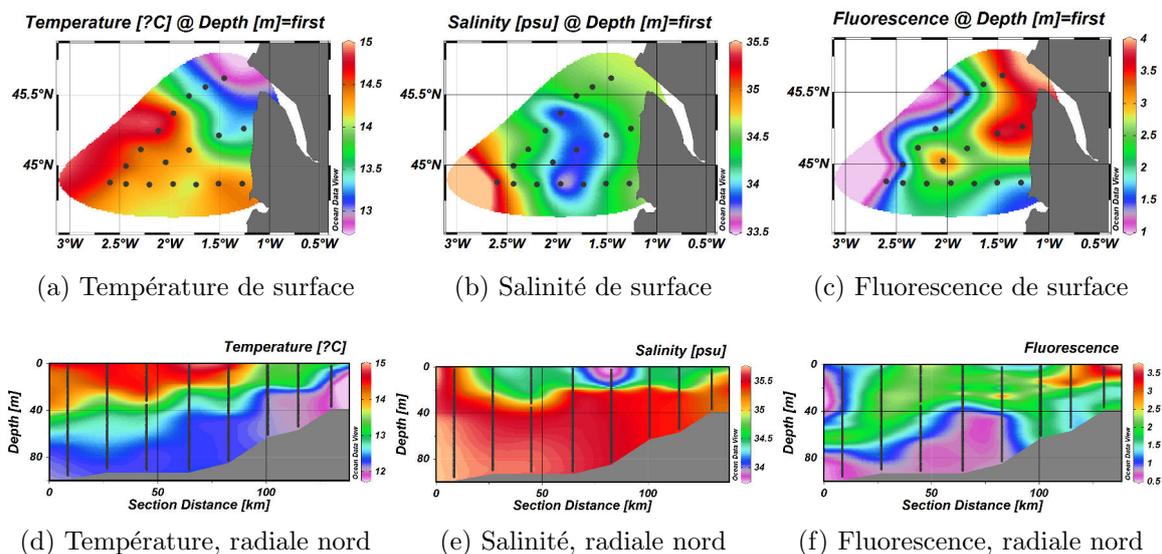


FIGURE 4.18 – Contexte hydrologique de la zone d'étude du leg 3 de la campagne PELGAS 2013, située dans le panache de la Gironde.

4.3.3 Discussion, limites et perspectives

Il s'agit toujours d'une approche exploratoire, puisque les résultats obtenus ne renseignent pas directement sur la composition taxonomique des couches diffusantes. Cette analyse fournit cependant une description synthétique du paysage acoustique multifréquence de la zone, utile

pour replacer les résultats obtenus à une échelle plus réduite, dans leur contexte.

En 2012, les données produites par l'EK60 et le TAPS apportent des informations différentes sur les cibles présentes dans la colonne d'eau insonifiée. Le TAPS ne peut détecter que les petits organismes parce qu'il insonifie la colonne d'eau avec de hautes fréquences dont le volume d'échantillonnage est faible (absorption de l'énergie acoustique qui augmente rapidement au cours de la propagation du faisceau). Les résultats de l'analyse montrent des réponses fréquentielles moyennes de type FL, ce qui est en accord avec les caractéristiques de l'appareil. Si l'échosondeur EK60 avait détecté les mêmes réflecteurs, alors ses réponses fréquentielles augmenterait avec la fréquence. Or, les basses fréquences montrent un pic de résonance dont la fréquence ne fait pas partie des 6 fréquences d'échantillonnage. Les fréquences de l'EK60 détectent d'autres cibles qui sont de types gazeux. Puisque l'on ne retrouve aucune trace de la réponse acoustiques des FL dans le spectre des basses fréquences, on peut supposer que la réponse des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse masque celle des réflecteurs plus faibles aux fréquences de l'EK60. En 2012, les cibles ayant une réponse fréquentielle de type réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse présentent un patron spatial en agrégats qui correspond au maximum de fluorescence. La relation potentielle entre un groupe de couches diffusantes et la fluorescence observée en 2012 n'a pas été confirmée par l'échantillonnage mené en 2013, pour lequel aucune relation nette entre couches diffusantes et hydro-biologie n'a été identifiée. Les conclusions sont les mêmes pour les données EK60 de 2012 et de 2013. Les résultats obtenus en 2012 sur les données de l'EK60 et du TAPS mènent aux mêmes conclusions que les résultats de l'analyse interstructures de la méthode STATIS, appliquée aux même données (cf. 4.2). Il semble que les réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse dominant la réponse acoustique des basses fréquences sur les dimensions horizontales et verticales de la zone d'étude. Les organismes FL dominant la réponse acoustique des hautes fréquences.

La classification des tranches de profondeur renseigne sur les types de réflecteurs qui dominant la réponse acoustique de la zone d'étude. La prise en compte de la dimension verticale dans cette analyse permet de replacer finement les couches diffusantes observées dans leur contexte hydrologique très structuré verticalement. Les réponses fréquentielles moyennes ont des formes connues et peuvent être reliées aux courbes théoriques de la réponse acoustique de grands types de réflecteurs. Dans la suite des analyses, les résultats de cette analyse seront utilisés pour guider les interprétations et les choix.

Cependant, les hypothèses émises à partir des formes des spectres de fréquences moyens ont besoin d'être validées par des données biologiques. Prenons par exemple, une réponse fréquentielle présentant un pic peu marqué, tels que les réponses fréquentielles moyennes de l'analyse des données EK60. Un tel spectre de fréquence peut être induit soit, par des bulles de gaz provoquant un pic de résonance à une fréquence non comprise dans les fréquences d'échantillonnage, soit par un ensemble de bulles de gaz de différentes tailles provoquant des pics de résonance à différentes fréquences de résonance, qui, combinés, forment un pic atténué. Ces deux hypothèses ne peuvent être départagées qu'en échantillonnant les organismes présents à la profondeur de la couche détectée, avec d'autres outils que l'acoustique.

4.4 Comparaison des caractérisations acoustiques et hydro-biologiques de l'écosystème pélagique

Les analyses exploratoires menées précédemment sur les données acoustiques à l'échelle du réseau des stations ont conduit à formuler des hypothèses sur la nature des réflecteurs

qui dominent la réponse acoustique mesurée. L'objectif de l'étude présentée dans cette partie est d'identifier la composition taxonomique des couches diffusantes. Les données acoustiques multi-fréquences sont considérées à l'échelle du profil vertical de la station. La méthode inverse est appliquée avec des modèles de réflecteurs en accord avec les résultats de la classification des tranches de profondeur. Les résultats de l'inversion sont comparés aux données hydro-biologiques à chaque station.

4.4.1 Matériel et méthodes

Échantillonnage du troisième leg de la campagne PELGAS 2012

Pour comprendre quelles sont les cibles capables de produire les réponses fréquentielles révélées par la classification des tranches de profondeur, une gamme d'instruments de mesure optique, vidéo et acoustique ainsi que des filets planctoniques ont été mis à l'eau durant le leg 3 de la campagne PELGAS 2012, dans le but d'échantillonner la plus grande gamme de tailles de particules possible. Sonde CTD, capteur d'intensité lumineuse, granulomètre laser (CILAS), fluorimètre, vidéo-fluo-microscope, système de prélèvement par bouteilles Niskin, un *Laser Optical Plankton Counter* (L-OPC, cf. 3.2.1), un *Underwater Vision Profiler* (UVP) et un *Tracor Acoustic Profiler System* (TAPS) étaient fixés à la structure d'une bathysonde (figure 4.20) pour effectuer des profils verticaux à chaque station. La bathysonde ainsi équipée effectuait deux profils successifs : l'un à une vitesse de 1 m/s et l'autre à 0.5 m/s pour obtenir une résolution verticale optimale pour l'ensemble des appareils. Deux filets à plancton (filet *Multi Plankton Sampler* (Multinet) et *Work Party 2* (WP2, cf. 3.2.1)) ont également été opérés à chaque point d'échantillonnage.

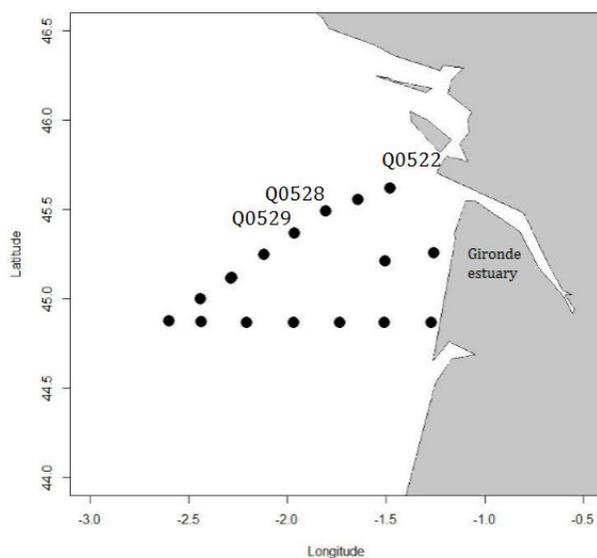


FIGURE 4.19 – Plan d'échantillonnage du leg 3 de la campagne PELGAS 2012. La zone se situe dans le panache de la Gironde. Les stations retenues pour la présentation des résultats sont identifiées par leur code.

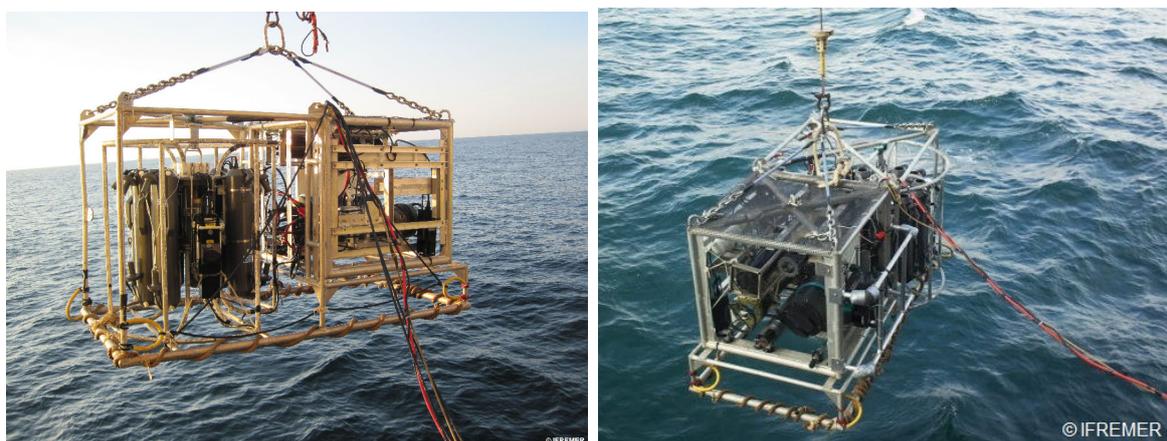


FIGURE 4.20 – Photographies des instruments opérés à chaque station en profil vertical fixés sur la structure d'un profileur pélagique. Le câble rouge est un câble numérique envoyant les informations de plusieurs instruments en temps réel sur l'ordinateur du bord.

Underwater Vision Profiler (UVP). Le profileur vidéo UVP (Picheral et al. (2010), figure 4.21) est un instrument muni d'une caméra sous-marine, développé pour quantifier la distribution des macro-particules dans la colonne d'eau. Les images sont enregistrées tous les 20 cm lorsque le profil est mené à 1 m/s. La taille minimale des organismes détectés est contrainte par la définition des images, mais les auteurs annoncent une gamme de tailles comprise entre $105 \mu\text{m}$ et 2.66 mm (figure 4.23, cadre bleu). Cet appareil a été développé dans les eaux claires de la Méditerranée et a été pour la première fois testé en Atlantique, dans le cadre de cette étude. Les données de l'UVP sont une série de vignettes représentant chaque organisme détecté. A chaque vignette est associée la profondeur de sa détection et une série de paramètres la caractérisant (contraste, taille, proportions, ...). Ces paramètres sont utilisés par le logiciel *Plankton Identifier* (Gorsky et al., 2010) pour trier les vignettes dans des classes préalablement définies. La résolution taxonomique est liée à la résolution de l'image. Le nombre de vignettes par classe d'organismes et la résolution taxonomique de ces classes donnent des informations à caractères quantitatifs et qualitatifs.

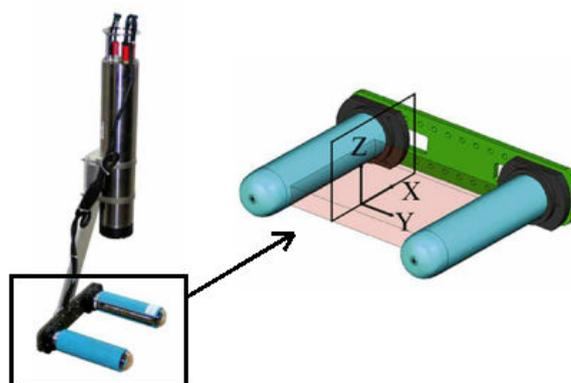


FIGURE 4.21 – Schéma de l'*Underwater Vision Profiler* (UVP, d'après Picheral et al. (2010)). L'illustration de gauche représente l'UVP en entier. Celle de droite représente le système lumineux de l'UVP avec, en rose, le volume d'eau échantillonné.

Multi Plankton Sampler (Multinet). Le filet Multinet (Hydro-Bios, figure 4.22) présente une ouverture fixe de 0.25 m^2 . La maille filtrante du récepteur étant de $315 \mu\text{m}$, ce filet échantillonne le compartiment du méso-zooplancton ($0.2 - 20 \text{ mm}$, figure 4.23, cadre vert). Le Multinet est composé de 5 filets échantillonnant des tranches de profondeur différentes sur un même profil. Les profondeurs de fermeture des filets sont programmées dans le système avant la mise à l'eau. Dans cette étude, les profondeurs sont déterminées selon un compromis entre les limites verticales de la couche diffusante dominante observée sur les échogrammes et le besoin d'échantillonner les tranches de surface pour d'autres études. Un exemple de programme typique du Multinet utilisé pendant PELGAS 2012 est :

- filet n ° 1 : du fond jusqu'en-dessous de la couche diffusante la plus dense
- filet n ° 2 : les profondeurs occupées par la couche diffusante la plus dense
- filet n ° 3 : 30-20 m
- filet n ° 4 : 20-10 m
- filet n ° 5 : 10-0 m

Le Multinet était rapidement descendu à la profondeur maximale puis remonté lentement pendant 30 minutes. Un capteur de pression activait la fermeture successive des filets.



FIGURE 4.22 – Photographie du filet *Multi Plankton Sampler* (Multinet, Hydro-Bios) composé des 5 filets. Lors de la remontée du filet, un capteur de pression ferme les différents filets aux profondeurs préalablement programmées.

Les autres instruments. Le granulomètre laser CILAS (Gentien et al., 1995), mesure la turbidité en comptant les particules comprises entre 0.7 et $400 \mu\text{m}$ (figure 4.23, cadre rouge). Un capteur d'intensité lumineuse indique la profondeur de la couche photique en relation avec la quantité de particules dans l'eau. Le vidéo-fluo-microscope est un instrument équipé d'une caméra et d'un éclairage dont la longueur d'onde lumineuse illumine la fluorescence, lui permettant de compter les cellules photosynthétiques. Ainsi, des vidéos des cellules phytoplanctoniques sont acquises et retranscrites en temps réel sur l'ordinateur du bord livrant la quantité et la nature des cellules rencontrées (Lunven et al., 2012). Le fluorimètre mesure la fluorescence comme un proxy de la quantité de cellules phytoplanctoniques. Le système de prélèvement est composé de plusieurs bouteilles Niskin dont la fermeture peut être commandée à distance de manière mécanique. Les bouteilles sont fermées en fonction de la forme des profils verticaux de densité et de fluorescence. Puisque la température, la salinité et la fluorescence sont suivies en temps réel lors du profil CTD, il est ainsi possible de distinguer la profondeur de la thermocline ou du maximum de fluorescence à la descente et de fermer les bouteilles aux profondeurs intéressantes

lors de la remontée. L'eau collectée par les bouteilles Niskin est utilisée pour l'étude des cellules phytoplanctoniques via un système d'imagerie en flux (le Flowcam) ou l'étude des matières inorganiques particulières (MIP) et des matières organiques particulières (MOP). Le filet Carré (1 m² d'ouverture et 315 μm de maille) a été mis à l'eau à certaines stations pour collecter des oeufs et des larves de poissons vivants.

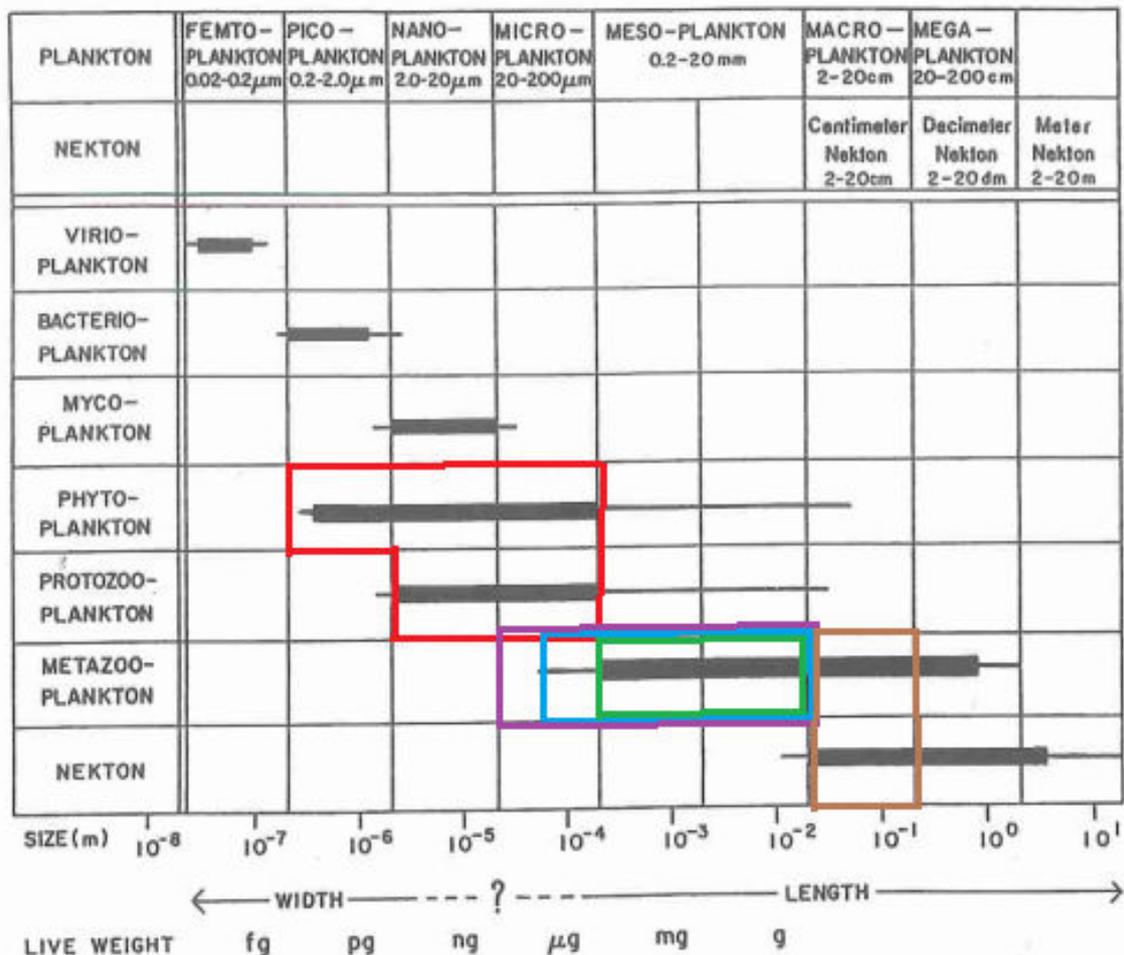


FIGURE 4.23 – Les communautés planctonique et nectonique structurées par classe de tailles, d'après Sieburth et al. (1978). Le cadre rouge indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le granulomètre laser CILAS, le cadre bleu indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le *Laser Optical Plankton Counter* (L-OPC) et le *Underwater Vision Profiler* (UVP), le cadre violet indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à plancton *Work Party 2* (WP2), le cadre vert indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à plancton *Multi Plankton Sampler* (Multinet), le cadre marron indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à micronecton *Midwater Ringnet Trawl* (MIK, cf. section 4.5).

Identification des échantillons collectés par les filets

Les échantillons du WP2 ont été intégralement identifiés au niveau taxonomique de l'espèce. Cependant, nous nous intéressons ici à la composition taxonomique des couches diffusantes qui sont bien structurées sur la verticale. Les échantillons du WP2 étant intégrés sur la verticale, cet instrument de mesure ne fournit pas d'information sur la composition taxonomique de tranches de profondeurs spécifiques. Ces données n'ont donc pas été utilisées dans ce travail.

Les échantillons collectés par le Multinet ont été identifiés selon l'objectif de ce travail, à savoir, trouver les cibles responsables des réponses acoustiques des couches diffusantes. Chaque échantillon a été fractionné selon un facteur dépendant de sa concentration en organismes, avec une cellule de Motoda. Les groupes "taxonomiques" ont été définis en fonction des types de réflecteur présents dans l'ensemble des échantillons et des modèles de réflecteurs acoustiques disponibles : petits euphausiacés et mysidacés, gros euphausiacés et mysidacés, petits copépodes, gros copépodes, petites méduses, grosses méduses, parties de siphonophores, salpes et doliolles, gastéropodes, autres (cladocères, larves de crustacés, oeufs de poissons, chaetognathes, dinoflagellées, ...). Les organismes des différents groupes ont été triés et comptés.

L'algorithme d'inversion

L'algorithme d'inversion utilisé dans ce travail est décrit en détails dans Lebourges-Dhaussy & Balle-Beganton (2004). Il a pour but d'estimer au moyen de modèles de réflecteurs acoustique, les vecteurs de tailles et de densités des organismes dont la réponse acoustique théorique permet d'expliquer au mieux la réponse fréquentielle mesurée *in-situ*. Il est basé sur un algorithme qui a été développé pour caractériser les petits organismes zooplanctoniques comme les copépodes (Costello et al., 1989; Greenlaw, 1979; Holliday, 1977). L'algorithme est basé sur l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre la densité des organismes (N en nombre d'individus/m³), leur signature acoustique et l'intensité de l'énergie qu'ils rétro-diffusent (*volume backscattering strength*, S_v). Soit Sv_{ij} , l'intensité acoustique rétro-diffusée par un réflecteur de taille i , à une abondance N , à la fréquence j :

$$Sv_{ij} = N_{ij} \times \sigma_{bs,ij} \quad (4.3)$$

où $\sigma_{bs,ij}$ diffère selon le modèle de réflecteur utilisé. Et Sv_j , l'intensité acoustique de n organismes à la fréquence j :

$$Sv_j = \sum^n N_{ij} \times \sigma_{bs,ij} \quad (4.4)$$

Dans le cas de l'inversion, l'intensité acoustique globale à chaque fréquence, Sv_j , est mesurée et l'abondance et la rétro-diffusion individuelle, $\sigma_{bs,ij}$, sont estimées à partir d'un modèle de réflecteur acoustique. La taille i est le rayon de la sphère équivalente (*Equivalent Sphere Radius*, ESR), défini comme la sphère de rayon ESR présentant le même volume total que l'organisme. Puisqu'il existe une équation de type équation 4.4 pour chaque fréquence, cette formulation conduit à un système d'équations où le nombre d'équations est égal au nombre de fréquences et où les abondances N_i sont les inconnues. La résolution du système d'équations est obtenue par la méthode de la somme linéaire des moindres carrés (Greenlaw, 1979). On cherche alors à résoudre l'équation suivante :

$$N = Sv \times \sigma_{bs}^{-1} \quad (4.5)$$

L'algorithme des moindres carrés cherche à minimiser les différences entre les mesures Sv_{meas} et des valeurs estimées à partir du modèle de réflecteur, de l'abondance et de la taille. Le résultat de la résolution du système d'équations est un vecteur d'abondances N . A partir du vecteur N , de la formulation du modèle, des fréquences d'échantillonnage et de la taille des organismes, une valeur d'énergie acoustique rétro-diffusée est calculée, Sv_{calc} . La différence entre le Sv mesuré et le Sv calculé est exprimé au travers d'un indicateur de la qualité de l'ajustement : l'erreur résiduelle. L'algorithme cherche à minimiser cette erreur avec une contrainte de non-négativité.

$$e = \| Sv_{meas} - Sv_{calc} \| \quad (4.6)$$

L'erreur est calculée par tranche de profondeur. La somme des erreurs sur l'ensemble des tranches de profondeur fournit une mesure de la qualité globale de l'ajustement du modèle aux données. Plus l'erreur est élevée, moins le modèle est bien ajusté. L'algorithme d'inversion a initialement été développé pour analyser les données acoustiques multifréquences collectées par le TAPS. C'est donc dans le manuel d'utilisation du TAPS ("*Appendix 3 : Data Analysis*") qu'est décrite l'interprétation de l'erreur résiduelle. Ce document mentionne qu'en général, la valeur de l'erreur doit être inférieure ou égale à 1. Les valeurs nettement supérieures à 1 indiquent une mauvaise qualité d'ajustement, qui peut être due à des problèmes de la mesure acoustique, à un mauvais choix de la gamme de tailles initiale, ou à un mauvais choix de modèle. Pour que le problème inverse puisse être résolu, il est nécessaire de définir une gamme de tailles initiale. Elle est déterminée pour être réaliste selon le type d'organisme considéré et doit correspondre à la zone géométrique du modèle (cf. 1.1). Le fonctionnement détaillé de l'algorithme et l'analyse de sensibilité des paramètres régissant les itérations sont décrits par Lebourges-Dhaussy & Balle-Beganton (2004).

Les modèles de réflecteurs couramment utilisés dans l'étude des cibles de plancton par acoustique (cf. 1.2) ont été testés avec l'algorithme d'inversion (tableau 4.1). Chaque modèle estime dans un premier temps l'intensité de rétro-diffusion d'une cible individuelle (*Target Strength*, TS) du type de réflecteur considéré. Il utilise des paramètres d'entrée qui décrivent approximativement la forme, la constitution et l'orientation du réflecteur. Les modèles disponibles dans la version mise à disposition pour ce travail et les références correspondantes sont répertoriés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Les modèles disponibles dans l’algorithme d’inversion, d’après SIMFAMI (2005). Le modèle de Ye (Ye, 1997) n’a été ajouté qu’en 2013, dans le cadre de cette étude.

Type d’organisme	Modèle	Forme et matériau de l’organisme	Référence
Copépodes	<i>Truncated Fluid Sphere</i> , TFS	Sphère fluide	Holliday (1992)
	<i>Distorted Wave Born Approximation</i> , DWBA	Sphéroïde prolate fluide	Stanton & Chu (2000)
	modèle <i>High-pass</i>	Sphère fluide	Stanton (1989)
	modèle <i>High-pass</i>	Sphéroïde prolate fluide	Stanton (1989)
Petits euphausiacés (L < 15 mm)	DWBA	Cylindre fluide	Stanton & Chu (2000)
Gros euphausiacés (L > 15 mm)	DWBA	Cylindre fluide	Stanton & Chu (2000)
Euphausiacés	<i>High-pass</i>	Cylindre fluide courbé	Stanton (1989)
	modèle <i>Randomly-oriented</i>	Cylindre fluide courbé	Stanton et al. (1994b)
Gastéropodes	<i>High-pass</i>	Sphère élastique	Stanton (1989)
Vessie natatoire	<i>High-pass</i>	Shéphoïde gazeux	Stanton (1989)
Bulles de gaz	DWBA	Sphère gazeuse	Stanton & Chu (2000)
	<i>High-pass</i>	Sphère gazeuse	Stanton (1989)
	Modèle de Ye, <i>Gaz-filled prolate spheroid</i>	Ellipsoïde allongé gazeux	Ye (1997)

En plus du modèle, l’utilisateur fournit une gamme de tailles initiales. L’algorithme découpe la gamme de tailles en 60 classes pour lesquelles il estime une abondance de réflecteurs. L’algorithme estime une distribution d’abondance dans les différentes classes de tailles par mètre de profondeur. Les 60 classes de tailles sont ensuite regroupées selon 5 grandes classes de tailles pour une meilleure lecture des résultats.

La sélection des modèles de réflecteurs est basée sur les résultats de la classification des tranches de profondeurs (cf. 4.3). Dans le cas de l’analyse des profils multi-fréquences de l’EK60

de PELGAS 2012, les réponses fréquentielles moyennes des groupes de tranches de profondeur présentaient une réponse acoustique de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse. L'algorithme d'inversion a été appliqué aux profils EK60 2012, en utilisant le modèle *High-Pass* de sphère gazeuse (Stanton, 1989) et le modèle DWBA paramétré pour un cylindre courbé gazeux (Stanton & Chu, 2000).

Dans le cas de l'analyse des données du TAPS, les réponses fréquentielles présentaient, en 2012, une réponse acoustique de réflecteurs FL. L'algorithme d'inversion a été appliqué aux profils TAPS avec le modèle *Truncated Fluid-Sphere* (TFS, Holliday (1992)) et le modèle DWBA paramétré pour les petits et les grands euphausiacés (Stanton & Chu, 2000).

Les performances des modèles ont été comparées en utilisant le critère de l'erreur résiduelle : le modèle optimal était celui dont l'erreur globale était minimale.

Corrélation entre les résultats de l'inversion et les données hydro-biologiques

A chaque station, les modèles de réflecteurs FL et GB les plus adaptés aux organismes considérés et qui présentaient la plus faible erreur résiduelle ont été sélectionnés pour estimer les profils verticaux de densités des organismes FL et GB à partir des données multifréquences TAPS et EK60, respectivement. Les profils verticaux de densités d'organismes ont ensuite été comparés à (i) la composition taxonomique des échantillons collectés par le Multinet, (ii) les profils verticaux des paramètres hydrologiques (température, salinité, fluorescence, turbidité) et (iii) les profils verticaux des structures en tailles mesurées par le LOPC et l'UVP.

Les échantillons du Multinet et des profils verticaux de densité des réflecteurs FL, estimés par le modèle sélectionné, ont été comparés qualitativement. Les profils hydrologiques et les profils de densités de réflecteurs FL et GB ont été comparés au moyen du coefficient de corrélation de Pearson (Adler et al., 2011), calculé à chaque station puis toutes stations confondues.

4.4.2 Résultats

Identification des échantillons du Multinet

La composition taxonomique des échantillons des 5 filets du Multinet collectés aux stations Q0522, Q0528 et Q0529 est présentée dans les figures 4.24, 4.25 et 4.26. A la station Q0522, la communauté méso-zooplanctonique est dominée par des siphonophores calycophores (dépourvus d'inclusion gazeuse, *Muggiae* sp.) de 6 à 31 m de profondeur. Les copépodes dominent la tranche de surface (0 à 6 m) et sont très présents jusqu'à 31 m. Des petits euphausiacés (< 1 mm), des larves de crustacés, des gastéropodes et des cladocères sont présents en plus faibles abondances (figure 4.24). A la station Q0528, la communauté méso-zooplanctonique est dominée par les copépodes de la surface jusqu'à 50 m de profondeur. Les plus grandes classes de tailles de copépodes sont présentes de 0 à 30 m. Des siphonophores calycophores (*Muggiae* sp.), des salpidés, des cladocères et des larves de crustacés sont présents en plus faibles abondances (figure 4.25). A la station Q0529, les copépodes dominent fortement la communauté méso-zooplanctonique de 11 à 70 m. En surface (0 à 11 m), les siphonophores calycophores (*Muggiae* sp.) sont significativement présents. Des salpidés, petits euphausiacés et cladocères sont présents en plus faibles abondances (figure 4.26). Aucun organismes porteurs d'inclusion gazeuse n'a été capturé par le Multinet .

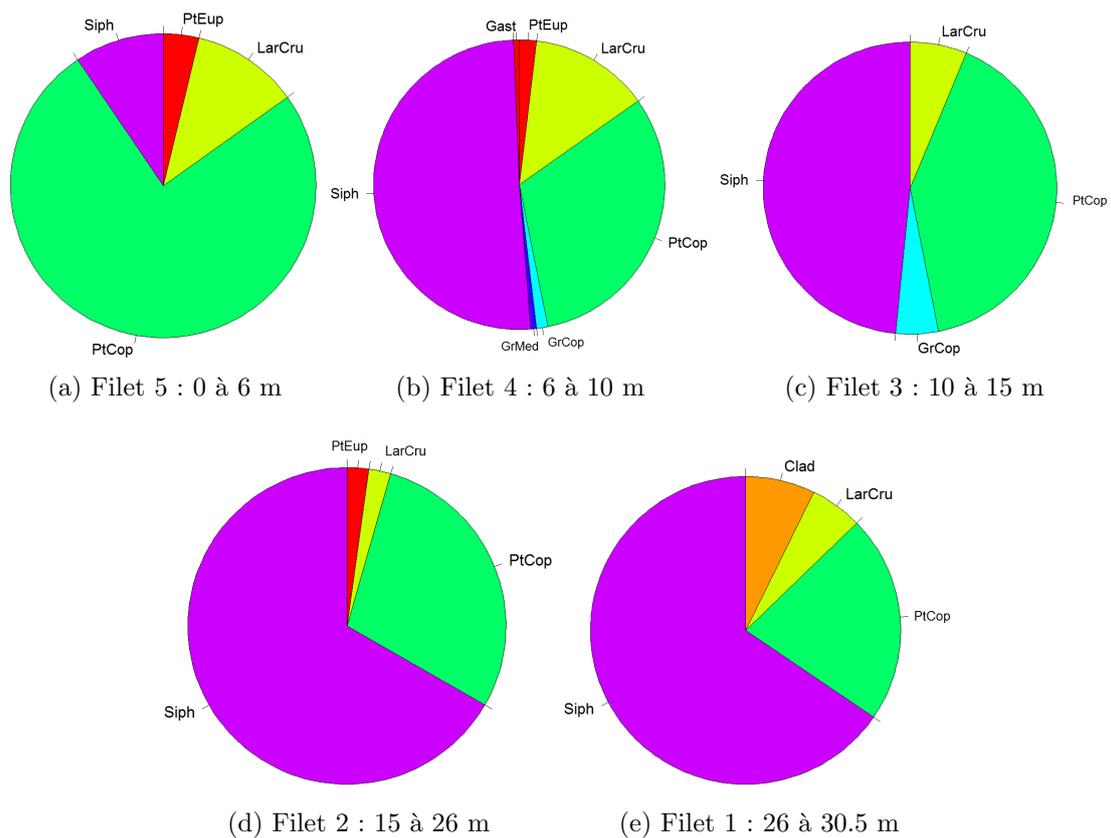


FIGURE 4.24 – Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0522. *Clad* : cladocères, *LarCru* : larves de crustacés, *PtCop* : petits copépodes, *GrCop* : gros copépodes, *PtMed* : petites méduses, *GrMed* : grosses méduses, *Siph* : siphonophores gélatineux, *Salp* : salpes et doliolles, *Gast* : gatéropodes, *PtEup* : petits euphausiacés, *GrEup* : gros euphausiacés.

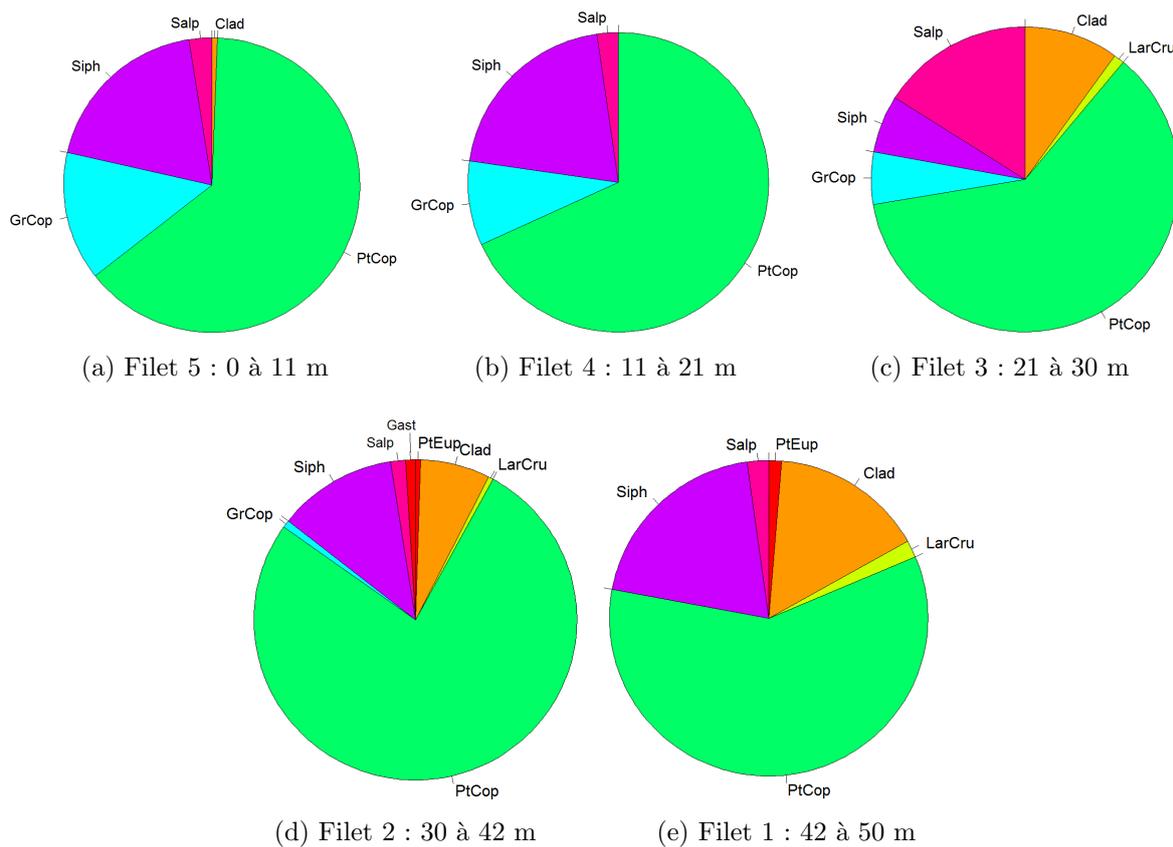


FIGURE 4.25 – Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0528. *Clad* : cladocères, *LarCru* : larves de crustacés, *PtCop* : petits copépodes, *GrCop* : gros copépodes, *PtMed* : petites méduses, *GrMed* : grosses méduses, *Siph* : siphonophores gélatineux, *Salp* : salpes et doliolles, *Gast* : gastéropodes, *PtEup* : petits euphausiacés, *GrEup* : gros euphausiacés.

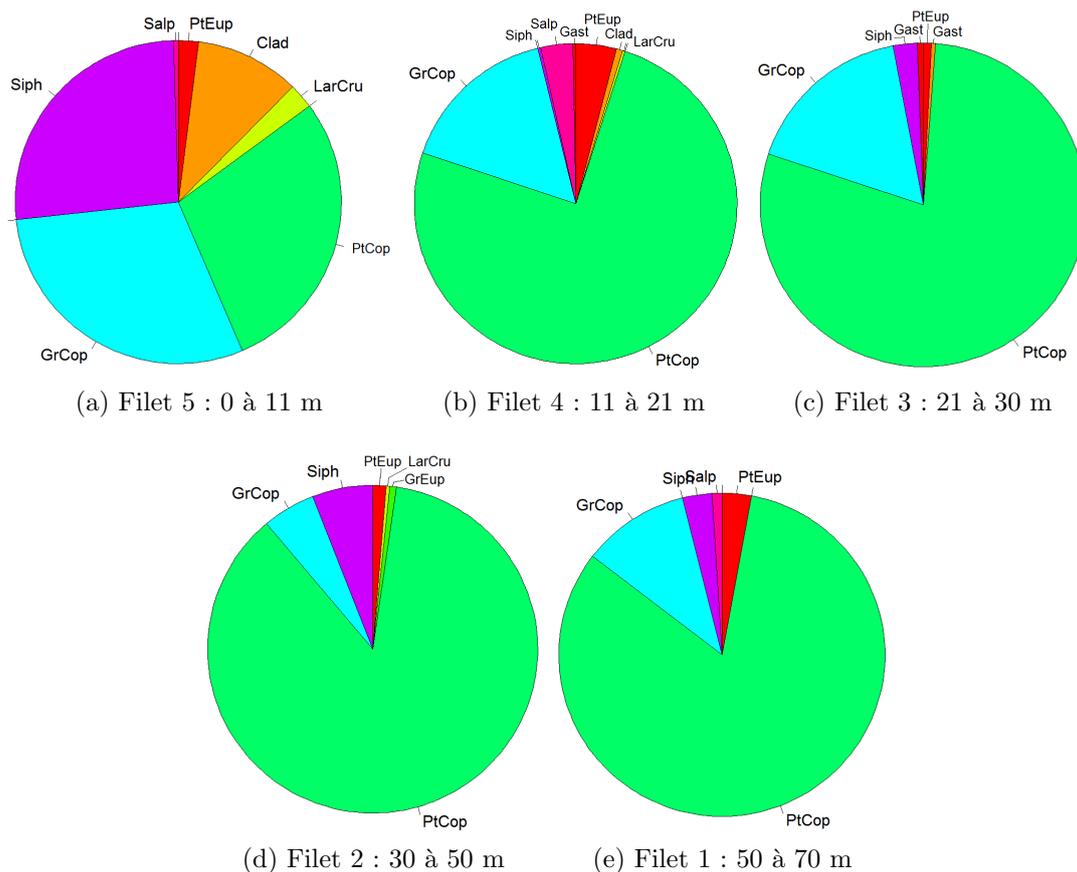


FIGURE 4.26 – Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0529. *Clad* : cladocères, *LarCru* : larves de crustacés, *PtCop* : petits copépodes, *GrCop* : gros copépodes, *PtMed* : petites méduses, *GrMed* : grosses méduses, *Siph* : siphonophores gélatineux, *Salp* : salpes et doliolés, *Gast* : gastéropodes, *PtEup* : petits euphausiacés, *GrEup* : gros euphausiacés.

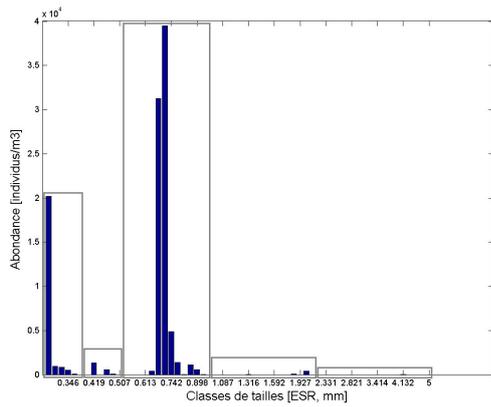
Résolution du problème inverse sur les données mutli-fréquences du TAPS

L'algorithme d'inversion a été utilisé sur les profils multi-fréquences collectés en 2012 par le TAPS avec des modèles d'organismes FL. Le tableau 4.2 répertorie les erreurs globales pour les modèles testés. Le modèle TFS s'ajuste mieux que les autres modèles aux données *in-situ* à la station Q0522 mais c'est le modèle DWBA qui s'ajuste mieux aux stations Q0528 et Q0529. La plupart des compositions taxonomiques des échantillons du Multinet étant largement dominés par les petits copépodes et ne présentant pas une présence marquée de grands euphausiacés, le modèle TFS a été sélectionné.

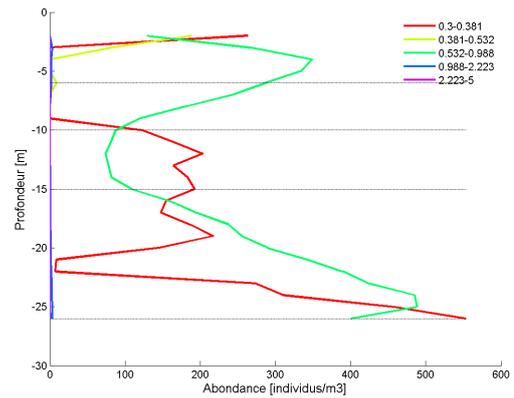
TABLE 4.2 – Valeurs des erreurs totales de l’ajustement des modèles de réflecteurs FL aux profils TAPS collectés pendant la campagne 2012.

Stations	Erreur TFS	Erreur DWBA petits euphau.	Erreur DWBA grands euphau.
Q0522	12,18	55,90	18,72
Q0528	45,46	125,22	35,48
Q0529	55,30	161,00	42,85

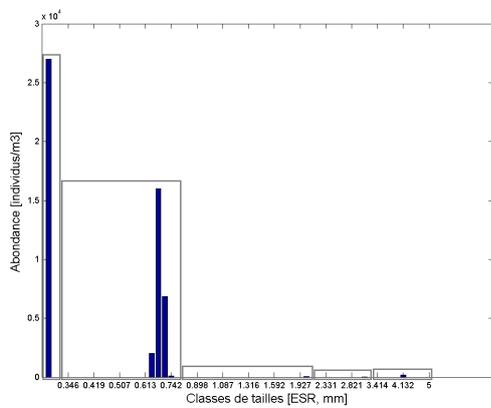
Le modèle TFS estime des abondances d’organismes FL sur une gamme de tailles de [0.3 - 5 mm]. La distribution de l’abondance totale dans les différentes classes de tailles (figures 4.27a, c & e) peut être groupée en 5 grandes classes de tailles. Ces distributions montrent que seulement quelques tailles sont abondantes sur l’ensemble de la gamme de taille initiale. La représentation des profils d’abondance estimée pour ces grandes classes de tailles (figures 4.27b, d, & f) montre une alternance de la dominance des très petites tailles [0.3 - 0.4 mm] et de tailles plus importantes. A la station Q0522, les tailles intermédiaires [0.5 - 1 mm] dominent jusqu’à 10 m puis de 20 à 25 m, tandis que les petites tailles sont dominantes entre 10 et 20 m et à partir de 25 m. A la station Q0529, les tailles intermédiaires [0.3 - 0.5 mm] dominent les 5 premiers mètres de la colonne d’eau, puis les plus grandes tailles [0.5 - 1.5 mm] sont dominantes jusqu’à 30 m, mais au-delà de cette profondeur, ce sont les très petites tailles (0.3 mm) qui dominent. La station Q0528 est différente puisque les petites tailles (0.3 mm) sont dominantes sur l’ensemble de la colonne d’eau.



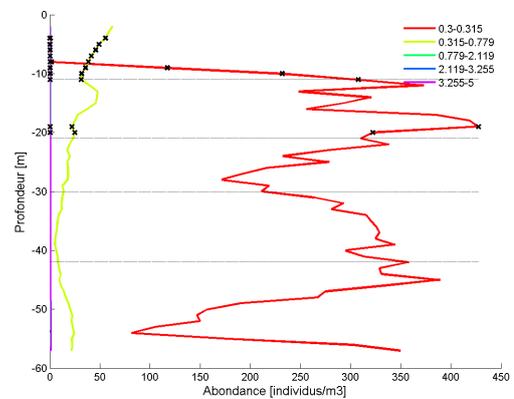
(a) Station Q0522 : Abondance par classe de tailles des réflecteurs FL.



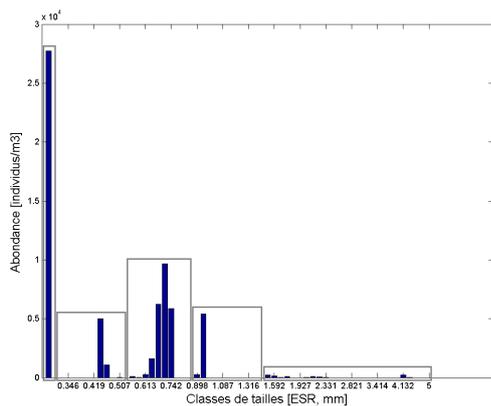
(b) Station Q0522 : Profils verticaux des abondances par classe de tailles des réflecteurs FL ($e = 12$).



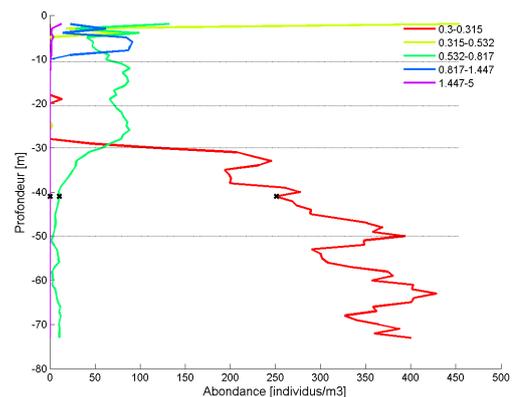
(c) Station Q0528 : Abondance par classe de tailles des réflecteurs FL.



(d) Station Q0528 : Profils verticaux des abondances par classes de tailles des réflecteurs FL ($e = 45$).



(e) Station Q0529 : Abondance par classe de tailles de réflecteurs FL.



(f) Station Q0529 : Profils verticaux des abondances par classe de tailles des réflecteurs FL ($e = 55$).

FIGURE 4.27 – Résultats de l'inversion appliquée aux profils du TAPS. Sur les figures (a), (c), (e) les cadres gris indiquent les regroupements des 60 classes en 5 grandes classes de tailles. Sur les figures (b), (d), (f) les lignes horizontales représentent les profondeurs d'ouverture des filets du Multinet et les croix noires indiquent les profondeurs où l'erreur est supérieure au seuil.

Résolution du problème inverse sur les données EK60 collectées en 2012

Le modèle *High-pass* et le modèle DWBA ont été ajustés aux profils de l'EK60 pour des classes de tailles de [0.02 - 0.3 mm ESR]. Bien que les erreurs du modèle *High-pass* soient plus faibles que celles de la DWBA (tableau 4.3), elles restent très supérieures au seuil de validité. En l'absence d'un modèle plus adapté, les estimations du modèle *High-Pass* ont été sélectionnées pour représenter les profils de densité des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse.

TABLE 4.3 – Erreurs totales, indicatrices de la qualité de l'ajustement des modèles aux profils médians verticaux collectés par l'EK60 aux stations Q0522, Q0528 et Q0529.

Stations	Erreur High-pass	Erreur DWBA
Q0522	20,61	32,71
Q0528	63,38	97,39
Q0529	94,52	132,90

Comparaison des profils d'abondance estimée de réflecteurs FL aux données hydro-biologiques

A la station Q0522, le filet #5 (0-11 m) du Multinet est dominé par les copépodes < 1 mm (tableau 4.4). Sur la même tranche de profondeurs, l'algorithme d'inversion appliqué aux données TAPS, estime une dominance de la classe de taille [0.5 - 1 mm]. Le filet # 3 (10-15 m) du Multinet est composé de siphonophores et de petits copépodes (< 1 mm), l'algorithme d'inversion estime une dominance de la classe de tailles [0.3 - 0.5 mm ESR]. Le filet # 2 du Multinet (15-26 m) est dominé par les siphonophores avec une abondance significative de petits copépodes. Aux mêmes profondeurs, l'algorithme d'inversion estime une dominance des classes de tailles ([0.3 - 0.5 mm] et [0.5 - 1 mm]).

TABLE 4.4 – Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l’algorithme d’inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0522. Lorsque plusieurs types d’organismes sont très présents dans l’échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d’abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.

Tranches de profondeur	Organismes dominants (Multinet)	Tailles dominantes (inversion)
0-6 m	petits copépodes	[0.5-1 mm]
6-10 m	siphonophores calycophores petits copépodes	[0.5-1 mm]
10-15 m	siphonophores calycophores petits copépodes	[0.3 mm]
15-26 m	siphonophores calycophores petits copépodes	[0.3-1 mm]

A la station Q0528, l’algorithme d’inversion estime que les petites tailles de réflecteurs FL (0.3 mm) dominent l’abondance de 8 à 60 m et présentent une abondance globalement forte (tableau 4.5). En surface, des tailles de classes supérieures, [0.3 - 0.8 mm], sont estimées dominantes par l’algorithme d’inversion et sont présentes jusqu’à 30 m de profondeur. Dans les échantillons du Multinet, les petits copépodes (< 1 mm) sont les organismes les plus abondants de 0 à 42 m et les gros copépodes sont présents de 0 à 30 m avec une abondance qui diminue avec la profondeur. Les variations verticale de l’abondance des petites classes de tailles estimées par l’inversion peuvent correspondre à la distribution verticale des petits copépodes et celles de la classe de tailles supérieures peuvent correspondre à la distribution verticale des gros copépodes.

TABLE 4.5 – Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l’algorithme d’inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0528. Lorsque plusieurs types d’organismes sont très présents dans l’échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d’abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.

Tranches de profondeur	Organismes dominants (Multinet)	Tailles dominantes (inversion)
0-11 m	petits copépodes	
	siphonophores calycophores	[0.3-0.8 mm]
11-21 m	gros copépodes	
	petits copépodes	
21-30 m	siphonophores calycophores	[0.3 mm]
	gros copépodes	
30-42 m	petits copépodes	
	salpes	[0.3 mm]
	cladocères	
42-50 m	petits copépodes	
	salpes	[0.3 mm]
	cladocères	

A la station Q0529, la composition taxonomique du filet # 5 (0-11 m) est hétérogène et les organismes présents correspondent à des classes de tailles différentes (tableau 4.6). Cela peut correspondre à l’alternance de la dominance des différentes classes de tailles estimées par l’algorithme d’inversion dans les 10 premiers mètres de la colonne d’eau. La composition taxonomique des filets # 4 à # 1 sont similaires. Or, l’algorithme d’inversion présente un changement de tailles dominantes à 30 m, qui ne correspond à aucun changement de composition taxonomique dans les filets.

Pour ces trois stations, les variations verticales de l’abondance des classes de tailles estimées par l’algorithme d’inversion sont globalement cohérentes avec la composition taxonomique des filets du Multinet aux différentes profondeurs, mais toutes les estimations ne peuvent pas être expliquées par l’abondance des organismes collectés par le Multinet.

TABLE 4.6 – Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l’algorithme d’inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0529. Lorsque plusieurs types d’organismes sont très présents dans l’échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d’abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.

Tranches de profondeur	Organismes dominants (Multinet)	Tailles dominantes (inversion)
0-11 m	petits copépodes	[0.3-1.4 mm]
	gros copépodes	
11-21 m	siphonophores calycophores	[0.5-0.8 mm]
	petits copépodes	
21-30 m	gros copépodes	[0.5-0.8 mm]
	petits copépodes	
30-50 m	gros coépodes	[0.3 mm]
	petits copépodes	
50-70 m	petits copépodes	[0.3 mm]
	gros copépodes	

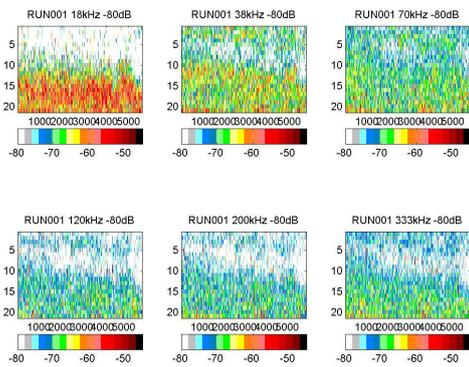
Les coefficients de corrélation calculés entre les profils verticaux des variables hydrologiques (température, salinité, fluorescence, turbidité, biovolume estimé par l’UVP, biovolume estimé par le LOPC) et les profils de densité de réflecteurs FL estimés par l’algorithme d’inversion sur les profils verticaux multifréquences collectés par le TAPS, ne sont pas significatifs sur les analyses par station ni sur l’analyse combinant les trois stations.

Comparaison des profils de l’abondance estimée de réflecteurs porteurs d’inclusion gazeuse aux données hydro-biologiques

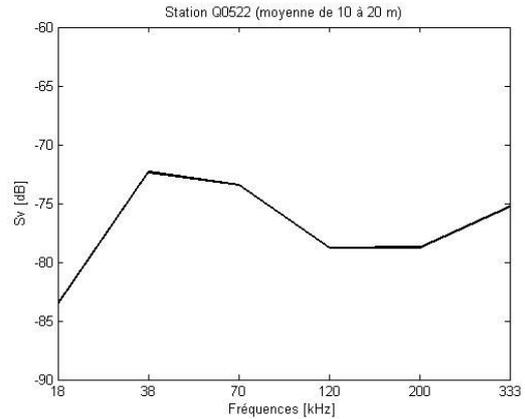
Une réponse fréquentielle moyenne a été calculée sur les tranches de profondeurs occupées par la couche diffusante sur les échogrammes (figure 4.28 : [10 - 20 m] à la station Q0522, [10 à 30 m] à la station Q0528 et [10 à 45 m] à la station Q0529). A toutes les stations, les tranches de profondeur occupées par les couches diffusantes sur les échogrammes, ne correspondent pas aux maximum de densité des réflecteurs FL qu’estiment l’algorithme d’inversion avec les données du TAPS (figure 4.27). De plus, si la réponse acoustique des couches diffusantes observées avait été dominée par des organismes FL, alors l’intensité de la réponse augmenterait progressivement avec la fréquence. Or, les réponses fréquentielles mesurées montrent globalement des intensités acoustiques plus fortes aux basses fréquences. La réponse acoustique des organismes FL n’est pas visible avec les fréquences de l’échosondeur EK60.

Les profils d’abondance de réflecteurs porteurs d’inclusion gazeuse estimés par l’inversion sur les profils EK60 n’ont pas pu être comparés à des organismes porteurs de bulles de gaz puisqu’aucun organisme à inclusion gazeuse n’a été échantillonné par le Multinet. L’analyse de corrélation entre les profils d’abondance de réflecteurs porteurs d’inclusion gazeuse estimés par l’inversion et les profils verticaux des paramètres hydro-biologiques ne montre aucune corrélation signifi-

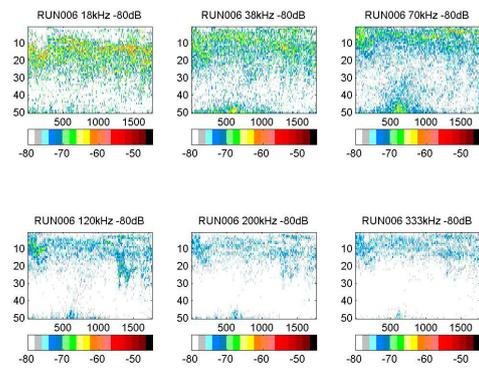
cative.



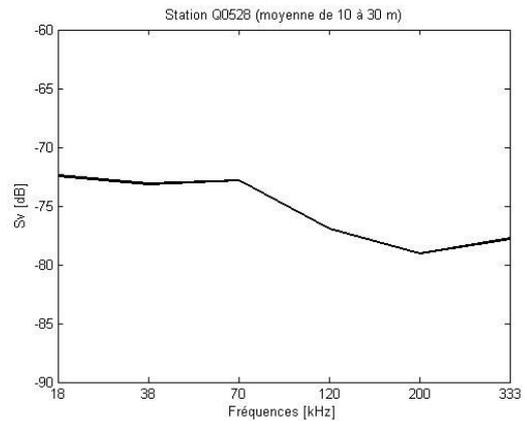
(a) Station Q0522 : échogrammes.



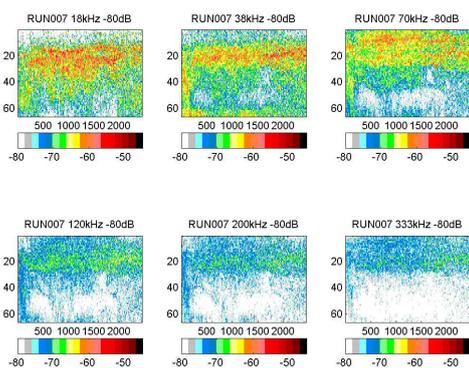
(b) Station Q0522 : réponse fréquentielle moyenne entre 1 à et 20 m.



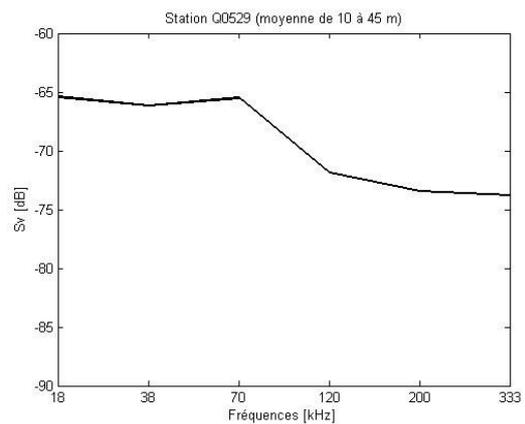
(c) Station Q0528 : échogrammes.



(d) Station Q0528 : réponse fréquentielle moyenne entre 10 et 30 m.



(e) Station Q0529 : échogrammes.



(f) Station Q0529 : réponse fréquentielle moyenne entre 10 et 45 m.

FIGURE 4.28 – Echogrammes multifréquences montrant des couches denses aux 3 stations. La réponse fréquentielle moyenne de la couche est calculée sur les données multifréquences sélectionnées aux profondeurs occupées par la couche diffusante sur les échogrammes.

4.4.3 Discussion, limites et perspectives

Le modèle *High-Pass* appliqué aux données de l'EK60 montre un mauvais ajustement. Il ne représente pas correctement les bulles de gaz qui dominent la réponse acoustique des fréquences de l'EK60. Pour valider le fait que la réponse acoustique mesurée par les fréquences de l'EK60 ne soit pas due à un autre phénomène que la résonance de bulles de gaz aux basses fréquences, des modèles de FL ont été utilisés dans l'algorithme d'inversion sur les données EK60. Les très fortes valeurs des erreurs (> 100) ont écarté cette hypothèse. Les estimations de l'algorithme d'inversion n'ont pas pu être validés car aucun organisme porteur d'inclusion gazeuse n'a été échantillonné par les instruments de mesure mis en œuvre lors du leg 3 de la campagne PELGAS 2012.

Le TAPS et le Multinet sont sensés échantillonner la même classe de tailles d'organismes. La comparaison grossière qui a été menée dans notre étude montre qu'il existe des cohérences entre la composition taxonomique des échantillons collectés par les différents filets du Multinet et les variations verticales de l'abondance des différentes classes de tailles de réflecteurs FL estimées par l'algorithme d'inversion. Cependant, pour certaines parties de la colonne d'eau, les estimations de l'algorithme d'inversion ne sont pas cohérentes avec la composition taxonomique des échantillons du Multinet. Des études ont montré de bonnes corrélations entre la composition d'un échantillonnage par un filet à plancton et les cibles détectées par le TAPS dont l'abondance par tranche de profondeur est estimée par l'algorithme d'inversion (e.g. Lebourges-Dhaussy & Balle-Beganton (2004); Napp et al. (1993)). En revanche, dans le cas de notre étude, la corrélation entre ces deux types de données n'a pas pu être étudiée quantitativement de façon très précise à partir des données PELGAS 2012 du fait des contraintes inhérentes au choix des tranches de profondeur échantillonnées. Le profil du Multinet effectué à chaque station devait en effet répondre aux besoins de deux études : l'échantillonnage de larves de poissons vivantes dans les premières tranches de profondeur et l'échantillonnage des couches diffusantes observées sur les échogrammes des sondeurs EK60. Ces deux objectifs impliquent que les tranches de profondeur échantillonnées par les filets du Multinet sont fines en surface mais très larges en profondeur. En d'autres termes, les profils du Multinet n'ont pas été organisés dans le but de comparer la composition taxonomique des échantillons aux données du TAPS. Cette question est apparue *a posteriori*, pendant l'analyse des données collectées pendant la campagne PELGAS 2012. En fixant le TAPS sur l'armature du Multinet et en mesurant les structures en tailles des organismes, les résultats auraient certainement été plus probants et indépendants des activités du navire entre les profils (Lebourges Dhaussy et al., 2009).

L'UVP est un profileur vidéo conçu dans les eaux claires de la Méditerranée. L'instrument a été embarqué pour échantillonner le méso-zooplancton mais n'avait pas été testé en Atlantique. La zone d'étude du leg 3 où il a été mis à l'eau, est située dans le panache de la Gironde et caractérisée par une eau turbide. Les résultats se sont révélés difficilement interprétables car 80% des vignettes ont été classées comme "détritiques non vivants". Les données de l'UVP n'ont donc pas été utilisées dans cette étude.

Le LOPC mesure toutes les particules se trouvant dans le milieu. Ses résultats doivent être corrigés pour éliminer l'influence des particules inorganiques (Vandromme et al., 2014). Les données LOPC comparées ici aux résultats de l'inversion du TAPS n'étaient pas corrigées, ce qui peut expliquer l'absence de corrélation entre ces deux échantillonneurs du compartiment méso-zooplanctonique.

Les profils d'abondance estimée de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse ne sont corrélés à aucune variable hydrologique. Ce résultat corrobore les résultats du chapitre 2. Aucun organisme porteur d'inclusion gazeuse n'a été échantillonné par la série d'instruments de mesure du

leg 3 de la campagne PELGAS 2012. Ces instruments ont échantillonné une gamme de tailles de particules allant des particules inorganiques en suspension ($0.7 \mu\text{m}$) au méso-zooplancton (20 mm). Même si cette gamme de tailles est très étendue, les résultats de l'étude présentée dans cette section, suggèrent que les individus recherchés font partie de compartiments contenant des organismes à inclusion gazeuse qui n'ont pas été échantillonnés : le macro-zooplancton et le micro-necton (siphonophores physonectes, larves de poissons, myctophidés).

4.5 Combinaison des approches directe et inverse pour caractériser la structure en taille et l'abondance des réflecteurs des couches résonantes

Dans cette analyse, les couches diffusantes sont étudiées à l'échelle très réduite de la fenêtre spatio-temporelle de l'échantillonnage biologique de chaque station. La combinaison des données acoustiques et biologiques a pour objectif d'identifier la nature des organismes contribuant à la réponse acoustique des couches diffusantes denses et d'en quantifier la structure en tailles et en densités.

4.5.1 Matériel et méthodes

Échantillonnage biologique

En 2013, le troisième leg de la campagne PELGAS s'est à nouveau concentré sur la composition spécifique des couches diffusantes. L'échantillonnage, dans son ensemble, était semblable à celui de la campagne PELGAS 2012. Les stations ont été positionnées aux mêmes emplacements qu'en 2012 et la même série d'instruments de mesure a été mise à l'eau, à l'exception de l'UVP et du TAPS, qui n'ont pas été utilisés en 2013. En 2012, les instruments utilisés n'échantillaient une gamme de tailles d'organismes n'allant que jusqu'au méso-zooplancton. Les résultats de l'analyse des données de la campagne 2012 ayant mis en évidence l'absence de corrélation entre les données biologiques et acoustiques collectées en 2012, l'échantillonnage a été étendu en 2013 aux communautés ichtyoplanctonique, macrozooplancton et micronectonique. Ces communautés ont été échantillonnées en 2013 par un filet à micro-necton (MIK, ICES (2013)). Les mauvaises conditions météorologiques n'ont permis de mettre le filet MIK à l'eau qu'aux stations de la radiale nord du plan d'échantillonnage du leg 3 (figure 4.29).

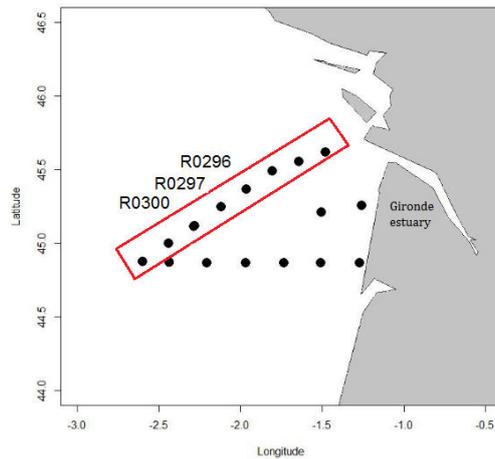


FIGURE 4.29 – Plan d'échantillonnage du leg 3 de la campagne PELGAS 2013. Le cadre rouge entoure les stations de la radiale nord où le MIK a été utilisé. Les stations étudiées de façon approfondie sont identifiées par leur code.

Le *Midwater Ringnet trawl* (MIK, ICES (2013), figure 4.30), présente une ouverture circulaire fixe de 2 m de diamètre (aire de 3.14 m²). Sa maille filtrante est de 500 μm , ce qui lui permet d'échantillonner le macro-zooplankton et le micro-necton (figure 4.23, cadre marron). Le plan du filet MIK est présenté dans l'annexe II.



FIGURE 4.30 – Photographie du *Midwater Ringnet trawl* (MIK) lors de sa mise à l'eau sur le pont arrière du navire Thalassa.

Dans le cadre de cette étude, le besoin d'échantillonner précisément les profondeurs des couches diffusantes a conduit au test de deux techniques d'utilisation du MIK (figure 4.31). La zone où les tests ont été réalisés a été sélectionnée du fait de la présence simultanée d'une couche diffusante en surface et d'une couche diffusante en profondeur. Les différents essais se sont déroulés lors d'aller-retour sur cette même portion de la colonne d'eau dans le but de pouvoir comparer les résultats des différentes approches. Le premier type d'échantillonnage testé est le protocole classique du filet MIK (ICES, 2013) (figure 4.31, droite) : à une vitesse de marche du navire de 2 nœuds, le MIK est descendu à 1 m du fond puis immédiatement remonté vers la

surface le tout à une vitesse de câble de 1 m/s. Dans ce cas, les échantillons collectés intègrent l'information sur la profondeur. Le second protocole a pour but d'échantillonner précisément une tranche de profondeur (figure 4.31, gauche). La profondeur moyenne de la couche diffusante la plus dense est déterminée par l'observation des échogrammes. Le MIK est rapidement descendu à cette profondeur et traîné par le navire à une vitesse de 2 nœuds. Dans ce cas, deux temps d'échantillonnage ont été testés : 15 et 30 minutes. Ce protocole de pêche a été testé avec deux temps d'échantillonnage différents sur la couche de surface et sur celle du fond.

Les traits de MIK de type "chalutage" de la couche de fond à 75 m, pendant 15 et 30 minutes présentaient la même composition taxonomique, à l'exception des larves de poissons. Ces dernières n'étaient présentes que dans l'échantillon collecté pendant le trait de 30 minutes. L'échantillon collecté pendant 30 minutes dans la couche de surface était largement dominé par les larves de crustacés. L'échantillon du profil intégré présentait une composition taxonomique relative semblable à ceux des traits de type chalutage. Les échantillons des couches diffusantes en mode chalutage 30 minutes étant différents entre les couches de fond et de surface, l'échantillonnage des couches diffusantes à chaque station a donc été réalisé avec un trait de MIK de type chalutage pendant 30 minutes.

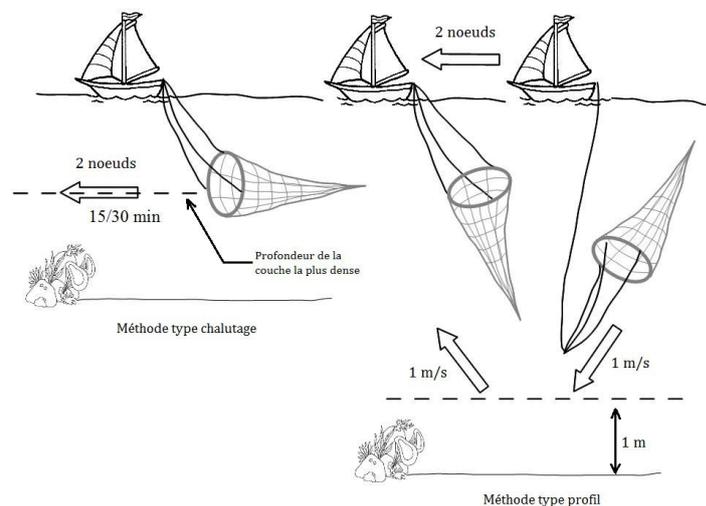


FIGURE 4.31 – Illustration des deux types de protocoles d'utilisation du *Midwater Ringnet Trawl* (MIK) testés. L'illustration de droite représente le protocole classique où le filet échantillonne de façon homogène toute la colonne d'eau (type "profil"). La figure de gauche présente le protocole type "chalutage", où le filet cible une tranche de profondeur déterminée.

Analyse des échantillons du filet MIK

Les échantillons du MIK sont fractionnés sur un tamis de 2 mm. La fraction < 2 mm a été analysée avec le système d'imagerie en flux Zoocam (figure 4.32), développé par Ifremer afin de caractériser les particules de l'ordre de grandeur de taille du méso-zooplancton. L'échantillon est dilué dans 5 L d'eau dans une cuve, puis aspiré dans un circuit d'eau par une pompe. Les organismes passent devant une caméra, qui prend des photos à raison de 15 images/sec. Les formes des organismes présents sur chaque photographie sont ensuite isolées sous la forme de vignettes individuelles.

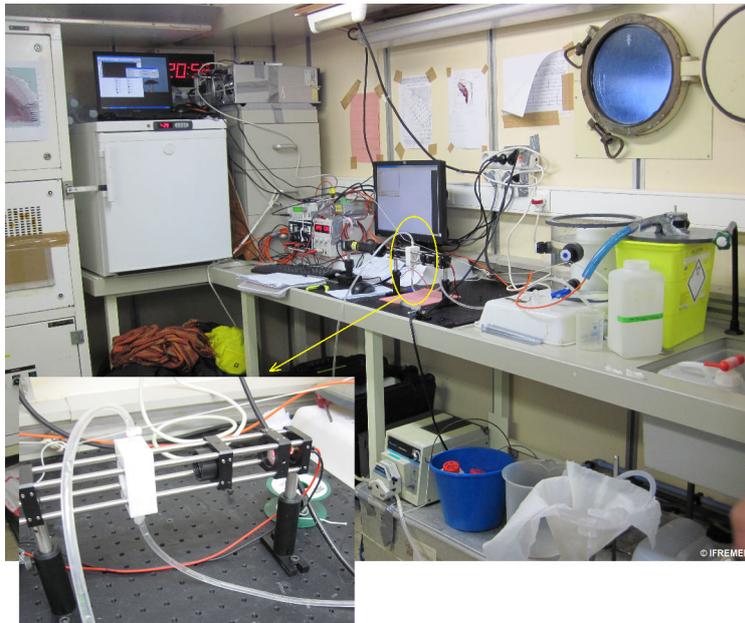
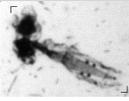
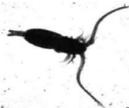
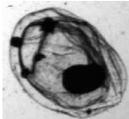


FIGURE 4.32 – Zoocam installé à bord du N/O La Thalassa pendant la campagne PELGAS 2013. Le zoom représente la cuve dans laquelle les images sont prises.

A chaque vignette sont associés divers paramètres (paramètres de niveaux de gris, de niveaux de contraste, de mensurations, ...) qui sont utilisés par un logiciel de traitement d'images pour les classifier. La classification, dans le logiciel *Plankton Identifier* (Gorsky et al., 2010), est réalisée à partir d'un jeu d'images dit "d'apprentissage". Il s'agit de la classification manuelle d'un nombre réduit de vignettes dans des groupes préalablement déterminés par l'opérateur. Les vignettes "exemple" de chaque groupe doivent être très caractéristiques de ce que l'opérateur souhaite trouver dans la classe.

Dans le cadre de cette étude, les groupes de classification correspondaient aux modèles de réflecteurs acoustiques, comme pour l'identification manuelle des échantillons collectés en 2012. Le tableau 4.7 présente ces groupes et des images caractéristiques de chaque groupe.

TABLE 4.7 – Les différents groupes dans lesquels sont classées les vignettes du Zoocam via le logiciel *Plankton Identifier*. La catégorie "non vivant" a été créée afin d'isoler les débris et artefacts.

Nom du groupe	Exemples de vignette		
Appendiculaires			
Cladocères			
Copépodes			
Doliolles & salpes			
Euphausiacés			
Larves de crustacés			
Méduses			
Oeufs d'anchois			
Oeufs d'autres espèces de poissons			
Siphonophores calycophores			
Non vivant			

Le logiciel produit une première classification des organismes méso-zooplanctoniques avec un premier dénombrement par groupe. Les résultats du tri automatique nécessitent une validation manuelle, puisque le taux d'erreur de classification dans les groupes est proche de 50%, en moyenne sur l'ensemble des échantillon traités.

La fraction > 2 mm des échantillons du MIK a été fractionnée en fonction de sa concentration en organismes. Les organismes ont ensuite été triés manuellement dans les mêmes groupes taxonomiques que ceux utilisés pour le tri du mésozooplancton. Pour chaque groupe, la taille de 10 individus a été mesurée puis moyennée par groupe.

Globalement, les échantillons collectés par le filet MIK à chaque station ont ainsi été identifiés en classant les organismes dans les grands groupes de réflecteurs suivants : larves de crustacés, cladocères, petits euphausiacés et mysidacés, gros euphausiacés et mysidacés, petits copépodes, gros copépodes, petites méduses, macro-méduses, pneumatophores de siphonophores, salpes et doliolles, ptéropodes et gastéropodes, larves de poissons, autres parties gélatineuses, petits poissons, cténophores. La limite de taille entre les petits et les gros copépodes, euphausiacés et mysidacés est 1 mm. Pour chaque groupe, une abondance et une taille moyenne ont été mesurées.

Échantillonnage acoustique

Les données acoustiques collectées par les sondeurs EK60 et les données issues de l'identification des échantillons collectés par le MIK sont de nature très différentes. Pour les comparer avec le plus de précision possible, il convient de les analyser à la même échelle spatio-temporelle. C'est la résolution d'échantillonnage grossière du filet MIK qui a déterminé l'échelle d'étude commune. Seules les données acoustiques enregistrées dans la fenêtre spatio-temporelle de l'échantillonnage du filet ont ainsi été considérées. Les données horodatées fournies par un capteur de pression (Marport), fixé au filet MIK, permettait de contrôler la profondeur du filet en cours d'échantillonnage et de reconstituer *a posteriori* la trajectoire du filet. Quatre points de repère ont été déterminés à partir des données du capteur de pression pour sélectionner les données acoustiques :

- le temps de départ : temps/ping auquel le filet est à la profondeur ciblée pour la première fois
- le temps de fin : temps/ping auquel le filet est à la profondeur ciblée pour la dernière fois avant la remontée
- la profondeur minimale : profondeur minimale échantillonnée par le filet entre le temps de départ et le temps de fin
- la profondeur maximale : profondeur maximale échantillonnée par le filet entre le temps de départ et le temps de fin

Les données multi-fréquence sélectionnées dans cette fenêtre spatio-temporelle ont ensuite été résumées par la médiane des Sv par fréquence.

Combinaison des données acoustiques et biologiques

L'approche directe. Nous avons supposé que les larves de poissons possédaient une inclusion gazeuse et étaient donc potentiellement les réflecteurs les plus forts. Cette hypothèse n'a pas pu être validée visuellement car les éventuelles vessies gazeuses étaient soit endommagées, soit trop petites pour être mesurées optiquement. Pour éviter toute confusion, l'approche directe n'a été appliquée qu'aux réflecteurs FL (tableau 4.8) pour lesquels l'abondance et la taille ont été mesurées précisément (figure 4.33 (1)).

Les tailles moyennes de chaque groupe ont été utilisées comme paramètres d'entrée des modèles de réflecteurs représentant les organismes des différents groupes. Les paramètres déterminant

les caractéristiques de forme et de propriétés acoustiques des organismes sont issus des études de Lawson et al. (2004), Lavery et al. (2007) et du projet SIMFAMI (2005) et répertoriés dans le tableau 4.8. Chaque modèle estime une réponse acoustique individuelle. En multipliant cette réponse par l'abondance mesurée dans l'échantillon, nous avons estimé une réponse fréquentielle par type d'organisme. La somme, par fréquence, de ces réponses acoustiques a été utilisée pour estimer la réponse fréquentielle théorique de l'échantillon. La réponse fréquentielle estimée par la résolution du problème direct a ensuite été comparée à la réponse mesurée *in-situ* dans la zone échantillonnée par le MIK.

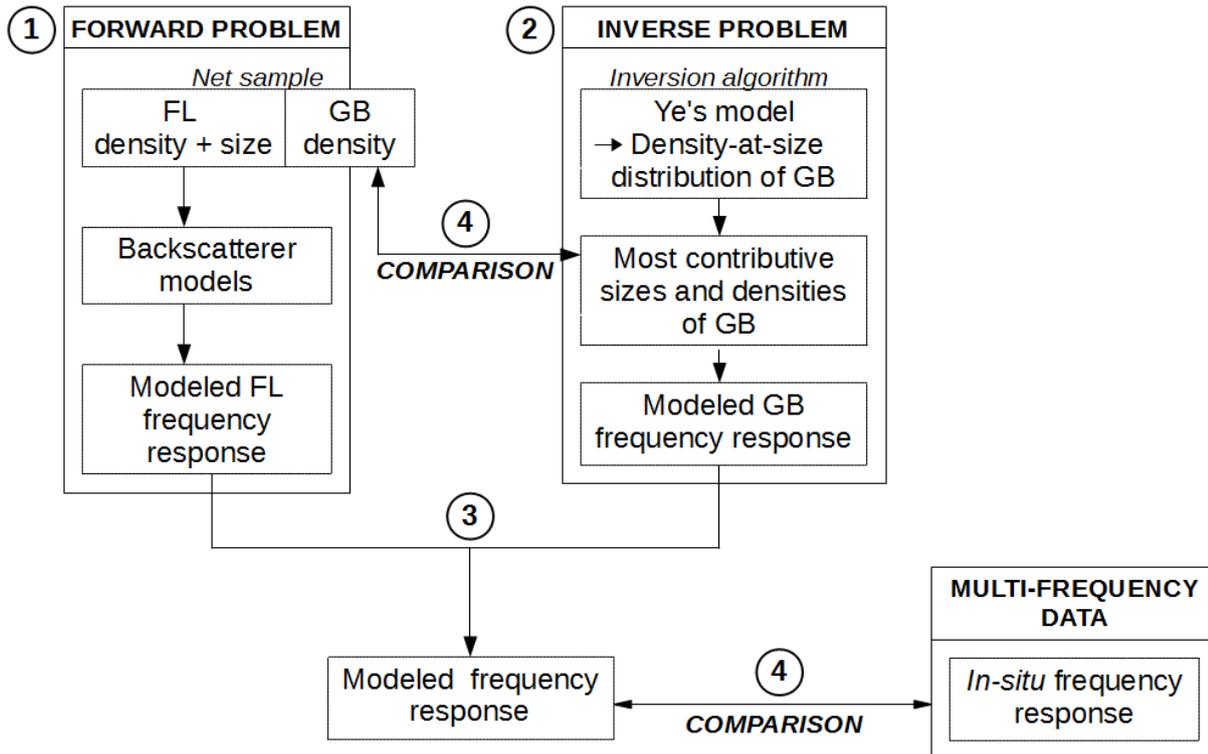


FIGURE 4.33 – Schéma conceptuel de la méthodologie utilisée pour mettre en relation les données acoustiques et biologiques. L'approche directe est appliquée pour estimer la réponse fréquentielle des organismes Fluid-Like (FL) échantillonnés par le filet (1). L'approche inverse est utilisée pour estimer la distribution des densités par classe de tailles des bulles de gaz incluses dans des organismes gazeux et la réponse fréquentielle correspondante (2). Les réponses fréquentielles des organismes gazeux contribuant le plus à la réponse *in-situ* sont ajoutées séquentiellement à la réponse estimée des FL jusqu'à approcher au mieux la réponse fréquentielle mesurée *in-situ* (3). Les réponses fréquentielles *in-situ* et estimées sont comparées. Les densités d'organismes gazeux estimées et échantillonnées sont comparées (4).

TABLE 4.8 – Choix et paramétrisation initiale des modèles de réflecteurs utilisés pour estimer la réponse fréquentielle des organismes *Fluid-Like* (FL) présents dans les échantillons du MIK. (D’après Lavery et al. (2007); Lawson et al. (2004); SIMFAMI (2005)). ^(a) Stanton et al. (1998). ^(b) Holliday (1992). ^(c) Stanton (1989). ^(d) Ye (1997).

Type d’organismes	Modèle utilisé	Elongation	Orientation	Contraste de densité (g)	Contraste de la vitesse du son (h)	Coefficient de réflectivité (R)
Larves de crustacés	DWBA, <i>Uniformly-bent cylinder</i> ^(a)	2.55	N(0,30)	1.058	1.058	-
Petits euphausiacés	DWBA, <i>Uniformly-bent cylinder</i> ^(a)	10.5	N(20,20)	1.016	1.019	-
Copépodes	TFS ^(b)	1	-	1.02	1.058	-
Gastéropodes	<i>High-pass, elastic shell</i> ^(c)	-	-	-	-	0.5
Petites méduses	DWBA ^(a)	1	-	1.02	1.02	-
Siphonophores calycophores	<i>High-pass, fluid-filled sphere</i> ^(c)	1	-	1.02	1.02	-
Gros euphausiacés	DWBA, <i>Uniformly-bent cylinder</i> ^(a)	13.04	N(0,30)	1.005	1.0073	-
Grandes méduses	DWBA ^(a)	1	-	1.02	1.02	-

Approche inverse pour estimer la taille et la densité des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse. L'approche inverse a été utilisée afin de quantifier la structure en taille et la densité des organismes gazeux les plus à même de produire la réponse acoustique mesurée *in-situ*. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. 4.4), l'algorithme d'inversion (Lebourges-Dhaussy & Balle-Beganton, 2004) estime la combinaison de tailles et de densités d'un réflecteur préalablement sélectionné, qui explique au mieux la réponse acoustique multi-fréquences mesurée.

Les résultats de la méthode inverse appliquée aux données de la campagne 2012 ont montré un mauvais ajustement des modèles de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse *Distorted Wave-Born Approximation* (Stanton & Chu, 2000) et *High-pass model* (Stanton, 1989) aux profils acoustiques verticaux multifréquences, qui suggéraient pourtant, la présence d'organismes avec une inclusion gazeuse.

Les formules les plus utilisées dans la littérature pour estimer la réponse acoustique d'une bulle de gaz dans l'eau ont été comparées dans le but de trouver un modèle plus performant. Dans la synthèse de Ainslie & Leighton (2011), une bulle de gaz est schématisée par un ellipsoïde allongé rempli de gaz. La meilleure estimation de sa réponse acoustique est donnée par la résolution de l'équation différentielle de Helmholtz pour calculer la solution exacte de l'équation d'onde de Furusawa (1988). Or, cette approche n'est pas réalisable en routine car le temps de calcul est très conséquent, et ce, pour n'importe quelle taille et valeur d'aplatissement de la bulle. Elle reste néanmoins un bon outil de comparaison pour estimer la qualité de l'estimation des autres modèles. Dans le but de trouver l'estimation la plus proche de l'équation d'onde, l'équation de Furusawa (1988), le modèle des vessies gazeuses de myctophidés de Kloser et al. (2002), le modèle d'un ellipsoïde allongé rempli de gaz de Ye (1997), le modèle *High-pass* de Stanton (1989) paramétré pour une sphère gazeuse et un ellipsoïde allongé et la formule de Medwin & Clay (1997) ont été comparés.

Okumura et al. (2003) ont comparé le modèle de Ye (1997) à la solution exacte de Furusawa (1988) et ont trouvé des résultats très proches aux basses fréquences et pour des $ka < 0.8$ (où k est le nombre d'ondes et a de la sphère équivalente). Dans la publication qui présente son modèle, Ye compare son approche au modèle *High-pass* de Stanton (Stanton, 1989) et sa formule se révèle plus précise. Le modèle de Kloser et al. (2002) est une version trop simplifiée de l'approche de Weston (1966), avec des paramètres adaptés à la modélisation des vessies natatoires des myctophidés à très grandes profondeurs. La formule de Medwin & Clay (1997) ne prends pas en compte la variabilité de l'aplatissement avec la profondeur qui entraîne un décalage de la fréquence de résonance et une réduction de l'amplitude du pic de résonance. Le modèle de Ye se révélant plus flexible au niveau de la paramétrisation, et plus proche de la solution exacte, il a été sélectionné pour estimer la fréquence et l'intensité de la résonance aux basses fréquences et/ou pour de petites tailles de bulles. D'après la synthèse de Ainslie & Leighton (2011), les effets de l'amortissement acoustique dû à la température et à la viscosité ne sont pas négligeables. Ces termes ont donc été ajoutés à la formule de Ye, en suivant la formulation de Kapodistrias & Dahl (2012).

Pour la fréquence d'échantillonnage f et une bulle de gaz de rayon à l'équilibre de rayon de sphère équivalente (ESR, *Equivalent Sphere Radius*) a , d'aplatissement e et avec un exposant polytrophique du gaz $\gamma = 1.4$, une densité de l'eau $\rho_w = 1030 \text{ g.m}^{-3}$ et la conductivité de l'eau $c = 1450$, Ye exprime la fréquence de résonance de Minnaert comme :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a e^{1/3}} \times \left(\frac{3\gamma P}{\rho_w} \right)^{1/2} \times \left(\frac{\log\left(\frac{1+\epsilon}{\epsilon}\right)}{\epsilon} \right)^{-1/2} \quad (4.7)$$

où

$$\epsilon = (1 - e^2)^{1/2} \quad (4.8)$$

et où la pression P à la profondeur D considérée est donnée par :

$$P = (1 + (0.1D)) \times 10^5 \quad (4.9)$$

Ye définit le facteur de l'amortissement dû à la radiation acoustique β_{rad} comme :

$$\beta_{rad} = kae^{-2/3} \left(\frac{\log(\frac{1+\epsilon}{e})}{\epsilon} \right)^{-1} \quad (4.10)$$

D'après Ainslie & Leighton (2011), les facteurs d'amortissement dus à la température β_{th} est défini par la formule suivante :

$$\beta_{th} = \frac{3P_{gas}}{2\rho_w(a)^2\omega} Im(\Gamma) \quad (4.11)$$

où P_{gas} est la pression à l'intérieur de la bulle de gaz à l'état d'équilibre :

$$P_{gas} = P + \frac{2\tau}{a} \quad (4.12)$$

et

$$\omega = ck = 2\pi f \quad (4.13)$$

où l'on définit l'indice polytrophique complexe Γ par :

$$\Gamma = \frac{\gamma}{1 - \left[\frac{(1+i)X/2}{\tanh[(1+i)X/2]} - 1 \right] \frac{6i(\gamma-1)}{X^2}} \quad (4.14)$$

le ratio de diffusion thermique par :

$$X \equiv \frac{a}{l_{th}} \quad (4.15)$$

avec l_{th} , la longueur de la diffusion thermique :

$$l_{th} = \sqrt{\frac{D_p a}{2\omega}} \quad (4.16)$$

et la diffusivité thermique $D_p = 1,9 \cdot 10^{-5}$.

L'effet de l'amortissement dû à la viscosité β_{vis} est donné par la formule suivante :

$$\beta_{vis} = \frac{2\eta_s}{\rho_w(a)^2} \quad (4.17)$$

où η_s (en Pa.s) est la viscosité de cisaillement. D'après les équations 4.11 et 4.17, le terme additionnel de l'amortissement est :

$$\beta_0 = \beta_{th} + \beta_{vis} \quad (4.18)$$

Dans ce travail, la réponse acoustique individuelle (TS) de la bulle de gaz considérée est estimée par :

$$TS(f, a) = 10 \log_{10} \left(\frac{(ae^{-2/3})^2 \left(\frac{\log(\frac{1+\epsilon}{e})}{\epsilon} \right)^{-1}}{[(f_0/f)^2 - 1]^2 - [\beta_{rad} + \frac{2\beta_0}{\omega}]^2} \right) \quad (4.19)$$

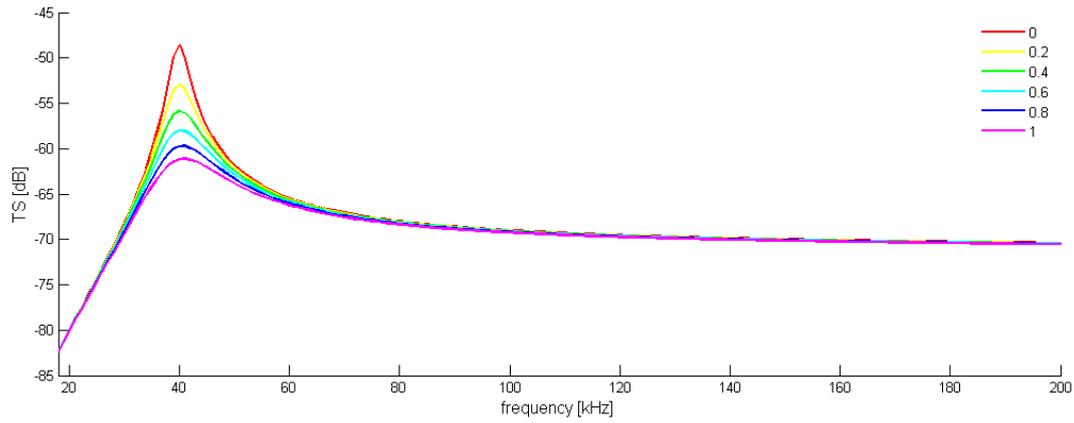
et la rétro-diffusion réduite de la coupe transversale de la bulle est donnée par :

$$\sigma_{bs}reduced = \frac{10^{TS(f,a)/10}}{L^2} \quad (4.20)$$

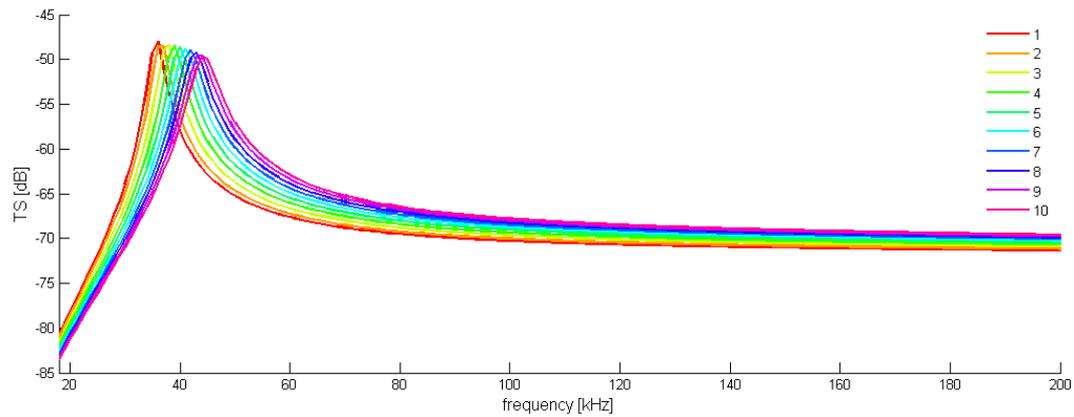
correspondant à une longueur réelle du diamètre majeur $L = \frac{2(a)}{(e)^{2/3}}$ pour un ellipsoïde allongé.

La formule du modèle de Ye a été utilisée dans l'algorithme d'inversion pour résoudre le problème inverse sur les réponses fréquentielles médianes mesurées dans la zone échantillonnée par le MIK. La profondeur considérée dans le modèle est la profondeur ciblée par l'échantillonnage au filet MIK à la station considérée (tableau 4.9). La gamme de taille utilisée est la même pour toutes les stations (tableau 4.9). La limite supérieure de cette gamme de taille est déterminée par la limite de validité du modèle et la limite inférieure correspond à de très petites bulles (0.01 mm), afin d'utiliser en entrée, une gamme de tailles assez étendue pour considérer toutes les combinaisons possibles.

Dans le cas d'une bulle de gaz libre dans l'eau, les oscillations provoquées par la résonance sont, d'une manière simplifiée, contraintes par la température et la viscosité de l'eau. Dans le cas d'une bulle de gaz incluse dans un organisme comme un poisson, les oscillations sont contraintes par la température et la viscosité de la chair du poisson (Love, 1978). Si les bulles sont très petites, elles seront très influencées par la température, alors que des bulles plus grosses, seront plus influencées par la viscosité (Love, 2013). Le terme modélisant l'effet de l'amortissement thermique β_{th} a été calculé pour une température constante de 15 ° C. Une étude de sensibilité du terme d'amortissement dû à la viscosité a été réalisée afin de déterminer sa ou ses valeur(s) optimale(s). La réponse acoustique d'une bulle de gaz de 0.27 mm (ESR), d'aplatissement 5 située à 80 m de profondeur a été estimée avec le modèle de Ye pour des amortissements visqueux (β_{vis}) de 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 et 1 (figure 4.34). L'effet de la valeur de l'aplatissement a également été étudié en modélisant, avec le modèle de Ye, la réponse acoustique d'une bulle de gaz de 0.27 mm (ESR) située à 80 m de profondeur avec un amortissement visqueux nul pour des valeurs d'aplatissement (e) allant de 1 à 10 par pas de 1 (figure 4.34b). Les résultats montrent que (i) la fréquence de résonance augmente et que l'amplitude du pic de résonance diminue lorsque la valeur de l'aplatissement augmente et que, (ii) l'intensité de la résonance diminue mais la fréquence de résonance reste constante lorsque l'amortissement visqueux augmente. La valeur attribuée à ces deux paramètres influence donc l'estimation du pic de résonance. Pour chaque station, une analyse de sensibilité a été menée pour déterminer les valeurs de e et β_{vis} qui induisent le meilleur ajustement. L'approche inverse a été menée sur les profils des trois stations pour toutes les combinaisons d'aplatissement/amortissement visqueux précédemment étudiées. Pour chaque test, la valeur du r^2 , indicateur de la qualité de l'ajustement, a été calculée à partir de l'erreur totale. Les combinaisons de paramètres correspondant au r^2 minimum ont été sélectionnées et sont présentées dans le tableau 4.9.



(a) Estimations pour différentes intensités de l'amortissement visqueux (aplatissement = 5)



(b) Estimations pour différents facteurs d'aplatissement (amortissement visqueux nul)

FIGURE 4.34 – Estimation de la réponse acoustique d'une bulle de gaz de 0.27 mm ESR située à 80 m de profondeur par le modèle de Ye.

TABLE 4.9 – Paramétrisation initiale du modèle de Ye pour les stations R0296, R0297 et R0300

	R0296	R0297	R0300
Profondeur	30 m	95 m	80 m
Gamme de tailles (ESR)	[0.01 - 0.8 mm]	[0.01 - 0.8 mm]	[0.01 - 0.8 mm]
Aplatissement	6	9	8
Amortissement visqueux	0	0	0
Erreur	8.9×10^{-9}	1.2×10^{-8}	1.3×10^{-9}

Pour chaque tranche de profondeur, l'algorithme d'inversion estime une combinaison de tailles et de densités de bulles de gaz. Une valeur de réponse individuelle (TS) est estimée pour chaque taille i et chaque fréquence f . En multipliant l'équivalent du TS en échelle arithmétique

(σ_{bs}) pour la fréquence f par l'abondance (Ab) estimée pour la taille i , on obtient une valeur de S_v pour la taille i à la fréquence f :

$$S_v(i, f) = Ab(i) \times \sigma_{bs}(f) \quad (4.21)$$

A partir de l'estimation du $S_v(i, f)$, la contribution de chaque classe de taille à la réponse acoustique globale est calculée. Elle est exprimée en pourcentage (P) de la contribution à la réponse totale de la fréquence f par :

$$P(i, f) = \frac{S_v(i, f) \times 100}{\sum_{i=1}^n S_v(i, f)} \quad (4.22)$$

où n est le nombre de classes de tailles.

Pour chaque fréquence, les tailles des bulles et les densités correspondantes sont classées dans l'ordre croissant de leur pourcentage de contribution à la fréquence f .

Combinaison des résultats des approches directe et inverse. Les tailles et les densités des bulles virtuelles sont sélectionnées parmi celles qui les plus contributives aux basses fréquences (< 70 kHz), où l'on observe les plus grandes différences entre les réponses fréquentielles prédite (courbe noire pleine, figure 4.35) et *in-situ* (courbe rouge pleine, figure 4.35).

Dans un premier temps, seule la taille de bulle qui contribue le plus à la fréquence où l'on observe la plus grande différence entre les courbes est sélectionnée. Sa réponse fréquentielle est ajoutée à la réponse fréquentielle estimée des FL (cas bleu, figure 4.35).

Si des différences subsistent entre les réponses fréquentielles prédites et *in-situ*, le processus est répété. La nouvelle fréquence où l'on observe la plus grande différence peut être la même que dans la première étape ou une fréquence différente.

Dans le cas où la fréquence est différente, la taille de bulle la plus contributive à la nouvelle fréquence est sélectionnée (cas vert, figure 4.35). Dans le cas où la fréquence est la même, la taille de bulle qui est la deuxième plus contributive à la réponse acoustique de la fréquence est sélectionnée (cas rouge pointillé, 4.35). La réponse fréquentielle de la seconde taille de bulle sélectionnée est ajoutée à la réponse fréquentielle prédite issue de la première étape.

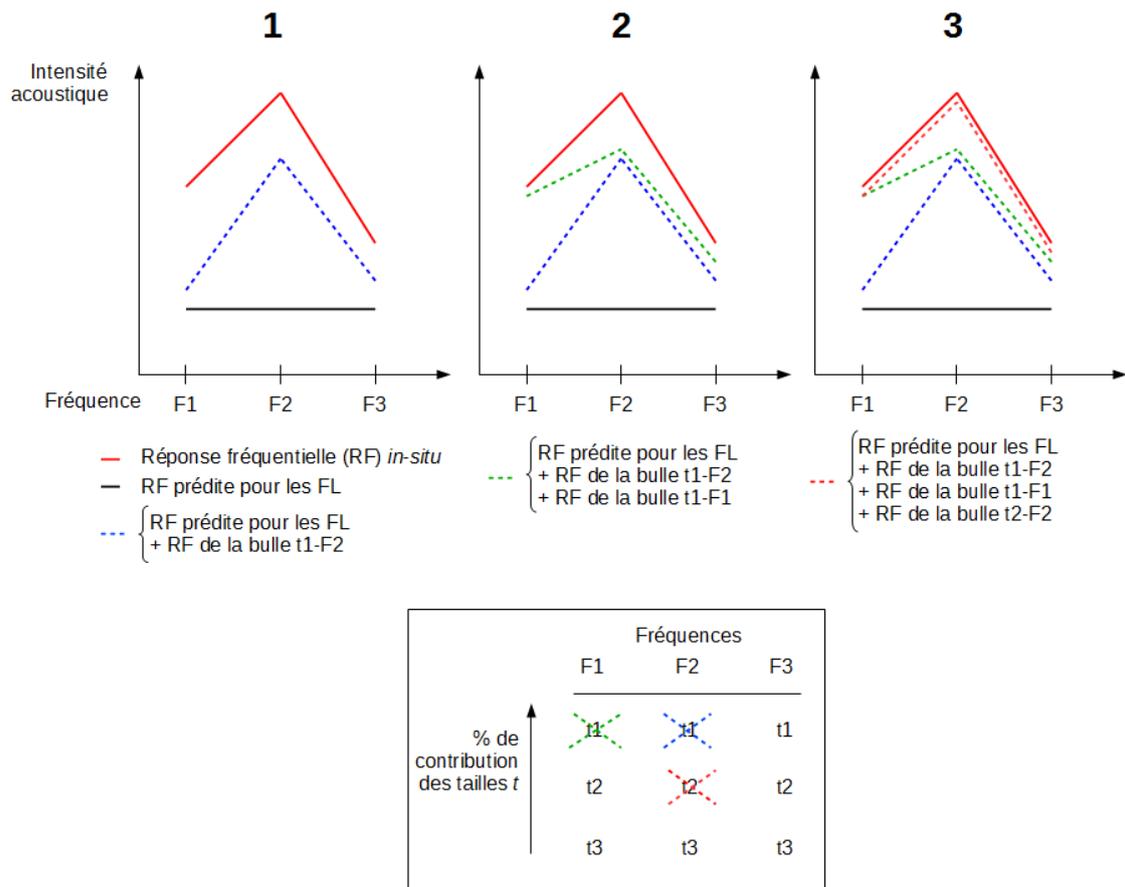


FIGURE 4.35 – Schéma conceptuel de l'approche pour quantifier la structure en taille des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse expliquant les différences entre les réponses fréquentielles prédite des *Fluid-Like* (FL) et mesurée *in-situ*. **(1)** La plus grande différence entre les réponses fréquentielles prédite (courbe noire pleine) et mesurée *in-situ* (courbe rouge pleine) s'observe à la fréquence F2. La taille t1 la plus contributive de la fréquence F2 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielle est ajoutée à celle de la réponse fréquentielle prédite des FL formant la courbe bleue pointillée. **(2)** La plus grande différence entre la réponse fréquentielle *in-situ* et la nouvelle réponse fréquentielle prédite (courbe bleue) est observée à la fréquence F1. La taille t1 la plus contributive de la fréquence F1 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielles est ajoutée à la nouvelle réponse fréquentielle prédite formant la courbe verte pointillée. **(3)** La plus grande différence entre la réponse fréquentielle *in-situ* et la nouvelle réponse fréquentielle prédite (courbe verte) est observée à la fréquence F2. La taille t2 la seconde plus contributive à la fréquence F2 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielle est ajoutée à la nouvelle réponse fréquentielle prédite formant la courbe rouge pointillée.

Le processus est répété jusqu'à ce que la nouvelle courbe théorique (réponse fréquentielle des bulles virtuelles ajoutée à celle des organismes FL) approche au mieux la réponse fréquentielle *in-situ* aux basses fréquences. Les combinaisons de taille/densité utilisées pour combler la différence entre les réponses fréquentielles *in-situ* et estimée à partir des FL, ont ainsi été considérées comme un indicateur de la structure en tailles des inclusions gazeuses de l'ichtyoplancton et du micronecton présents dans le volume échantillonné à la profondeur ciblée par le MIK. Les densités par taille ont enfin été additionnées pour obtenir une estimation de la densité totale des inclusions gazeuses dans le volume considéré.

4.5.2 Résultats

Données acoustiques

Les réponses fréquentielles moyennes mesurées dans la fenêtre spatio-temporelle de l'échantillonnage du filet MIK sont présentées dans la figure 4.36. Les réponses fréquentielles mesurées aux stations R0296 et R0300 présentent un pic qui a été attribué à un phénomène de résonance. La courbe théorique du pic dans le cas d'un phénomène de résonance (Ye, 1997), présente cependant classiquement une différence de Sv entre la fréquence du pic et les fréquences environnantes de 20 à 30 dB. Les réponses fréquentielles mesurées ne présentent pas de telles variations mais peuvent être interprétées comme le résultat de l'échantillonnage discret d'un pic de résonance continu, où les fréquences de résonance des pics seraient différentes mais proches des fréquences d'échantillonnage. A la station R0296, la fréquence de résonance serait proche de 38 kHz. A la station R0300, elle se situerait entre 38 et 70 kHz. La réponse fréquentielle de la station R0297 montre une dominance des basses fréquences avec un pic bien moins marqué que pour les autres stations. Cela est dû au fait que les hautes fréquences sont fortes. La partie de la courbe aux basses fréquences peut également être interprétée comme la partie d'un pic de résonance qui aurait lieu entre 18 et 38 kHz. La partie de la courbe aux hautes fréquences serait un indicateur d'une forte densité d'organismes FL (Stanton & Chu, 2000). Les hypothèses émises à partir de ces courbes ont été validées par comparaison avec des données biologiques.

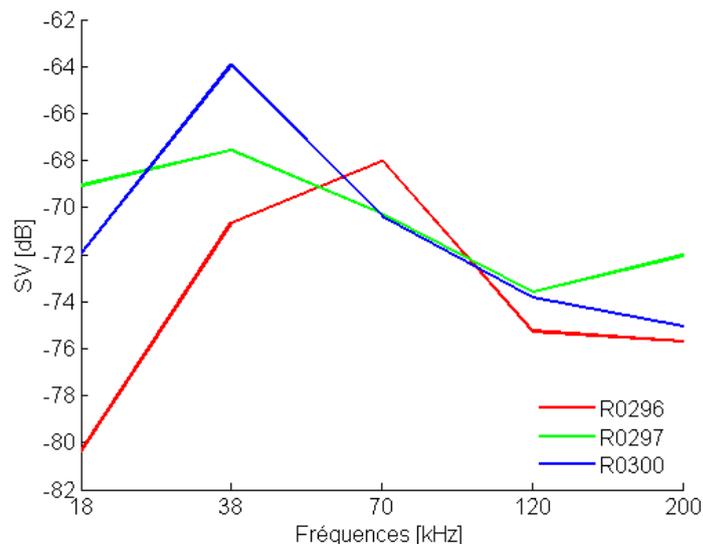


FIGURE 4.36 – Réponses fréquentielles médianes calculées dans les fenêtres spatio-temporelles de l'échantillonnage du *Midwater Ringnet trawl* (MIK) aux stations R0296, R0297 et R0300.

Analyse des échantillons collectés par le filet MIK

L'échantillonnage au filet MIK a pour objectif de collecter les organismes macro-zooplanctoniques et micro-nectoniques présents dans les tranches de profondeur occupées par les couches diffusantes les plus denses sur les échogrammes de chaque station. Le sondeur Marport est fixé au filet pour renseigner sur sa profondeur en temps réel. Cependant, la transmission peut être erratique, ce qui n'a parfois pas permis d'échantillonner réellement le centre des couches diffusantes les plus denses. Ne sont présentés ici que les résultats issus de 3 stations sur 8, pour lesquelles la couche diffusante la plus dense a correctement été échantillonnée par le MIK (R0296, R0297 et R0300).

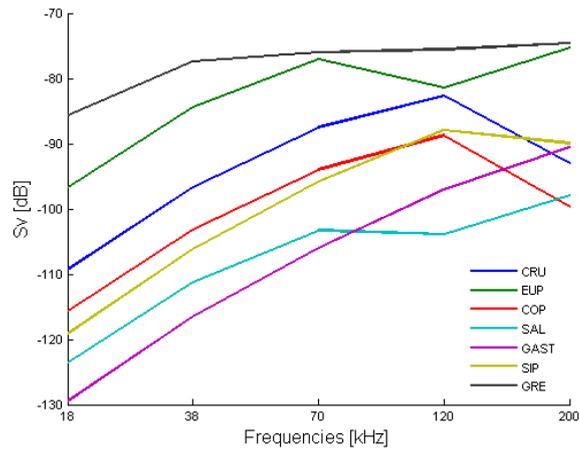
La taille moyenne et les abondances mesurées par type d'organismes présents dans les échantillons du MIK sont répertoriées dans le tableau 4.10. Aux trois stations, les organismes FL représentent 46 à 85 % de l'abondance totale de l'échantillon de la station (pourcentage qui combine les euphausiacés, les copépodes, les larves de crustacés et les siphonophores calyco-phores). Des larves de poissons (*Sardina pilchardus* et/ou *Arnoglossus* sp.) sont présentes dans les échantillons de toutes les stations et représentent 3 à 9 % des abondances totales.

TABLE 4.10 – Résultats de l'identification des échantillons du MIK pour les stations R0296, R0297 et R0300. La partie méso-zooplanctonique a été identifiée par le Zoocam et la fraction macro-zooplanctonique et micro-nectonique a été identifiée manuellement.

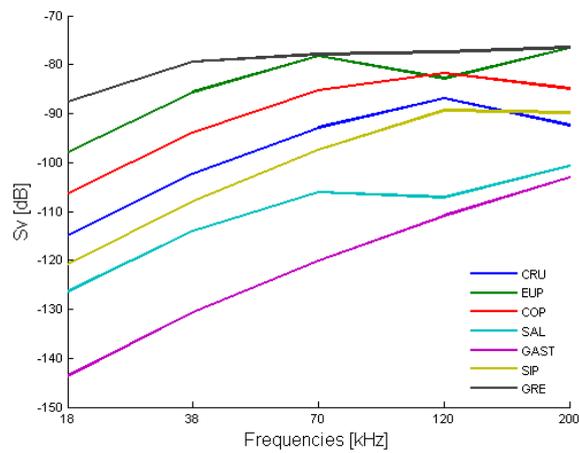
Organismes	Stations		
(Longueur moyenne mesurée [mm])	R0296	R0297	R0300
(Abondance [#ind./m ³])			
Profondeur ciblée par le MIK [m]	30	95	80
Larves de crustacés	2.44 <i>0.0921</i>	2.19 <i>0.0479</i>	2.56 <i>0.0045</i>
Petits euphausiacés	3.25 <i>0.1637</i>	3.26 <i>0.1220</i>	2.99 <i>0.0135</i>
Copépodes	2.45 <i>0.1705</i>	2.85 <i>0.6100</i>	2.47 <i>0.0606</i>
Salpidés	3.07 <i>0.0614</i>	3.11 <i>0.0305</i>	3.17 <i>0.0146</i>
Gastéropodes	0.9 <i>0.0375</i>	0.7 <i>0.0065</i>	0.68 <i>0.0086</i>
Siphonophore calycophore	2.45 <i>0.2625</i>	2.34 <i>0.2331</i>	2.37 <i>0.0445</i>
Grands euphausiacés	- <i>3.16</i>	4.5 <i>2.03</i>	5 <i>0.35</i>
Larves de poissons	- <i>0.72</i>	9 <i>0.01</i>	7.12 <i>0.1</i>

Mise en relation des données acoustiques et biologiques

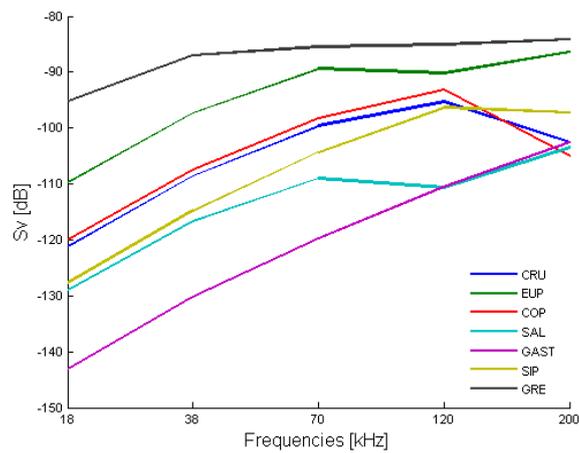
Estimation de la réponse fréquentielle des organismes FL par la résolution du problème direct. Les estimations des modèles de réflecteurs montrent la faible contribution des organismes FL à la réponse acoustique mesurée aux basses fréquences. En revanche, ces organismes contribuent à la réponse acoustique mesurée aux hautes fréquences (figure 4.37). Les euphausiacés, dominants en abondance dans les échantillons biologiques, sont également les réflecteurs les plus forts, du fait de leur réponse fréquentielle globalement croissante, sans pic de résonance. A la station R0296, la forte abondance d'euphausiacés collectée par le MIK (tableau 4.10) induit une réponse particulièrement forte aux hautes fréquences. Cette observation est en accord avec l'augmentation de la valeur du Sv moyen entre les fréquences 120 et 200 kHz, visible sur le spectre en fréquence mesuré (figure 4.36).



(a) Station R0296



(b) Station R0297



(c) Station R0300

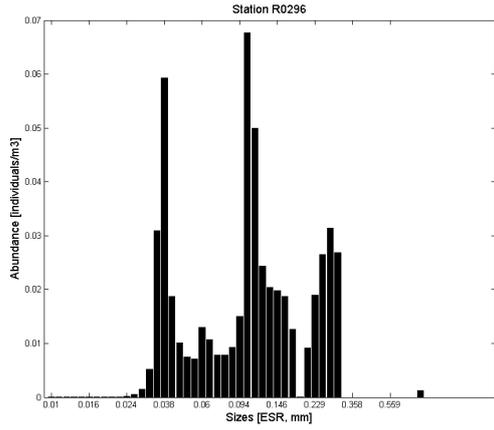
FIGURE 4.37 – Estimation de la réponse fréquentielle de chaque groupe de réflecteur présent dans les échantillons collectés par le MIK. Les mesures d’abondance et de taille moyennes sont utilisées comme paramètres d’entrée dans les modèles de réflecteurs. *CRU* : larves de crustacés. *EUP* : petits euphausiacés. *COP* : copépodes. *SAL* : salpidés. *GAST* : gastéropodes. *SIP* : siphonophores calycophores. *GRE* : grands euphausiacés.

Inversion des données acoustiques avec un modèle de réflecteur porteur d'inclusion gazeuse. L'algorithme d'inversion estime une densité de bulles par taille. La réponse acoustique de certaines classes de tailles de bulle domine la réponse fréquentielle totale (figures 4.38, 4.39 et 4.40). Du fait de la forte non linéarité de la réponse acoustique de la bulle autour du pic de résonance, les tailles de bulles estimées comme les plus abondantes ne sont pas nécessairement les bulles dont la rétro-diffusion domine la réponse acoustique totale.

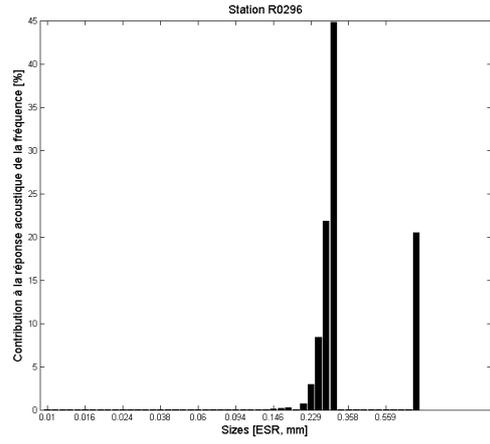
A la station R0296, la densité estimée est dominée par les classes de tailles de l'ordre de 0.038, 0.1 et 0.23 mm (figure 4.38). L'algorithme d'inversion estime que la classe de taille de l'ordre 0.33 mm est celle qui contribue le plus à la réponse acoustique mesurée à la fréquence 18 kHz. La classe de tailles autour de 0.27 mm est celles qui contribue le plus à la réponse acoustique mesurée à la fréquence 38 kHz. La classe de tailles autour de 0.1 mm est celle qui contribue le plus à la réponse acoustique mesurée à la fréquence 70 kHz. Les classes de tailles autour de 0.06, 0.33 et 0.1 mm contribuent le plus à la réponse acoustique de la fréquence 120 kHz, dans cet ordre. Les classes de tailles autour de 0.038 et 0.33 mm contribuent le plus à la réponse acoustique de la fréquence 200 kHz, dans cet ordre.

A la station R0297, la densité estimée par l'algorithme d'inversion est dominée par la densité des classes de tailles autour de 0.06 et 0.53 mm, dans cet ordre (figure 4.39). Pour la fréquence 18 kHz, la classe de tailles autour de 0.56 mm est la plus contributive. Pour la fréquence 38 kHz, les classes de tailles autour de 0.33 et 0.53 mm, dans cet ordre, sont les plus contributives. Pour la fréquence 70 kHz, les classes de tailles autour de 0.20 et 0.56 mm, dans cet ordre, sont les plus contributives. Pour la fréquence 120 kHz, la classe de tailles autour de 0.56 mm est la plus contributive. Pour la fréquence 200 kHz, la classe de tailles autour de 0.08 mm est la plus contributive.

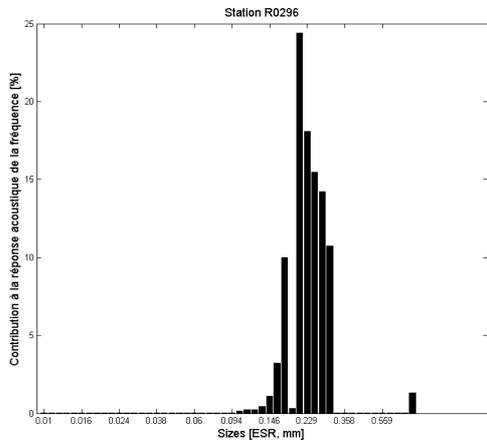
A la station R0300, la densité estimée par l'algorithme d'inversion est dominée par des classes de tailles comprises entre 0.33 et 0.53 mm et autour de 0.06, 0.150 et 0.094 mm. La réponse acoustique de la fréquence 18 kHz est dominée par des classes de tailles autour de 0.56 et 0.8 mm. La réponse acoustique de la fréquence 38 kHz est dominée par une classe de tailles autour de 0.3 mm. La fréquence 70 kHz est dominée par une classe de tailles autour de 0.150 mm. La réponse acoustique de la fréquence 120 kHz est dominée par une classe de tailles autour de 0.094 mm et une classe de tailles plus large s'étendant de 0.33 à 0.53 mm, avec une dominance des tailles autour de 0.53 mm. La réponse acoustique de la fréquence 200 kHz est dominée par une classe de taille autour de 0.06 mm et une classe de taille plus large qui s'étend de 0.33 à 0.53 mm avec une dominance des tailles autour de 0.53 mm.



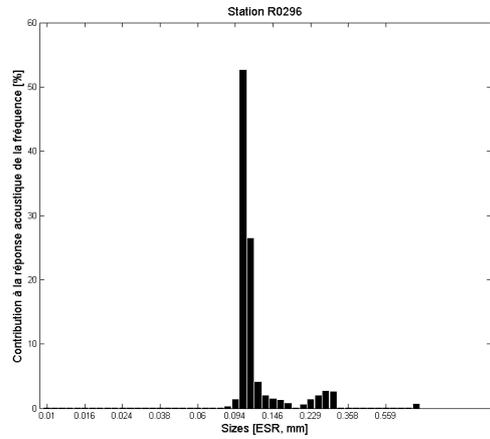
(a) Densité par classe de tailles



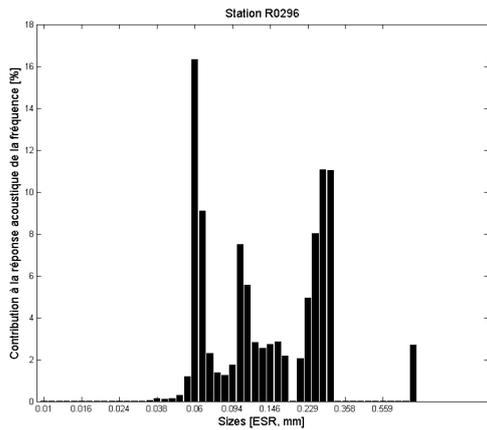
(b) Contributions à 18 kHz



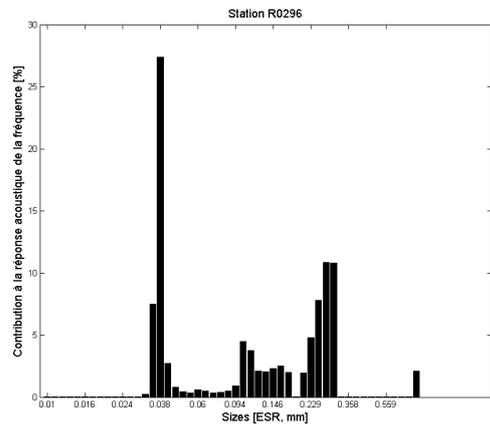
(c) Contributions à 38 kHz



(d) Contributions à 70 kHz

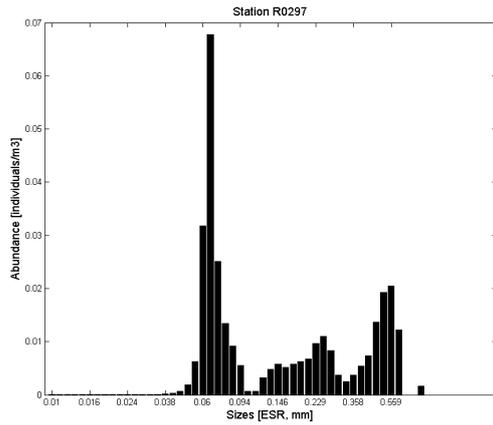


(e) Contributions à 120 kHz

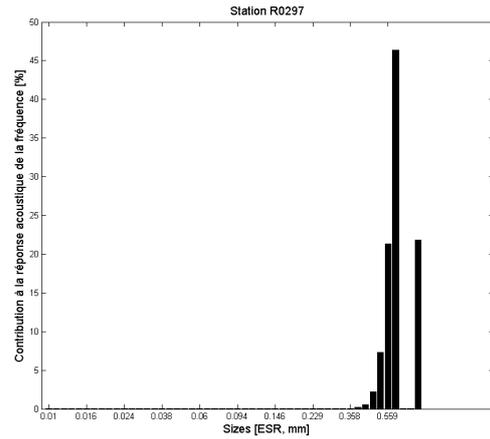


(f) Contributions à 200 kHz

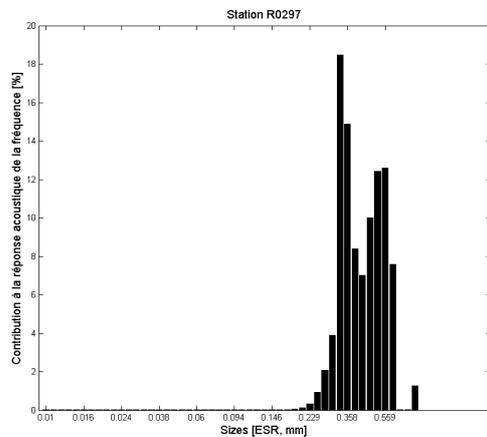
FIGURE 4.38 – Résultat de l’algorithme d’inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l’EK60 collectés à la station R0296 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l’énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.



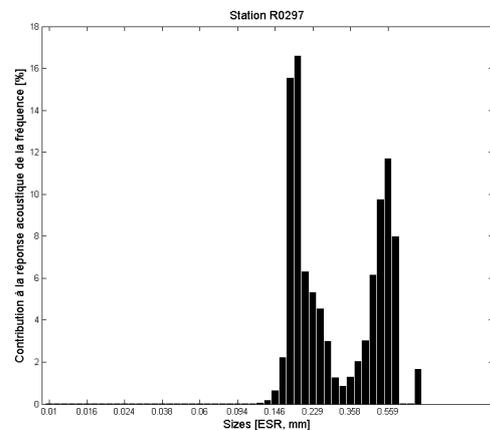
(a) Densité par classe de tailles



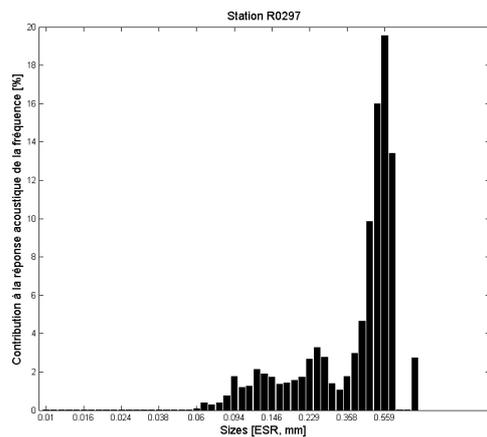
(b) Contributions à 18 kHz



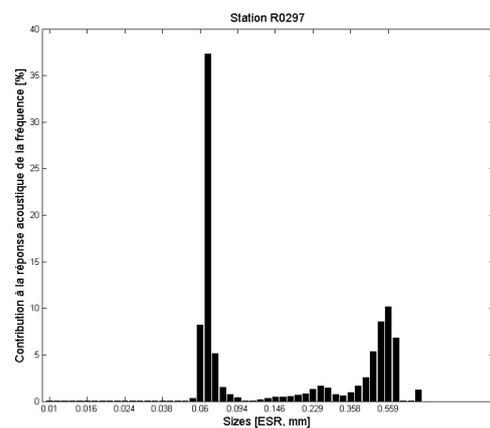
(c) Contributions à 38 kHz



(d) Contributions à 70 kHz

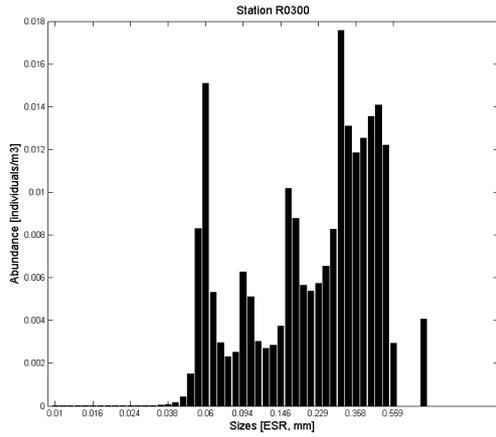


(e) Contributions à 120 kHz

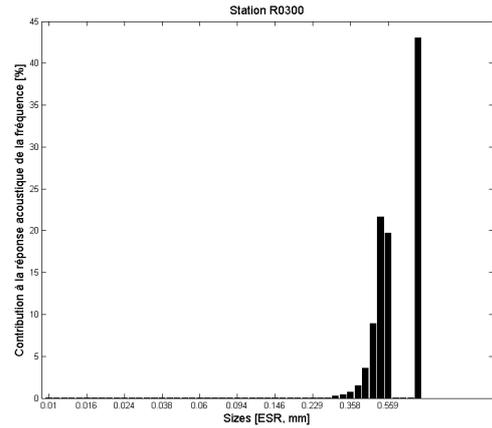


(f) Contributions à 200 kHz

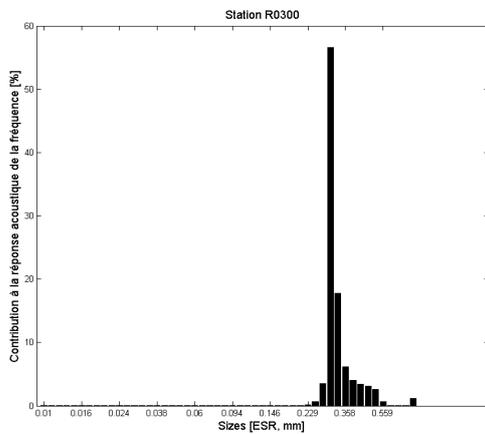
FIGURE 4.39 – Résultat de l’algorithme d’inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l’EK60 collectés à la station R0297 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l’énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.



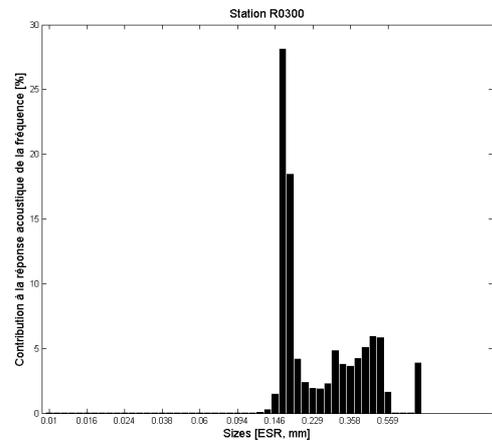
(a) Densité par classe de tailles



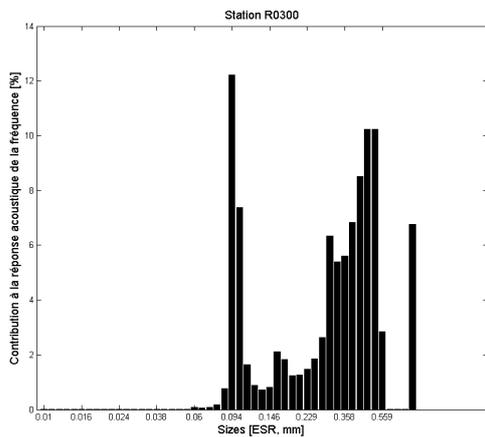
(b) Contributions à 18 kHz



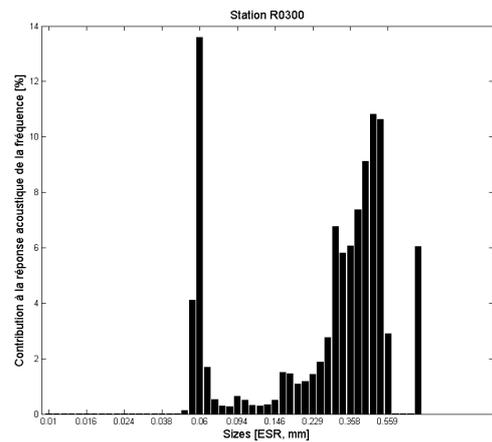
(c) Contributions à 38 kHz



(d) Contributions à 70 kHz



(e) Contributions à 120 kHz



(f) Contributions à 200 kHz

FIGURE 4.40 – Résultat de l’algorithme d’inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l’EK60 collectés à la station R0300 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l’énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.

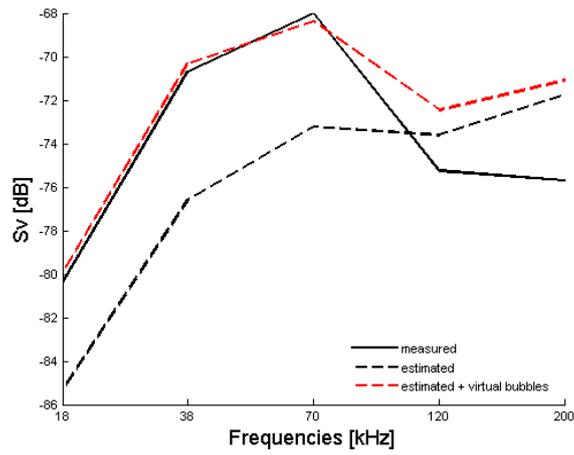
Combinaison des résultats des approches directe et inverse. Lorsque la réponse fréquentielle des organismes FL estimée par l'approche directe est comparée à la réponse mesurée, de grandes différences sont observées aux basses fréquences aux trois stations (figure 4.41). Pour expliquer ces différences, l'approche inverse avec le modèle de Ye, indique qu'il est nécessaire d'ajouter une densité totale de 0.2, 0.07 et de 0.09 bulles/m³ à la réponse acoustique théorique des stations R0296, R0297 et R0300 respectivement. La structure en tailles composant ces densités totales s'étend de 0.1 à 0.3 mm ESR (i.e. 0.7 à 2 mm de diamètre réel) pour la station R0296, de 0.2 à 0.8 mm ESR (i.e. 1.6 à 7 mm de diamètre réel) pour la station R0297 et de 0.2 à 0.8 mm ESR (i.e. 1.4 à 7 mm de diamètre réel) pour la station R0300. Le détail des combinaisons optimales est donné par le tableau 4.11.

A la station R0296, aux basses fréquences (18 à 70 kHz), la réponse fréquentielle prédite pour les organismes FL est sous-estimée par rapport à la réponse fréquentielle mesurée *in-situ* (figure 4.41a). Aux hautes fréquences, l'approche directe menée sur les organismes FL sur-estime la réponse acoustique. L'ajout de la réponse acoustique des bulles virtuelles permet d'expliquer les sous-estimations aux basses fréquences, mais sur-estime la réponse acoustique aux hautes fréquences.

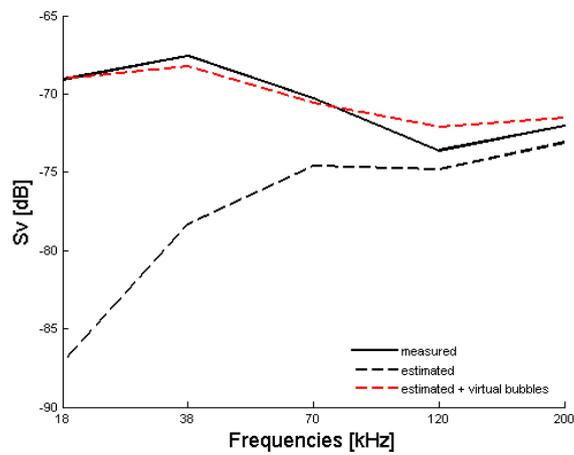
A la station R0297, la réponse fréquentielle prédite sur les organismes FL sous-estime la réponse fréquentielle *in-situ* à toutes les fréquences. L'ajout de la réponse acoustique de bulles virtuelles explique bien la sous-estimation aux basses fréquences (≤ 70 kHz) mais sur-estime légèrement la réponse acoustique aux hautes fréquences.

A la station R0300, la réponse fréquentielle prédite sur les organismes FL sous-estime largement la réponse fréquentielle *in-situ* à toutes les fréquences. L'ajout de la réponse acoustique de bulles virtuelles explique la sous-estimation à toutes les fréquences.

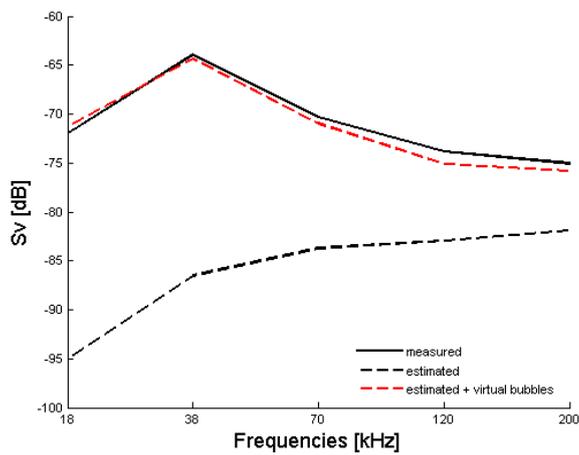
A la station R0300, la densité de bulles de gaz estimée par l'inversion (0.09 ind./m³) est très proche de la densité de larves de poissons échantillonnée par le filet MIK (0.1 ind./m³). A la station R0297, la densité de bulles estimée par l'inversion est 7 fois plus importante que la densité des larves de poissons (*Sardina pilchardus*) dans l'échantillon biologique (0.07 *vs.* 0.01 ind./m³). Dans le cas de la station R0296, la différence entre les densités est très grande (0.72 ind./m³ mesurés dans l'échantillon *vs.* 0.2 ind./m³ estimés par l'inversion).



(a) Station R0296



(b) Station R02967



(c) Station R0300

FIGURE 4.41 – Comparaison entre la réponse fréquentielle mesurée (courbes noires), la réponse fréquentielle des organismes FL estimée par l’approche directe (courbes noires pointillées) et la réponse fréquentielle combinée des bulles de gaz virtuelles et des organismes FL (courbes rouges pointillées) pour les stations R0296 (a), R0297 (b) et R0300 (c).

TABLE 4.11 – Combinaisons des tailles et des densités des bulles de gaz dont la réponse acoustique doit être ajoutée à celle des organismes FL pour expliquer la réponse acoustique mesurée.

Station	ESR [mm]	Diamètre réel [mm]	Densité [ind./m ³]	Somme des densités [ind./m ³]
R0296	0.102	0.67	0.07	
	0.209	1.38	0.009	
	0.229	1.51	0.02	
	0.250	1.65	0.03	
	0.274	1.81	0.03	
	0.299	1.97	0.03	
				0.2
R0297	0.191	1.65	0.006	
	0.327	2.83	0.003	
	0.358	3.10	0.004	
	0.468	4.05	0.01	
	0.512	4.43	0.02	
	0.559	4.84	0.02	
	0.612	5.30	0.01	
	0.800	6.92	0.004	
				0.07
R0300	0.160	1.38	0.01	
	0.175	1.51	0.009	
	0.299	2.59	0.02	
	0.327	2.83	0.01	
	0.358	3.10	0.01	
	0.468	4.05	0.01	
	0.512	4.43	0.01	
	0.800	6.92	0.004	
				0.09

4.5.3 Discussion

A la station R0300, la densité de bulles de gaz estimée par l'inversion (0.09 ind.m³) est très proche de la densité de larves de poissons échantillonnée par le filet MIK (0.1 ind./m³). On peut considérer que dans ce cas, le MIK a correctement échantillonné les réflecteurs FL et GB, responsables de la réponse fréquentielle mesurée. A la station R0297, la densité de bulles estimée par l'inversion est 7 fois plus importante que la densité des larves de poissons (*Sardina pilchardus*) dans l'échantillon biologique (0.07 *vs.* 0.01 ind./m³). A cette station, la profondeur échantillonnée par le MIK est de 95 m. La faible densité de larves à cette profondeur et leur capacité à éviter le filet peuvent expliquer la sous-estimation de la densité des larves de poissons par le MIK à la station R0297. L'absence de capture de quelques larves qui auraient évité le filet peut en effet entraîner de fortes variations de l'estimation de la densité totale faible.

Dans le cas de la station R0296, la différence entre les densités de GB estimées par inversion et par le MIK est très grande (0.72 ind./m³ mesuré dans l'échantillon *vs.* 0.2 bulle./m³ estimé par inversion). C'est également la station qui présente les densités de larves les plus importantes (10 fois celles observées dans les 2 autres stations). La profondeur d'échantillonnage de cette

station est de 30 m. Les larves de *S. pilchardus* sont couramment collectées entre la surface et 30 m de profondeur (0.05 larve/m³ en surface et 0.01 larve/m³ à 30 m, Martin Huret, *Comm. Pers.*). Le filet MIK a donc pu échantillonner une partie des larves dans la tranche visée, mais également en capturer d'autres lors du filage ou du virage entre 30 m et la surface. Ceci pourrait expliquer la forte différence positive entre les densités de larves collectées par le MIK et les densités de GB estimées par inversion. Du fait de la profondeur des transducteurs (6.4 m) et de la taille de leur zone aveugle (3 m), une éventuelle forte densité de larves de *S. pilchardus* entre 0 et 10 m de profondeur n'a pas pu être détectée par acoustique.

Des différences relativement faibles ont été observées entre les prédictions de l'approche directe basées sur les captures de FL et la réponse acoustique mesurée aux hautes fréquences. Cela indique que l'évitement du filet MIK par les organismes méso-zooplanctoniques est faible.

De grandes différences ont été observées entre les résultats de l'échantillonnage des organismes porteurs d'inclusion gazeuse par le filet MIK et les estimations de GB issus de l'inversion. Même dans le cas où le filet MIK semble collecter des individus sur toute l'étendue des tailles de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse prédites par l'inversion (station R0300), la distribution en taille et les densités collectées par le MIK restent très différentes de celles de l'inversion.

La sous-estimation de la densité des petits organismes porteurs d'inclusion gazeuse est un biais d'échantillonnage bien connu, car ces animaux sont capables d'éviter les filets dont l'ouverture est restreinte. Par exemple, même s'ils ne sont pas capables de nager contre des courants forts, l'inclusion gazeuse (pneumatophore) des siphonophores leur permet de modifier leur position verticale rapidement (Pugh, 1975). Les larves de poissons font partie de l'ichtyoplancton et sont considérées comme des organismes incapables de nager contre des courants forts. Les larves échantillonnées par le MIK sont de petite taille et ne sont vraisemblablement pas encore capables d'éviter le filet. En revanche, l'inversion a estimé des tailles de bulles de GB plus importants, qui ne correspondaient à aucun organisme présent dans les échantillons biologiques. Ces résultats suggèrent la présence d'organismes plus grands avec une capacité de nage plus importante, qui auraient pu éviter le MIK.

L'évitement de ces filets par les organismes du micronecton est donc potentiellement important mais jusqu'alors quasi impossible à estimer. L'étude des différences entre estimations biologiques et acoustiques sur un plus grand nombre de cas, et avec d'autres filets, pourrait ouvrir la voie à une estimation de la capturabilité des organismes porteurs d'inclusion gazeuse par les filets mésopélagiques.

Les conclusions de l'expérience présentée ici ne sont pas définitives, car le fait que le MIK ne soit pas un filet ouvrant/fermant laisse planer un doute sur la validité de l'échantillonnage de couches diffusantes à des profondeurs spécifiques. L'échantillonnage efficace des couches diffusantes de micronecton nécessiterait un chalut méso-pélagique à maille assez fine ($\sim 300 \mu\text{m}$) et dont l'ouverture serait supérieure à 8 m², et/ou un filet ouvrant/fermant de grande envergure, comme le MOCNESS (Wiebe et al., 1985; Collins et al., 2008).

Le Zoocam a été embarqué pour être testé en mer pendant le leg 3 de la campagne PELGAS 2013. La paramétrisation des vignettes et les jeux d'apprentissage ne sont pas encore correctement définis, ce qui explique la forte erreur de classification du logiciel. Les résultats corrigés de la classification quantifient cependant la densité des différents types d'organismes.

Dans ce travail, nous proposons une version améliorée du modèle de Ye. Le modèle présente les avantages de : (i) prendre en compte la variabilité du potentiel effet de l'amortissement dû à la viscosité et à la température provenant de la chair de l'animal ; (ii) permettre la variation

de l'aplatissement de la bulle. Nous pensons que cette formulation est plus pertinente que celle des modèles où ces paramètres sont constants (Kloser et al., 2002).

L'analyse de sensibilité de l'estimation des résultats du modèle de Ye en fonction des paramètres d'aplatissement et d'amortissement visqueux, indique que l'aplatissement des vessies augmente avec la profondeur. Les larves échantillonnées aux stations R0296, R0300 et R0297 ont été respectivement collectées à 30, 80 et 95 m de profondeur et seraient porteuses d'inclusions gazeuses dont l'aplatissement est estimé à 6, 8 et 9. Ces résultats sont en accord avec le comportement théorique de la bulle de gaz, qui doit se comprimer lorsque la pression environnante augmente avec la profondeur. Un terme d'amortissement visqueux nul implique que les vessies gazeuses des larves de poissons réagissent comme des bulles de gaz libres dans l'eau. Cette observation est en accord avec les travaux de Love (1978). Les larves de poissons seraient incapables de nager contre des courants importants, du fait d'une faible musculature. La densité de leur chair pourrait ainsi être assez proche de celle de l'eau de mer du fait du faible développement de leurs muscles à ce stade de l'ontogenèse (Russell, 1976).

Les larves de poissons collectées par le MIK appartenait à l'espèce *Sardina pilchardus* et au groupe *Arnoglossus* sp., à la station R0296 et uniquement à l'espèce *S. pilchardus* aux deux autres stations. D'après Russell (1976), les stades larvaires des *Arnoglossus* ont des vessies gazeuses sphériques de diamètre 0.2 mm (correspondant à un ESR de 0.03 mm). Or, ces tailles de bulles de gaz n'ont pas été identifiées comme contribuant significativement à la réponse acoustique globale dans l'analyse inverse. En revanche, les tailles estimées par l'inversion s'étalant de 0.7 à 7 mm (diamètre réel) sont compatibles avec la taille des larves de sardines. Cependant, aucune référence sur la tailles des vessies de larves de cette espèce n'a été trouvé dans la littérature. Ce paramètre essentiel reste à l'état d'estimation dans l'attente d'une mesure expérimentale. La structure en tailles estimée comporte des valeurs qui peuvent aussi correspondre à des vessies de petits poissons comme les myctophidés. Cette observation reste à l'état d'hypothèse dans l'attente d'une collecte d'organismes plus efficace sur la communauté micro-nectonique.

Les hypothèses sur la densité, la présence et la taille d'inclusions gazeuses chez les larves de poissons échantillonnées devront être validées par des analyses radiographiques, qui permettraient d'estimer avec précision la dimension et la densité des différents organes des larves.

Pour être sûr que la réponse acoustique observée avec un pic d'intensité à une fréquence particulière ne soit pas due à un autre phénomène que la résonance de bulles de gaz, le problème inverse a été résolu en modélisant une agrégation dense d'organismes gélatineux. En effet, de fortes concentrations de méduses ou de salpidés peuvent induire une réponse acoustique oscillante aux basses fréquences qui pourraient ressembler à des pics de résonance atténués sur une gamme de fréquences réduite (Monger et al., 1998). Le modèle DWBA a été utilisée dans l'algorithme d'inversion avec des paramètres initiaux modélisant d'une part la couronne supérieure des organismes gélatineux de type méduse, et d'autre part la forme allongée et gélatineuse des organismes de type salpes. Les fortes valeurs des erreurs résiduelles et la faible densité de ces organismes dans les échantillons collectés par le MIK ont écarté cette hypothèse.

Les siphonophores physonectes (porteurs d'un pneumatophore) ont déjà été cités comme les réflecteurs pouvant potentiellement contribuer aux couches diffusantes résonantes dans le golfe de Gascogne (Lezama-Ochoa et al., 2011; Trenkel & Berger, 2013). Cette hypothèse n'a pas été validée par les données biologiques collectées dans le cadre de cette étude. Les siphonophores collectés dans le golfe de Gascogne au printemps 2012 et 2013 appartenaient en effet à l'espèce *Muggiaea atlantica*, qui appartient au groupe des siphonophores calycophores, qui sont dépourvus d'inclusion gazeuse. Les siphonophores physonectes (avec pneumatophore) n'ont pas

été recensés dans le golfe de Gascogne jusqu'alors, à notre connaissance. Le recensement le plus proche est celui effectué par Pugh (1975) sur un transect au milieu de l'océan Atlantique.

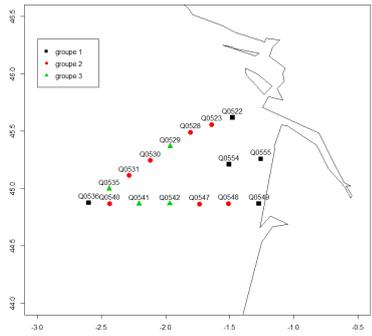
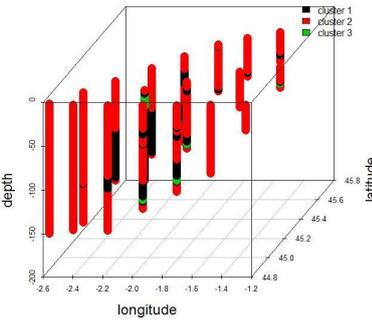
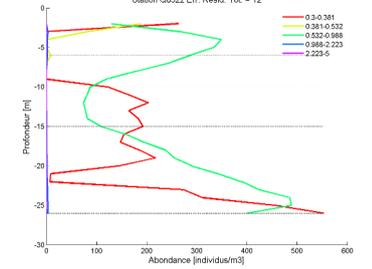
La principale conclusion écologique de cette étude est que des larves de sardine (ou d'autres organismes porteurs de bulles de gaz millimétriques) pourraient être présentes à faible densité, sur une gamme de profondeurs étendue.

Des larves de sardine ont été échantillonnées pendant une campagne PELGAS antérieure par les filets Multinet et Carré. Des densités de 0.05 ind./m³ et de 0.01 ind./m³ ont respectivement été mesurées à 0-10 m et 30 m de profondeur. Dans le cadre d'une étude dans le courant des Canaries, Moyano et al. (2014) ont échantillonné des larves de *S. pilchardus* jusqu'à 200 m de profondeur. Les larves de sardines étaient les larves les plus abondantes collectées pendant les campagnes ichtyoplanctoniques menées dans le golfe de Gascogne (Arbault & Boutin, 1968; Alvarez & Chifflet, 2012). On peut donc supposer que les larves de sardine ont pu contribuer à la réponse acoustique des couches résonantes observées à 80 et 95 m (stations R0297 et R0300). Ce résultat doit néanmoins être validé par la collecte d'organismes avec un filet ouvrant/fermant de large envergure.

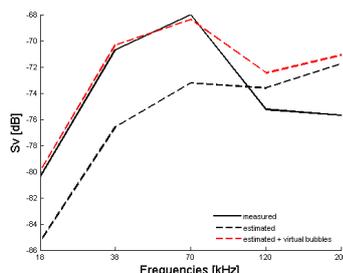
Si les couches diffusantes présentant une réponse fréquentielle clairement dominée par une fréquence sont effectivement provoquées par la présence de larves ou de petits poissons adultes porteurs de vessie natatoire, alors les données acoustiques collectées en continu sur les radiales peuvent nous apporter une information écologique nouvelle sur : la distribution des larves et des adultes de poissons du micronecton dans le golfe de Gascogne. L'analyse de la distribution de ces couches résonantes diffusantes renseignerait également sur l'étendue du masquage qu'elles exercent sur les couches diffusantes d'organismes FL du mésozooplancton.

4.6 Bilan

TABLE 4.12 – Synthèse des résultats et des limites pour chaque échelle d'observation de la composition spécifique des couches diffusantes dans la zone de la Gironde.

Analyse	Echelle	Résultats	Limites
<p>4.2. Classification des stations.</p> 	<p>Dans le réseau, chaque station est caractérisée par un profil médian vertical des intensités acoustiques aux fréquences d'échantillonnage.</p>	<p>Les formes des réponses fréquentielles dominantes sont caractéristiques de types de réflecteurs connus.</p>	<p>Pas de différenciation nette entre les stations. Besoin de classifier les couches diffusantes à une échelle inférieure à celle de la station pour résoudre leur forte structuration verticale.</p>
<p>4.3. Classification des tranches de profondeur.</p> 	<p>Dans le réseau de stations, chaque tranche de profondeur est caractérisée par sa réponse acoustique médiane par fréquence.</p>	<p>Analyse des données EK60 : réponse fréquentielle moyenne dominée par des réflecteurs gazeux. Analyse des données TAPS : réponse fréquentielle moyenne dominée par des réflecteurs FL.</p>	<p>L'interprétation des réponses fréquentielles moyennes ne sont que des hypothèses. Besoin de les valider avec des données biologiques.</p>
<p>4.4. Comparaison des estimations de l'inversion et des données hydro-biologiques.</p> 	<p>La station.</p>	<p>Relation grossière entre l'abondance de réflecteurs FL estimée par l'inversion sur les données du TAPS et la composition des filets du Multinet. Pas de relations entre les profils d'abondance de réflecteurs estimés par inversion et les paramètres hydrologiques.</p>	<p>Les organismes GB n'ont pas été échantillonnés avec les outils utilisés, qui ciblaient les particules de taille inférieure ou égale au millimètre. Les modèles de réflecteurs gazeux disponibles s'ajustent mal aux données EK60.</p>

4.5. Combinaison de la résolution des problèmes direct et inverse pour quantifier la structure en taille et la densité des réflecteurs composant les couches résonantes.



Fenêtre spatio-temporelle de l'échantillonnage biologique.

La combinaison des données acoustiques et biologiques par la résolution combinée des problèmes direct et inverse quantifie la taille et la densité des inclusions gazeuses pouvant produire la réponse fréquentielle mesurée. Les seuls organismes échantillonnés pouvant contenir des bulles de gaz et être à l'origine des couches diffusants sont les larves de sardine.

Le filet MIK n'est pas adapté pour échantillonner une tranche de profondeur particulière, ou des organismes GB plus grands et plus agiles que les larves de poissons. La présence et la taille des inclusions gazeuses dans les larves de sardines échantillonnées restent à déterminer.

Dans ce chapitre nous proposons une méthodologie visant à identifier la composition spécifique des couches résonantes. L'observation de couches diffusantes à plusieurs échelles montre que (i) les hypothèses émises sur les réponses fréquentielles mesurées sont les mêmes à toutes les échelles et que (ii) la pertinence de la comparaison entre les données acoustiques et biologiques est dépendante de l'échelle d'observation.

La méthodologie proposée s'articule en plusieurs étapes :

- Déterminer la diversité des couches et des réponses fréquentielles dominantes sur la zone d'étude par la classification des tranches de profondeur.
- Collecter les organismes présents aux profondeurs occupées par les couches résonantes sur les échogrammes au moyen d'un engin de pêche adapté.
- Identifier la composition des échantillons biologiques par types de réflecteurs.
- Estimer la réponse fréquentielle des organismes FL par la résolution de la méthode directe en utilisant les mesures d'abondances et de tailles.
- Estimer la combinaison de tailles et d'abondances de réflecteurs GB qui explique la différence entre la mesure acoustique et la réponse théorique des organismes FL collectés.

Cette étude est la première tentative de caractérisation de la nature et de la densité des organismes composant les couches diffusantes denses largement répandues dans le golfe de Gascogne au printemps. Elle est basée sur des techniques éprouvées de modélisation acoustique, combinées de façon originale afin de relier les données acoustiques et biologiques collectées *in-situ*. Nos résultats indiquent que les réflecteurs ayant produit les couches diffusantes denses observées lors du troisième leg de PELGAS 2013 sont vraisemblablement des organismes micronectoniques porteurs d'inclusion gazeuse, qui entreraient en résonance avec les signaux acoustiques des

basses fréquences des échosondeurs halieutiques. Les seuls organismes échantillonnés pouvant contenir des bulles de gaz et être à l'origine de ces couches diffusantes sont les larves de sardine. La composition des couches diffusantes denses est cependant potentiellement très diverse. Notre étude met en évidence les limites de l'échantillonnage acoustique et biologique des organismes micronectoniques composant les couches diffusantes. L'amélioration des connaissances sur ces couches diffusantes passera, à notre sens, par la combinaison de techniques acoustiques large et simple bande, avec des pêches d'identification à l'aide de chalutage mésopélagiques ouvrant/fermant de grande ouverture et de maille fine et des techniques de micro-radiographie permettant de caractériser précisément la morphologie des inclusions gazeuses des organismes échantillonnés.

Cette méthodologie a donné lieu à l'écriture d'un article soumis au *ICES Journal of Marine Science* :

*Remond B., Doray M., Lebourges-Dhaussy A., Berger L., Petitgas P. **Contribution of resonant backscatterers to phantom sound scattering layers off the mouth of the Gironde estuary (Bay of Biscay).***

Synthèse et perspectives

Cette thèse est née de la combinaison de l'intérêt récent de l'écologie halieutique pour les niveaux trophiques intermédiaires et de la quantité croissante de données acoustiques multifréquences contenant potentiellement des informations sur les niveaux trophiques intermédiaires, de la méso- à la fine échelle. Dans ce travail, les données acoustiques collectées pendant les campagnes écosystémiques PELGAS ont été utilisées pour étudier les couches diffusantes, et déterminer quelles informations elles pouvaient fournir sur les compartiments intermédiaires de l'écosystème pélagique du golfe de Gascogne (le zooplancton et le micronecton). L'étude visait à répondre à la question suivante :

Quelles sont les caractéristiques acoustiques et la composition taxonomique des couches diffusantes observées sur les échogrammes dans le golfe de Gascogne ?

En relation directe avec les observations *in-situ*, les premiers objectifs étaient de valider l'existence de différents types de couches diffusantes, d'en décrire les caractéristiques acoustiques et d'en étudier la distribution spatiale. Pour ce faire, une méthode de classification non supervisée des échos ACM-KM a été développée. La comparaison de cette approche avec d'autres méthodes a mis en évidence que les interprétations des échos sont encore très subjectives et qu'il est nécessaire de collecter des vérités-terrain avant de quantifier les assemblages détectés et de les relier à des groupes d'organismes. L'application de la méthode non supervisée ACM-KM sur les données multifréquences collectées pendant la campagne PELGAS 2013, a mené à la définition de groupes de couches diffusantes aux réponses fréquentielles distinctes formant des patrons spatiaux structurés dans le golfe de Gascogne. L'analyse conjointe de ces groupes de cibles acoustiques aux caractéristiques similaires a permis de définir des paysages acoustiques structurés dans les domaines spatiaux et fréquentiels à l'échelle du golfe de Gascogne.

L'application de la méthode de classification des échos ACM-KM sur l'ensemble des données acoustiques collectées pendant la campagne PELGAS 2013 suggère que des réflecteurs porteurs d'inclusions gazeuses dominaient la réponse acoustique dans le golfe de Gascogne au printemps 2013. Cette classification uniquement basée sur les données acoustiques ne permet cependant pas de déterminer avec certitude la nature des organismes insonifiés. A l'issue de cette étude, une question majeure restait donc en suspens :

Quelle est la composition taxonomique des couches diffusantes du golfe de Gascogne ?

Pour y répondre, une première comparaison a été effectuée à méso-échelle entre les distributions spatiales des compartiments de l'écosystème pélagique du golfe de Gascogne au printemps 2013 et la distribution spatiale des grands types de couches diffusantes. Une seconde comparaison a été effectuée à l'échelle plus réduite d'une radiale acoustique entre les structures hydro-biologiques et la distribution spatiale verticale des grands types de couches diffusantes. Aucune corrélation linéaire significative n'a été mise en évidence entre la distribution des couches diffusantes et les indicateurs des compartiments hydro-biologiques échantillonnés pendant les campagnes écosystémiques PELGAS. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette absence de corrélation : (i) les distributions spatiales sont corrélées par des relations non linéaires ; (ii) les assemblages obtenus regroupent des organismes aux préférences environnementales variées ; (iii) les organismes présents dans les couches diffusantes et qui dominent la réponse acoustique observée ne sont pas échantillonnés en routine par les campagnes PELGAS. Cette étude nous a

permis de réduire les hypothèses quand à la nature des organismes composant les couches diffusantes. Les structures hydrologiques, le phytoplancton, le mésozooplancton et les petits poissons pélagiques ayant été échantillonnés de façon quasi-exhaustive dans cette étude, les réflecteurs principaux des couches diffusantes devaient appartenir à des compartiments intermédiaires entre le mésozooplancton et les petits poissons pélagiques. A l'issue de cette étude, il nous est apparu évident qu'il était nécessaire de mettre en œuvre des instruments de mesure différents et à plus fine échelle. La suite de l'étude s'est concentrée sur les questions suivantes :

Quels sont les organismes présents dans les tranches de profondeur occupées par les couches diffusantes les plus denses sur les échogrammes ?

Quelle est la contribution de chaque type d'organisme et de classe de taille à la réponse acoustique mesurée ?

Pour étudier la composition spécifique des couches diffusantes avec plus de précision, l'échelle d'observation a été réduite à quelques stations d'échantillonnage. D'après la littérature, il est commun de considérer les couches diffusantes comme des agrégations de plancton (Baamstedt et al., 2003; Ballon et al., 2011; Barans et al., 1997; Korneliussen & Ona, 2002; Colombo et al., 2003). Or, dans la zone d'étude sélectionnée, les couches diffusantes montraient une forte réponse acoustique mais l'abondance en organismes mésozooplanctoniques était faible. Les couches diffusantes résonantes ont été échantillonnées finement au moyen de capteurs et filets permettant d'échantillonner tout le spectre de tailles des particules de 0.2 μm à 20 cm. L'analyse conjointe des données acoustiques multifréquences et de validation terrain a été effectuée en combinant de façon originale deux approches classiques de modélisation acoustique : les méthodes directe et inverse. Les résultats ont mis en évidence la structure en tailles la plus probable des inclusions gazeuses induisant la réponse acoustique mesurée. L'hypothèse majeure qui résulte de cette analyse est que les organismes produisant les couches diffusantes denses observées au printemps 2013 en face de l'embouchure de la Gironde, seraient principalement des larves de poissons porteuses d'inclusion gazeuse (GB) résonant aux fréquences halieutiques, mais également des réflecteurs GB plus gros, qui n'ont pas été échantillonnés. L'estimation de la densité et de la taille des réflecteurs avec inclusion gazeuse détectés par acoustique suggère ainsi des biais dans l'échantillonnage de l'ichtyoplancton et du micronecton avec les outils utilisés.

Les perspectives

"Pour chaque fin il y a un nouveau départ."

- Antoine de Saint-Exupéry -

Collecte et analyse des données

Ce travail a mis en évidence les limites de l'échantillonnage des couches diffusantes par acoustique au moyen d'écho-sondeurs halieutiques de coque. L'augmentation du volume insonifié par le faisceau acoustique avec la profondeur doit avoir une influence importante sur la caractérisation acoustique des couches diffusantes, surtout en présence de petites cibles résonantes, dont l'inclusion ou non dans le volume insonifié peut avoir des conséquences importants sur la réponse fréquentielle. D'après les résultats de cette thèse, les cibles résonantes peuvent être distribuées dans toute la colonne d'eau. La probabilité d'inclure l'une de ces cibles dans le volume échantillonné à une profondeur donnée, et donc d'obtenir une réponse fréquentielle incluant

l'influence d'un pic de résonance, augmenterait donc avec la profondeur, et ce, quelque soit la taille de l'ESDU. Ceci pourrait en partie expliquer la prédominance des réponses acoustiques du type résonant dans les paysages acoustiques identifiés dans le golfe de Gascogne au printemps 2013.

Les données acoustiques ont, de plus, été collectées à 5 fréquences discrètes. Cette caractéristique du jeu de données acoustiques limite l'étude des réflecteurs avec inclusion gazeuse qui résonnent dans la gamme des fréquences d'échantillonnage, car la résolution de l'étroit pic de résonance est alors trop grossière. L'estimation de la taille et de la densité des bulles de gaz induisant le phénomène de résonance observé, est essentiellement basé sur la fréquence à laquelle a lieu la résonance. Or, avec seulement 5 fréquences, la probabilité que la fréquence de résonance soit comprise dans les fréquences d'échantillonnage est faible. Récemment, les avancées technologiques ont permis le développement d'écho-sondeurs de type "large bande". Ces écho-sondeurs se distinguent des écho-sondeurs traditionnels par leur capacité à insonifier la colonne d'eau selon une gamme de fréquences continue (exemple du sondeur large bande basses fréquences développé par Stanton et al. (2012) qui insonifie à des fréquences comprises entre 1 et 6 kHz). L'échantillonnage acoustique des couches diffusantes résonantes par un sondeur large bande émettant dans la gamme des basses fréquences halieutiques, permettrait de mesurer la fréquence de résonance avec une grande précision et d'en déduire la taille des bulles de gaz avec une bonne certitude.

D'après les résultats de cette thèse, les organismes zooplanctoniques de type FL, très abondants dans la colonne d'eau (copépodes, euphausiacé, ...) peuvent être étudiés par acoustique avec des écho-sondeurs hautes fréquences comme le TAPS (e.g. Lebourges-Dhaussy et al. (2014)), dont les estimations doivent être validées par des pêches planctoniques effectuées au même endroit. Des sondeurs large bande hautes fréquences sont également aujourd'hui disponibles (Lavery et al., 2010) (Simrad EK80) et leur utilisation permet d'obtenir des réponses fréquentielles sur une gamme de fréquences continue. Une telle résolution de la réponse fréquentielle permet de mesurer avec précision la réponse fréquentielle ondulante des réflecteurs FL aux hautes fréquences, et d'en estimer la taille et la densité avec une plus grande certitude. Le déploiement de ces sondeurs large bande hautes fréquences en profil vertical sur des bathysondes permettrait d'insonifier les organismes méso-zooplanctoniques dans le même volume d'échantillonnage, évitant ainsi les biais d'échantillonnage dus à l'augmentation du volume du faisceau acoustique avec la profondeur pour les sondeurs halieutiques de coque. Les méthodes utilisées pour interpoler les données entre les profils verticaux auront alors une place centrale dans l'étude de la distribution spatiale du zooplancton par acoustique.

L'étude des couches diffusantes à toutes les échelles d'observation est limitée par les biais de leur échantillonnage biologique. Dans notre travail à fine échelle, le filet MIK est apparu être le plus adapté dans le jeu d'instruments disponibles. Cependant, son utilisation s'est révélée peu efficace pour estimer la quantité des larves de poissons et échantillonner les organismes porteurs de gaz de plus grande taille. L'utilisation d'un chalut mésopélagique de type "mésopélagos" dont l'ouverture est 4 fois plus importante que celle du MIK apparaît être plus adaptée à la capture du micronecton car il serait sujet à moins d'évitement. Un échantillonneur ouvrant/fermant de type MOCNESS (*Multiple Opening and Closing Net, with an Environmental Sensing System*, Wiebe et al. (1985)) dont l'ouverture et la maille peuvent être adaptées à la capture d'organismes micronectoniques, dispose de plusieurs nappes de filets qui peuvent être fermées à distance, en temps réel par un opérateur à bord, ce qui permet d'échantillonner plusieurs tranches de profondeurs lors d'un déploiement. Le filet "mésopélagos" ou le MOCNESS présentent le désavantage d'abîmer les organismes le plus fragiles (les organismes gélatineux par exemple)

lors de la collecte. Les systèmes vidéo paraissent également adaptés à l'échantillonnage de certains organismes avec inclusion gazeuse (Benfield et al., 2003). Ils ont l'avantage de n'engendrer aucune casse et d'être moins invasifs, en revanche, la forte turbidité de certaines zones, et/ou le faible volume filtré peuvent rendre leur utilisation inefficace.

Il est évident que les conclusions issues de l'échantillonnage biologique restreint aux couches diffusantes de la zone de la Gironde ne peuvent être étendues à l'ensemble des couches diffusantes du golfe de Gascogne. Cette approche exploratoire a cependant permis de réduire le champs des hypothèses possibles et a mis en évidence les organismes porteurs d'inclusion gazeuse qui peuvent induire le phénomène de résonance aux fréquences halieutiques et former des couches diffusantes. D'autre part, une réponse acoustique pouvant être produite par différentes compositions biologiques, la caractérisation précise de la nature des couches diffusantes nécessitera toujours un échantillonnage biologique. A partir des observations effectuées dans ce travail, un échantillonnage de plus grande envergure devrait être envisagé. Il s'agirait d'échantillonner les couches diffusantes de manière adaptative, lors de leur détection en temps réel pendant les campagnes acoustiques. A l'instar de ce qui est réalisé pour l'identification de la composition des bancs de poissons détectés par acoustique, seul un échantillonnage répété de chaque grand type de couches diffusantes permettra de construire une base de connaissances sur les couches diffusantes liant leur réponse acoustique à une ou des compositions spécifiques.

D'un point de vue technique, la méthode de classification non supervisée des échos ACM-KM, développée dans le cadre de cette thèse, pourrait être appliquée sur les données multifréquences des autres campagnes PELGAS. Cela permettrait de valider la robustesse des résultats obtenus en 2013 et d'étudier la variation inter-annuelle des différents types de couches diffusantes dans le golfe de Gascogne. La méthode ACM-KM peut être appliquée en quasi-temps réel à bord d'un navire collectant des données multifréquences afin de suivre l'évolution des types de couches diffusantes au fur et à mesure de l'avancée de la campagne. Cette méthode pourrait être appliquée à un jeu de données collecté dans une zone ou à une saison différentes, dès lors que la gamme de fréquences est assez large pour discriminer les variations fréquentielles de la réponse acoustique des couches diffusantes. Les campagnes EVHOE, par exemple, ont lieu dans le golfe de Gascogne à l'automne sur la Thalassa. L'application de la méthode ACM-KM sur des données acoustiques multifréquences collectées pendant cette campagne permettrait d'étudier les variations saisonnières des types de couches diffusantes observés dans le golfe au printemps. L'ensemble de ces applications permettrait de valider si cette méthode est générique et si elle produit des résultats cohérents au-delà du cas d'étude dans lequel elle a été développée. Une autre perspective pour l'utilisation de cette méthode de classification non supervisée serait de faire des classifications dans des sous-zones de la zone d'étude. En suivant les structures décrites par les paramètres hydrologiques, la classification non supervisée pourrait détecter des assemblages non visibles à une extension plus grande (*e.g.* panaches fluviaux, upwellings, eaux côtières, eaux du plateau, nord/sud du golfe, ...).

L'approche combinant des données acoustiques et biologiques pour étudier la composition spécifique des couches diffusantes est originale par la combinaison nouvelle de méthodes existantes et bien validées, qui étaient jusqu'alors utilisées séparément. Une comparaison des modèles de réflecteurs avec inclusion gazeuse menée dans le cadre de cette thèse a, d'autre part, abouti à la sélection d'un modèle plus performant que ceux qui étaient utilisés jusqu'alors pour décrire la réponse acoustique des réflecteurs biologiques porteurs d'inclusion gazeuse. Cette approche pourrait être appliquée sur des données collectées dans une zone différente qui présenterait des couches diffusantes résonantes, afin de valider sa robustesse.

Processus écologiques

D'un point de vue écologique, cette thèse présente un premier aperçu des réflecteurs biologiques qui peuvent composer les couches diffusantes du golfe de Gascogne, au printemps. Les résultats suggèrent que la réponse acoustique du golfe de Gascogne est dominée par les réflecteurs gazeux à toutes les échelles d'observation (centaines de km, 100 m à 100 km, 10 m à 100 m). Cette thèse fournit également des ordres de grandeurs sur la structuration spatiale à méso-échelle et les tailles et les densités des réflecteurs porteurs de bulles de gaz qui sont potentiellement présentes dans les couches diffusantes denses.

L'hypothèse principale qui résulte de ce travail est que des larves de poissons (ex. *Sardina pilchardus*) et d'autres organismes micro-nectoniques plus grands, comprendraient des inclusions gazeuses qui pourraient résonner aux basses fréquences halieutiques. Une faible densité (0.01 à 0.2 individus/m³) d'organismes porteurs de bulle de gaz concentrés à la même profondeur pourraient ainsi produire des couches diffusantes visibles sur les échogrammes des écho-sondeurs halieutiques. Nous n'avons pas pu mesurer la présence et la taille de la vessie gazeuse des larves de poissons échantillonnées et n'avons pas trouvé d'information à ce sujet dans la littérature. Cela témoigne du manque de connaissance actuel sur le développement anatomique des premiers stades de développement de nombreux poissons. Le projet TOMOFISH, actuellement en cours, vise à produire des morphologies 3D d'anchois et de sardines à différents stades de développement par micro-tomographie à rayons X, afin de caractériser quantitativement la morphologie de leur vessie natatoire. Si les résultats de ce projet sont encourageants pour les adultes, il est encore difficile d'interpréter les images des larves, pour lesquelles la présence et donc la position, la taille ou la morphologie de la vessie natatoire n'ont pas encore été mises en évidence.

Il a été estimé que des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse de plus grande taille étaient également présents dans les couches diffusantes observées. Au-delà du fait que les instruments de mesure utilisés n'étaient pas adaptés à la capture du micronecton, aucune hypothèse n'a pu être formulée sur la nature de ces réflecteurs.

Les compartiments intermédiaires du macrozooplancton, de l'ichtyoplancton et du micronecton sont encore très peu connus tant en termes de distribution spatiale et de fonctions écologiques qu'en termes de biologie ou d'anatomie. Néanmoins, ce travail ouvre des perspectives pour l'échantillonnage à méso-échelle de ces compartiments, en fournissant des méthodes permettant d'analyser les résultats d'un échantillonnage adaptatif des couches diffusantes détectées par acoustique avec des filets ouvrant/fermant.

Les compartiments intermédiaires sont peu connus et mal ou pas représentés dans les modèles écosystémiques du fait du déficit de données et de connaissances à leur sujet (Lehodey et al., 2010). Pourtant, les organismes qui occupent ces compartiments d'une manière temporaire ou permanente sur la durée de leur cycle de vie, peuvent être des proies pour de plus gros prédateurs mais également des prédateurs de plus petits organismes (Lassalle et al., 2013). Ils peuvent donc potentiellement contrôler la dynamique d'autres espèces marines à travers des mécanismes trophiques, et pourrait ainsi constituer le "chaînon manquant" permettant de coupler les modèles biogéochimiques aux niveaux trophiques supérieurs. L'étude des compartiments intermédiaires en combinant données acoustiques et biologiques pourrait fournir des données importantes pour paramétrer les compartiments trophiques intermédiaires des modèles d'écosystèmes (e.g. modèle Lehodey (2004)).

Cette thèse est un premier pas vers une meilleure appréhension de la composition des couches diffusantes du le golfe de Gascogne. Elle a permis de mettre en évidence que les couches dif-

fusantes détectées par les écho-sondeurs de coque et abondantes dans le golfe de Gascogne étaient potentiellement composées de réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse en faible densité (< 10 individus/m³), et difficiles à échantillonner. Cela implique que les données acoustiques multifréquences ne peuvent pas être utilisées pour étudier le compartiment du zooplancton dans son ensemble car la majorité des organismes zooplanctoniques sont des réflecteurs de type *Fluid-Like* et que leur réponse acoustique dans le golfe de Gascogne, au printemps est masquée par celle des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse. Comme nous l'avons vu précédemment, l'utilisation de sondeurs large bande hautes fréquences en station, devrait cependant permettre à l'avenir, de caractériser par acoustique les abondances par taille et la distribution verticale du méso-zooplancton.

Les couches diffusantes peuvent être induites, à l'échelle de l'océan mondial, par une grande diversité de réflecteurs impliqués dans de nombreux processus écologiques différents. L'application des techniques acoustiques à la détection des organismes des niveaux trophiques intermédiaires est un domaine de recherche en expansion dans lequel, comme dans toute autre activité scientifique, le doute doit tenir une place centrale car, comme l'a dit Steven J. GOULD :

" The most erroneous stories are those we think we know best - and therefore never scrutinize or question. "

Bibliographie

- Adler, J., Jacoboni, E., & Hunault, G. (2011). *R, l'essentiel*. CampusPress. Paris : Pearson.
- Ahl, V. & Allen, T. F. H. (1996). *Hierarchy Theory : a Vision, Vocabulary and Epistemology*. New York : Columbia University Press.
- Ainslie, M. A. & Leighton, T. G. (2011). Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 3184–3208.
- Albaina, A. & Irigoien, X. (2007). Fine scale zooplankton distribution in the Bay of Biscay in spring 2004. *Journal of Plankton Research*, 29(10), 851–870.
- Alvarez, P. & Chifflet, M. (2012). The fate of eggs and larvae of three pelagic species, mackerel (*Scomber scombrus*), horse mackerel (*Trachurus trachurus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in relation to prevailing currents in the Bay of Biscay : Could they affect larval survival? *Scientia Marina*, 76(3), 573–586.
- Anderson, V. C. (1950). *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 426–431.
- Arbault, S. & Boutin, N. (1968). Ichtyoplancton oeufs et larves de poissons teleosteens dans le golfe de gascogne en 1964 (Teleostean fish eggs and larvae in the Bay of Biscay in 1964). *Revue des Travaux de l'Institut des Peches Maritimes*, 32(4), 413–476.
- Baamstedt, U., Kaartvedt, S., & Youngbluth, M. (2003). An evaluation of acoustic and video methods to estimate the abundance and vertical distribution of jellyfish. *Journal of Plankton Research*, 25(11), 1307–1318.
- Ballon, M., Bertrand, A., Lebourges-Dhaussy, A., Gutiérrez, M., Ayón, P., Grados, D., & Gerlotto, F. (2011). Is there enough zooplankton to feed forage fish populations off Peru? An acoustic (positive) answer. *Progress in Oceanography*, 91(4), 360–381.
- Balls, R. (1948). Herring fishing with the ecometer. *Journal du Conseil International pour l'Exploitation de la Mer*, 15, 193–206.
- Barans, C. A., Stender, B. W., Holliday, D. V., & Greenlaw, C. F. (1997). Variation in the vertical distribution of zooplankton and fine particles in an estuarine inlet of South Carolina. *Estuaries*, 20, 467–482.
- Beaugrand, G. (2005). Monitoring pelagic ecosystems using plankton indicators. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 62(3), 333–338.
- Benfield, M. C., Lavery, A. C., Wiebe, P. H., Greene, C. H., Stanton, T. K., & Copley, N. J. (2003). Distributions of physonect siphonulae in the Gulf of Maine and their potential as important sources of acoustic scattering. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(7), 759–772.

- Benoit-Bird, K. J., Cowles, T. J., & Wingard, C. E. (2009). Edge gradients provide evidence of ecological interactions in planktonic thin layers. *Limnol. Oceanogr.*, *54*, 1382–1392.
- Benoit-Bird, K. J., Moline, M. A., Waluk, C. M., & Robbins, I. C. (2010). Integrated measurements of acoustical and optical thin layers I : Vertical scales of association. *Continental Shelf Research*, *30*(1), 17–28.
- Berger, L., Poncelet, C., & Trenkel, V. (2009). A method for reducing uncertainty in estimates of fish-school frequency response using data from multifrequency and multibeam echsounders. *ICES Journal of Marine Science*, *66*(6), 1155–1161.
- Bertrand, A. (1999). *Le système {thon-environnement} en Polynésie Française : caractérisation de l'habitat pélagique, étude de la distribution et de la capturabilité des thons, par méthodes acoustiques et halieutiques*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, Rennes.
- Bertrand, A., Ballón, M., & Chaigneau, A. (2010). Acoustic Observation of Living Organisms Reveals the Upper Limit of the Oxygen Minimum Zone. *PLoS ONE*, *5*(4).
- Bertrand, A., Le Borgne, R., & Josse, E. (1999). Acoustic characterisation of micronekton distribution in French Polynesia. *Marine Ecology Progress Series*, *191*, 127–140.
- Bok, T., Na, J., & Paeng, D. (2013). Diel variation in high-frequency acoustic backscatter from *Cochlodinium polykrikoides*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *134*(2), EL140–EL146.
- Bonnet, D., Harris, R., Lopez-Urrutia, A., Halsband-Lenk, C., Greve, W., Valdes, L., Hirche, H., Engel, M., Alvarez-Ossorio, M., & Wiltshire, K. (2007). Comparative seasonal dynamics of *Centropages typicus* at seven coastal monitoring stations in the North Sea, English Channel and Bay of Biscay. *Progress in Oceanography*, *72*(2–3), 233–248.
- Brierley, A. S., Axelsen, B. E., Buecher, E., Sparks, C. a. J., Boyer, H., & Gibbons, M. J. (2001). Acoustic observations of jellyfish in the Namibian Benguela. *Marine Ecology Progress Series*, *210*, 55–66.
- Brierley, A. S., Ward, P., Watkins, J. L., & Goss, C. (1998). Acoustic discrimination of Southern Ocean zooplankton. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, *45*(7), 1155–1173.
- Brierley, A. S. & Watkins, J. L. (1996). Acoustic targets at South Georgia and the South Orkney islands during a season of krill scarcity. *Marine Ecology Progress Series*, *138*(1-3), 51–61.
- Béhagle, N., du Buisson, L., Josse, E., Lebourges-Dhaussy, A., Roudaut, G., & Ménard, F. (2014). Mesoscale features and micronekton in the Mozambique Channel : An acoustic approach. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, *100*, 164–173.
- Cabreira, A. G., Madirolas, A., & Brunetti, N. E. (2011). Acoustic characterization of the Argentinean short-fin squid aggregations. *Fisheries Research*, *108*(1), 95–99.
- Chu, D., Foote, K. G., & Stanton, T. K. (1993). Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz : Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *Journal of the Acoustical Society of America*, *93*, 2985.

- Churnside, J. H., Marchbanks, R. D., Lee, J. H., Shaw, J. A., Weidemann, A., & Donaghay, P. L. (2012). Airborne lidar detection and characterization of internal waves in a shallow fjord. *Journal of Applied Remote Sensing*, *6*, 063611.
- Collins, M. A., Xavier, J. C., Johnston, N. M., North, A. W., Enderlein, P., Tarling, G. A., Waluda, C. M., Hawker, E. J., & Cunningham, N. J. (2008). Patterns in the distribution of myctophid fish in the northern Scotia Sea ecosystem. *Polar Biology*, *31*(7), 837–851.
- Colombo, G. A., Mianzan, H., & Madirolas, A. (2003). Acoustic characterization of gelatinous-plankton aggregations : four case studies from the Argentine continental shelf. *Ices Journal of Marine Science*, *60*(3), 650–657.
- Costello, J. H., Pieper, R. E., & Holliday, D. V. (1989). Comparison of acoustic and pump sampling techniques for the analysis of zooplankton distributions. *Journal of Plankton Research*, *11*(4), 703–709.
- Coyle, K. O. (2000). Acoustic estimates of zooplankton biomass and distribution : application of canonical correlation to scaling of multifrequency acoustic data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *57*, 2306–2318.
- Cressie, N. (2003). *Statistics for Spatial Data* (revised ed. ed.). Wiley.
- David, P., Guerin-Ancey, O., Oudot, G., & Van Cuyck, J. P. (2001). Acoustic backscattering from salp and target strength estimation. *Oceanologica Acta*, *24*(5), 443–451.
- De Robertis, A., McKelvey, D. R., & Ressler, P. H. (2010). Development and application of an empirical multifrequency method for backscatter classification. *Canadian Journal Fisheries Aquatic Sciences*, *67*(9), 1459–1474.
- Debby, I., Jackson, G. A., Angel, M. V., Lampitt, R. S., & Burd, A. B. (2004). Effect of net avoidance on estimates of diel vertical migration. *Limnology and Oceanography*, *49*(6), 2297–2303.
- d'Elbee, J., Castege, I., Hemery, G., Lalanne, Y., Mouches, C., Pautrizel, F., & D'Amico, F. (2009). Variation and Temporal Patterns in the Composition of the Surface Ichthyoplankton in the Southern Bay of Biscay (W. Atlantic). *Continental Shelf Research*, *29*(8), 1136–1144.
- Deuser, L., Middleton, D., Plemons, T., & Vaughan, J. (1979). On the classification of underwater acoustic signals : II. Experimental application involving fish. *Journal of the Acoustical Society of America*, *65*, 444–445.
- Diner, N. & Marchand, E. (1995). *Acoustique et pêche maritime*. Plouzané, France : Ifremer.
- Doray, M. (2006). *L'agrégation de thons de sub-surface au sein du système [DCP ancré - macro-necton - environnement - pêche] en Martinique : étude hiérarchique par méthodes acoustiques, optiques et halieutiques*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, Rennes.
- Doray, M., Badts, V., Massé, J., Duhamel, E., Huret, M., Doremus, G., & Petitgas, P. (2014). Manual of fisheries survey protocols. PELGAS surveys (PELgagiques GAScogne). Manuel des protocoles de campagnes halieutique Ifremer.
- Doray, M., Massé, J., & Petitgas, P. (2010). Pelagic fish stock assessment by acoustic methods at Ifremer. Rapport interne Ifremer DOP/DCN/EMH 10-02.

- Dupuy, C., Talarmin, A., Hartmann, H. J., Delmas, D., Courties, C., & Marquis, E. (2011). Community structure and grazing of the nano-microzooplankton on the continental shelf of the Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(1), 1–13.
- Everitt, B. (1993). *Cluster analysis* (Heinemann Educational for the Social Science Research Council ed.). London.
- Fleminger, A. & Clutter, R. I. (1965). Avoidance of Towed Nets by Zooplankton. *Limnology and Oceanography*, 10(1), 96–104.
- Foote, K. G. (1983). Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73, 1932–1940.
- Foote, K. G. (1990). Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(1), 16.
- Foote, K. G., Knudsen, H. P., Vestnes, G., MacLennan, D. N., & Simmonds, E. J. (1987). Calibration of acoustic instruments for fish density estimation : a practical guide. *ICES Cooperative Research Report*, 144.
- Fraser, J. H. (1962). *Nature adrift. the story of marine plankton*. Philadelphia, Dufour Editions.
- Furusawa, M. (1988). Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, E(9), 1.
- Gailhard-Rocher, I., Huret, M., Lazure, P., Vandermeirsch, F., Gatti, J., Garreau, P., & Gohin, F. (2012). Identification de "paysages hydrologiques" dans les eaux marines sous juridiction française (France métropolitaine). Réponse à la demande de description des habitats principaux de la colonne d'eau dans le cadre de l'Evaluation Initiale de la DCSMM, Ifremer.
- Gauthier, S. & Horne, J. K. (2004). Potential acoustic discrimination within boreal fish assemblages. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 61(5), 836–845.
- Gauthier, S., Oeffner, J., & O'Driscoll, R. L. (2014). Species composition and acoustic signatures of mesopelagic organisms in a subtropical convergence zone, the New Zealand Chatham Rise. *Marine Ecology Progress Series*, 503, 23–40.
- Gentien, P., Lunven, M., Lehaitre, M., & Duvent, J. L. (1995). In-situ depth profiling of particle sizes. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 42(8), 1297–1312.
- Giryn, A., Rojewski, M., & Somla, R. (1979). The number parameters of echosounder signals with respect to their usefulness to sea creature species identification. In *Procedures of the Meeting on Hydroacoustical Methods for the Estimation of Marine Fish Populations*, volume 2 (pp. 467–489). J. B. Suomala.
- Gorsky, G., Ohman, M. D., Picheral, M., Gasparini, S., Stemmann, L., Romagnan, J. B., Cawood, A., Pesant, S., García-Comas, C., & Prejger, F. (2010). Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton Research*, 32(3), 285–303.
- Greene, C. H., Wiebe, P. H., Pelkie, C., Benfield, M. C., & Popp, J. M. (1998). Three-dimensional acoustic visualization of zooplankton patchiness. *Deep Sea Research*, 45(7), 1201–1217.
- Greenlaw, C. F. (1979). Acoustical Estimation of Zooplankton Populations. *Limnology and Oceanography*, 24(2), 226–242.

- Greenlaw, C. F. & Johnson, R. K. (1983). Multiple-frequency acoustical estimation. *Biological Oceanography*, 2(2-4), 227–252.
- Hardy, A. (1970). *The Open Sea. Part 1. World of Plankton* (2nd edition ed.). London, UK : Collins.
- Harris, R. P., Wiebe, P. H., Lenz, J., Skjoldal, H. R., & Huntley, M. (2000). *Zooplankton methodology manual* (Academic press ed.). ICES. London : Academic Press.
- Haury, L. R., McGowan, J. A., & Wiebe, P. H. (1978). Patterns and processes in the time-space scales of plankton distribution. In *Spatial pattern in plankton communities* (Plenum Press ed.). (pp. 277–327). New York, USA.
- Herbland, A., Delmas, D., Laborde, P., Sautour, B., & Artigas, F. (1998). Phytoplankton spring bloom of the Gironde plume waters in the Bay of Biscay : early phosphorus limitation and food-web consequences. *Oceanologica Acta*, 21(2), 279–291.
- Herman, A. W., Beanlands, B., & Phillips, E. F. (2004). The next generation of Optical Plankton Counter : the Laser-OPC. *Journal of Plankton Research*, 26(10), 1135 –1145.
- Holliday, D. V. (1977). *Extracting bio-physical information from the acoustic signatures of marine organisms*.
- Holliday, D. V. (1992). Zooplankton acoustics. In *Oceanography of the Indian Ocean* (Oxford-IBH ed.). (pp. 733–740). New Delhi : B.N. Desai.
- Holliday, D. V., Donaghay, P. L., Greenlaw, C. F., McGehee, D. E., McManus, M. M., Sullivan, J. M., & Miksis, J. L. (2003). Advances in defining fine- and micro-scale pattern in marine plankton. *Aquatic Living Resources*, 16(3), 131–136.
- Holliday, D. V. & Pieper, R. E. (1995). Bioacoustical oceanography at high frequencies. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 52(3-4), 279 –296.
- Horne, J. K. (2000). Acoustic approaches to remote species identification : a review. *Fisheries Oceanography*, 9(4), 356–371.
- Huret, M., Petitgas, P., & Woillez, M. (2010). Dispersal kernels and their drivers captured with a hydrodynamic model and spatial indices : A case study on anchovy (*Engraulis encrasicolus*) early life stages in the Bay of Biscay. *Progress in Oceanography*, 87(1–4), 6–17.
- Ibaibarriaga, L., Irigoien, X., Santos, M., Motos, L., Fives, J. M., Franco, C., Lago De Lanzós, A., Acevedo, S., Bernal, M., Bez, N., Eltink, G., Farinha, A., Hammer, C., Iversen, S. A., Milligan, S. P., & Reid, D. G. (2007). Egg and larval distributions of seven fish species in north east Atlantic waters. *Fisheries Oceanography*, 16(3), 284–293.
- ICES (2008). Report of the Working Group on Acoustic and Egg Surveys for Sardine and Anchovy in ICES Areas VIII and IX (WGACEGG). Report of an Expert Group ICES CM 2008/LRC :17, Nantes, France.
- ICES (2013). Manual for the Midwater Ring Net sampling during IBTS Q1.
- Irigoien, X., Chust, G., Fernandes, J. A., Albaina, A., & Zarauz, L. (2011). Factors determining the distribution and beta diversity of mesozooplankton species in shelf and coastal waters of the Bay of Biscay. *Journal of Plankton Research*, 33(8), 1182 –1192.

- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with applications in R* (Springer ed.). Springer Texts in Statistics. New York : G. Casella, S. Fienberg, I. Olkin.
- Jech, J. M. & Michaels, W. L. (2007). A multifrequency method to classify and evaluate fisheries acoustics data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *64*(2), 386.
- Kapodistrias, G. & Dahl, P. H. (2012). Scattering measurements from a dissolving bubble. *Journal of the Acoustical Society of America*, *131*(6), 4243–4251.
- Kaufman, L. & Rousseeuw, P. J. (1990). *Finding Groups in Data - An Introduction to CLuster Analysis*. John Wiley and Sons.
- Kimura, K. (1929). On the detection of fish-groups by an acoustic method. *Journal of the Imperial Fisheries Institute*, *24*, 41–45.
- Kloser, R. J., Ryan, T., Sakov, P., Williams, A., & Koslow, J. A. (2002). Species identification in deep water using multiple acoustic frequencies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *59*(6), 1065–1077.
- Korneliussen, R. J. (2000). Measurement and removal of echo integration noise. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, *57*(4), 1204 –1217.
- Korneliussen, R. J. & Ona, E. (2002). An operational system for processing and visualizing multi-frequency acoustic data. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, *59*(2), 293–313.
- Korneliussen, R. J. & Ona, E. (2003). Synthetic echograms generated from the relative frequency response. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, *60*(3), 636 –640.
- Koutsikopoulos, C. & LeCann, B. (1996). Physical processes and hydrological structures related to the Bay of Biscay anchovy. *Scientia Marina*, *60*, 9–19.
- Kringel, K., Jumars, P. A., & Holliday, D. V. (2003). A shallow scattering layer : High-resolution acoustic analysis of nocturnal vertical migration from the seabed. *Limnology and Oceanography*, *48*, 1223–1248.
- Labry, C., Herbland, A., Delmas, D., Laborde, P., Lazure, P., Froidefond, J. M., Jegou, A. M., & Sautour, B. (2001). Initiation of winter phytoplankton blooms within the Gironde plume waters in the Bay of Biscay. *Marine Ecology Progress Series*, *212*, 117–130.
- Lassalle, G., Lobry, J., Le Loc'h, F., Mackinson, S., Sanchez, F., Tomasz Tomczak, M., & Niquil, N. (2013). Ecosystem status and functioning : searching for rules of thumb using an itersite comparison of food-web models in Northeast Atlantic continental shelves. *ICES Journal of Marine Science*, *70*(1), 135–149.
- Lavery, A. C., Chu, D., & Moum, J. N. (2010). Measurements of acoustic scattering from zooplankton and oceanic microstructure using a broadband echosounder. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, *67*(2), 379–394.
- Lavery, A. C., Schmitt, R. W., & Stanton, T. K. (2003). High-frequency acoustic scattering from turbulent oceanic microstructure : the importance of density fluctuations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *114*(5), 2685–2697.

- Lavery, A. C., Stanton, T. K., McGehee, D. E., & Chu, D. (2002). Three-dimensional modeling of acoustic backscattering from fluid-like zooplankton. *Journal of the Acoustical Society of America*, *111*, 1197.
- Lavery, A. C., Wiebe, P. H., Stanton, T. K., Lawson, G. L., Benfield, M. C., & Copley, N. (2007). Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. *Journal of the Acoustical Society of America*, *122*, 3304.
- Lavit, C., Escoufier, Y., Sabatier, R., & Traissac, P. (1994). The ACT (STATIS method). *Computational Statistics and Data Analysis*, *18*, 97–119.
- Lawson, G. L., Wiebe, P. H., Ashjian, C. a. J., Gallagher, S. M., Davis, C. S., & Warren, J. D. (2004). Acoustically-inferred zooplankton distribution in relation to hydrography west of the Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, *51*(17-19), 2041–2072.
- Lebart, L., Morineau, A., & Piron, M. (1997). *Statistique exploratoire multidimensionnelle* (DUNOD ed.). Paris.
- Lebourges-Dhaussy, A. & Balle-Beganton, J. (2004). *Multifrequency multimodel zooplankton classification*. International Council for the Exploration of the Sea, Palaegade 2-4 DK 1261 Copenhagen K Denmark.
- Lebourges Dhaussy, A., Coetzee, J., Hutchings, L., Roudaut, G., & Nieuwenhuys, C. (2009). Zooplankton spatial distribution along the South African coast studied by multifrequency acoustics, and its relationships with environmental parameters and anchovy distribution. *ICES Journal of Marine Science*, *66*, 1055–1062.
- Lebourges-Dhaussy, A., Huggett, J., Ockhuis, S., Roudaut, G., Josse, E., & Verheye, H. (2014). Zooplankton size and distribution within mesoscale structures in the Mozambique Channel : A comparative approach using the TAPS acoustic profiler, a multiple net sampler and ZooScan image analysis. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, *100*, 136–152.
- Lehodey, P. (2004). A Spatial Ecosystem And Populations Dynamics Model (SEAPODYM) for tuna and associated oceanic top-predator species : Part I - Lower and intermediate trophic components. Working Paper SCTB17 ECO-1, Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, Noumea, New Caledonia.
- Lehodey, P., Murtugudde, R., & Senina, I. (2010). Bridging the gap from ocean models to population dynamics of large marine predators : A model of mid-trophic functional groups. *Progress in Oceanography*, *84*(1–2), 69–84.
- Leroy, V. (2004). *Bulles d'air dans l'eau : couplage d'oscillateurs harmoniques et excitation paramétrique*. Acoustics, Université Paris-Diderot, Paris VII, Paris.
- Levin, S. A. (1992). The Problem of Pattern and Scale in Ecology : The Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology*, *73*(6), 1943–1967.
- Lezama-Ochoa, A., Ballon, M., Woillez, M., Grados, D., Irigoien, X., & Bertrand, A. (2011). Spatial patterns and scale-dependent relationships between macrozooplankton and fish in the Bay of Biscay : an acoustic study. *Marine Ecology Progress Series*, *439*, 151–168.
- Love, R. H. (1971). Measurements of fish target strength : a review. *Fisheries Bulletin*, *69*, 703–715.

- Love, R. H. (1978). Resonant acoustic scattering by swimbladder-bearing fish. *Journal of the Acoustical Society of America*, 64(2), 571–580.
- Love, R. H. (2013). Response to "Comment on 'Resonant acoustic scattering by swimbladder-bearing fish'" (J. Acoust. Soc. Am. 64, 571-580 (1978))(L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 3399–3402.
- Loyer, S., Lampert, L., Menesguen, A., Cann, P., & Labasque, T. (2006). Seasonal evolution of the nutrient pattern on Biscay Bay continental shelf over the years 1999–2000. *Scientia Marina*, 70(1), 31–46.
- Lunven, M., Landeira, J., Lehaitre, M., Siano, R., Podeur, C., Danielou, M., Le Gall, E., Gentien, P., & Sourisseau, M. (2012). In situ video and fluorescence analysis (VFA) of marine particles : applications to phytoplankton ecological studies. *Limnology and Oceanography-Methods*, 10, 807–823.
- Madureira, L. S. P., Everson, I., & Murphy, E. J. (1993). Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and other scatterers. *Journal of Plankton Research*, 15(7), 787–802.
- Mair, A. M., Fernandes, P. G., Lebourges-Dhaussy, A., & Brierley, A. S. (2005). An investigation into the zooplankton composition of a prominent 38-kHz scattering layer in the North Sea. *J. Plankton Res*, 27(7), 623–633.
- Martin Traykovski, L. V. (1998). Effect of orientation on broadband acoustic scattering of Antarctic krill *Euphausia superba* : Implications for inverting zooplankton spectral acoustic signatures for angle of orientation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(4), 2121.
- Massé, J. (1996). Acoustic observations in the Bay of Biscay : Schooling, vertical distribution, species assemblages and behaviour. *Scientia marina*, 60(suppl. 2), 227–234.
- McGehee, O'Driscoll, R. L., & Martin Traykovski, L. V. (1998). Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 45(7), 1273–1294.
- McQuinn, I. H., Dion, M., & St Pierre, J. F. (2013). The acoustic multifrequency classification of two sympatric euphausiid species (*Meganyctiphanes norvegica* and *Thysanoessa raschii*), with empirical and SDWBA model validation. *ICES Journal of Marine Science*, 70(3), 636–649.
- Medwin, H. & Clay, C. S. (1997). *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press, 525 B St. Suite 1900 San Diego CA USA.
- Miller, D. G. M. & Hampton, I. (1989). Biology and ecology of the Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) : A review. *SCAR/SCOR, CAMBRIDGE (UK)*.
- Miyashita, K., Aoki, I., & Inagaki, T. (1996). Swimming behaviour and target strength of isada krill (*Euphausia pacifica*). *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 53(2), 303–308.
- Monger, B. C., Chinniah-Chandy, S., Meir, E., Billings, S., Greene, C. H., & Wiebe, P. H. (1998). Sound scattering by the gelatinous zooplankters *Aequorea victoria* and *Pleurobrachia bachei*. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, 45(7), 1255–1271.

- Moyano, M., Rodriguez, J. M., Benitez-Barrios, V. M., & Hernandez-Leon, S. (2014). Larval fish distribution and retention in the Canary Current system during the weak upwelling season. *Fisheries Oceanography*, *23*(3), 191–209.
- Murase, H., Ichihara, M., Yasuma, H., Watanabe, H., Yonezaki, S., Nagashima, H., Kawahara, S., & Miyashita, K. (2009). Acoustic characterization of biological backscatterings in the Kuroshio Oyashio inter frontal zone and subarctic waters of the western North Pacific in spring. *Fisheries Oceanography*, *18*(6), 386–401.
- Nakken, O. & Olsen, K. (1977). Target strength measurements of fish. *Procés-verbal Réunion du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, *170*, 52–69.
- Napp, J. M., Ortner, P. B., Pieper, R. E., & Holliday, D. V. (1993). Biovolume-size spectra of epipelagic zooplankton using a multi-frequency acoustic profiling system (MAPS). *Deep-Sea Research (Part I, Oceanographic Research Papers)*, *40*(3), 445–459.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., & Wagner, H. (2013). Community Ecology Package (vegan).
- Okumura, T., Masuya, T., Takao, Y., & Sawada, K. (2003). Acoustic scattering by an arbitrarily shaped body : an application of the boundary-element method. *ICES Journal of Marine Science*, *60*(3), 563–570.
- Pagès, J. (2014). *Multiple Factor Analysis by Exemple Using R*. CRC. Chapman and Hall.
- Petitgas, P. (2001). Geostatistics in fisheries survey design and stock assessment : models, variances and applications. *Fish and Fisheries*, *2*(3), 231–249.
- Petitgas, P. (2010). Life cycle spatial patterns of small pelagic fish in the Northeast Atlantic. ICES Cooperative Research Report 306, International Council for the Exploration of the Sea.
- Petitgas, P., Doray, M., Huret, M., Massé, J., & Woillez, M. (2014). Modelling the variability in fish spatial distributions over time with empirical orthogonal functions : anchovy in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, *71*(9), 2379–2389.
- Peña, M., Olivar, M. P., Balbín, R., López-Jurado, J., Iglesias, M., & Miquel, J. (2014). Acoustic detection of mesopelagic fishes in scattering layers of the Balearic Sea (western Mediterranean). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *71*(8), 1186–1197.
- Picheral, M., Guidi, L., Stemmann, L., Karl, D., Iddaoud, G., & Gorsky, G. (2010). The Underwater Vision Profiler 5 : An advanced instrument for high spatial resolution studies of particles size spectra and zooplankton. *Limnology and Oceanography : methods*, *8*, 462–473.
- Pieper, R. E., Holliday, D. V., & Kleppel, G. S. (1990). Quantitative zooplankton distributions from multifrequency acoustics. *Journal of Plankton Research*, *12*(2), 433–441.
- Pieper, R. E., McGehee, D. E., Greenlaw, C. F., & Holliday, D. V. (2001). Acoustically measured seasonal patterns of Zooplankton in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, *48*(6-7), 1325–1343.
- Pugh, P. R. (1975). The distribution of siphonophores in a transect across the North Atlantic Ocean at 32n. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *20*, 77–97.
- Rayleigh, L. J. W. S. (1945). *The theory of sound* (Dover Publications ed.). New York, USA.

- Reid, P. C., Colebrook, J. M., Matthews, J. B. L., & Aiken, J. (2003). The Continuous Plankton Recorder : concepts and history, from Plankton Indicator to undulating recorders. *Progress In Oceanography*, 58(2-4), 117–173.
- Renard, D., Bez, N., Desassis, N., Beucher, H., Ors, F., & Laporte, F. (2014). RGeostats : The Geostatistical package [10.0.4].
- Roger, C. (1994). The Plankton of the Tropical Western Indian-Ocean as a Biomass Indirectly Supporting Surface Tunas (yellowfin, Thunnus-Albacares and Skipjack, Katsuwonus-Pelamis). *Environmental Biology of Fishes*, 39(2), 161–172.
- Romaine, S. J., Mackas, D. L., & Macaulay, M. C. (2002). Comparison of euphausiid population size estimates obtained using replicated acoustic surveys of coastal inlets and block average vs. geostatistical spatial interpolation methods. *Fisheries Oceanography*, 11(2), 102–115.
- Roman, M. R., Holliday, D. V., & Sanford, L. P. (2001). Temporal and spatial patterns of zooplankton in the Chesapeake Bay turbidity maximum. *Marine Ecological Progress Series*, 213, 215–227.
- Ross, T. & Lueck, R. (2003). Sound scattering from oceanic turbulence. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1343.
- Russell, F. S. (1976). *The eggs and planktonic stages of British marine fishes*. Academic Press, London (UK).
- Saporta, G. (2011). *Probabilités, Analyse des données et Statistiques* (3ème édition révisée ed.). Paris : Ecditions Technip.
- Sautour, B., Artigas, F., Herbland, A., & Laborde, P. (1996). Zooplankton grazing impact in the plume of dilution of the Gironde estuary (France) prior to the spring bloom. *Journal of Plankton Research*, 18(5), 835–853.
- Sieburth, J. M., Smetacek, V., & Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure - heterotrophic compartments of plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23(6), 1256–1263.
- Simard, Y., Marcotte, D., & Naraghi, K. (2003). Three-dimensional acoustic mapping and simulation of krill distribution in the Saguenay St. Lawrence Marine Park whale feeding ground. *Aquatic Living Resources*, 16(3), 137–144.
- SIMFAMI (2005). Species Identification Methods From Acoustic Multi-frequency Information. *EU project final report, Q5RS-2001-02054*, 1–500.
- Simmonds, J. & MacLennan, D. (2005). *Fisheries acoustics* (Blackwell Publishing ed.). Oxford (UK).
- Sourisseau, M. & Carlotti, F. (2006). Spatial distribution of zooplankton size spectra on the French continental shelf of the Bay of Biscay during spring 2000 and 2001. *Journal of Geophysical Research*, 111, 12.
- Stanton, T. K. (1988a). Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(1), 55.
- Stanton, T. K. (1988b). Sound scattering by cylinders of finite length. II. Elastic cylinders. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(1), 64.

- Stanton, T. K. (1989). Sound scattering by cylinders of finite length. III. Deformed cylinders. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 691–705.
- Stanton, T. K. & Chu, D. (2000). Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton : euphausiids and copepods. *ICES Journal of Marine Science*, 57(4), 793–807.
- Stanton, T. K., Chu, D., & Wiebe, P. H. (1996). Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 53(2), 289–295.
- Stanton, T. K., Chu, D. Z., & Wiebe, P. H. (1998). Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 236.
- Stanton, T. K., Chu, D. Z., Wiebe, P. H., Martin, L., & Eastwood, R. L. (1998). Sound scattering by several zooplankton groups. I. Experimental determination of dominant scattering mechanisms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 225.
- Stanton, T. K., Sellers, C. J., & Jech, J. M. (2012). Resonance classification of mixed assemblages of fish with swimbladders using a modified commercial broadband acoustic echosounder at 1-6 kHz. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(5), 854–868.
- Stanton, T. K., Wiebe, P. H., Chu, D., Benfield, M. C., Scanlon, L., Martin, L., & Eastwood, R. L. (1994a). On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 51(4), 505–512.
- Stanton, T. K., Wiebe, P. H., Chu, D. Z., Benfield, M. C., Scanlon, L., Martin, L., & Eastwood, R. L. (1994b). On acoustical estimates of zooplankton biomass. *ICES Journal of Marine Science*, 51(4), 505–512.
- Stommel, H. (1963). Varieties of Oceanographic Experience : The ocean can be investigated as a hydrodynamical phenomenon as well as explored geographically. *Science*, 139(3555), 572–576.
- Sund, O. (1935). Echo sounding in fishery research. *Nature*, 135, 953.
- Tester, A. L. (1943). Use of the eco sounder to locate herring in B.C. waters. *Fisheries of the Fisheries Research Board of Canada*, 63, 21.
- The MathWorks, I. (2012). MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b.
- Trenkel, V., Berger, L., Bourguignon, S., Doray, M., Fablet, R., Massé, J., Mazauric, V., Poncelet, C., Quemener, G., Scalabrin, C., & Villalobos, H. (2009). Overview of recent progress in fisheries acoustics made by Ifremer with examples from the Bay of Biscay. *Aquatic Living Resources*, 22, 433–445.
- Trenkel, V. M. & Berger, L. (2013). A fisheries acoustic multi-frequency indicator to inform on large scale spatial patterns of aquatic pelagic ecosystems. *Ecological Indicators*, 30, 72–79.
- Trenkel, V. M., Mazauric, V., & Berger, L. (2008). The new fisheries multibeam echosounder ME70 : description and expected contribution to fisheries research. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 65(4), 645–655.
- Vandromme, P., Nogueira, E., Huret, M., Lopez-Urrutia, A., Gonzalez-Nuevo Gonzalez, G., Sourisseau, M., & Petitgas, P. (2014). Springtime zooplankton size structure over the continental shelf of the Bay of Biscay. *Ocean Science*, 10, 821–835.

- Warren, J. D. & Smith, J. N. (2007). Density and sound speed of two gelatinous zooplankton : Ctenophore (*Mnemiopsis leidyi*) and lion's mane jellyfish (*Cyanea capillata*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(1), 574–580.
- Warren, J. D., Stanton, T. K., Benfield, M. C., Wiebe, P. H., Chu, D., & Sutor, M. (2001). In situ measurements of acoustic target strengths of gas-bearing siphonophores. *ICES Journal of Marine Science*, 58(4), 740–749.
- Warren, J. D., Stanton, T. K., Wiebe, P. H., & Seim, H. E. (2003). Inference of biological and physical parameters in an internal wave using multiple-frequency, acoustic scattering data. *ICES Journal of Marine Science : Journal du Conseil*, 60(5), 1033–1046.
- Weill, A., Scalabrin, C., & Diner, N. (1993). MOVIES-B An acoustic detection description software. Application to shoal species' classification. *Aquat. Living Resour*, 6(3), 255–267.
- Weston, D. E. (1966). Sound propagation in presence of bladder fish. In *Underwater acoustics* (Plenum Press ed.), volume II of *Proc. NOTA Advanced Study Institute, Copenhagen* (pp. 55–88). New York : V. M. Albers.
- Wiebe, P. H., Chu, D., Kaartvedt, S., Hundt, A., Melle, W., Ona, E., & Batta-Lona, P. (2010). The acoustic properties of *Salpa thompsoni*. *ICES Journal of Marine Science*, 67(3), 583–593.
- Wiebe, P. H., Morton, A. W., Bradley, A. M., Backus, R. H., Craddock, J. E., Barber, V., Cowles, T. J., & Flierl, G. R. (1985). New development in the MOCNESS, an apparatus for sampling zooplankton and micronekton. *Marine Biology*, 87(3), 313–323.
- Wiebe, P. H., Mountain, D. G., Stanton, T. K., Greene, C. H., Lough, G., Kaartvedt, S., Dawson, J., & Copley, N. (1996). Acoustical study of the spatial distribution of plankton on Georges Bank and the relationship between volume backscattering strength and the taxonomic composition of the plankton. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, 43(7-8), 1971–2001.
- Wuillez, M., Ressler, P. H., Wilson, C. D., & Horne, J. K. (2012). Multifrequency species classification of acoustic-trawl survey data using semi-supervised learning with class discovery. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2), 184–190.
- Ye, Z. (1997). Low-frequency acoustic scattering by gas-filled prolate spheroids in liquids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4), 1945–1952.
- Zwolinski, J. P. & Demer, D. A. (2012). A cold oceanographic regime with high exploitation rates in the Northeast Pacific forecasts a collapse of the sardine stock. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(11), 4175–4180.

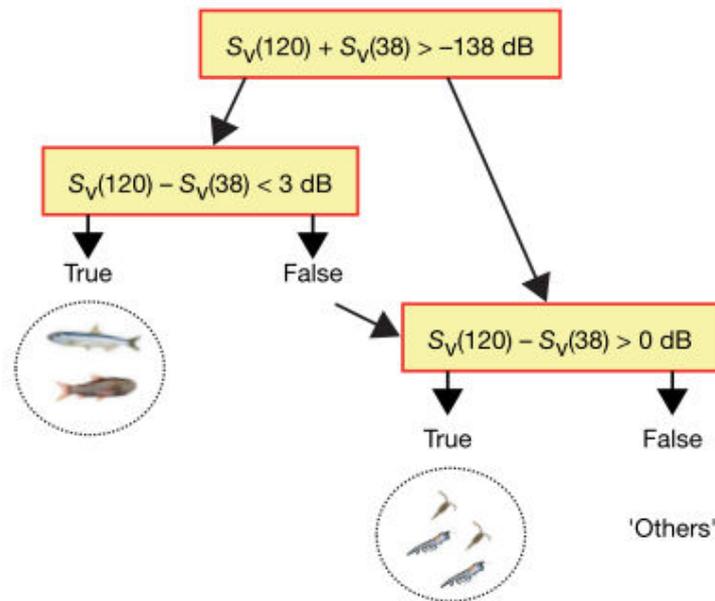
Annexes

Annexe I - Comparaison des méthodes de classification des échos

Paramétrisation des méthodes testées

Méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011)

Nous utilisons cette méthode avec les paramètres issus de Lezama-Ochoa et al. (2011) qui utilisent cette méthode sur des données acoustiques collectées dans le golfe de Gascogne. La paramétrisation des différentes étapes de la méthode est résumée dans le schéma conceptuel issu de Lezama-Ochoa et al. (2011) :



Les S_v sont ensuite convertis en *Nautical Area Scattering Coefficient* (NASC), qui est un indicateur de la biomasse.

$$NASC = 4\pi(1852)^2 s_v T \quad (4.23)$$

où T est la dimension verticale des cellules d'écho-intégration.

Méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013)

Cette méthode repose sur le calcul d'un "indice multifréquence de diversité". Dans un premier temps, l'indice multifréquence I mesure la distribution de l'intensité acoustique sur

les différentes fréquences d'échantillonnage. Il est semblable à l'indice de diversité, utilisé en écologie pour quantifier la diversité en espèces d'une zone considérée. Selon les auteurs, cet indice distingue des réponses fréquentielles croissantes ou décroissantes et ils le définissent comme suit :

$$I = \frac{\sum_i \sum_{l < i} d(i, l) D_i D_l e_i e_l / \sum_i \sum_{l < i} D_i D_l e_i e_l - 0.4}{0.6} \quad (4.24)$$

où D_i et D_l sont les s_v standardisés pour les sondeurs i et l . La fonction de distance $d(i, l)$ permet de prendre en compte l'allure générale de la réponse fréquentielle. Elle se définit par rapport aux fréquences des sondeurs f_i et f_l

$$d(i, l) = 1 - \exp\left(\frac{-|f_i - f_l|}{\delta}\right) \quad (4.25)$$

La forme de cette fonction $d(i, l)$ dépend de la valeur du paramètre δ . Pour 5 fréquences d'échantillonnage, $\delta = 40$.

Les auteurs sélectionnent 7 réflecteurs acoustiques et font l'hypothèse que le volume insonifié ne peut être composé que par ces réflecteurs. Ils assignent une réponse fréquentielle théoriques issues du modèle de réflecteur correspondant aux réflecteurs sélectionnés. Pour chaque courbe théorique, un indice multifréquence de diversité est calculé.

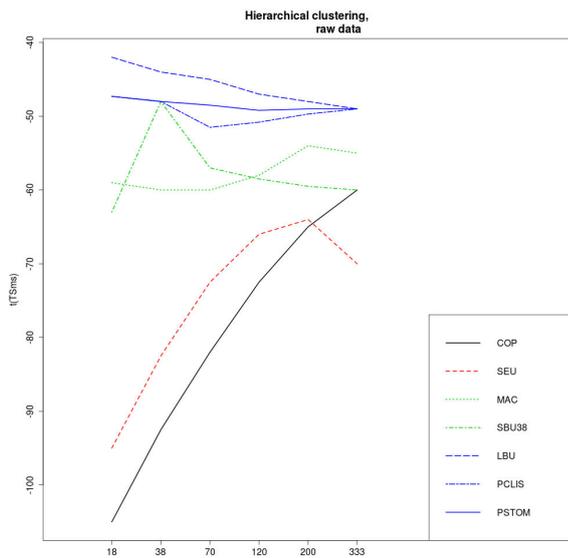
L'indice multifréquence de diversité est calculé pour chaque cellule d'écho-intégration. Les auteurs fixent des seuils autour des indices multifréquence de diversité pour classer les cellules d'écho-intégration dans les groupes de réflecteurs préalablement sélectionnés. Les seuils sont les suivants :

- $I < 0.39 =$ *Swimbladder fish or large gas bubbles.*
- $I = 0.39-0.58 =$ *Small resonant bubbles present in gas bearing organisms such as larval fish and phytoplankton.*
- $I = 0.7-0.8 =$ *fluidlike zooplankton such as copepods and euphausiids.*
- $I > 0.8 =$ *mackerel.*

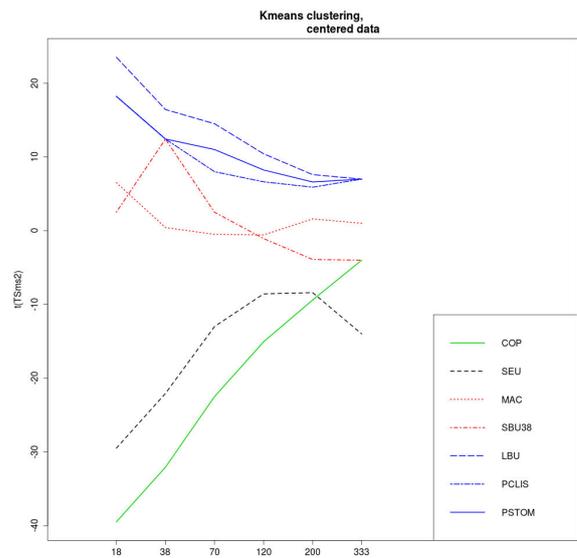
Comparaison des méthodes de classification sur le jeu de réponses fréquentielles théoriques

Jeu de réponses fréquentielles théoriques # 1

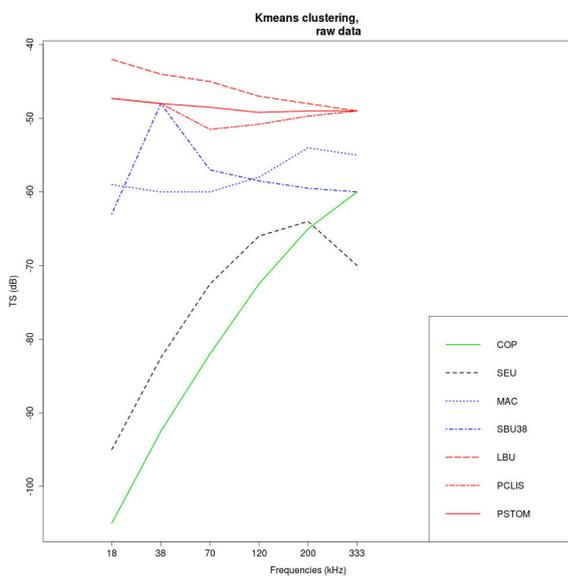
Jeu de réponses fréquentielles théoriques issues du projet SIMFAMI (2005). Le modèle de petite bulle est paramétré pour que la résonance ait lieu à 38kHz.



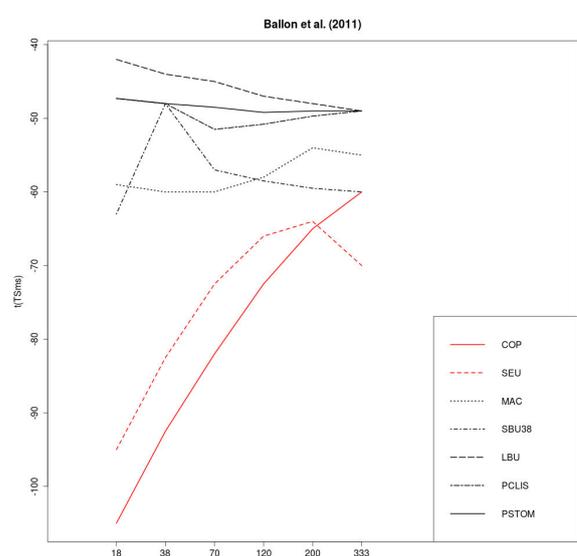
(a) CAH sur données brutes



(b) Kmeans sur données centrées

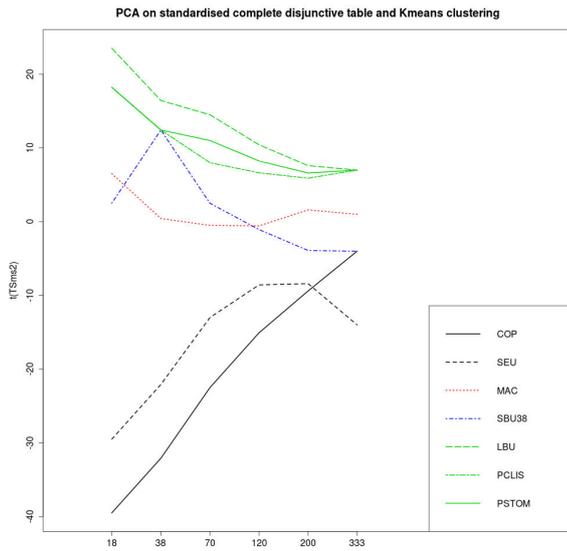


(c) Kmeans sur données brutes

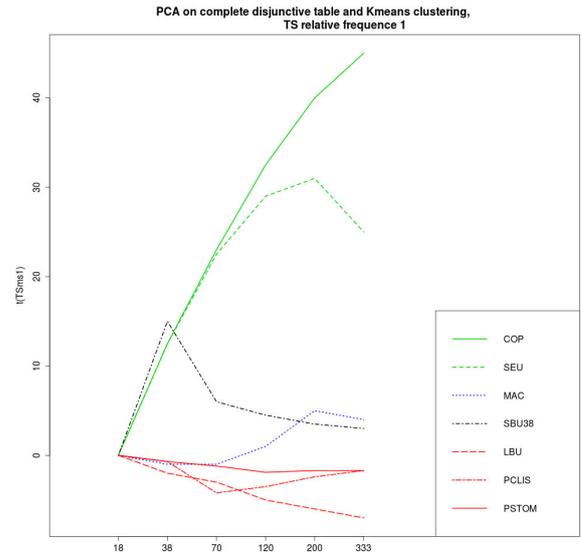


(d) ACM-KM sur données brutes

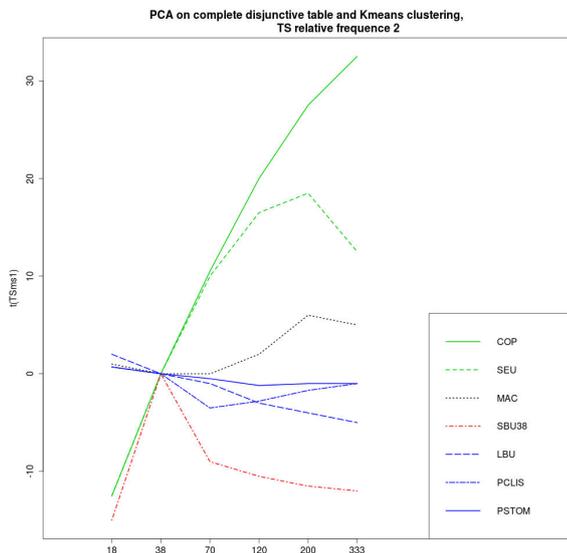
FIGURE 4.42 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PSTOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.



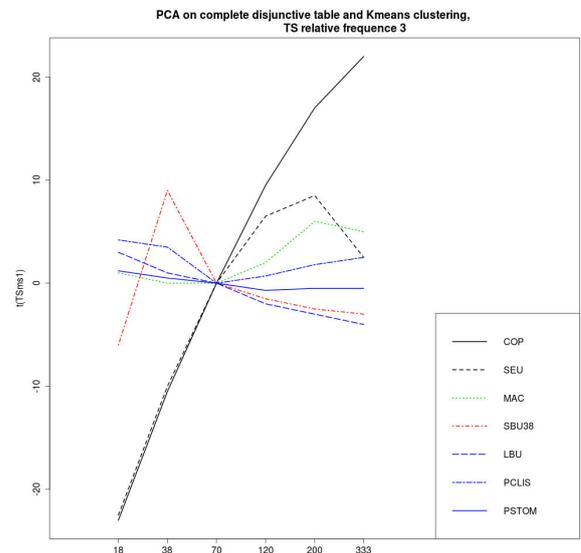
(a) ACM-KM sur données centrées



(b) ACM-KM sur données ref. 18kHz

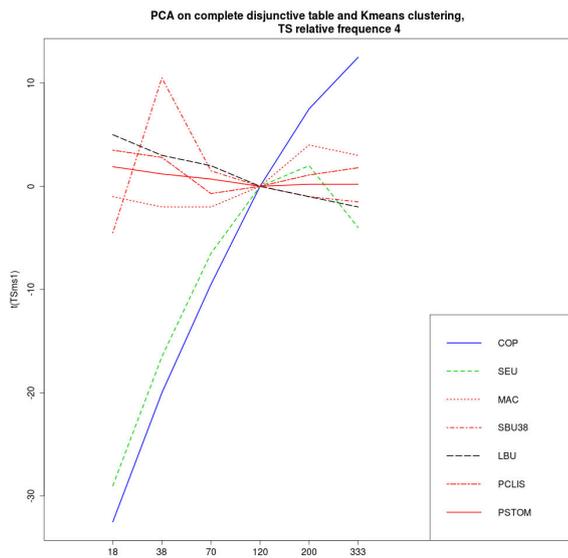


(c) ACM-KM sur données ref. 38kHz

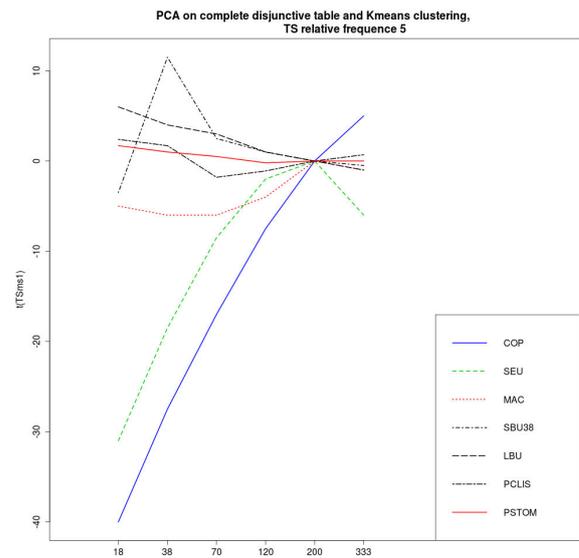


(d) ACM-KM sur données ref. 70kHz

FIGURE 4.43 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PSTOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.



(a) ACM-KM sur données ref. 120kHz

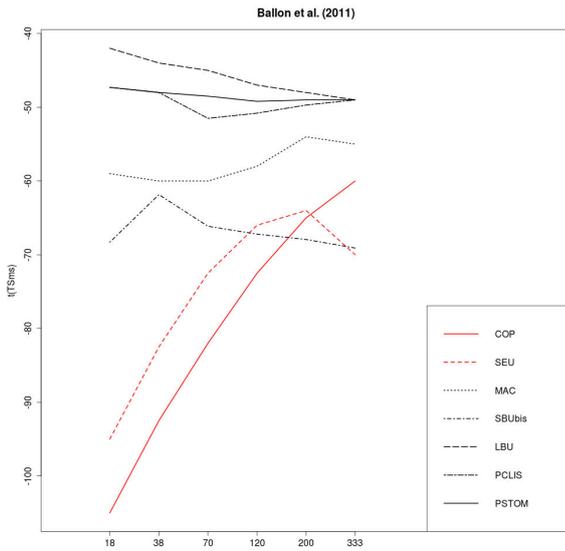


(b) ACM-KM sur données ref. 200kHz

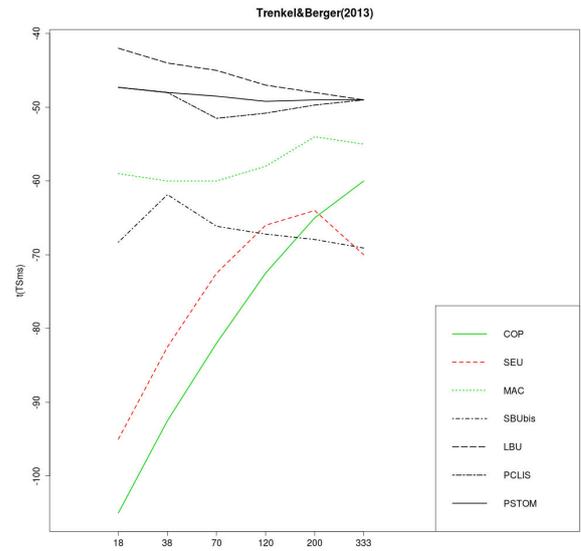
FIGURE 4.44 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PSTOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.

Jeu de réponses fréquentielles théoriques # 2

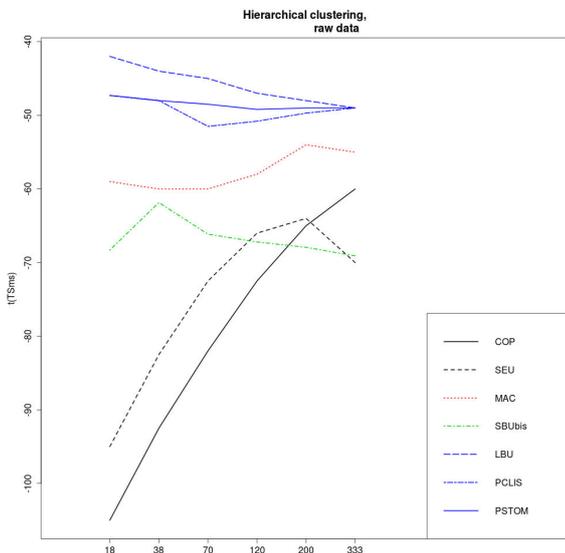
Dans le jeu de réponses théoriques # 2, le modèle des petites bulles de gaz a été paramétré avec les données moyennes issus de Remond et al. (soumis).



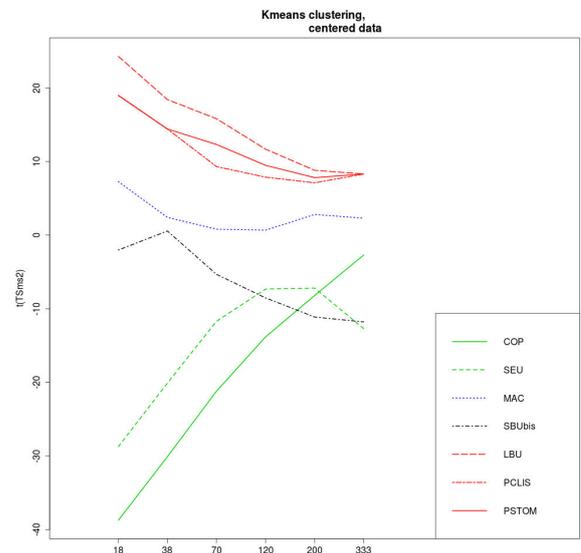
(a) Méthode Ballon et al. (2011)



(b) Méthode Trenkel & Berger (2013)

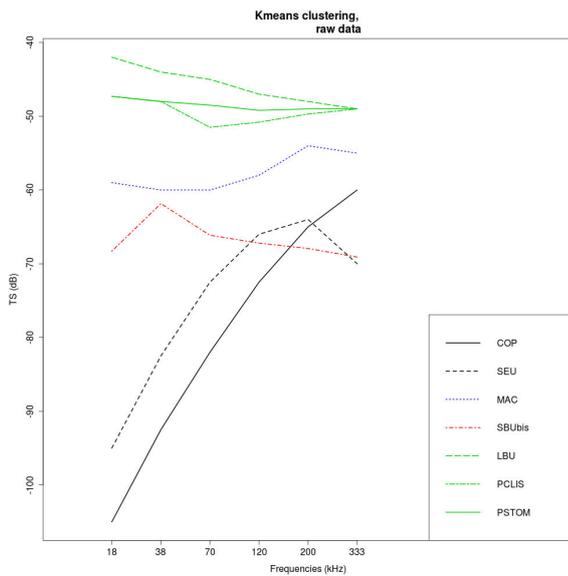


(c) CAH sur données brutes

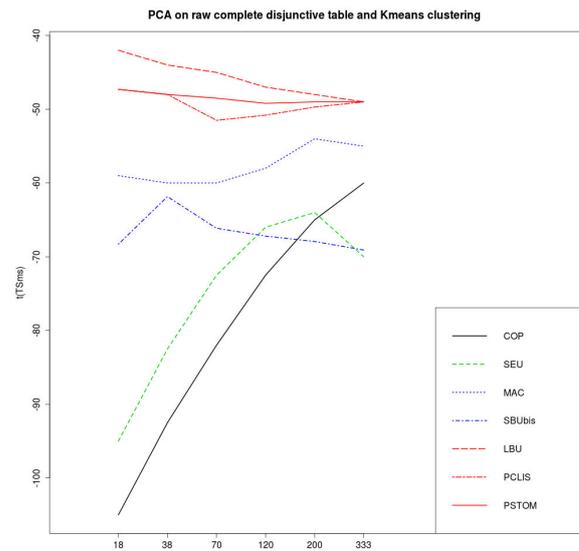


(d) Kmeans sur données centrées

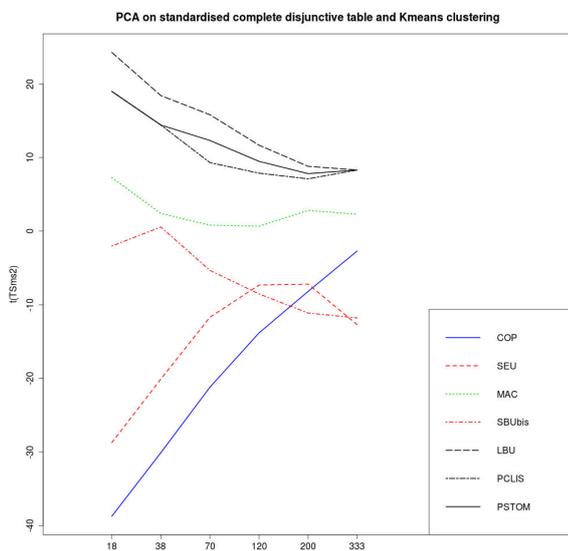
FIGURE 4.45 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PSTOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.



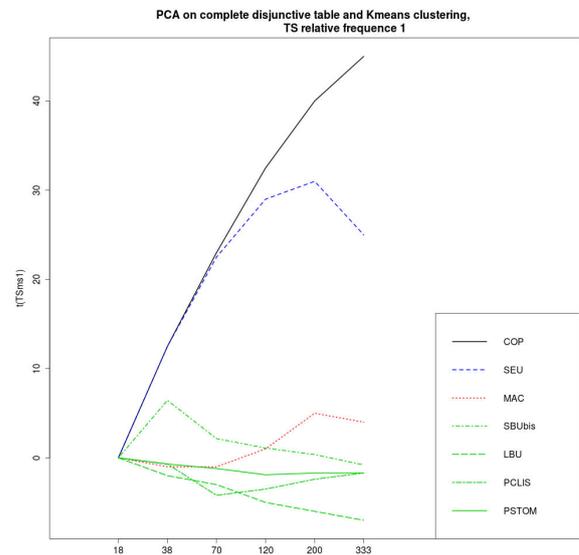
(a) Kmeans sur données brutes



(b) ACM-KM sur données brutes

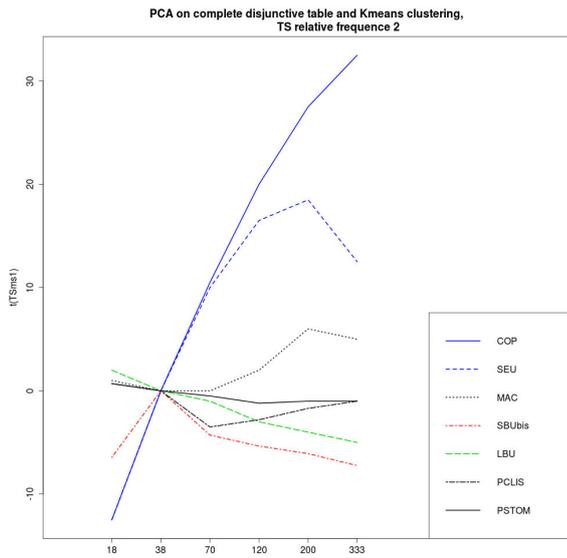


(c) ACM-KM sur données centrées

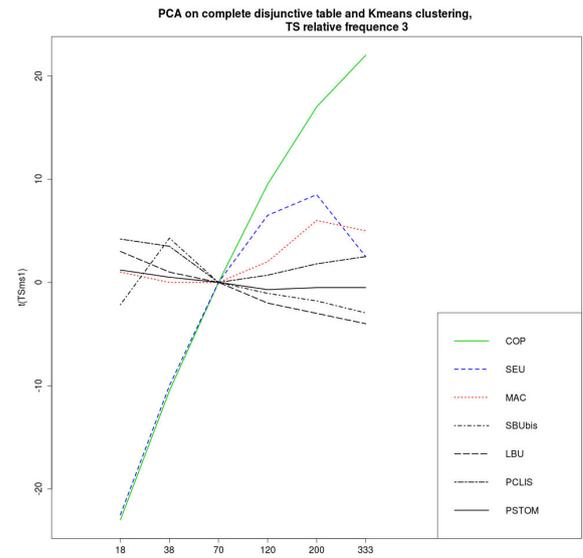


(d) ACM-KM sur données ref. 18kHz

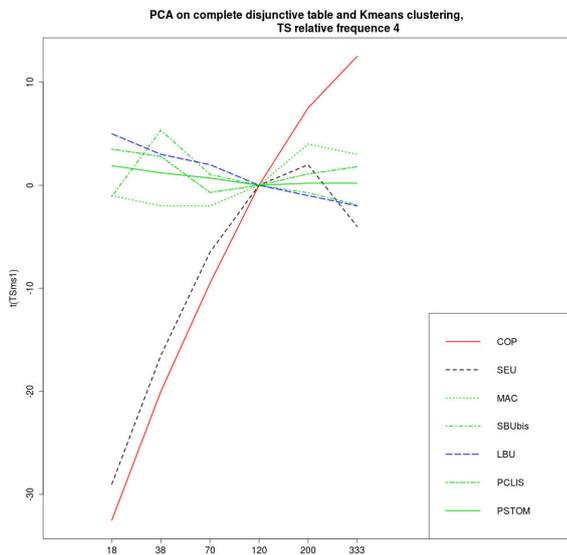
FIGURE 4.46 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PS-TOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.



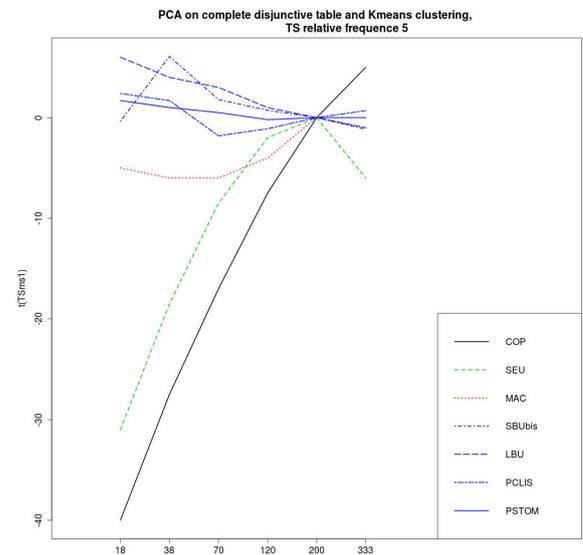
(a) ACM-KM sur données ref. 38kHz



(b) ACM-KM sur données ref. 70kHz



(c) ACM-KM sur données ref. 120kHz



(d) ACM-KM sur données ref. 200kHz

FIGURE 4.47 – **COP** : copépodes. **SEU** : petits euphausiacés. **MAC** : maquereaux. **SBU38** : petites bulles résonantes à 38 kHz. **LBU** : grosses bulles. **PCLIS** : poissons clisostomes. **PSTOM** : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.

Comparaison des méthodes de classification sur le jeu de données *in-situ* de 2 minutes

Echo-intégration par cellules de 1 ping

Dans cette partie sont annexés les résultats de l'application des méthodes de classification décrites dans la section 2.3 sur des données *in-situ* collectées pendant 2 minutes de prospection acoustique et écho-intégrées sur des cellules de 1 ping de long et 1 m de profondeur. Les résultats obtenus par la méthode de Ballon et al. (2011), de Trenkel & Berger (2013), ACM-KM sur les données centrées et brutes selon 3 et 5 groupes de cellules ont déjà été présentée dans le

manuscrit. Ici, sont répertoriés les résultats de l'application de la classification ACM-KM aux données centrées et brutes selon 4, 6 et 7 groupes de cellules.

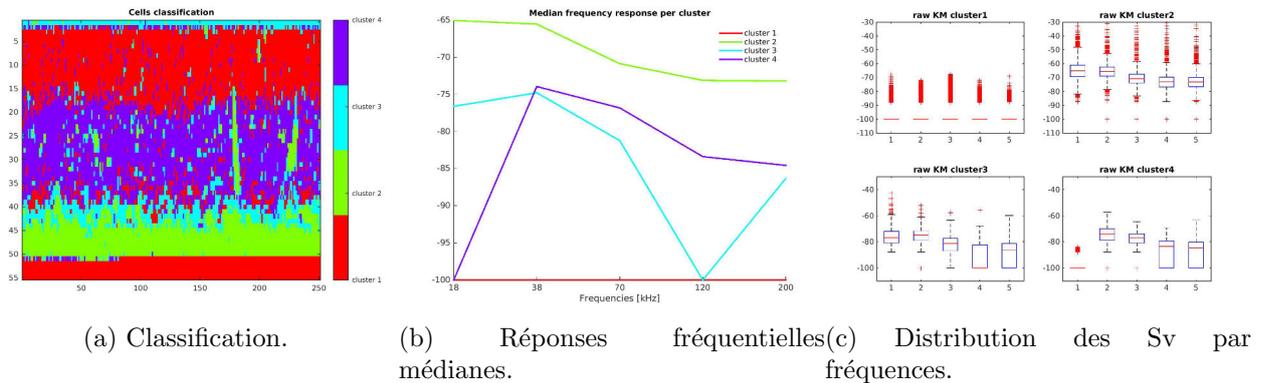


FIGURE 4.48 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 4 groupes.

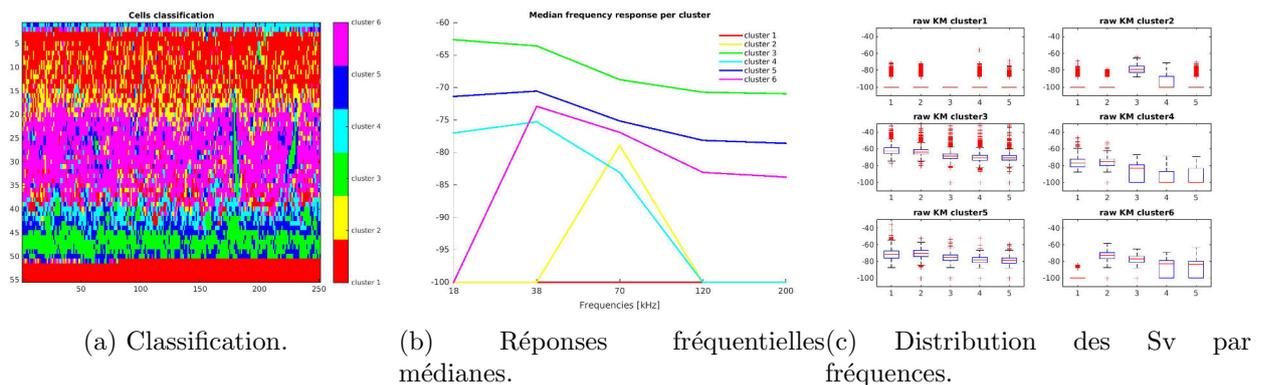


FIGURE 4.49 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 6 groupes.

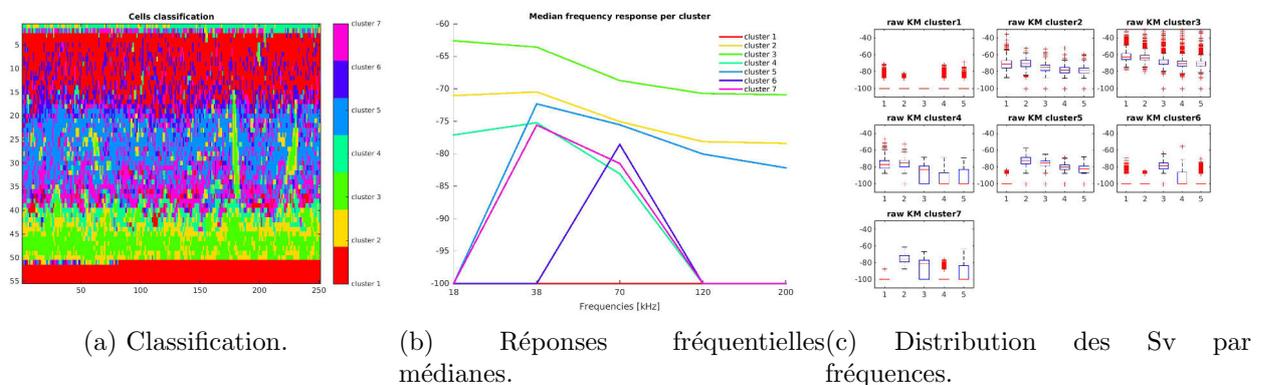


FIGURE 4.50 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 7 groupes.

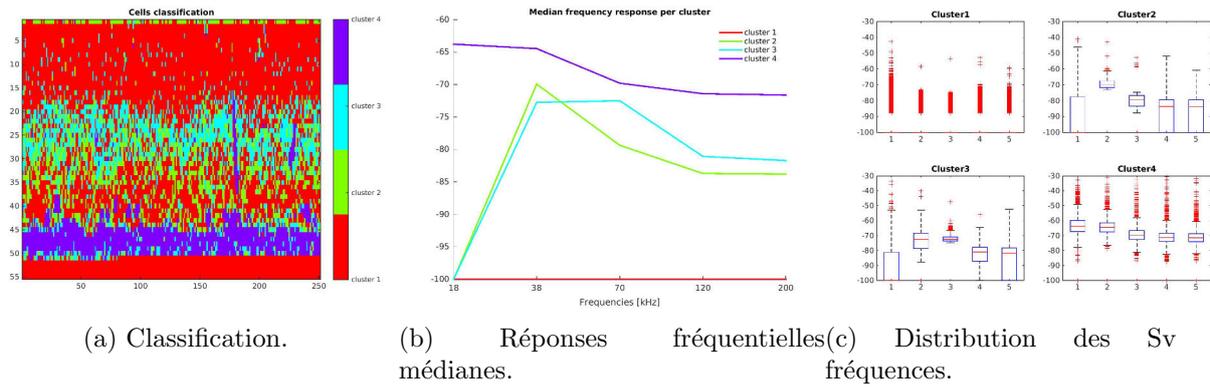


FIGURE 4.51 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 4 groupes.

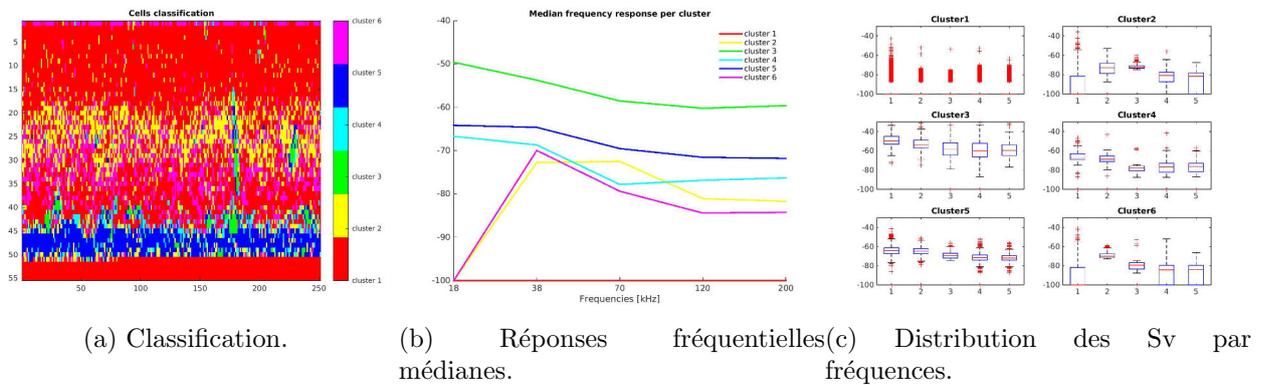


FIGURE 4.52 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 6 groupes.

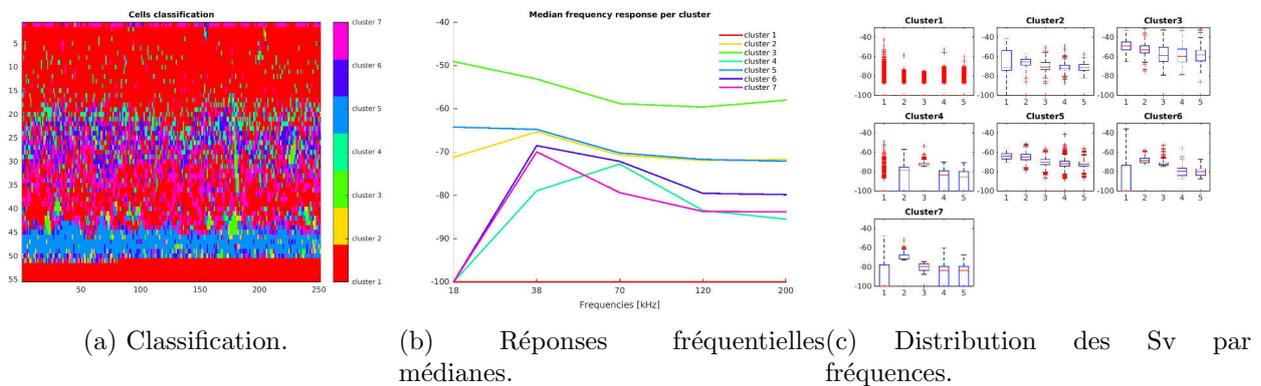


FIGURE 4.53 – Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 7 groupes.

Echo-intégration par cellules de 0.01 MN

Dans cette partie sont annexés les résultats de l'application des méthodes : Ballon, Trenkel, ACM-KM sur données brutes et centrées. Les résultats des deux dernières méthodes sont présentés pour 3, 4, 5, 6 et 7 groupes de cellules.

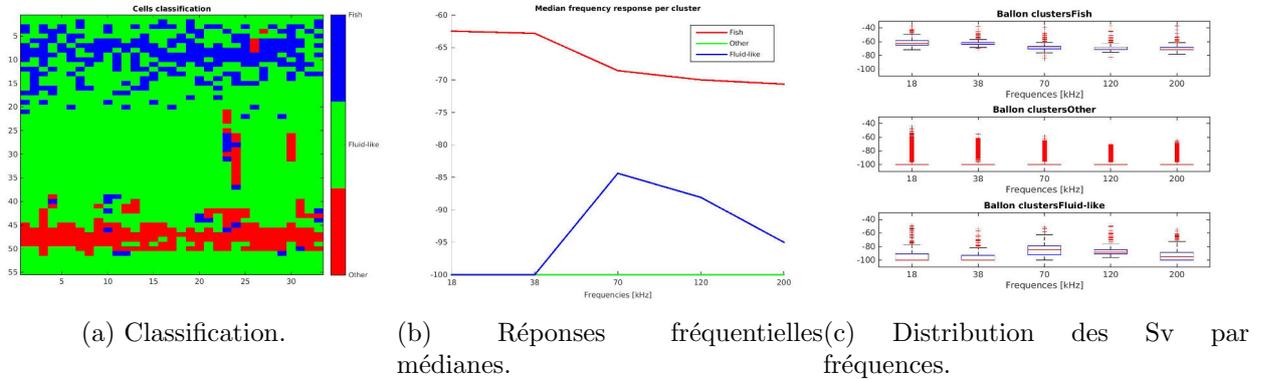


FIGURE 4.54 – Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).

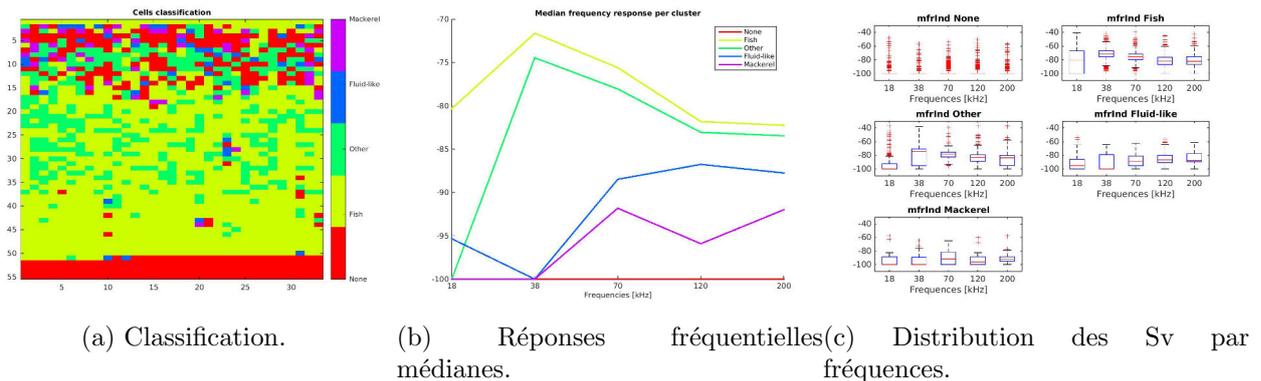


FIGURE 4.55 – Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).

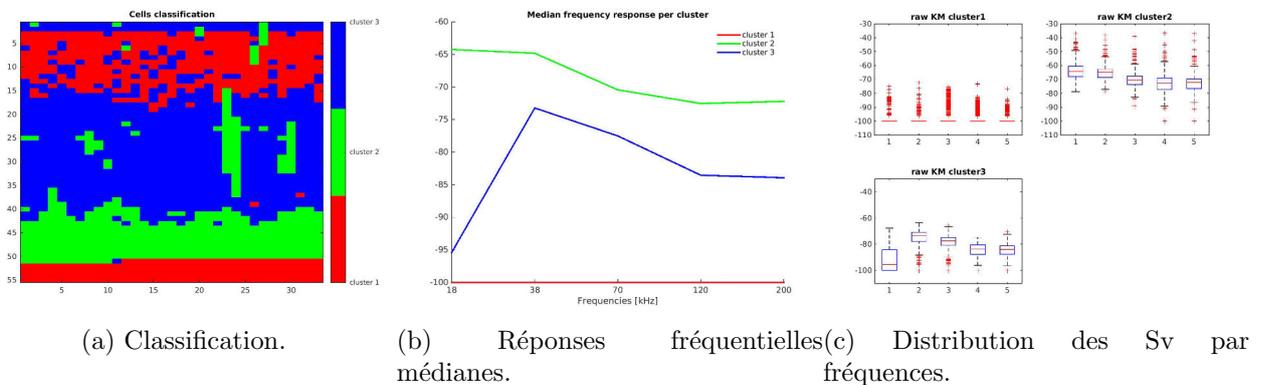


FIGURE 4.56 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.

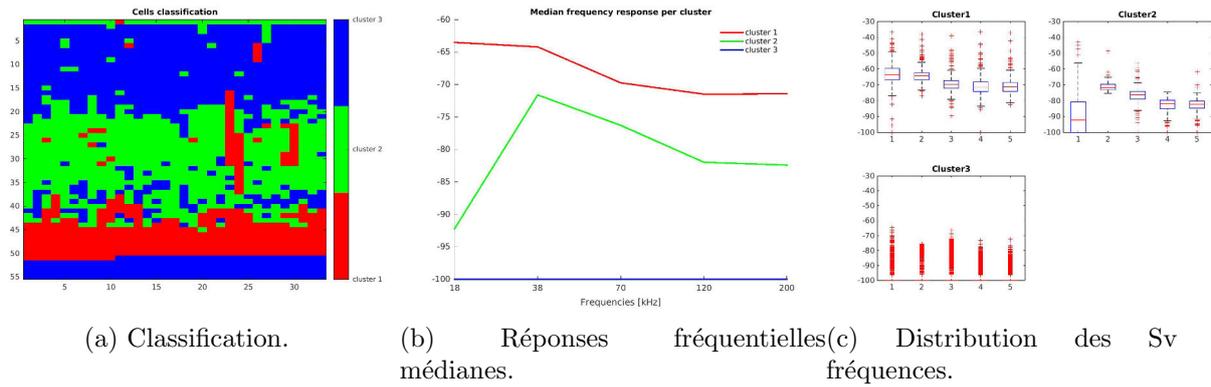


FIGURE 4.57 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.

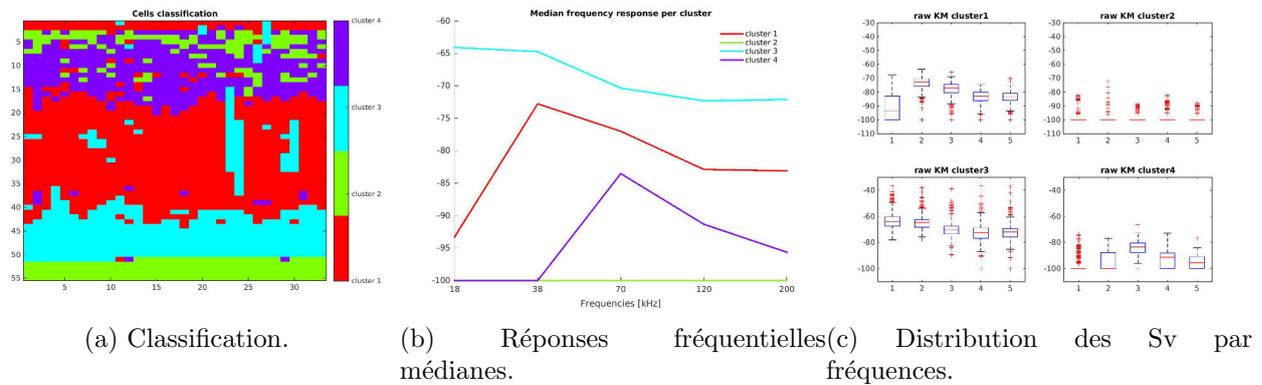


FIGURE 4.58 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.

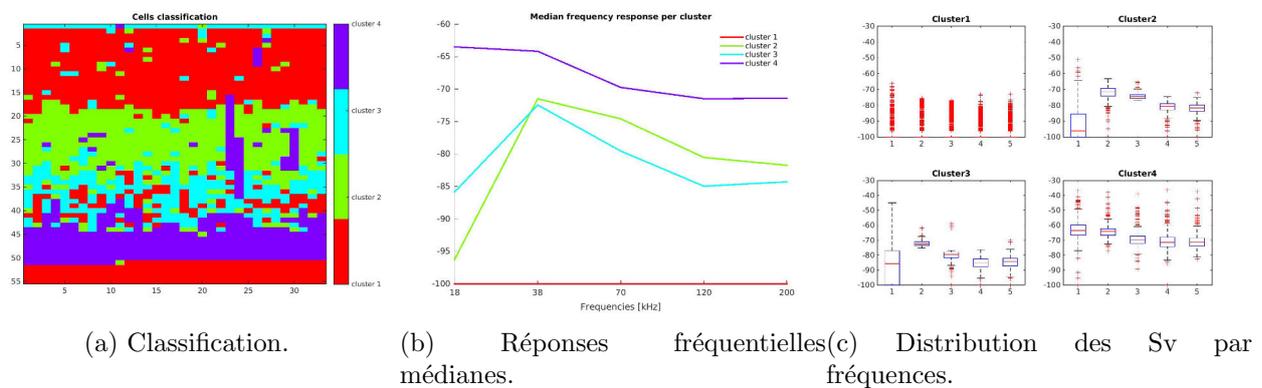


FIGURE 4.59 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.

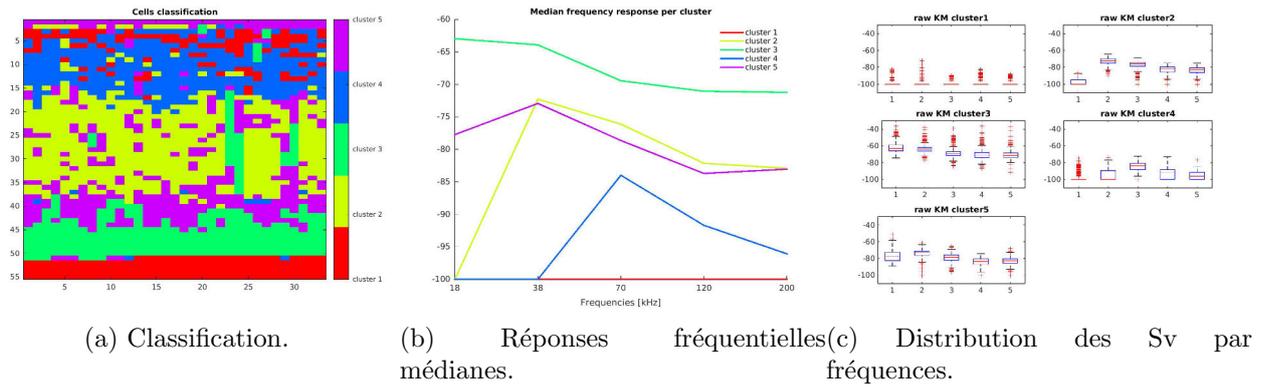


FIGURE 4.60 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.

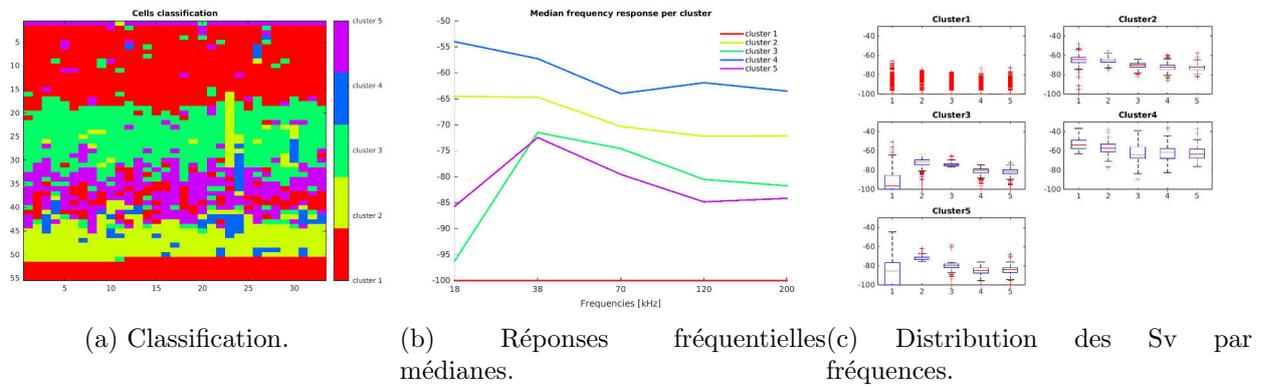


FIGURE 4.61 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.

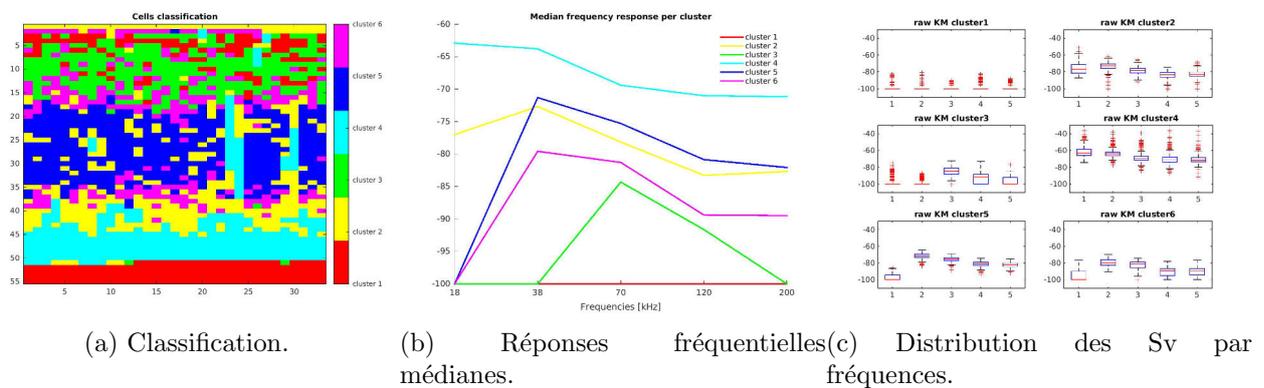


FIGURE 4.62 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.

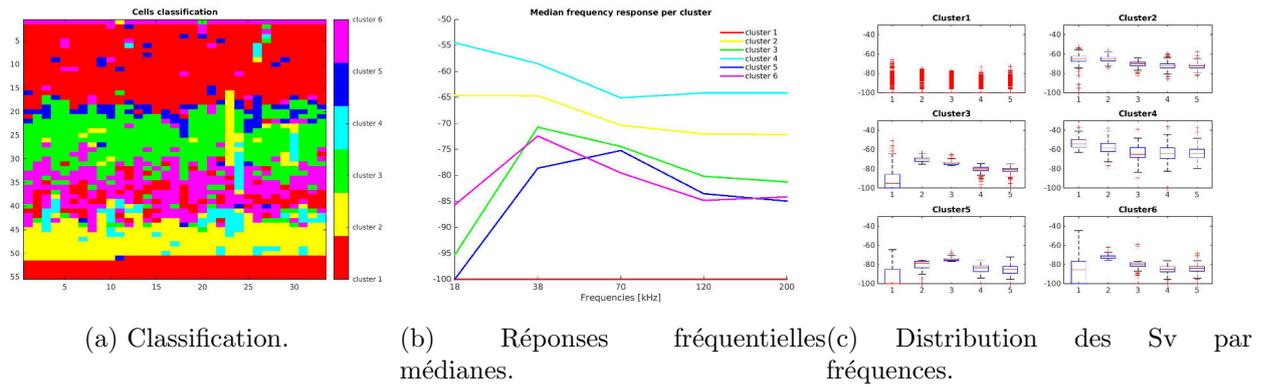


FIGURE 4.63 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.

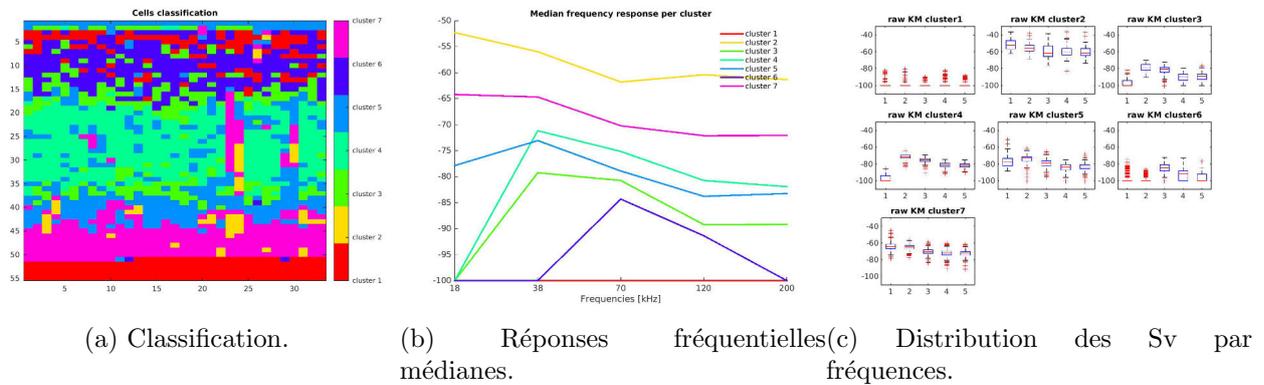


FIGURE 4.64 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.

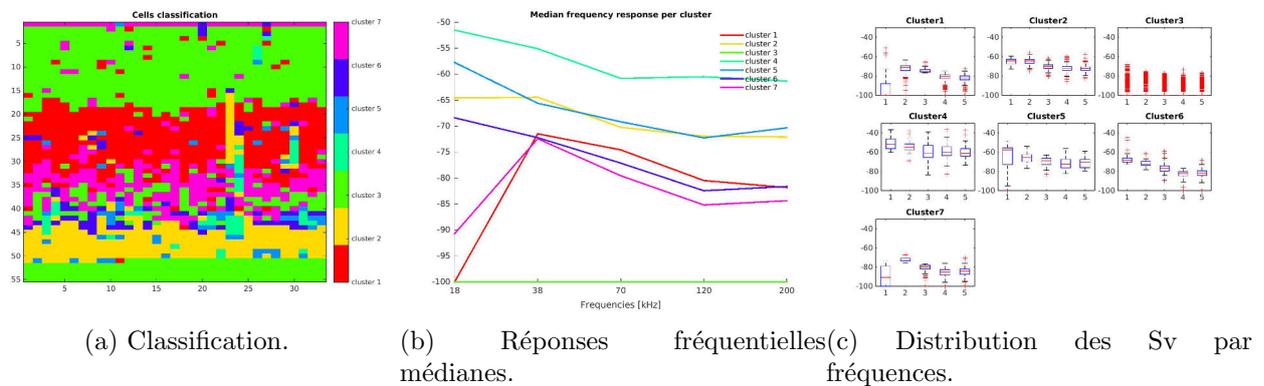


FIGURE 4.65 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.

Echo-intégration par cellules de 0.1 MN

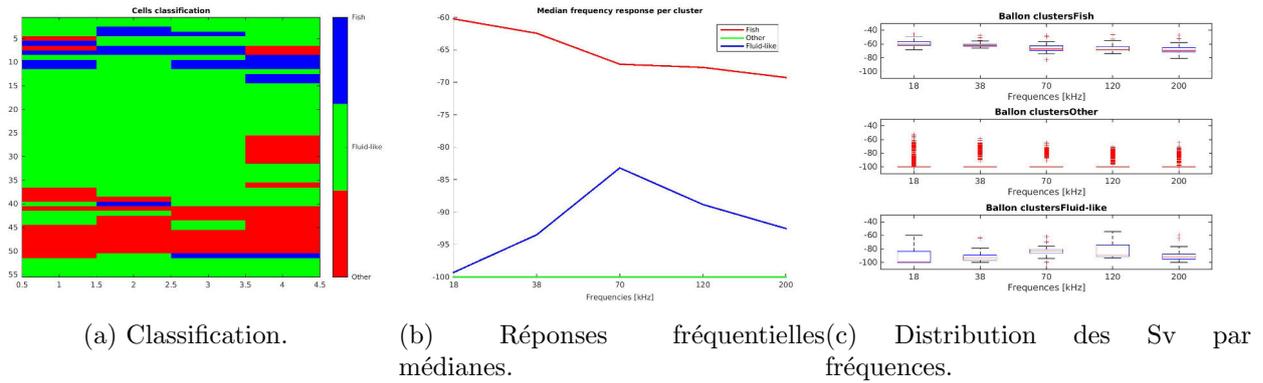


FIGURE 4.66 – Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).

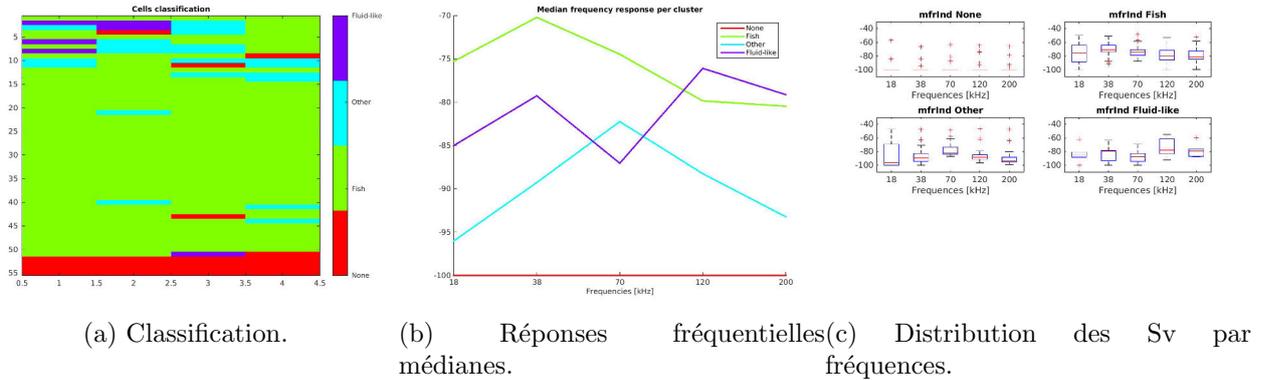


FIGURE 4.67 – Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).

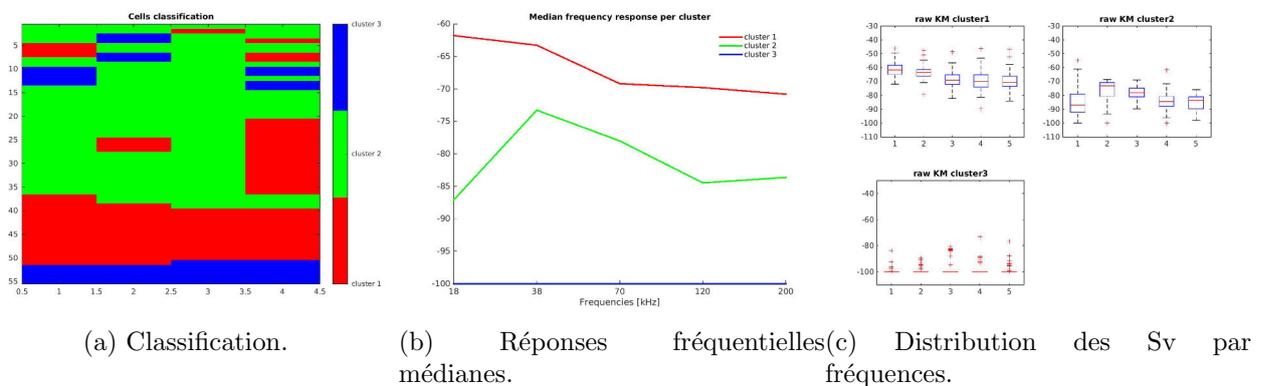


FIGURE 4.68 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.

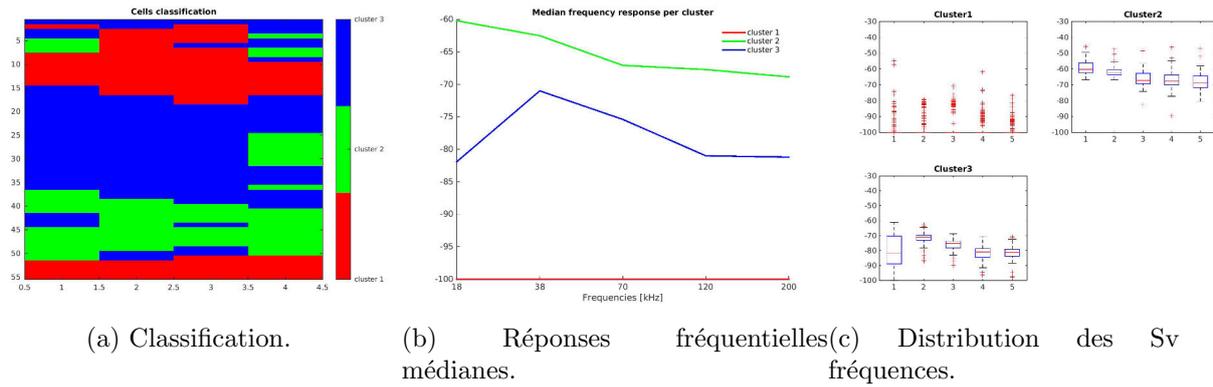


FIGURE 4.69 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.

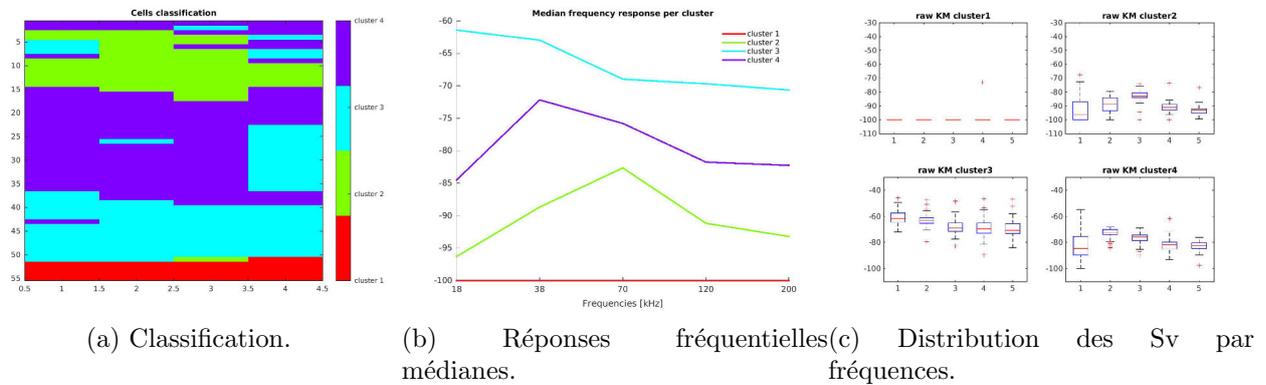


FIGURE 4.70 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.

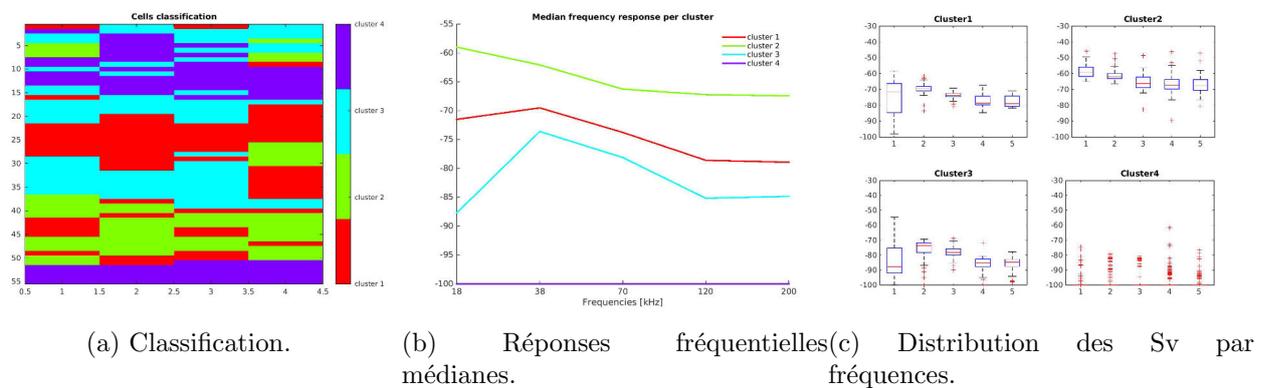


FIGURE 4.71 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.

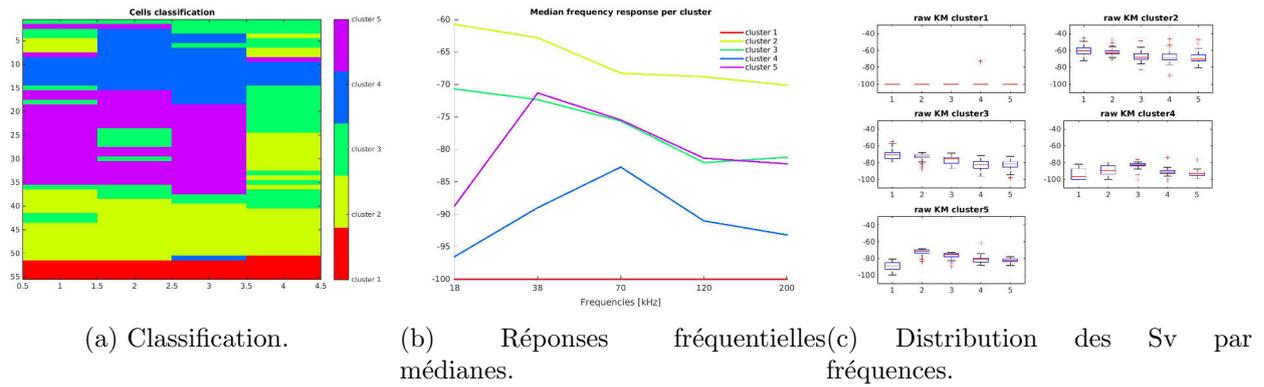


FIGURE 4.72 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.

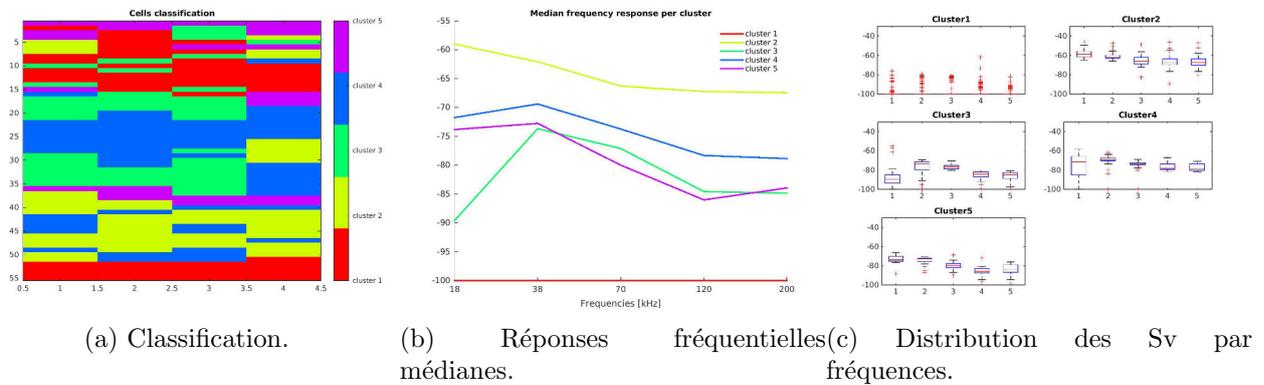


FIGURE 4.73 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.

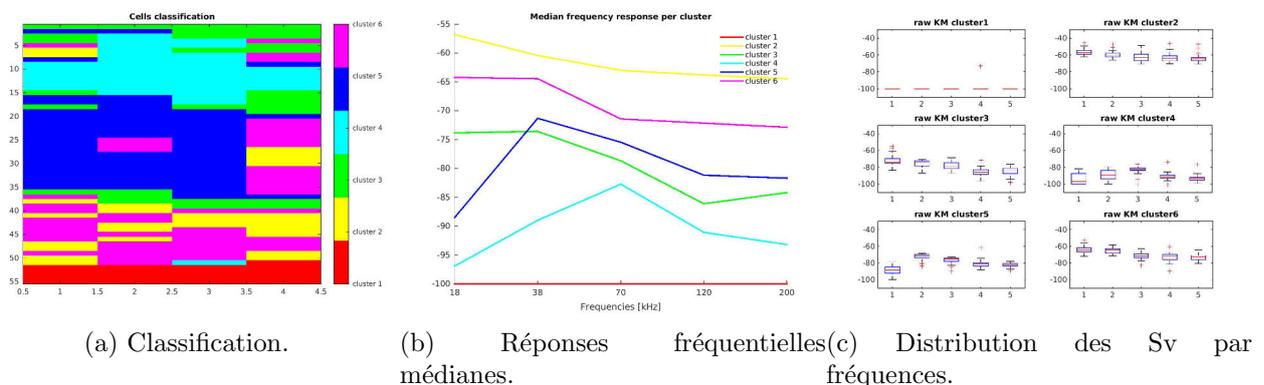


FIGURE 4.74 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.

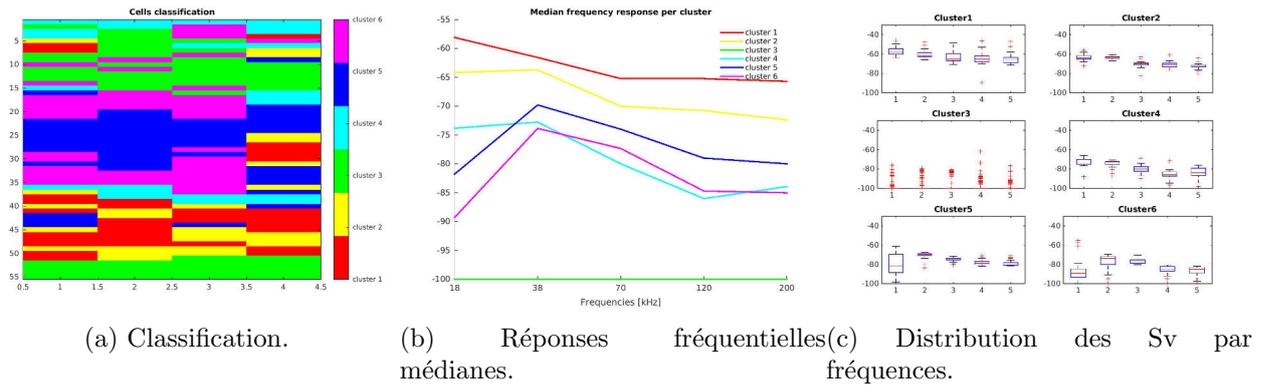


FIGURE 4.75 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.

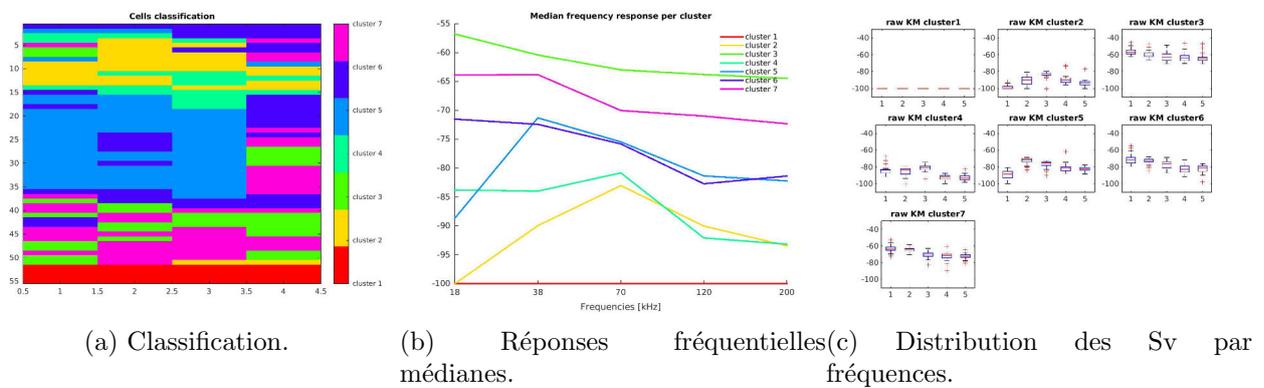


FIGURE 4.76 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.

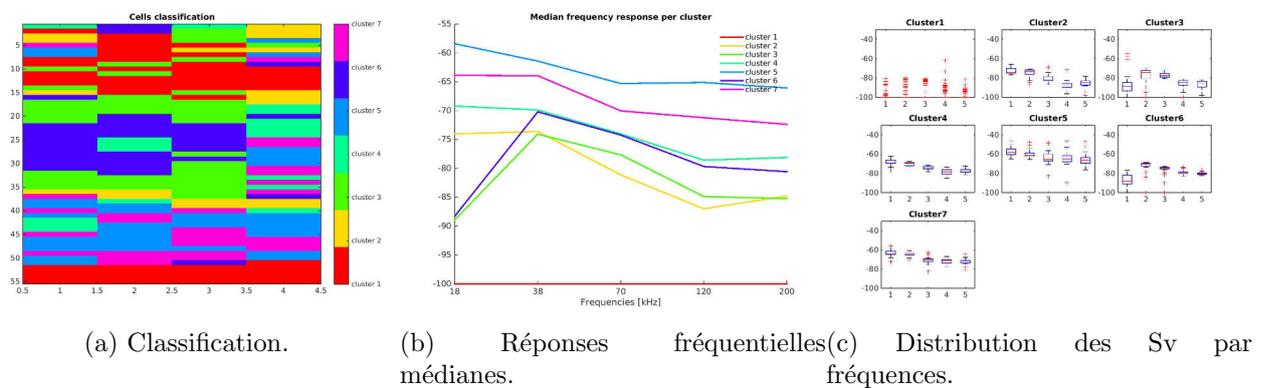


FIGURE 4.77 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.

Comparaison des méthodes de classification sur le jeu de données *in-situ* de 1h

Echo-intégration par cellules de 1 ping

Dans cette partie sont annexés les résultats de l'application des méthodes de classification décrites dans la section 2.3 sur des données *in-situ* collectées pendant 1h de prospection acoustique et écho-intégrées sur des cellules de 1 ping de long et 1 m de profondeur. Les résultats obtenus par la méthode de Ballou et al. (2011), de Trenkel & Berger (2013), ACM-KM sur les données centrées et brutes selon 3 et 5 groupes de cellules ont déjà été présentée dans le manuscrit. Ici, sont répertoriés les résultats de l'application de la classification ACM-KM aux données centrées et brutes selon 4, 6 et 7 groupes de cellules.

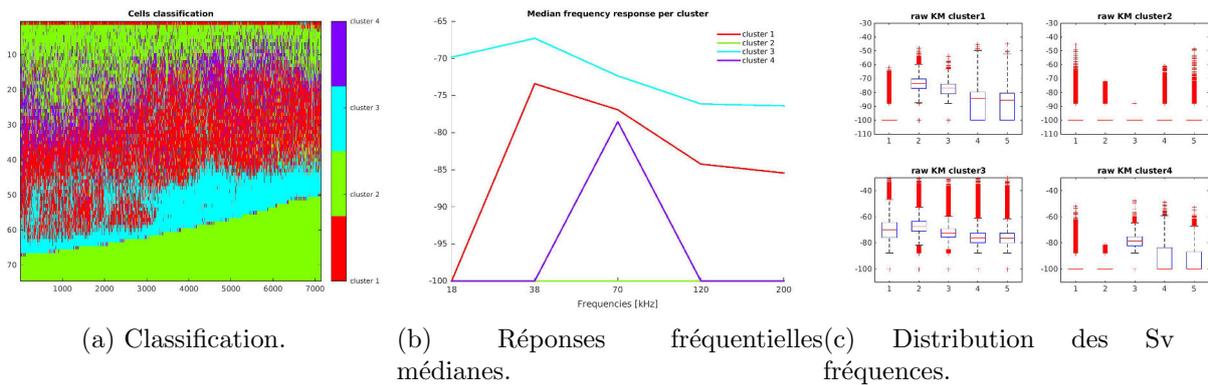


FIGURE 4.78 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.

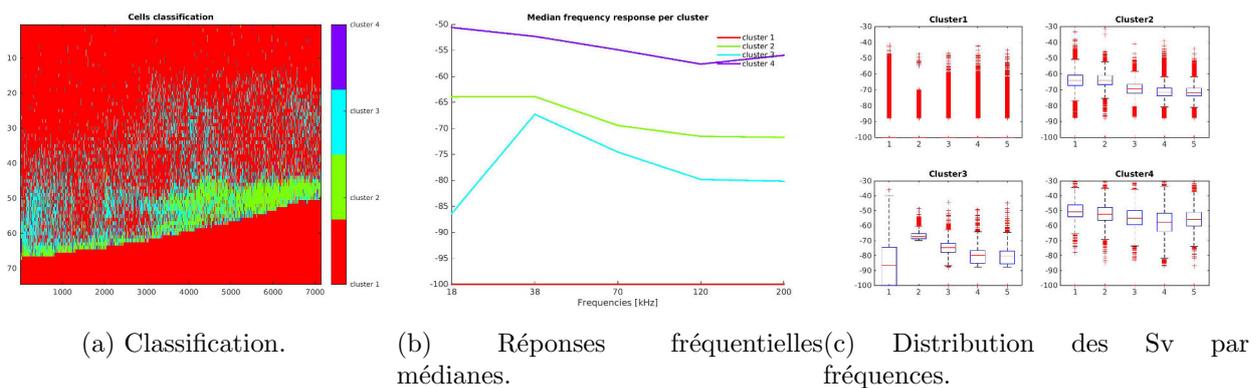


FIGURE 4.79 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.

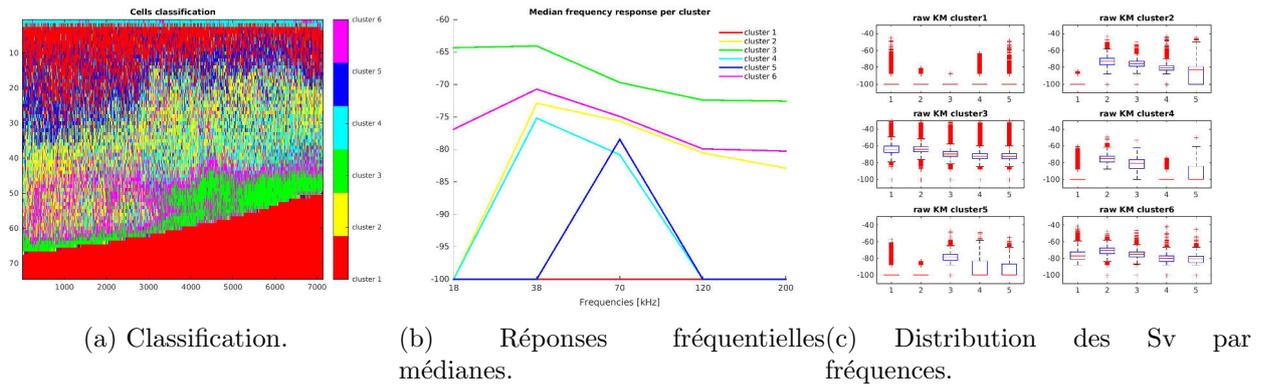


FIGURE 4.80 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.

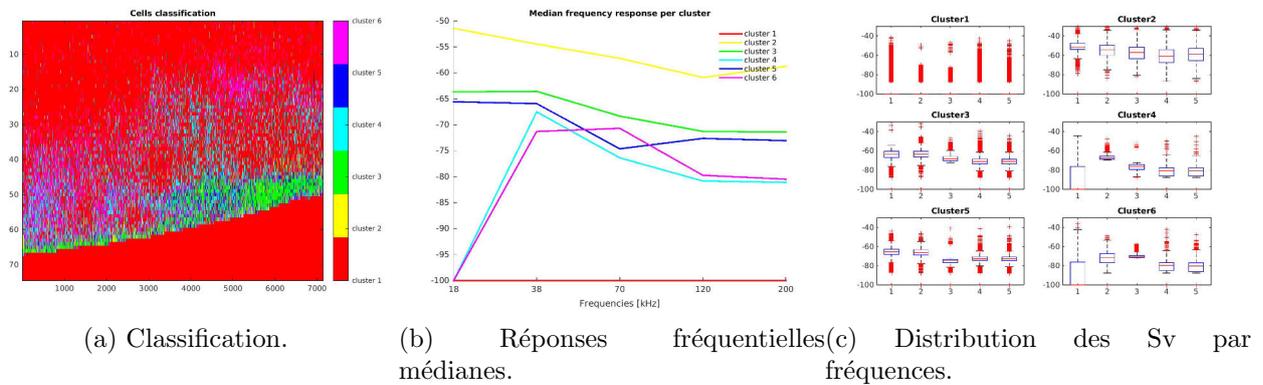


FIGURE 4.81 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.

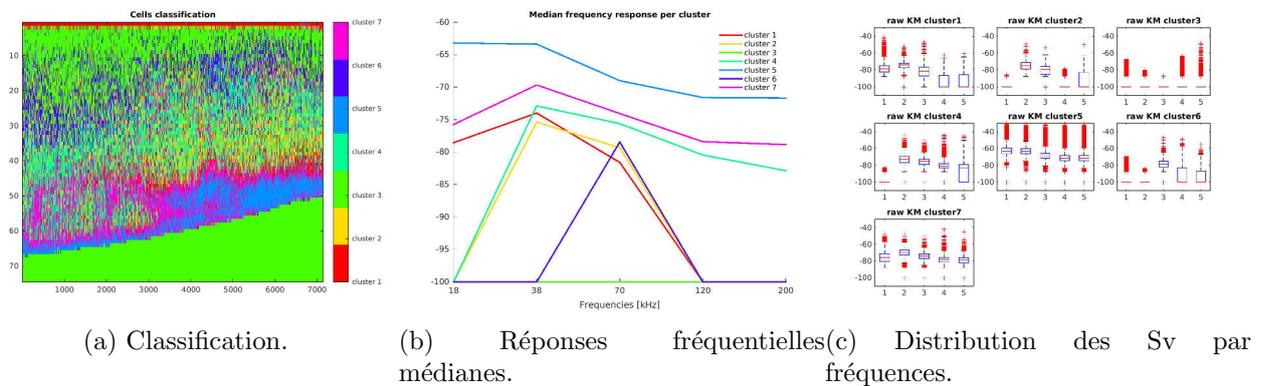
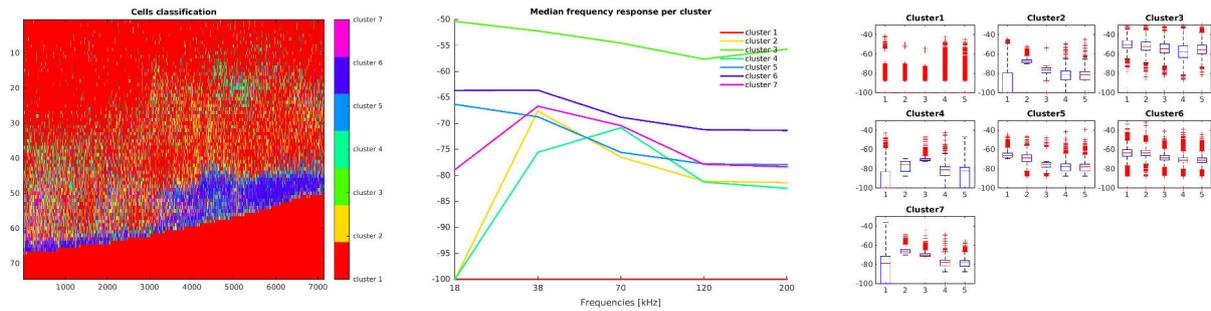


FIGURE 4.82 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.



(a) Classification. (b) Réponses fréquentielles médianes. (c) Distribution des Sv par fréquences.

FIGURE 4.83 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.

Echo-intégration par cellules de 0.01 MN

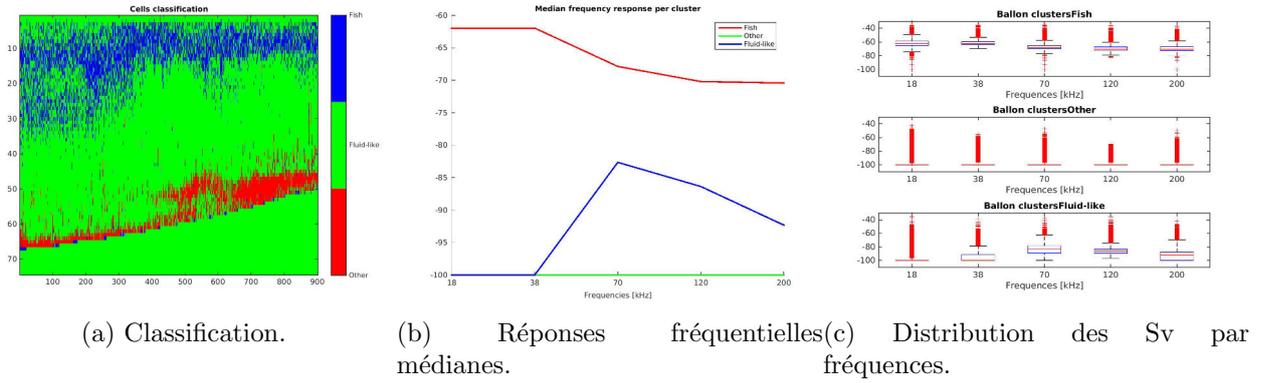


FIGURE 4.84 – Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).

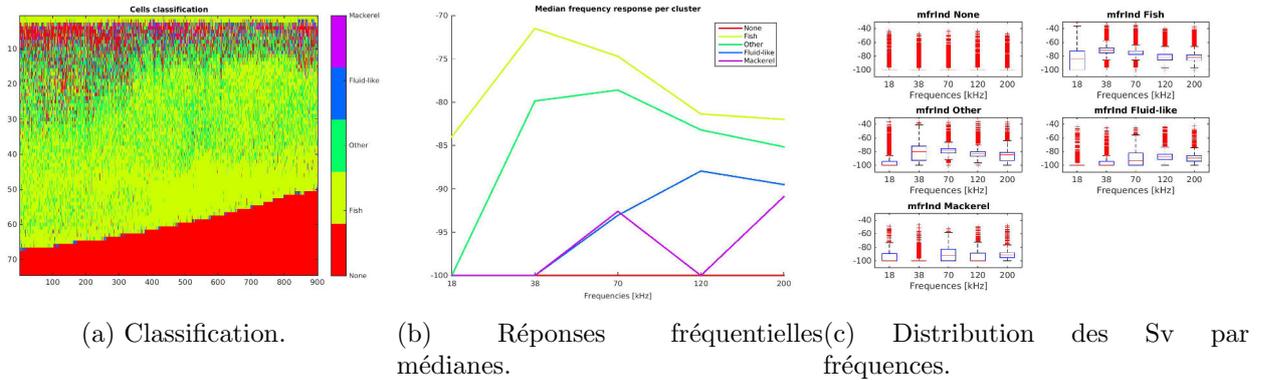


FIGURE 4.85 – Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).

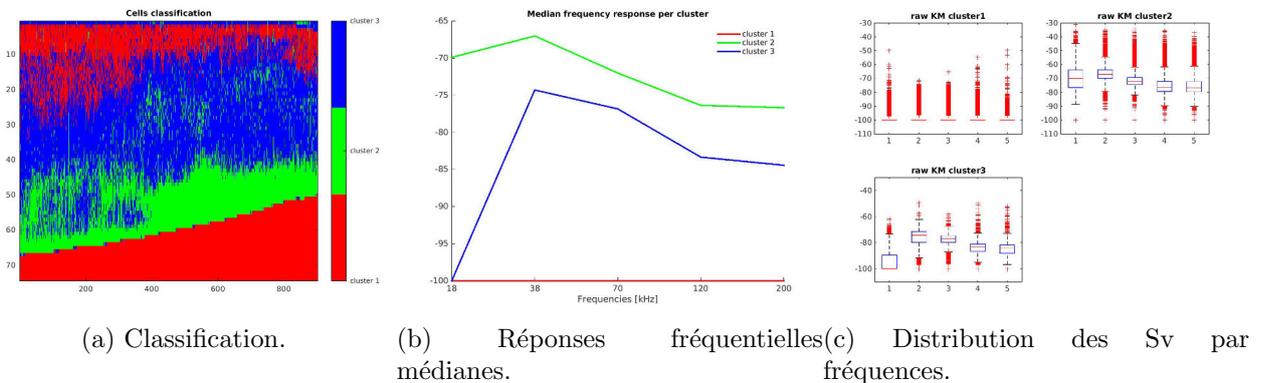


FIGURE 4.86 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.

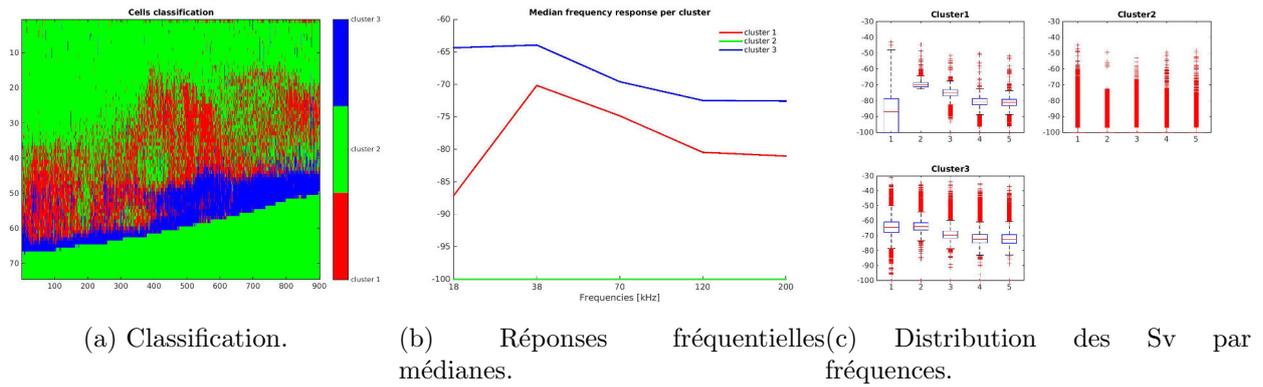


FIGURE 4.87 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.

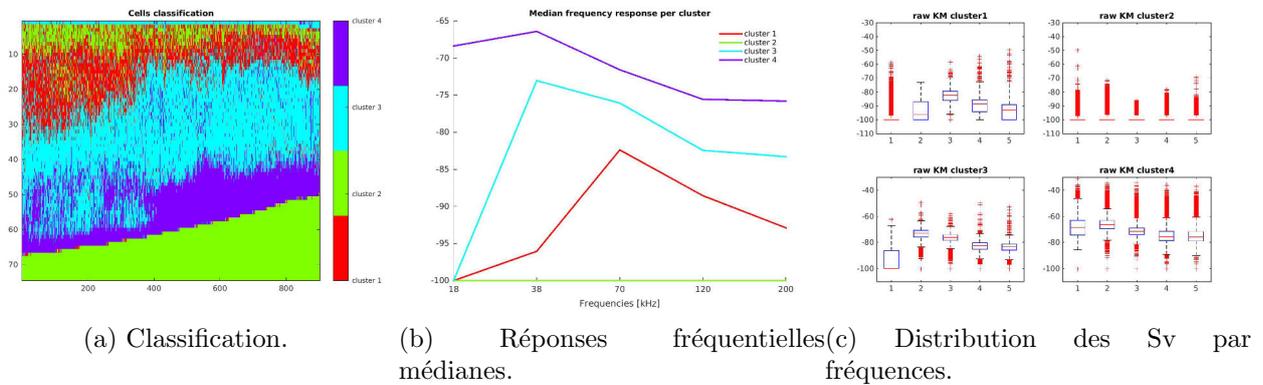


FIGURE 4.88 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.

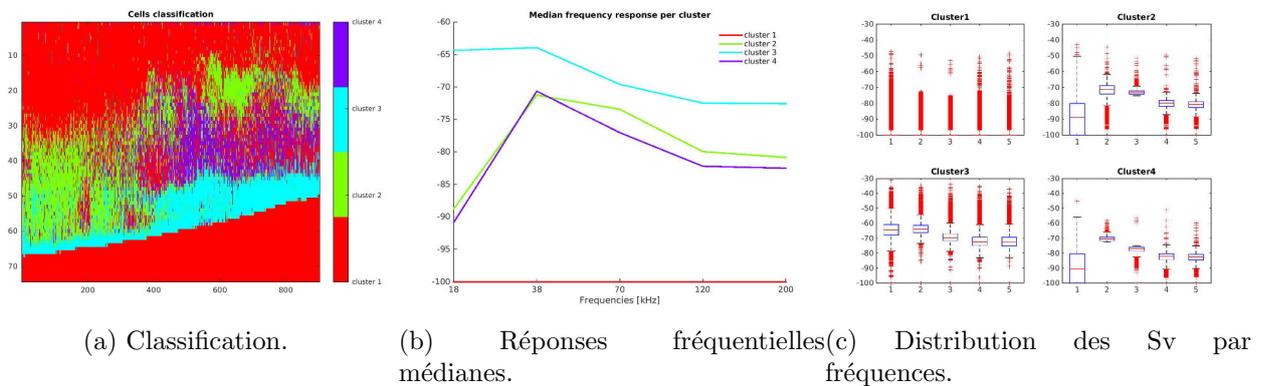


FIGURE 4.89 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.

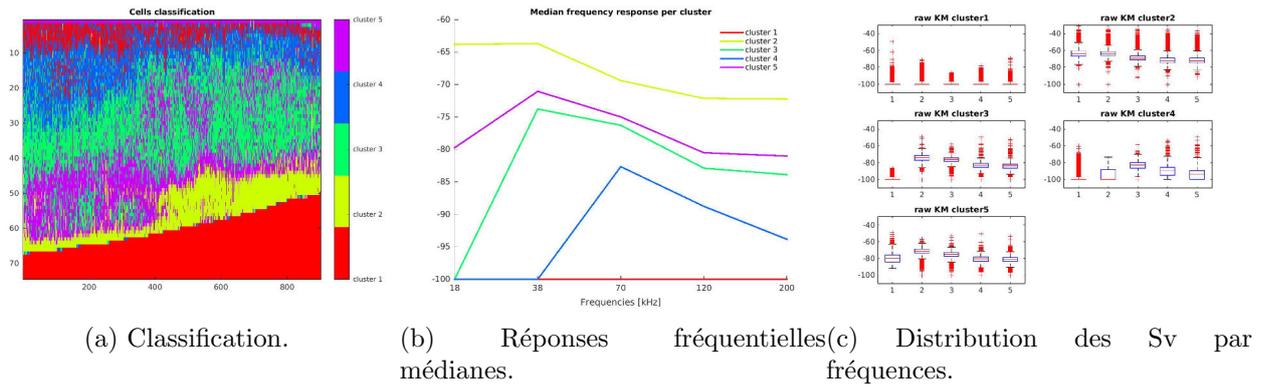


FIGURE 4.90 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.

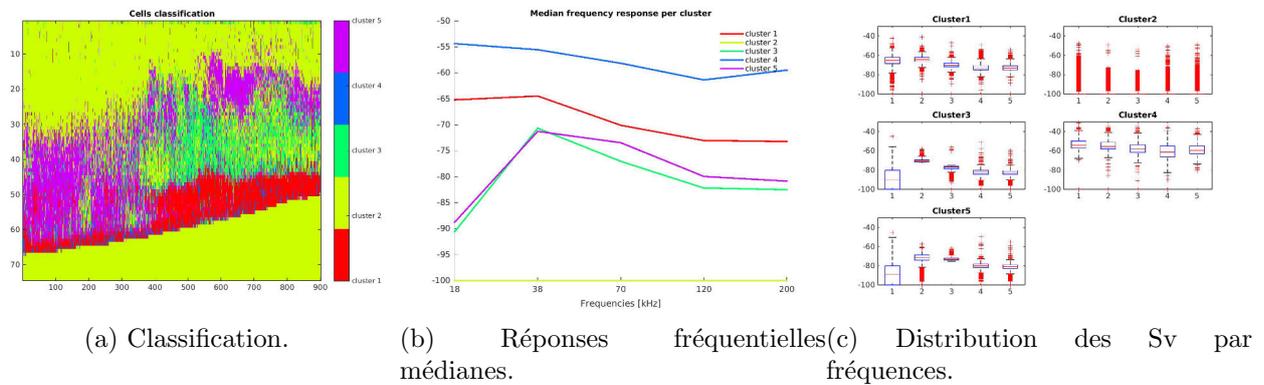


FIGURE 4.91 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.

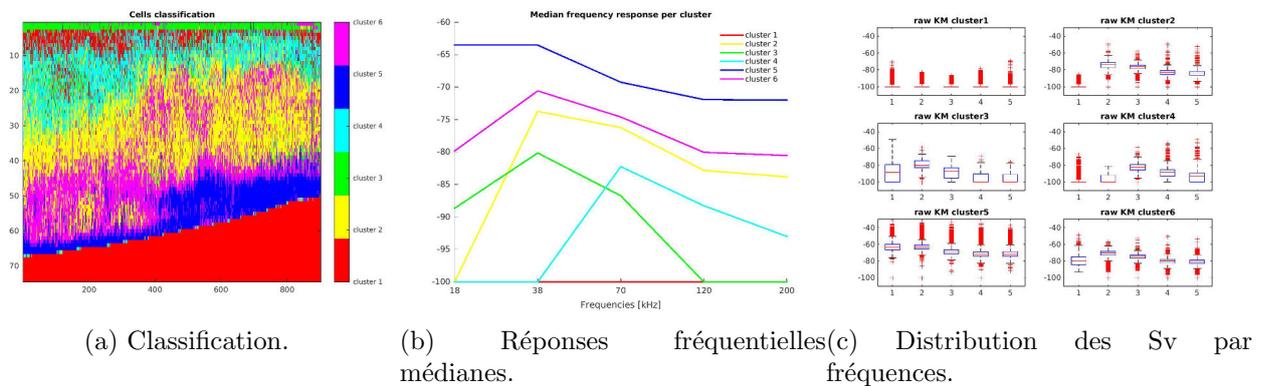


FIGURE 4.92 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.

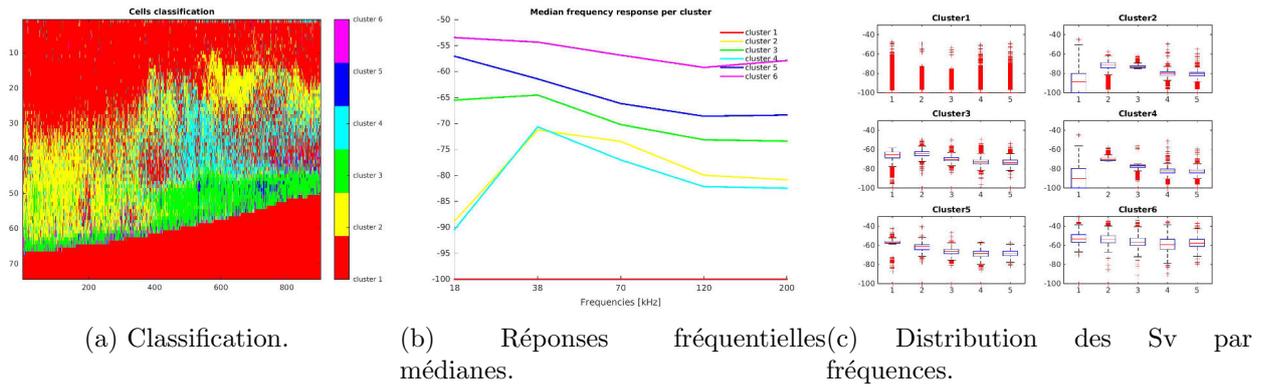


FIGURE 4.93 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.

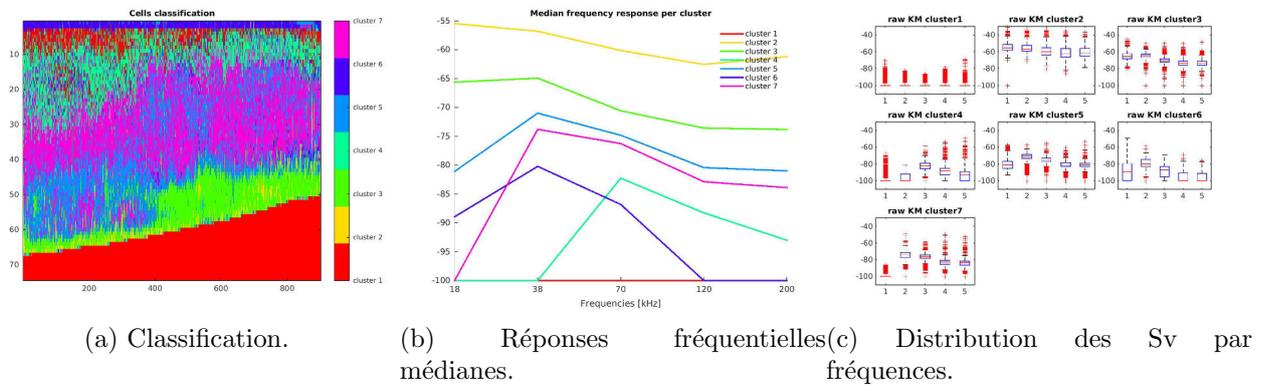


FIGURE 4.94 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.

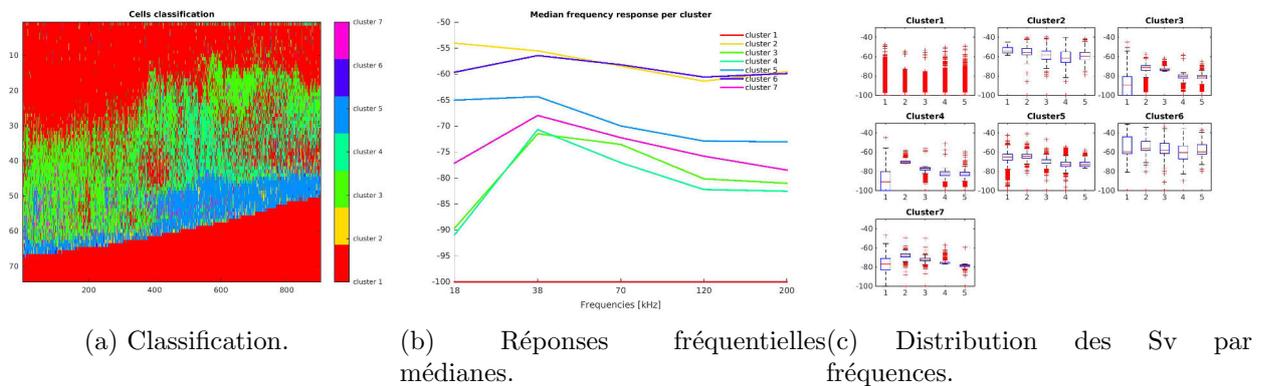


FIGURE 4.95 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.

Echo-intégration par cellules de 0.1 MN

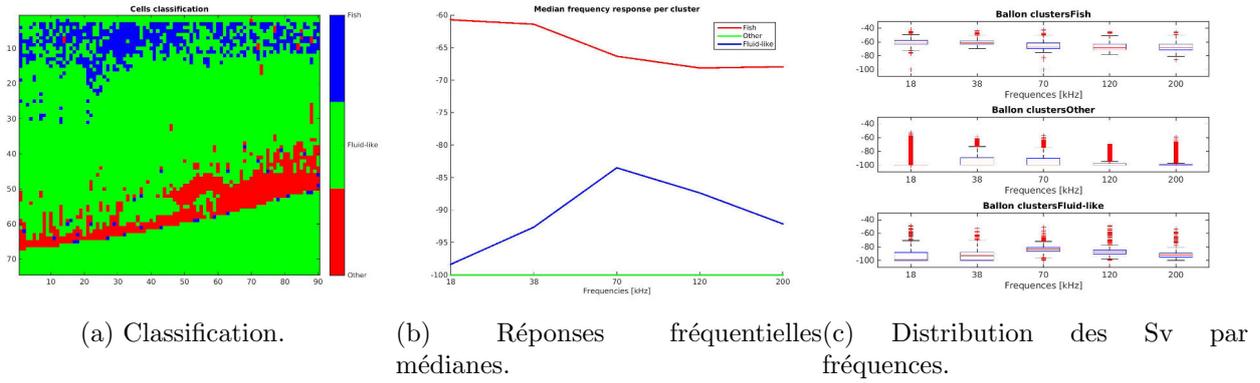


FIGURE 4.96 – Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).

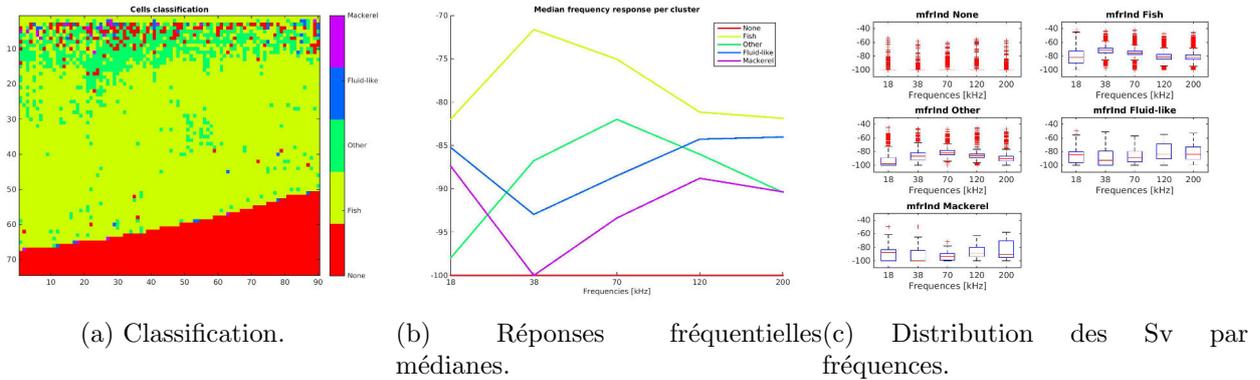


FIGURE 4.97 – Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).

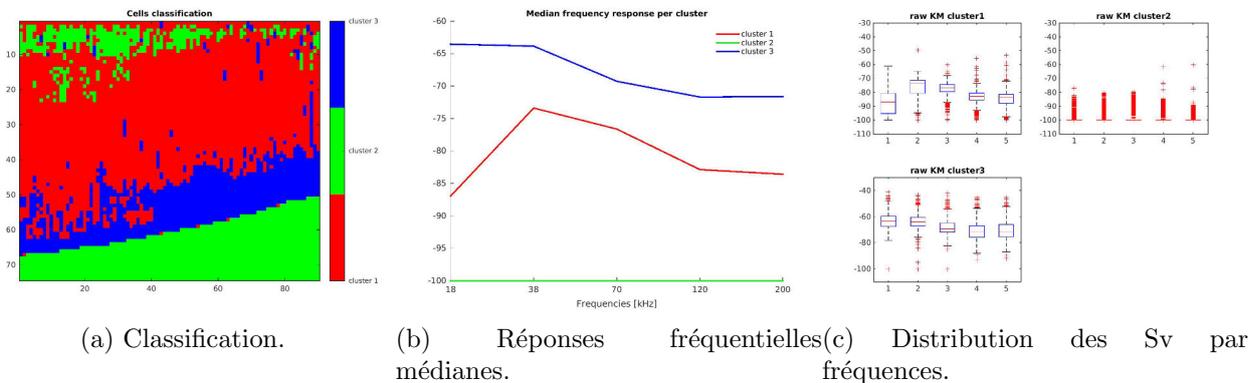


FIGURE 4.98 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.

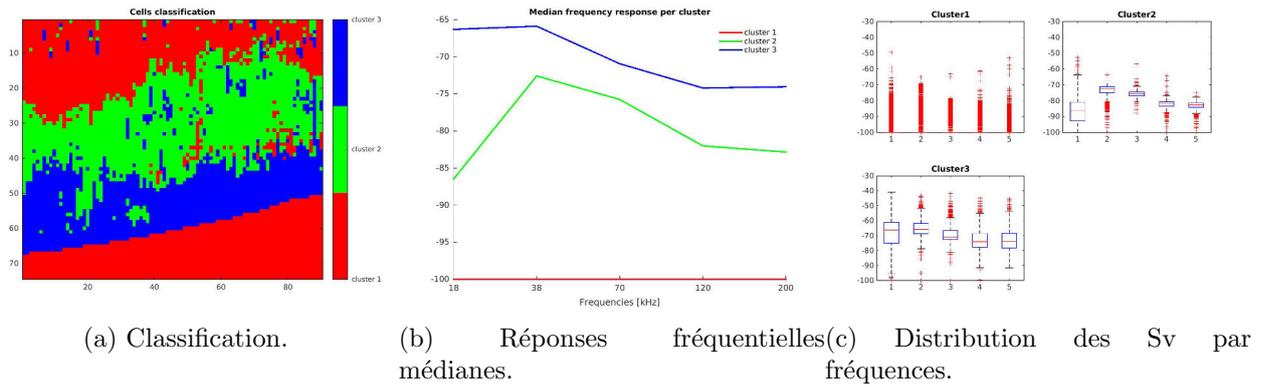


FIGURE 4.99 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.

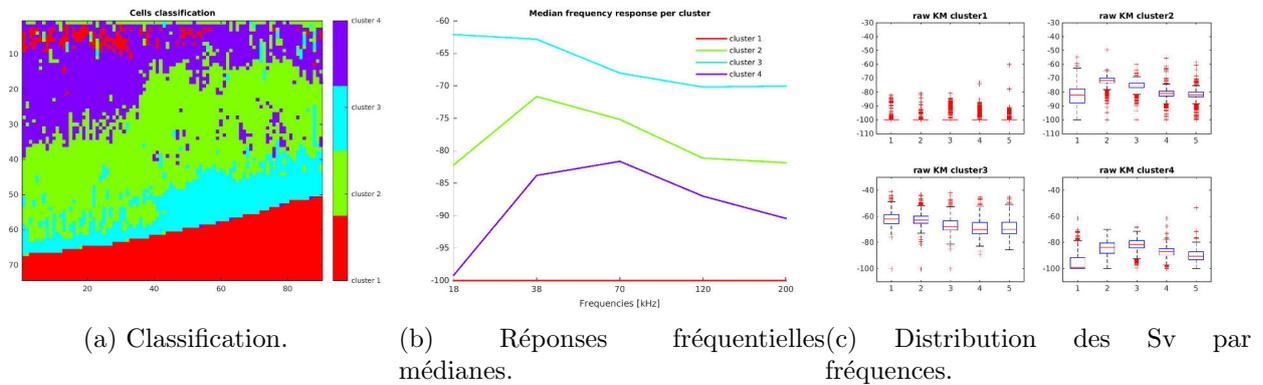


FIGURE 4.100 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.

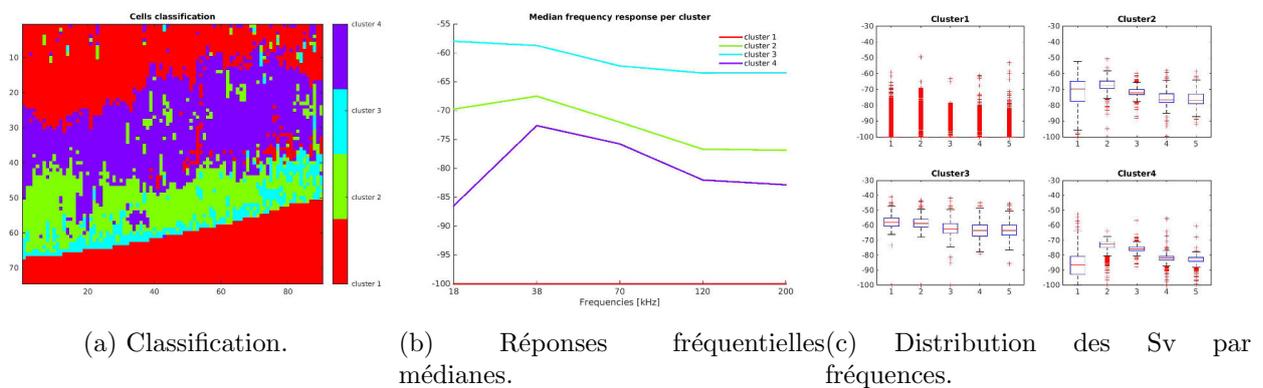


FIGURE 4.101 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.

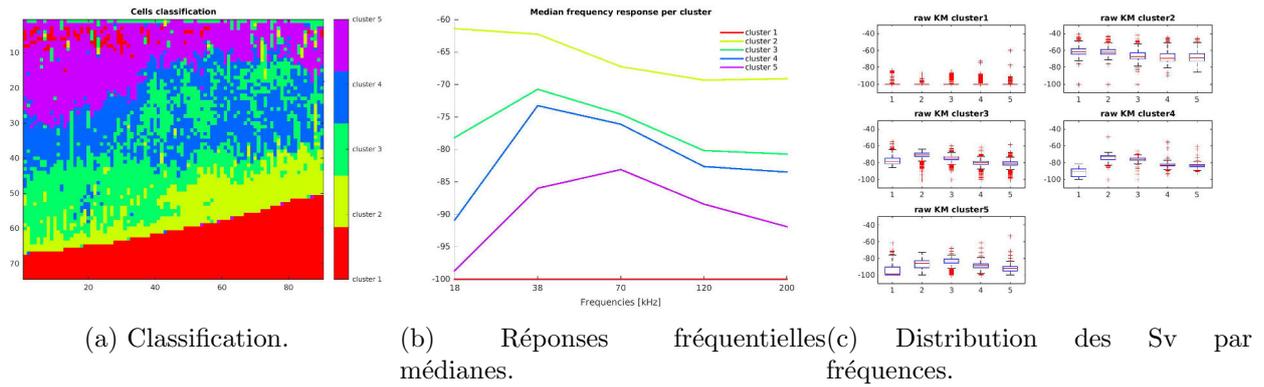


FIGURE 4.102 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.

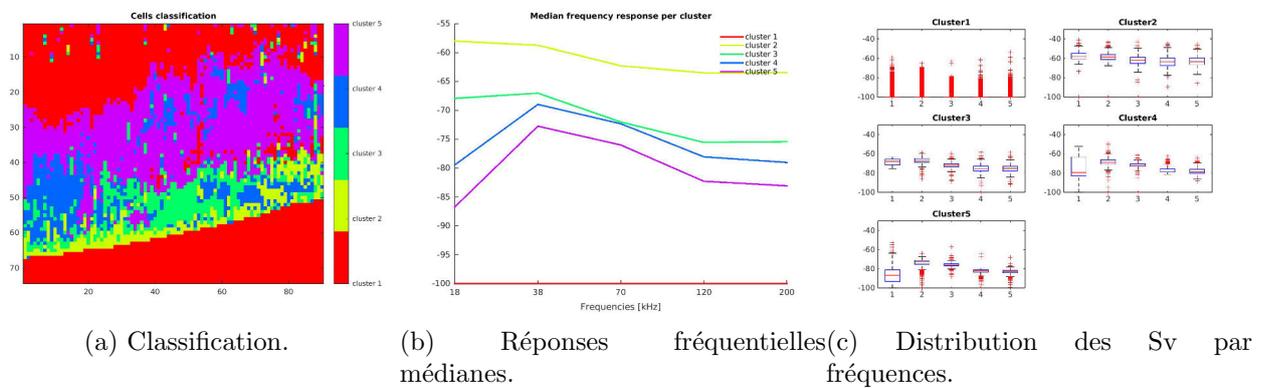


FIGURE 4.103 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.

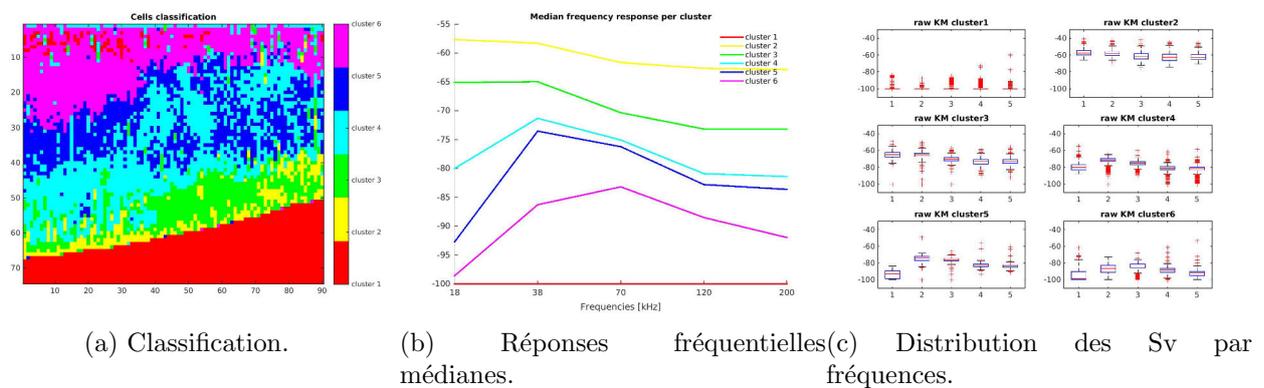


FIGURE 4.104 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.

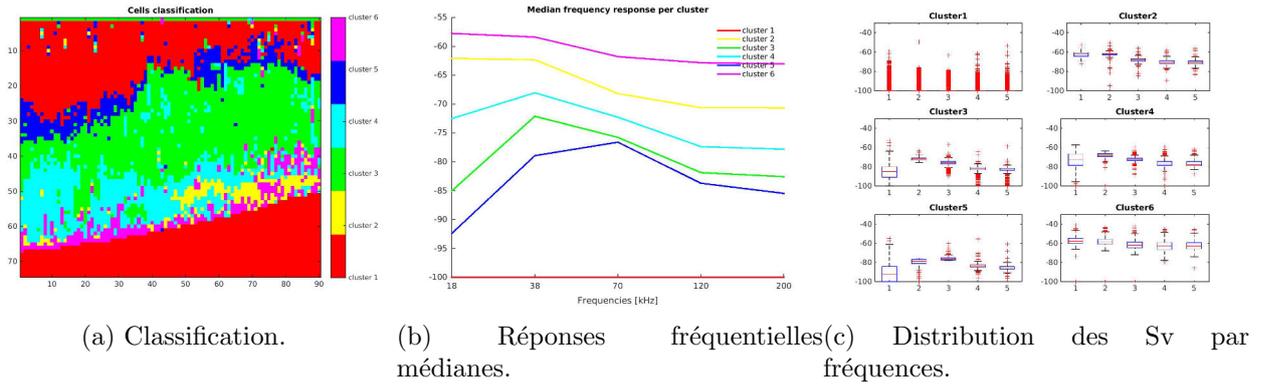


FIGURE 4.105 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.

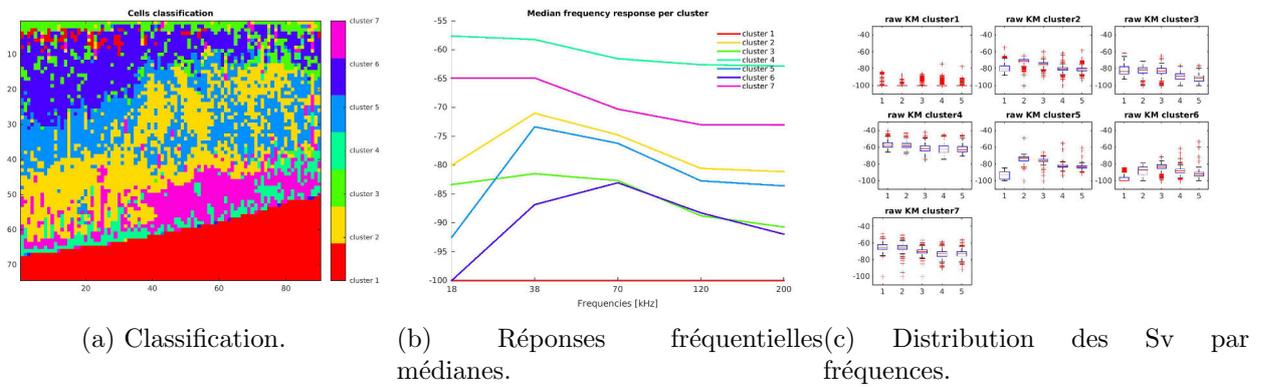


FIGURE 4.106 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.

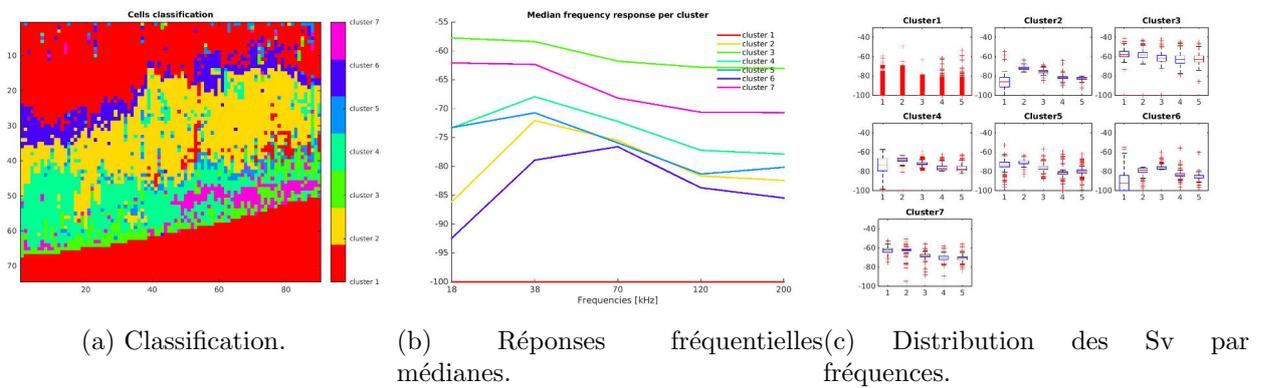


FIGURE 4.107 – Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.

Annexe II - Plan du filet *Midwater Ringnet Trawl* (MIK)

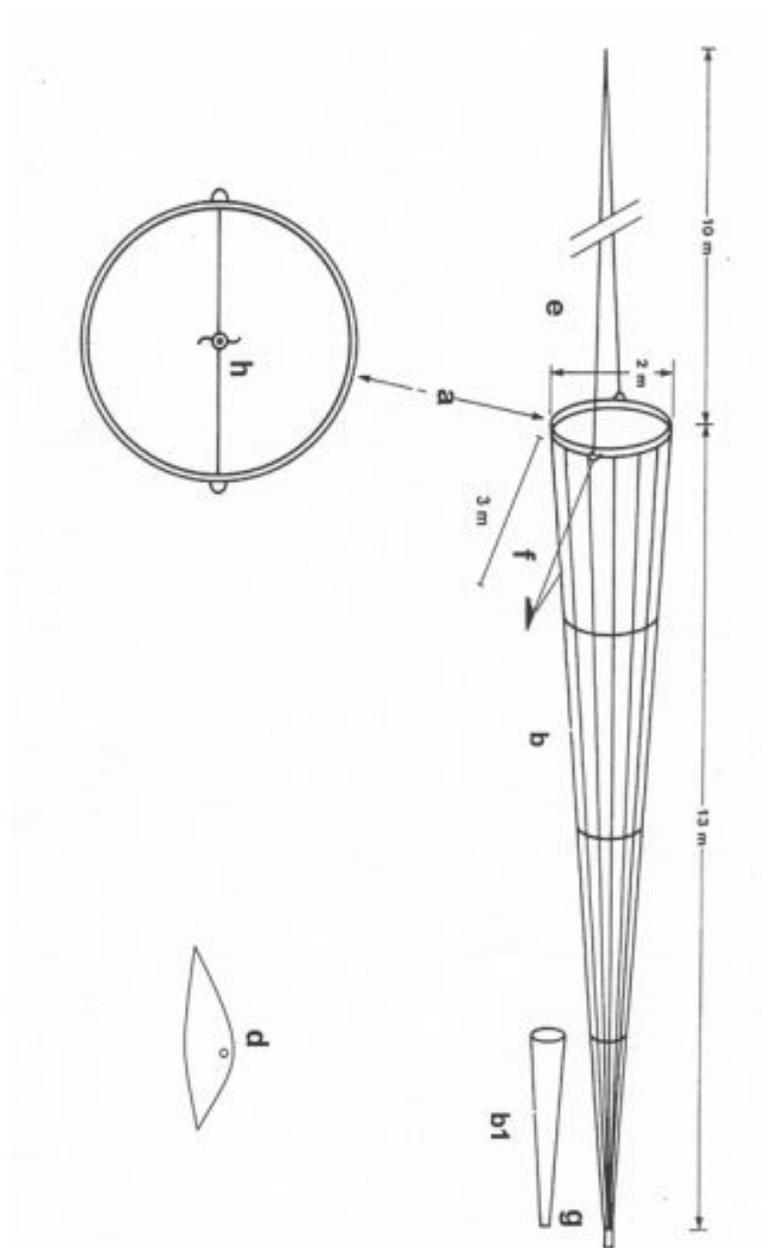


FIGURE 4.108 – Plan du filet à micro-necton *Midwater Ringnet Trawl* (MIK, ICES (2013)). *d* : poids pour stabiliser le filet qui pèse ~ 100 kg. *b* : filet noir de maille 1.6 mm et de 13 m de longueur. *b1* : au cul du filet un filet de maille 500 µm est inséré. *e* : deux funes de 10 m de long. *f* : deux bouts de 3 m pour fixer le poids. *g* : collecteur de 11 cm de diamètre pour récupérer les échantillons de plancton. *h* : débimètre positionné au centre de l'ouverture circulaire du MIK.

Table des figures

1	Localisation d'exemples d'études qui ont collecté des données acoustiques et ont fait l'observation de couches diffusantes.	11
1.1	Schéma de la propagation d'ondes acoustiques illustrant le changement de pression entre les périodes de compression et d'expansion. Schéma modifié d'après Simmonds & MacLennan (2005)	18
1.2	Schéma de la fonction de directivité d'un faisceau acoustique. Le lobe principal contient la majeure partie d'intensité acoustique du faisceau. L'énergie restante forme les lobes secondaires. D'après Diner & Marchand (1995)	18
1.3	Variation de l'aire insonifiée et de l'intensité acoustique avec l'ouverture du faisceau acoustique. Dans le champs proche, ou zone aveugle, les fronts d'onde impulsées par les différents éléments du transducteur ne sont pas en phase et la relation entre l'intensité et la distance au transducteur est complexe. Dans le champ lointain, les fronts d'onde sont en phase et la relation entre l'intensité et la distance est connue. D'après Diner & Marchand (1995)	19
1.4	Illustration de la réflexion. (a) cas d'une onde réfléchie par une surface plate. Les angles d'incidence et de réflexion (α) sont égaux. (b) cas d'une onde acoustique impulsée par un transducteur rétro-diffusée par une surface plate. La flèche en pointillés représente la rétro-diffusion enregistrée par le sondeur.	20
1.5	Réponse fréquentielle d'une cible. Lorsque la fréquence du faisceau acoustique est proche de la taille de la cible, l'intensité rétro-diffusée augmente rapidement en pic à la fréquence de résonance. Lorsque la fréquence du faisceau est inférieure à la fréquence de résonance, elle est dans la zone de Rayleigh, lorsque la fréquence du faisceau est supérieure, elle est dans la zone géométrique. D'après Simmonds & MacLennan (2005).	21
1.6	Schémas illustrant le phénomène de résonance. (a) A l'état d'équilibre la pression du gaz dans la bulle est équivalent à la pression environnante. (b) La bulle entre en résonance suite à sa perturbation par une onde acoustique. (c) Une onde acoustique détecte une bulle en résonance, l'énergie acoustique enregistrée est très forte par rapport à l'énergie envoyé par le transducteur.	22
1.7	Exemple d'un échogramme obtenu avec un écho-sondeur émettant à 38 kHz. La ligne épaisse de couleur foncée, en bas de la figure, représente le fond de la mer. La ligne épaisse en haut de la figure, représente la zone aveugle du sondeur. Les écho-traces les plus rouges sont les plus intenses (cf. bancs de poisson) et les plus bleues sont les plus faibles.	23
1.8	Courbes théoriques de l'intensité de la réponse acoustique en fonction de la fréquence pour les grands types de réflecteurs. Issu de Lavery et al. (2007).	24
1.9	Résultats issus de l'étude de Stanton (1989) : Comparaison de la réponse acoustique normalisée d'une sphère, d'un cylindre droit (angle d'incidence normal) et d'un cylindre courbé uniformément pour les cas rigide et fixe (courbes supérieures) et fluide (courbe inférieure).	25

1.10	Illustration de la réflectivité des organismes <i>Fluid-Like</i> (FL, a). Exemple d'organismes considérés comme FL (b, c, d).	26
1.11	Courbe théorique de l'intensité de la réponse acoustique d'un copépode en fonction de la fréquence selon le modèle <i>Truncated Fluid Sphere</i> (Holliday, 1992). . .	27
1.12	Illustration de la réflectivité d'un réflecteur <i>Elastic-Shell</i> (ES, a) et exemple d'un organisme considéré comme réflecteurs ES.	28
1.13	Courbe théorique de l'intensité de la réponse acoustique induite par un gastéropode en fonction de la fréquence, selon le modèle de Stanton et al. (1994b).	29
1.14	Illustration de deux types d'organismes considérés comme réflecteurs <i>Gas-Bearing</i> . . .	30
1.15	Bathymétrie du golfe de Gascogne présentant les différentes zones du plateau continental. D'après Koutsikopoulos & LeCann (1996).	31
1.16	Synthèse des évènements marquant l'hydrologie du golfe de Gascogne. D'après Petitgas (2010).	32
1.17	Groupe de masses d'eau du golfe de Gascogne au mois de mai. D'après Gailhard-Rocher et al. (2012). Zone rouge : eaux marquées par une stratification due aux panaches. Zone vert clair : eaux mélangée sur la colonne d'eau couvrant l'ensemble du plateau continental. Zone bleu clair : eaux du large à la stratification peu intense. Zone bleu foncé : eaux du large très peu influencées par les panaches fluviaux et non stratifiées.	32
1.18	Plan d'échantillonnage de la campagne PELGAS. Les radiales (rouge) de prospection acoustique sont échantillonnées pendant la journée. Les stations hydrologiques (étoiles) sont échantillonnées pendant la nuit.	34
2.1	Jeu de réponses fréquentielles théoriques des réflecteurs. <i>copepods</i> : copépodes, <i>small.euphausiids</i> : petits euphausiacés, <i>mackerel</i> : maquereaux (poissons sans vessie), <i>small.bubble.mYeinsitu</i> : petites bulles de gaz dont les paramètres sont issus de Remond et al. (soumis), <i>small.bubbles.YeMax18</i> : petites bulles de gaz résonantes à 18 kHz, <i>small.bubbles.YeMax38</i> : petites bulles de gaz résonantes à 38 kHz, <i>small.bubbles.YeMax70</i> : petites bulles de gaz résonantes à 70 kHz, <i>large.bubbles</i> : grosses bulles de gaz, <i>deep.physostomes</i> : poissons physostomes (avec vessie), <i>deep.physoclistes</i> : poissons physoclistes (avec vessie). D'après Trenkel & Berger (2013); SIMFAMI (2005).	45
2.2	Echogrammes multifréquences des données <i>in-situ</i> collectées pendant 1h de prospection selon une écho-intégration par cellules (ESDU) de 1 m de profondeur et 1 ping de long. Une couche diffusante dense est située proche du fond (18 kHz) et une couche diffusante plus faible s'étend sur l'ensemble de la colonne d'eau (38-70 kHz). A cette échelle, les écho-traces des bancs de poissons sont trop petits pour se dégager des autres structures. L'échogramme moyen des 5 fréquences synthétise les patrons spatiaux dominants.	46
2.3	Echogrammes multifréquences des données <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes de prospection selon une écho-intégration par cellules (ESDU) de 1 m de profondeur et 1 ping de long. Les tâches sombres sont les écho-traces des bancs de poissons. Une couche diffusante dense est située à 50 m et une plus faible est située autour de 30 m. L'échogramme moyen des 5 fréquences représente les patrons spatiaux dominants.	47

2.4	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données brutes du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	51
2.5	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	52
2.6	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM aux données référencées à la fréquence 18 kHz du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	53
2.7	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM aux données référencées à la fréquence 200 kHz du jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	54
2.8	Résultats de l'application de la méthode de Trenkel & Berger (2013) au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	55
2.9	Résultats de l'application de la méthode de Ballon et al. (2011) au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. Les couleurs correspondent aux groupes formés par la classification. <i>COP</i> : copépodes. <i>SEU</i> : petits euphausiacés. <i>MAC</i> : Maquereaux. <i>ISSBU</i> : petites bulles paramètres <i>in-situ</i> . <i>SBU18</i> : petites bulles résonance à 18 kHz. <i>SBU38</i> : petites bulles résonance à 38 kHz. <i>SBU70</i> : petites bulles résonance à 70 kHz. <i>LBU</i> : grosses bulles. <i>PCLIS</i> : poissons physoclistes. <i>PSTOM</i> : poissons physostomes.	56
2.10	Distribution des taux de bonne classification calculés pour l'application de chaque méthode aux 3 jeux de réponses fréquentielles théoriques. Pour chaque méthode, le rectangle représente la distribution du critère entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile). Les "moustaches" représentent l'étendue des valeurs extrêmes. Le cadre rouge indique les méthodes les plus robustes selon les critères fixés dans le cadre de cette étude.	57

2.11	Résultats de l'application de la méthode de Ballon et al. (2011) sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, comparés à l'échogramme moyen de la zone prospectée selon une résolution d'écho-intégration de 1 ping.	58
2.12	Résultats de l'application de la méthode de Trenkel & Berger (2013) sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, comparés à l'échogramme moyen de la zone prospectée, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping.	59
2.13	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.	60
2.14	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.	61
2.15	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.	62
2.16	Résultats de l'application de la méthode ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 2 minutes, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.	63
2.17	Résultats de l'application de la méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011), paramétrée selon Lezama-Ochoa et al. (2011), sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping.	64
2.18	Distribution des Sv (croix rouges) par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification supervisée de Ballon et al. (2011), paramétrée selon Lezama-Ochoa et al. (2011), appliquée sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	65
2.19	Résultats de l'application de la méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013), paramétrée selon leur publication, sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping.	66
2.20	Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification supervisée de Trenkel & Berger (2013), appliquée sur les données <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	67
2.21	Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.	68

2.22	Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM appliquée sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 1h selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	69
2.23	Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes.	70
2.24	Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 3 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	71
2.25	Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.	72
2.26	Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données brutes <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	73
2.27	Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes.	74
2.28	Distribution des Sv par fréquence pour les groupes issus de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon une échelle d'écho-intégration de 1 ping, avec 5 groupes. Le rectangle bleu représente l'étendue de la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile) représentée par la barre rouge. Les "moustaches" de la boîte représentent l'étendue des valeurs extrêmes de la distribution. L'absence de boîte dans le cas du groupe "other" indique une distribution de Sv très étendue.	75
2.29	Résultats de l'application de la méthode de classification non supervisée ACM-KM sur les données centrées <i>in-situ</i> collectées pendant 1h, selon des échelles d'écho-intégration plus grossières : 0.01 MN (a, c, e) et 0.1 MN (b, d, f).	76
2.30	Pourcentage de la variance totale expliquée par les composantes principales de l'ACP appliquée au tableau disjonctif complet des Sv centrés.	80
2.31	Répartition du nombre de cellules total dans les différents groupes issus de la classification ACM-KM.	81
2.32	Projection de l'aire des groupes de cellules issus de la classification ACM-KM dans les deux premiers plans factoriels.	82

2.33 Réponses fréquentielles médianes calculées sur les cellules des groupes issus de la classification ACM-KM.	83
2.34 Distribution des valeurs de Sv des cellules de chaque groupe (croix rouges) à chaque fréquence. Les boîtes représentent la distributions des Sv entre le 25 ^e et le 75 ^e pourcentiles. La barre rouge dans les boîtes représente la médiane de la distribution considérée. Les moustaches des boîtes représentent les valeurs extrêmes de chaque distribution.	84
2.35 Comparaison de l'échogramme des cellules classifiées selon la méthode ACM-KM (f) aux échogrammes multifréquences (a) à (e). Les couleurs de la figure (f) correspondent aux différents groupes de cellules. Les cadres noirs montrent des zones caractéristiques de chaque groupe. zone I : groupe 4, zone J : groupe 5, zone K : groupe 3, zone L : groupe 6, zone M : groupe 2.	86
2.36 Cartographie des cellules le long des radiales 1 à 8, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.	87
2.37 Cartographie des cellules le long des radiales 9 à 16, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.	88
2.38 Cartographie des cellules le long des radiales 17 à 24, selon leur appartenance aux groupes issus de la classification. Les couleurs correspondent aux groupes de cellules qui apparaissent dans la légende.	89
2.39 Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 2. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.	90
2.40 Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 2.	91
2.41 Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 3. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.	92
2.42 Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 3. La flèche rouge indique une portée à 0.8°.	92
2.43 Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 5. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.	93
2.44 Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 5. Les flèches rouges indiquent des portées à 0.5° et à 2°.	94
2.45 Distribution spatiale de l'occurrence sur la profondeur des cellules du groupe 6. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.	95
2.46 Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 6. La flèche rouge indique une portée à 0.5°.	95
2.47 Distribution spatiale de l'occurrence des cellules du groupe 4. La croix noire est le centre de gravité des positions géographiques des ESDUs et la croix rouge est le centre de gravité des occurrences.	96
2.48 Variogramme de la distribution spatiale de l'occurrence du groupe 4.	97
2.49 Co-variogrammes pour toutes les paires des distributions spatiales des groupes. Le premier graphique de chaque colonne est un rappel du variogramme expérimental du groupe. Les co-variogrammes sont positionnés aux croisements des lignes et des colonnes. Les flèches rouges indiquent les portées des co-variogrammes. . . .	98
2.50 Cartographie des cellules en 3 dimensions dans le logiciel Globe, selon les groupes issus de la classification.	99

2.51	Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 2 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 2 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.	100
2.52	Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 3 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 3 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.	101
2.53	Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 4 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 4 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.	102
2.54	Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 5 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 5 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.	103
2.55	Carte de la distribution de l'occurrence des cellules du groupe 6 sur la dimension verticale. Les polygones noirs indiquent les zones où les patrons verticaux des couches diffusantes du groupe 6 sont homogènes à méso-échelle. Les échogrammes illustrant les patrons verticaux typiques rencontrés dans chaque zone.	104
3.1	D'après Herman et al. (2004), schéma du L-OPC illustrant le flux de l'eau dans le tunnel d'échantillonnage.	112
3.2	L'échantillonneur WP2 est composé de 3 filets identiques de maille 200 μm . Il est utilisé en profil vertical pour décrire la communauté méso-zooplanctonique. .	113
3.3	Illustration des espèces de petits poissons pélagiques les plus présentes dans le golfe de Gascogne et échantillonnées pendant la campagne PELGAS.	114
3.4	Coefficients de corrélation entre les cartes de distribution des indicateurs et des groupes de couches diffusantes. La valeur du coefficient est représentée par la dimension et la couleur du point à l'intersection des indicateurs des deux cartes considérées par le calcul.	117
3.5	Cartes de distribution des indices hydrologiques (a à f), de la biomasse phytoplanctonique (g & h) et des paysages acoustiques issus de la classification ACM-KM (i à m).	119
3.6	Cartes de distribution des indicateurs du méso-zooplancton (a à g) et des petits poissons pélagiques (h à l).	120
3.7	Poisitions géographiques des stations dans la zone d'étude au large de l'embouchure de la Gironde, échantillonnées pendant les 10 derniers jours des campagnes PELGAS 2012 et 2013.	121
3.8	Application d'un modèle linéaire aux deux dimensions des variogrammes expérimentaux des variables hydrologiques. Directions : horizontale (courbes noires) et verticale (courbes rouges).	124
3.9	Variogrammes expérimentaux pour les variables hydrologiques des stations de la radiale nord selon deux directions : horizontale (courbes noires) et verticale (courbes rouges).	125
3.10	Distribution verticale des paramètres hydrologiques et de la charge en particules totale, estimée par la méthode de krigeage. Les points noirs représentent les données.	126

3.11	Comparaison des résultats de la classification des échos ACM-KM appliquée sur les données du réseau d'échantillonnage des legs 1 et 2 (a) & (c) et sur les données des legs 1 et 2 avec les cellules d'écho-intégration de la radiale nord du leg 3 (b) & (d), sur la radiale 17.	128
3.12	Comparaison de la distribution des Sv (croix rouges) par fréquence pour chaque groupe entre les résultats obtenus par la méthode de classification ACM-KM appliquée aux données des legs 1 et 2 de la campagne PELGAS 2013 et aux mêmes données auxquelles s'ajoutent les cellules de la radiale nord du leg 3. Les rectangles représentent la distribution des Sv entre le 1 ^e et le 3 ^e quartile, séparés par la médiane (2 ^e quartile, barre rouge). Les moustaches des boîtes représentent les valeurs extrêmes des distributions.	129
3.13	Résultats de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données des legs 1 et 2 avec les cellules d'écho-intégration de la radiale nord du leg 3, pour les cellules de la radiale nord du leg 3.	130
3.14	Comparaison de la distribution verticale des paramètres hydrologiques (c à f) et des distributions verticales des groupes de couches diffusantes issus de la classification ACM-KM (a et b), le long de la radiale nord du leg 3 de la campagne PELGAS 2013.	131
3.15	Comparaison de la distribution du "macrozooplancton" issue de Lezama-Ochoa et al. (2011) d'après des données acoustiques (a) et de la distribution spatiale de la biomasse du gros mésozooplancton issue de données biologiques de la campagne PELGAS 2009 (b), dans le sud du golfe de Gascogne au printemps 2009.	132
3.16	Comparaison de la distribution spatiale du "poisson acoustique" issue de Lezama-Ochoa et al. (2011) à partir de densités acoustiques (a) et la distribution spatiale de la densité acoustique attribuée aux poissons à vessie selon les données acoustiques validées par des chalutages d'identification de la campagne PELGAS 2009 (b), dans le sud du golfe de Gascogne au printemps 2009.	133
3.17	Comparaison de la distribution spatiale du macrozooplancton issue de données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, d'après Trenkel & Berger (2013) (a), celle de la biomasse du mésozooplancton total (200-2000 μm , b) et celle de la biomasse du gros mésozooplancton ($> 2000 \mu\text{m}$, c) d'après les données biologiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2008 à 2010.	135
3.18	Distribution des poissons à vessie dans le golfe de Gascogne, d'après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon Trenkel & Berger (2013) (a) et d'après les estimations de biomasses réalisées en combinant les données acoustiques et les chalutages d'identification collectées et effectuées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 selon la méthode décrite dans Doray et al. (2010) (b).	136
3.19	Distribution des poissons sans vessie (maquereau) dans le golfe de Gascogne d'après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010 selon Trenkel & Berger (2013) (a) et d'après les estimations de biomasses réalisées en combinant les données acoustiques et les chalutages d'identification collectées et effectués pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon la méthode décrite dans Doray et al. (2010) (b).	137
3.20	Distribution des petites bulles de gaz estimées être du phytoplancton, d'après les données acoustiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010, selon Trenkel & Berger (2013) et de la concentration en chlorophylle-a d'après des données biologiques collectées pendant les campagnes PELGAS 2006 à 2010.	138

4.1	Exemple des échogrammes d'une station présentant des anomalies de détection acoustique. La présence de bulles devant les transducteurs engendrée par le sillage d'un navire ou par une houle importante provoque une atténuation anormale de la détection acoustique sur le reste du ping (les sous-détections). La grande quantité de bulles en surface provoquée par les mêmes phénomènes engendre des détections denses mais indésirables (les sur-détections).	144
4.2	Exemple du filtre des sous-détections sur la fréquence 120 kHz. Graphique inférieur : variance par ping. L'intervalle de contrôle (en rouge) est l'intervalle sur lequel la variance moyenne de référence est calculée.	145
4.3	Exemple des échogrammes d'une station (aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz) avant (a) et après (b) filtrage.	146
4.4	Photographie du TAPS fixé à la bathysonde. Les transducteurs du TAPS sont placés légèrement en dehors de la structure pour que cette dernière n'entre pas dans le volume insonifié par les faisceaux acoustiques.	147
4.5	Exemple du lissage des profils verticaux multi-fréquences du TAPS collectés à une station.	147
4.6	Schéma conceptuel des étapes de l'analyse interstructures de la méthode STATIS utilisé dans notre cas d'étude. Les tranches de profondeur communes à toutes les stations sont sélectionnées (1) ; une matrice de covariance C_i est calculée par station (2) ; la diagonalisation de la matrice des corrélations vectorielles (3) permet de calculer les coordonnées des tableaux dans un système d'axes en relation avec ses valeurs propres.	149
4.7	Résultats de l'analyse interstructure de la méthode STATIS et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) sur les profils médians verticaux collectés par les échosondeurs EK60 pendant la campagne PELGAS 2012.	150
4.8	Résultats de l'analyse interstructures de la méthode STATIS et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les profils médians verticaux collectés par le TAPS pendant la campagne PELGAS 2012.	151
4.9	Réponses fréquentielles moyennes calculées par groupe issus de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) sur les résultats de l'analyse interstructures de la méthode STATIS appliquées sur la combinaison des profils médians verticaux collectés par les échosondeurs EK60 et des profils verticaux collectés par le TAPS, pendant PELGAS 2012.	152
4.10	Structure de la matrice X regroupant les profils médians multifréquences des k stations. Les n tranches de profondeurs sont considérées comme des individus indépendants.	153
4.11	Résultats de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2012.	155
4.12	Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2012.	156
4.13	Contexte hydrologique de la zone d'étude du leg 3 de la campagne PELGAS 2012 située dans le panache de la Gironde.	157
4.14	Résultats de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeur des profils du TAPS collectés pendant PELGAS 2012.	158
4.15	Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils collectés par le TAPS pendant PELGAS 2012.	159

4.16	Résultats de l'Analyse des Composantes Principales (ACP) et de la Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) appliquées sur les tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2013. . . .	160
4.17	Résultats de la classification des tranches de profondeurs des profils médians verticaux collectés par l'EK60 pendant PELGAS 2013.	161
4.18	Contexte hydrologique de la zone d'étude du leg 3 de la campagne PELGAS 2013, située dans le panache de la Gironde.	161
4.19	Plan d'échantillonnage du leg 3 de la campagne PELGAS 2012. La zone se situe dans le panache de la Gironde. Les stations retenues pour la présentation des résultats sont identifiées par leur code.	163
4.20	Photographies des instruments opérés à chaque station en profil vertical fixés sur la structure d'un profileur pélagique. Le câble rouge est un câble numérique envoyant les informations de plusieurs instruments en temps réel sur l'ordinateur du bord.	164
4.21	Schéma de l' <i>Underwater Vision Profiler</i> (UVP, d'après Picheral et al. (2010)). L'illustration de gauche représente l'UVP en entier. Celle de droite représente le système lumineux de l'UVP avec, en rose, le volume d'eau échantillonné.	164
4.22	Photographie du filet <i>Multi Plankton Sampler</i> (Multinet, Hydro-Bios) composé des 5 filets. Lors de la remontée du filet, un capteur de pression ferme les différents filets aux profondeurs préalablement programmées.	165
4.23	Les communautés planctonique et nectonique structurées par classe de tailles, d'après Sieburth et al. (1978). Le cadre rouge indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le granulomètre laser CILAS, le cadre bleu indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le <i>Laser Optical Plankton Counter</i> (L-OPC) et le <i>Underwater Vision Profiler</i> (UVP), le cadre violet indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à plancton <i>Work Party 2</i> (WP2), le cadre vert indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à plancton <i>Multi Plankton Sampler</i> (Multinet), le cadre marron indique les organismes et classes de tailles échantillonnés par le filet à micronecton <i>Midwater Ringnet Trawl</i> (MIK, cf. section 4.5).	166
4.24	Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0522. <i>Clad</i> : cladocères, <i>LarCru</i> : larves de crustacés, <i>PtCop</i> : petits copépodes, <i>GrCop</i> : gros copépodes, <i>PtMed</i> : petites méduses, <i>GrMed</i> : grosses méduses, <i>Siph</i> : siphonophores gélatineux, <i>Salp</i> : salpes et doliolles, <i>Gast</i> : gatéropodes, <i>PtEup</i> : petits euphausiacés, <i>GrEup</i> : gros euphausiacés.	171
4.25	Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0528. <i>Clad</i> : cladocères, <i>LarCru</i> : larves de crustacés, <i>PtCop</i> : petits copépodes, <i>GrCop</i> : gros copépodes, <i>PtMed</i> : petites méduses, <i>GrMed</i> : grosses méduses, <i>Siph</i> : siphonophores gélatineux, <i>Salp</i> : salpes et doliolles, <i>Gast</i> : gatéropodes, <i>PtEup</i> : petits euphausiacés, <i>GrEup</i> : gros euphausiacés.	172
4.26	Composition taxonomique des échantillons des filets du Multinet (Hydro-Bios) collectés à la station Q0529. <i>Clad</i> : cladocères, <i>LarCru</i> : larves de crustacés, <i>PtCop</i> : petits copépodes, <i>GrCop</i> : gros copépodes, <i>PtMed</i> : petites méduses, <i>GrMed</i> : grosses méduses, <i>Siph</i> : siphonophores gélatineux, <i>Salp</i> : salpes et doliolles, <i>Gast</i> : gatéropodes, <i>PtEup</i> : petits euphausiacés, <i>GrEup</i> : gros euphausiacés.	173
4.27	Résultats de l'inversion appliquée aux profils du TAPS. Sur les figures (a), (c), (e) les cadres gris indiquent les regroupements des 60 classes en 5 grandes classes de tailles. Sur les figures (b), (d), (f) les lignes horizontales représentent les profondeurs d'ouverture des filets du Multinet et les croix noires indiquent les profondeurs où l'erreur est supérieure au seuil.	175

4.28	Echogrammes multifréquences montrant des couches denses aux 3 stations. La réponse fréquentielle moyenne de la couche est calculée sur les données multifréquences sélectionnées aux profondeurs occupées par la couche diffusante sur les échogrammes.	180
4.29	Plan d'échantillonnage du leg 3 de la campagne PELGAS 2013. Le cadre rouge entoure les stations de la radiale nord où le MIK a été utilisé. Les stations étudiées de façon approfondie sont identifiées par leur code.	183
4.30	Photographie du <i>Midwater Ringnet trawl</i> (MIK) lors de sa mise à l'eau sur le pont arrière du navire Thalassa.	183
4.31	Illustration des deux types de protocoles d'utilisation du <i>Midwater Ringnet Trawl</i> (MIK) testés. L'illustration de droite représente le protocole classique où le filet échantillonne de façon homogène toute la colonne d'eau (type "profil"). La figure de gauche présente le protocole type "chalutage", où le filet cible une tranche de profondeur déterminée.	184
4.32	Zoocam installé à bord du N/O La Thalassa pendant la campagne PELGAS 2013. Le zoom représente la cuve dans laquelle les images sont prises.	185
4.33	Schéma conceptuel de la méthodologie utilisée pour mettre en relation les données acoustiques et biologiques. L'approche directe est appliquée pour estimer la réponse fréquentielle des organismes Fluid-Like (FL) échantillonnés par le filet (1). L'approche inverse est utilisée pour estimer la distribution des densités par classe de tailles des bulles de gaz incluses dans des organismes gazeux et la réponse fréquentielle correspondante (2). Les réponses fréquentielles des organismes gazeux contribuant le plus à la réponse <i>in-situ</i> sont ajoutées séquentiellement à la réponse estimée des FL jusqu'à approcher au mieux la réponse fréquentielle mesurée <i>in-situ</i> (3). Les réponses fréquentielles <i>in-situ</i> et estimées sont comparées. Les densités d'organismes gazeux estimées et échantillonnées sont comparées (4).	188
4.34	Estimation de la réponse acoustique d'une bulle de gaz de 0.27 mm ESR située à 80 m de profondeur par le modèle de Ye.	193
4.35	Schéma conceptuel de l'approche pour quantifier la structure en taille des réflecteurs porteurs d'inclusion gazeuse expliquant les différences entre les réponses fréquentielles prédite des <i>Fluid-Like</i> (FL) et mesurée <i>in-situ</i> . (1) La plus grande différence entre les réponses fréquentielles prédite (courbe noire pleine) et mesurée <i>in-situ</i> (courbe rouge pleine) s'observe à la fréquence F2. La taille t1 la plus contributive de la fréquence F2 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielle est ajoutée à celle de la réponse fréquentielle prédite des FL formant la courbe bleue pointillée. (2) La plus grande différence entre la réponse fréquentielle <i>in-situ</i> et la nouvelle réponse fréquentielle prédite (courbe bleue) est observée à la fréquence F1. La taille t1 la plus contributive de la fréquence F1 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielles est ajoutée à la nouvelle réponse fréquentielle prédite formant la courbe verte pointillée. (3) La plus grande différence entre la réponse fréquentielle <i>in-situ</i> et la nouvelle réponse fréquentielle prédite (courbe verte) est observée à la fréquence F2. La taille t2 la seconde plus contributive à la fréquence F2 est sélectionnée. Sa réponse fréquentielle est ajoutée à la nouvelle réponse fréquentielle prédite formant la courbe rouge pointillée.	195
4.36	Réponses fréquentielles médianes calculées dans les fenêtres spatio-temporelles de l'échantillonnage du <i>Midwater Ringnet trawl</i> (MIK) aux stations R0296, R0297 et R0300.	196

4.37	Estimation de la réponse fréquentielle de chaque groupe de réflecteur présent dans les échantillons collectés par le MIK. Les mesures d'abondance et de taille moyennes sont utilisées comme paramètres d'entrée dans les modèles de réflecteurs. <i>CRU</i> : larves de crustacés. <i>EUP</i> : petits euphausiacés. <i>COP</i> : copépodes. <i>SAL</i> : salpidés. <i>GAST</i> : gastéropodes. <i>SIP</i> : siphonophores calycophores. <i>GRE</i> : grands euphausiacés.	199
4.38	Résultat de l'algorithme d'inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l'EK60 collectés à la station R0296 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l'énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.	201
4.39	Résultat de l'algorithme d'inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l'EK60 collectés à la station R0297 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l'énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.	202
4.40	Résultat de l'algorithme d'inversion utilisé sur les profils médians verticaux de l'EK60 collectés à la station R0300 en utilisant le modèle de Ye. La figure (a) montre la densité estimée par classe de tailles. Les figures (b) à (f) montrent la contribution (en %) de chaque classe de tailles à l'énergie acoustique mesurée aux fréquences 18 à 200 kHz.	203
4.41	Comparaison entre la réponse fréquentielle mesurée (courbes noires), la réponse fréquentielle des organismes FL estimée par l'approche directe (courbes noires pointillées) et la réponse fréquentielle combinée des bulles de gaz virtuelles et des organismes FL (courbes rouges pointillées) pour les stations R0296 (a), R0297 (b) et R0300 (c).	205
4.42	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	234
4.43	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	235
4.44	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	236
4.45	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	237
4.46	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	238
4.47	COP : copépodes. SEU : petits euphausiacés. MAC : maquereaux. SBU38 : petites bulles résonantes à 38 kHz. LBU : grosses bulles. PCLIS : poissons clisostomes. PSTOM : poissons physostomes. Les couleurs correspondent aux groupes de réflecteurs formés par la méthode considérée.	239

4.48	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 4 groupes.	240
4.49	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 6 groupes.	240
4.50	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données brutes selon 7 groupes.	240
4.51	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 4 groupes.	241
4.52	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 6 groupes.	241
4.53	Résultat de la classification non supervisée ACM-KM appliquée aux données centrées selon 7 groupes.	241
4.54	Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).	242
4.55	Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).	242
4.56	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.	242
4.57	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.	243
4.58	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.	243
4.59	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.	243
4.60	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.	244
4.61	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.	244
4.62	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.	244
4.63	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.	245
4.64	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.	245
4.65	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.	245
4.66	Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).	246
4.67	Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).	246
4.68	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.	246
4.69	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.	247
4.70	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.	247
4.71	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.	247
4.72	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.	248
4.73	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.	248
4.74	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.	248

4.75	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.	249
4.76	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.	249
4.77	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.	249
4.78	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.	250
4.79	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.	250
4.80	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.	251
4.81	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.	251
4.82	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.	251
4.83	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.	252
4.84	Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).	253
4.85	Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).	253
4.86	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.	253
4.87	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.	254
4.88	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.	254
4.89	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.	254
4.90	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.	255
4.91	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.	255
4.92	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.	255
4.93	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.	256
4.94	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.	256
4.95	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.	256
4.96	Résultat de la classification de Ballon et al. (2011).	257
4.97	Résultat de la classification de Trenkel & Berger (2013).	257
4.98	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 3 groupes de cellules.	257
4.99	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 3 groupes de cellules.	258
4.100	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 4 groupes de cellules.	258
4.101	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 4 groupes de cellules.	258

4.102	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 5 groupes de cellules.	259
4.103	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 5 groupes de cellules.	259
4.104	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 6 groupes de cellules.	259
4.105	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 6 groupes de cellules.	260
4.106	Résultat de la classification ACM-KM sur les données brutes selon 7 groupes de cellules.	260
4.107	Résultat de la classification ACM-KM sur les données centrées selon 7 groupes de cellules.	260
4.108	Plan du filet à micro-necton <i>Midwater Ringnet Trawl</i> (MIK, ICES (2013)). <i>d</i> : poids pour stabiliser le filet qui pèse ~ 100 kg. <i>b</i> : filet noir de maille 1.6 mm et de 13 m de longueur. <i>b1</i> : au cul du filet un filet de maille $500 \mu\text{m}$ est inséré. <i>e</i> : deux funes de 10 m de long. <i>f</i> : deux bouts de 3 m pour fixer le poids. <i>g</i> : collecteur de 11 cm de diamètre pour récupérer les échantillons de plancton. <i>h</i> : débimètre positionné au centre de l'ouverture circulaire du MIK.	261

Liste des tableaux

2.1	Cadences de tirs appliquées automatiquement par le logiciel Hermes (Trenkel et al., 2009) en fonction de la profondeur sur le plateau continental.	40
2.2	Portée maximale de la détection acoustique aux différentes fréquences des sondeurs mono-faisceaux EK60 sur le N/O Thalassa, pour différents seuil de détection.	40
2.3	Modèles de réflecteurs utilisés pour construire les réponses fréquentielles théoriques, issus de SIMFAMI (2005).	44
2.4	Comparaison des taux de bonne classification obtenus par l'application des différentes méthodes de classification au jeu de réponses fréquentielles théoriques # 3. L'indice le plus élevé indique la méthode la plus robuste.	50
2.5	Synthèse des représentations des résultats de la classification qui apportent des informations complémentaires.	108
3.1	Paramètres utilisés dans le packages R <i>RGeostats</i> (Renard et al., 2014), pour le calcul des variogrammes expérimentaux des quatre variables hydrologiques. . . .	123
3.2	Paramètres utilisés dans le package R <i>RGeostats</i> (Renard et al., 2014) pour calculer le voisinage utilisé dans le krigeage. Les valeurs entre parenthèses correspondent respectivement à la valeur appliquée à la direction horizontale et à la valeur appliquée à la direction verticale.	124
4.1	Les modèles disponibles dans l'algorithme d'inversion, d'après SIMFAMI (2005). Le modèle de Ye (Ye, 1997) n'a été ajouté qu'en 2013, dans le cadre de cette étude.	169
4.2	Valeurs des erreurs totales de l'ajustement des modèles de réflecteurs FL aux profils TAPS collectés pendant la campagne 2012.	174
4.3	Erreurs totales, indicatrices de la qualité de l'ajustement des modèles aux profils médians verticaux collectés par l'EK60 aux stations Q0522, Q0528 et Q0529. . . .	176
4.4	Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l'algorithme d'inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0522. Lorsque plusieurs types d'organismes sont très présents dans l'échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d'abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.	177
4.5	Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l'algorithme d'inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0528. Lorsque plusieurs types d'organismes sont très présents dans l'échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d'abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.	178

4.6	Comparaison des organismes les plus abondants dans les échantillons du Multinet aux classes de tailles de réflecteurs FL estimées comme dominantes par l'algorithme d'inversion et le modèle TFS. Les tranches de profondeurs considérées sont les tranches de profondeur échantillonnées par les différents filets du Multinet à la station Q0529. Lorsque plusieurs types d'organismes sont très présents dans l'échantillon du Multinet, ils sont indiqués par ordre croissant d'abondance. Les petits copépodes sont < 1 mm et les gros copépodes sont ≥ 1 mm.	179
4.7	Les différents groupes dans lesquels sont classées les vignettes du Zoocam via le logiciel <i>Plankton Identifier</i> . La catégorie "non vivant" a été créée afin d'isoler les débris et artefacts.	186
4.8	Choix et paramétrisation initiale des modèles de réflecteurs utilisés pour estimer la réponse fréquentielle des organismes <i>Fluid-Like</i> (FL) présents dans les échantillons du MIK. (D'après Lavery et al. (2007); Lawson et al. (2004); SIM-FAMI (2005)). ^(a) Stanton et al. (1998). ^(b) Holliday (1992). ^(c) Stanton (1989). ^(d) Ye (1997).	189
4.9	Paramétrisation initiale du modèle de Ye pour les stations R0296, R0297 et R0300	193
4.10	Résultats de l'identification des échantillons du MIK pour les stations R0296, R0297 et R0300. La partie méso-zooplanctonique a été identifiée par le Zoocam et la fraction macro-zooplanctonique et micro-nectonique a été identifiée manuellement.	198
4.11	Combinaisons des tailles et des densités des bulles de gaz dont la réponse acoustique doit être ajoutée à celle des organismes FL pour expliquer la réponse acoustique mesurée.	206
4.12	Synthèse des résultats et des limites pour chaque échelle d'observation de la composition spécifique des couches diffusantes dans la zone de la Gironde.	210

Résumé :

Des données acoustiques sont collectées en continu lors de campagnes écosystémiques pour détecter les bancs de poissons d'espèces commerciales et en quantifier l'abondance. Ces données multifréquences contiennent également des informations sur des agrégations de cibles plus petites qui se présentent sous forme de couches diffusantes. Il existe une grande diversité de couches diffusantes dont l'aspect sur les échogrammes, la réponse fréquentielle et la composition spécifique varient. L'objectif de cette thèse est de définir les types de couches diffusantes rencontrées lors de la campagne PELGAS, de décrire leurs distributions spatiales à méso-échelle, de les comparer à celles des autres compartiments de l'écosystème, et d'examiner la composition taxonomique des couches diffusantes résonantes à fine échelle. Une méthode de classification non supervisée des échos appliquée aux données PELGAS permet de définir des « paysages acoustiques » structurés spatialement. Ces paysages acoustiques sont dominés par des réflecteurs porteurs de bulles de gaz résonnant aux fréquences halieutiques et ne sont corrélés à aucun compartiment de l'écosystème pélagique issus de PELGAS2013. La composition biologique de couches diffusantes denses est étudiée à fine échelle en combinant par des approches directe et inverse les résultats de leur échantillonnage acoustique et biologique. Les résultats montrent que la réponse acoustique des couches diffusantes denses est dominée par celle de bulles de gaz incluses dans des larves de poissons (e.g. *Sardina pilchardus*), et dans des organismes micronectoniques, qui sont peu ou pas échantillonnés avec les outils de collecte biologique.

Mots clés : [acoustique, multifréquences, couches diffusantes, micronecton, golfe de Gascogne, PELGAS]

[Bay of Biscay sound scattering layers: acoustic characterization, taxonomic composition and spatial distribution]

Abstract:

Fisheries acoustic data are continuously collected during ecosystemic surveys to detect fish schools of commercial species and to quantify the fish abundance. These multifrequency data also contain information about smaller target aggregations producing ubiquitous Sound Scattering Layers (SSLs) on the echograms, with quite diverse shape, frequency responses and taxonomic compositions. In this work, we focus on the SSLs observed in spring in the Bay of Biscay during the PELGAS surveys. The objectives are: i) to classify SSLs, ii) to describe their spatial meso-scale distribution, iii) to investigate their relationships with other ecosystem components, and iv) to investigate the taxonomic composition of resonant SSLs at fine scale. A Multiple Correspondence Analysis based method for non supervised echoes classification is applied to PELGAS multifrequency data to define contrasted and spatially structured "acoustic landscapes". Acoustic landscapes are dominated by frequency responses of gas-bearing organisms, whose gas inclusion might resonate at the fisheries acoustic frequencies. No correlation is found between the spatial distributions of acoustic landscapes and those of other pelagic ecosystem components indices. The biological composition of resonant SSLs is investigated by jointly applying forward and inverse approaches to fine scale acoustic and biological collected in the same dense SSL. Results suggest that the dense SSLs may be comprised of fish larvae (e.g. *Sardina pilchardus*) and larger micronektonic gas bearing organisms that are so far very poorly sampled by non-acoustic devices.

Keywords: [acoustic, multifrequency, sound scattering layers, micronekton, Bay of Biscay, PELGAS]