

Département : Infrastructures Marines et Numériques  
Unité : Navires et Systèmes Embarqués

AS-2015-132

Romain SCHWAB  
21/08/2015

## Modélisation acoustique de poissons pélagiques-rapport de projet de fin d'études

Visibilité Archimer :

- Internet
- Intranet Ifremer
- Equipe :
- Groupe d'utilisateurs :
- Confidentiel



Modélisation acoustique de poissons pélagiques  
- rapport de projet de fin d'études

Auteur :

**Romain Schwab,**

Elève ingénieur hydrographe,

ENSTA Bretagne,

29200 Brest,

France

`romain.schwab.fr@gmail.com`

Ingénieur pilote :

Laurent Berger,

Service Acoustique Sismique,

Ifremer Centre Bretagne,

ZI de la Pointe du Diable - CS 10070,

29280 Plouzané,

France

21 août 2015

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Mise en contexte du stage</b>	<b>3</b>
1	Contexte . . . . .	3
2	Le projet TOMOFISH . . . . .	4
2.1	Prélèvement des échantillons . . . . .	4
2.2	L'extraction de la géométrie par tomographie rayons X . . . . .	5
3	La campagne PELGAS . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Etat de l'art et définition de l'index d'une cible</b>	<b>8</b>
1	La vessie natatoire, réflecteur principal . . . . .	8
2	Le calcul de l'index de cible . . . . .	8
2.1	L'index de cible - définition . . . . .	8
2.2	L'index de cible - dépendance fréquentielle et matérielle . . . . .	9
2.3	L'index de cible - méthodes de calcul . . . . .	10
3	Résumé des enjeux du stage . . . . .	12
3.1	Objectif global du projet TOMOFISH . . . . .	12
3.2	Représentativité des échantillons . . . . .	12
3.3	De la modélisation acoustique à la modélisation géométrique . . . . .	12
3.4	Objectifs du stage . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Modélisation géométrique de la vessie natatoire</b>	<b>15</b>
1	Introduction . . . . .	15
1.1	La donnée (format) . . . . .	16
1.2	Convention d'orientation . . . . .	16
2	Extraction des descripteurs géométriques . . . . .	16
2.1	Implémentation numérique . . . . .	17
2.2	Longueur de la vessie natatoire : $L_{vessie}$ . . . . .	17
2.3	Rayon équivalent : $R$ . . . . .	18
2.4	Partie significative de la vessie natatoire . . . . .	18
2.5	Inclinaison de la vessie natatoire : $\theta_b$ . . . . .	19
2.6	Courbure de la vessie natatoire : $\gamma_{max}$ . . . . .	20
2.7	Surface et volume de la vessie natatoire . . . . .	20
3	Dimensionnement des formes simplifiées . . . . .	21
3.1	Rayon équivalent tronqué $R_p$ et longueur tronquée $L_p$ . . . . .	21
3.2	Liste des dimensionnements possibles . . . . .	21
3.3	Dimensionnements retenus . . . . .	22
4	Descripteurs géométriques de nos jeux de données . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Modélisation acoustique de la vessie natatoire</b>	<b>24</b>
1	Etat de l'art - modèles de calcul d'index de cible . . . . .	24
1.1	Présentation des modèles retenus . . . . .	24
1.1.1	Hypothèses et approximations des modèles . . . . .	25
1.1.2	Modèle acoustique - cylindre droit fini fluide ([Sta88]) . . . . .	25
1.1.3	Modèle acoustique - cylindre uniformément courbé fini fluide ([Sta89]) . . . . .	26

1.1.4	Modèle acoustique - ellipsoïde de révolution fluide ([Fur88]) . . . . .	27
1.1.5	Modèle acoustique - cylindre déformé fini fluide ([Sta89]) . . . . .	27
2	Domaines de validité des modèles . . . . .	28
2.1	Domaine de validité fréquentiel . . . . .	28
2.2	Domaine de validité matériel . . . . .	28
2.3	Domaine de validité angulaire . . . . .	30
2.4	Domaine de validité d'aplatissement . . . . .	32
3	Etude de sensibilité des modèles aux paramètres d'entrée . . . . .	33
3.1	Sensibilité à la longueur de la vessie natatoire . . . . .	33
3.2	Sensibilité à la taille et à la forme de la vessie natatoire : aplatissement . . . . .	35
3.3	Sensibilité à l'angle d'incidence . . . . .	37
3.4	Sensibilité à la courbure . . . . .	38
3.5	Conclusions . . . . .	40
4	Validation du dimensionnement géométrique . . . . .	41
4.1	Réponse acoustique <i>réelle</i> de la vessie natatoire . . . . .	41
4.2	Moyennage de la réponse acoustique sur une distribution de nage . . . . .	41
4.3	Rappel des choix de dimensionnement . . . . .	41
4.4	Comparaison des directivités angulaire . . . . .	42
4.5	Comparaison de la réponse acoustique sur une distribution de nage . . . . .	44
5	Réponse acoustique moyenne sur une distribution de nage de l'ensemble des données <i>La Rochelle</i> . . . . .	45

## Bibliographie

	Listes des figures . . . . .	53
1	Annexe 1 : Géométries des sardines issues de la manipulation avec l'aquarium de La Rochelle (Chap. 1, Sec. 2.1) . . . . .	54
2	Annexe 2 : Corrélation entre les formes géométriques simples et les formes réelles de vessies natatoires . . . . .	56
3	Annexe 3 : Validation de l'implémentation des modèles acoustiques . . . . .	58
3.1	Validation du modèle acoustique cylindre fluide fini droit [Sta88] . . . . .	58
3.2	Validation du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89] . . . . .	59
4	Annexe 4 : Rapport constant entre la longueur du corps du poisson et la longueur de sa vessie natatoire . . . . .	60

## Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mon tuteur de stage, Laurent Berger, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet ainsi que pour tout ce qu'il m'a appris sur ce domaine particulier qu'est l'acoustique halieutique. Grâce à sa patience et sa gentillesse, ce fut une expérience réellement enrichissante, tant du côté technique que humain.

Merci aussi à mon encadrant ENSTA Bretagne, Michel Legris, pour sa grande disponibilité, ses explications profuses et détaillées sur les points *obscur*s de l'acoustique ainsi que ses conseils toujours pertinents qui m'ont permis d'aller aussi loin.

Je suis reconnaissant au service *Acoustique sous-marine* de l'Ifremer de m'avoir fait un accueil aussi chaleureux. On s'insère avec une facilité déconcertante dans votre équipe, rendant le départ d'autant plus difficile.

Enfin merci à Dimitrios Eleftherakis de m'avoir accompagné de sa bonne humeur durant ces 5 mois passés à l'Ifremer.

## Résumé

La réponse acoustique de poissons tels que la sardine est principalement due à leur organe de flottabilité, appelé *vessie natatoire*.

Des modèles permettent de calculer analytiquement la manière dont un objet diffuse une onde acoustique, à condition que la cible ait une forte symétrie. La vessie va donc être approximée par des formes simples comme des cylindres ou des ellipsoïdes.

Des outils ont donc été mis en place pour dimensionner ces formes simplifiées à partir de la structure réelle, avec de multiples choix possibles.

Pour des sardines adultes, les modèles acoustiques retenus sont valides sur un large domaine fréquentiel (18-200kHz) et ne nécessitent pas de connaître la composition exacte de l'organe de flottabilité. Par contre, l'angle d'incidence doit généralement être proche de la normale.

En basse fréquence, l'écho acoustique est surtout influencé par la taille de la vessie, alors qu'en haute fréquence il est plutôt influencé par sa forme.

Si le dimensionnement des formes simplifiées conserve la surface et la longueur initiales, la réponse acoustique déduite correspond à celle de la forme réelle.

## Introduction

L'océan possède une abondance et une diversité d'organismes inédite. Le caractère invisible de cette ressource tend à la considérer comme inépuisable. Cependant, la réalité est autre et des actes de surpêche ont par le passé conduit à l'effondrement de populations de poisson ([DCNB<sup>+</sup>10]).

Pour prévenir ces risques, l'Union Européenne a introduit les TAC (Totaux admissibles de Captures) dans la Politique Commune des Pêches, qui sont les *quantités maximales de poissons d'une espèce pouvant être prélevées sur une zone et une période délimitées*<sup>1</sup>.

Ces TAC (Totaux admissibles de Captures), qui sont une mesure de préservation des ressources en poisson, sont calculés en partie à partir des estimations de population réalisées par les instituts nationaux de recherche comme l'Ifremer (Sec. ).

Dans les eaux françaises métropolitaines, l'Ifremer est donc chargé d'évaluer régulièrement les stocks d'espèces commerciales comme la sardine ([pel15]).

Pour ce faire, l'institut utilise son expertise pour estimer des biomasses à partir de mesures acoustiques.

La sardine du Golfe de Gascogne est une espèce dont on connaît finalement peu la morphologie interne exacte et le comportement en banc, alors que ces informations sont prépondérantes pour l'évaluation des stocks (Chap. 1, Sec. 1).

Le projet présenté ici vise tout d'abord à apporter une meilleure connaissance de ces paramètres. Cela permettra de modéliser la réponse acoustique de ce type de poisson pélagique, pour à terme optimiser la méthode de calcul des stocks.

---

1. Définition issue de [lfr].

## Présentation de l’Ifremer

L’Ifremer, *Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer*, est un établissement public à caractère industriel et commercial créé en 1984, qui *contribue, par ses travaux et expertises, à la connaissance des océans et de leurs ressources, à la surveillance du milieu marin et du littoral et au développement durable des activités maritimes. À ces fins, il conçoit et met en œuvre des outils d’observation, d’expérimentation et de surveillance, et gère des bases de données océanographiques.*<sup>2</sup>

Pour mener à bien cette mission, l’établissement opère la majeure partie de la flotte océanographique française : 8 navires dont 4 hauturiers<sup>3</sup> affrétés par l’armateur Genavir.

L’institut est divisé en cinq centres : Boulogne-sur-mer, Brest, Nantes, Toulon, Tahiti. Celui de Brest<sup>4</sup>, où j’ai effectué mon stage, est le principal en terme de taille (30 ha) et de personnel (1000 personnes sur le site dont 610 salariés permanents). Des organismes de recherche comme l’*Institut Polaire Français Paul-Emile Victor* (IPEV) et l’*Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) sont aussi implantés sur le site de Brest.

Mon stage s’est déroulé au sein de l’unité Navires et Systèmes Embarqués (NSE), qui est divisé en trois services : Navires et Équipement (NE), Acoustique Sismique (AS) et Ingénierie des Logiciels Embarqués (ILE). Le service auquel j’étais affecté était l’Acoustique Sismique (AS).

L’unité NSE est une unité technologique, faisant partie du département Infrastructures Marines et Numérique (IMN), dont l’activité est principalement tournée vers le développement de projets et de solutions liés à la flotte de l’Ifremer : navires hauturiers et côtiers, équipements communs embarqués et engins sous-marins.

Le département Infrastructures Marines et Numérique (IMN) est en lien étroit avec la Direction Scientifique qui définit les orientations en terme de projet, la Direction des Moyens Navals qui élabore le calendrier et Genavir, qui exploite les navires de l’Ifremer et les équipements qui lui sont confiés en gestion.

Le service Navires et Équipement (NE) est en charge la construction ou la jouvence des navires océanographiques ainsi que le développement de leurs équipements scientifiques.

Le service Ingénierie des Logiciels Embarqués (ILE) conçoit certains logiciels d’acquisition, de traitement et de dépouillement des données acquises en mer.

Le service Acoustique Sismique (AS) a des activités de recherche et de développement dans le domaine de l’acoustique sous-marine, pour des applications aussi bien de cartographie des fonds marins que d’observations et de gestion des populations halieutiques<sup>5</sup>. Il participe aussi à la conception de systèmes SONAR, de répulsifs acoustiques et de logiciels de traitement de la donnée acoustique.

---

2. Définition de l’Ifremer issue de [Ifr]

3. hauturier : apte à la navigation en pleine mer.

4. Centre de Brest B.P. 70 29280 Plouzané 02.98.22.40.25

5. halieutique : ensemble des disciplines ayant trait aux problèmes de la pêche. [Lar]

# Chapitre 1

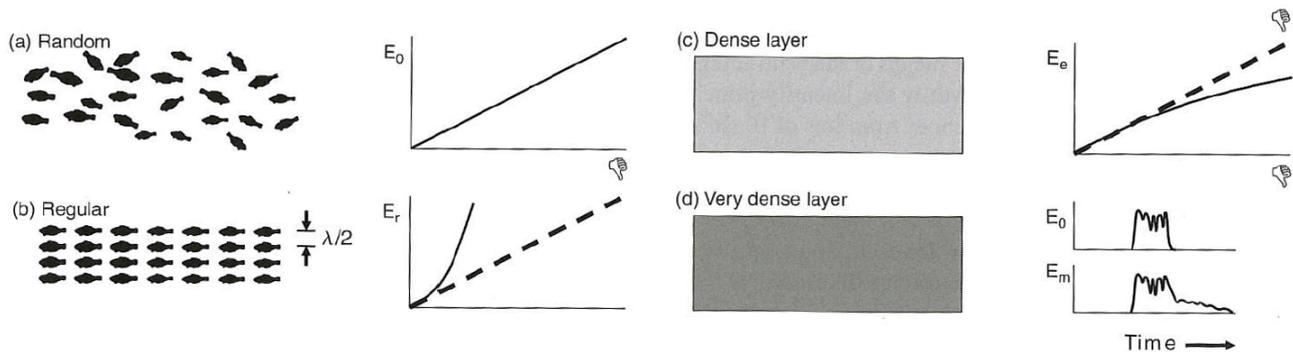
## Mise en contexte du stage

### 1 Contexte

Les biomasses<sup>1</sup> de poissons pélagiques<sup>2</sup> sont couramment estimées par comptage des oeufs pompés en surface ([Gun93], p. 129) et écho-intégration de la réponse acoustique des bancs de poissons ([SM05], p. 187).

La plupart des poissons sont facilement détectables par acoustique sous-marine du fait de leur organe de flottabilité, appelé *vessie natatoire*, qui possède un fort contraste d'impédance<sup>3</sup> avec l'eau ([CH94]).

L'Ifremer, lors de ses campagnes d'évaluation des stocks de sardines et d'anchois dans le Golfe de Gascogne ([pel15]), écho-intègre la réponse acoustique pour calculer un indice d'abondance de chaque espèce ([DMP12]). Cette évaluation des biomasses halieutiques<sup>4</sup> se base sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre le nombre de poissons et le signal acoustique reçu ([Foo83]), valide si le banc de poisson a une densité modérée et que la distribution de nage est suffisamment aléatoire pour éviter une sommation cohérente en phase des échos (Fig. 1.1).



**Fig. 5.18** Types of fish distribution. (a) Random, low density: the echo energy  $E = E_0$  is proportional to the target density  $F$ , and linearity applies. (b) Regular, half-wavelength spacing:  $E = E_r$  increases more rapidly than  $F$ . (c) Shadow effect:  $E = E_c$  increases less rapidly than  $F$ . (d) Multiple scattering:  $E = E_m$  is extended in time compared to  $E_0$ .

FIGURE 1.1 – Conditions à respecter pour avoir une écho-intégration linéaire ([SM05], Fig. 5.18, p. 193)

Cette méthode de détermination de l'abondance s'appelle l'*écho-intégration linéaire*, et n'est rendue possible qu'à condition de connaître l'*index de cible* individuel moyen représentatif d'un poisson dans

1. biomasse : masse totale de l'ensemble des être vivants occupant, à un moment donné, un biotope bien défini. [Lar]  
 2. pélagique : qui vit dans les eaux proches de la surface ou entre la surface et le fond. [Ifr]  
 3. impédance acoustique : produit de la masse volumique du milieu par la vitesse de l'onde dans le milieu.  
 4. halieutique : ensemble des disciplines ayant trait aux problèmes de la pêche. [Lar]

la zone (notion définie dans Chap. 2, Sec. 2.1).

Cet index, noté TS, dépend de l'onde acoustique émise (fréquence) et de la cible insonifiée (orientation, forme, dimensions et composition du poisson).

Dans les années 80, la combinaison de mesures *in-situ* et *ex-situ* a permis d'établir des lois donnant l'index de cible individuel par espèce ([Foo87]) sous la forme :

$$TS = 20 \log_{10} L_{cm} + b_{20} \quad (1.1)$$

avec  $b_{20}$  un offset lié à l'espèce et à la fréquence utilisée et  $L_{cm}$  la longueur en cm du poisson.

Aujourd'hui, les évaluations de biomasse par acoustique s'appuient principalement sur les index de cible issus de ces lois ([DMP12], Table 2), et ne sont rigoureusement possibles que sur des espèces et pour des fréquences particulières, ne correspondant pas forcément aux besoins de l'Ifremer et doivent être adaptés aux anchois et sardines du Golfe de Gascogne et aux fréquences des sondeurs acoustiques utilisés pour les estimations d'abondance par écho-intégration.

## 2 Le projet TOMOFISH

Partant de ce constat, l'Ifremer s'est associé à l'UMR SUBATECH ([Sub]) de l'école des Mines de Nantes pour lancer le projet TOMOFISH ([LCD15]) en 2014.

Ce projet, dans lequel s'inscrit mon stage, vise à déterminer le plus précisément possible l'index de cible individuel de petits poissons pélagiques du Golfe de Gascogne pour de multiples fréquences. Cela permettra d'affiner les estimations d'abondance par acoustique lors des campagnes PELGAS (Chap. 1, Sec. 3 et [pel15]).

Pour ce faire, nous n'allons pas directement nous baser comme dans [Foo87] sur des mesures *in-situ* de TS pour aboutir à une loi, mais partir d'une modélisation de la réponse acoustique, qui sera par la suite validée par des mesures *in-situ*. Cela permettra d'avoir une loi adaptée à nos paramètres : espèce, distribution d'angles de nage et fréquence; et d'analyser la sensibilité de cet index à ces différents paramètres.

Les espèces concernées sont la sardine, l'anchois et le hareng<sup>5</sup>, à différents stades de vie : larvaire, juvénile et adulte.

Vu que l'index de cible TS dépend de la forme et aux dimensions du poisson (Chap. 1, Sec. 1), la première étape du projet TOMOFISH était d'obtenir des géométries représentatives de poissons pélagiques. Il a donc fallu prélever des échantillons puis extraire leur géométrie.

### 2.1 Prélèvement des échantillons

Des sardines adultes ont été pêchées lors de la campagne PELGAS 2014 (Chap. 1, Sec. 3). Les poissons ont ensuite été congelés.

Suite aux premières extractions de géométrie (Chap. 1, Sec. 2.2), il a été constaté un taux de gonflement des vessies natatoires particulièrement faible. Ce premier résultat a conduit à se demander si la rapide remontée du chalut avait engendré une décompression rapide ou un stress fort conduisant à un dégazage<sup>6</sup> du poisson.

Si cette hypothèse s'avérait exacte, cela pouvait être critique pour modéliser la réponse acoustique du poisson, car cette dernière est fortement dépendante de l'organe de flottabilité.

---

5. hareng observé par l'Ifremer en Manche et Mer du Nord.

6. dégazage : vidage rapide de la vessie natatoire.

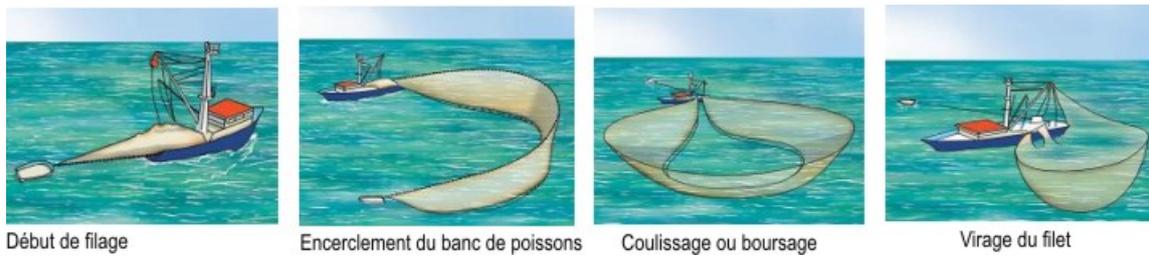


FIGURE 1.2 – Illustration d'une pêche à la senne (©Ifremer).

Il a donc été décidé d'effectuer un second prélèvement à la senne en octobre 2014 (Fig. 1.2) sur un banc de sardines adultes. Cette technique de pêche fait remonter lentement les poissons à la surface, limitant ainsi les risques de dégazage. Une partie des poissons récupérés ont été transférés vivants à l'aquarium de La Rochelle puis a été laissée pendant 43 jours en bassin.

Suite à cette acclimatation visant à assurer un bon gonflement des vessies natatoires, les sardines ont été euthanasiées puis congelées.

## 2.2 L'extraction de la géométrie par tomographie rayons X

L'association avec l'équipe PRISMA ([PRI]) du laboratoire SUBATECH, disposant d'un tomographe à rayons X (Fig. 1.3), a permis d'obtenir depuis 2014 des représentations tri-dimensionnelles très haute résolution de poissons adultes (ex. avec Fig. 1.5).

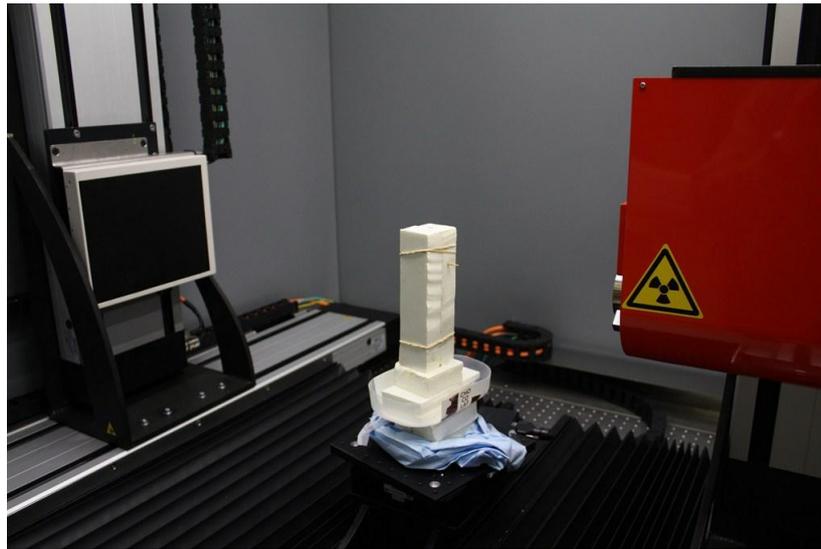


FIGURE 1.3 – Tomographe à rayons X de l'UMR SUBATECH : EasyTom XL 150 / RX Solutions. Au centre, un "sarcophage" en polystyrène maintenant le poisson sur une plateforme rotative.

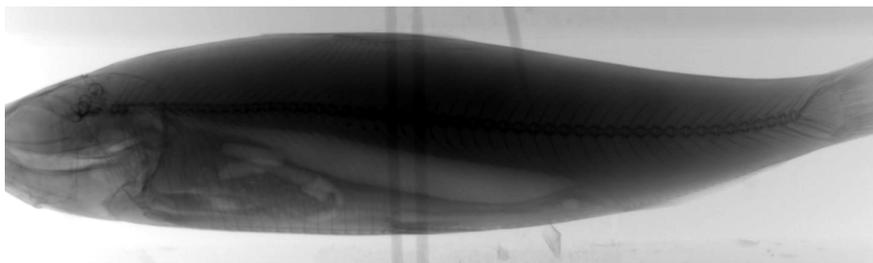


FIGURE 1.4 – Exemple de vue en coupe d'une sardine adulte. L'organe clair est la vessie natatoire.

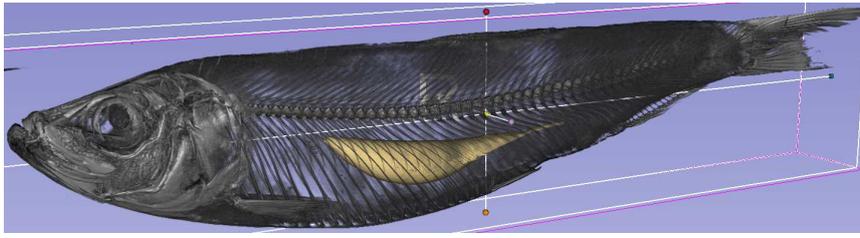


FIGURE 1.5 – Exemple d’un scan tri-dimensionnel haute résolution d’un hareng adulte issu d’une micro-tomographie par rayons X. L’organe visible en jaune est la vessie natatoire.

La radiographie par rayons X utilise la propriété que la quantité de photons traversant le poisson est liée à la densité locale de la matière. Ainsi, le contraste des images obtenues (Fig. 1.4) peut être vu comme l’expression de la variation de la densité.

Le fonctionnement de la tomographie peut être résumé ainsi : initialement, le poisson est fixé dans un sarcophage en polystyrène lui-même scotché sur une plateforme rotative (Fig. 1.3). Ensuite, le tomographe radiographie à très haute résolution sous différents angles le poisson. On dispose ainsi d’un ensemble de projections (Fig. 1.4). Finalement, la forme tri-dimensionnelle du poisson (Fig. 1.5) est construite à partir de l’ensemble des projections, par un algorithme dédié.

En 2014, un projet de fin d’études ([Lic14]) au sein de l’UMR SUBATECH a permis de mettre en place la méthode d’utilisation du tomographe à rayons X (détermination des niveaux d’émission donnant le meilleur contraste) dans le cadre de l’extraction de la géométrie de poissons. Le procédé de segmentation, visant à extraire le corps et la vessie natatoire des poissons radiographiés à partir de la géométrie brute, a aussi été défini.

À l’issue de la première année du projet TOMOFISH, l’ensemble des prélèvements a permis d’extraire la géométrie de 53 sardines, 3 harengs et 2 sprats adultes ([DBdLBR15]).

### 3 La campagne PELGAS

La mission PELGAS est une campagne annuelle d’évaluation des stocks de sardines et d’anchois dans le Golfe de Gascogne (Fig. 1.7). Cette campagne mobilise pendant plus d’un mois, courant mai, un navire océanographique de l’Ifremer : la Thalassa (Fig. 1.6).

À son bord, des sondeurs mono-faisceau Simrad ER60 émettant à 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz ainsi qu’un sondeur multi-faisceau multi-fréquence halieutique Simrad ME70 ([TMB08]) émettant sur une plage de 70 à 120 kHz récupèrent de la donnée acoustique dite *colonne d’eau*<sup>7</sup>.

Cette donnée est analysée à la fois en temps réel pour la détection de bancs de poisson et a posteriori pour l’évaluation des stocks.

En temps réel, la mission est de détecter les bancs et de prendre une décision de prélèvement d’échantillon si nécessaire. Il peut s’avérer difficile de distinguer les couches diffusantes ([Rem15]) des bancs de poisson, lorsque le banc est très diffus ou composé d’une espèce de poisson sans vessie natatoire. Lorsque de fortes quantités de poissons sont détectées par acoustique et qu’il y a une incertitude sur l’espèce, il peut y avoir une décision de chalutage<sup>8</sup>. Cette opération permet d’*écho-typer*<sup>9</sup> la donnée et d’estimer la taille moyenne des poissons du banc afin d’associer aux échos acoustiques un index de cible individuel représentatif (Eq. 1.1).

Cela permet à posteriori de calculer une biomasse halieutique par espèce, par une écho-intégration linéaire (Fig. 1.1).

7. donnée acoustique "colonne d’eau" : puissance reçue par le sondeur acoustique, échantillonnée temporellement, sur la durée d’une émission.

8. chalutage : mise à l’eau d’un chalut dans l’intention de pêcher un banc de poisson détecté par acoustique.

9. écho-typage : détermination de l’espèce des bancs de poisson *vu* sur les échogrammes acoustiques.



FIGURE 1.6 – N/O Thalassa (© Ifremer)

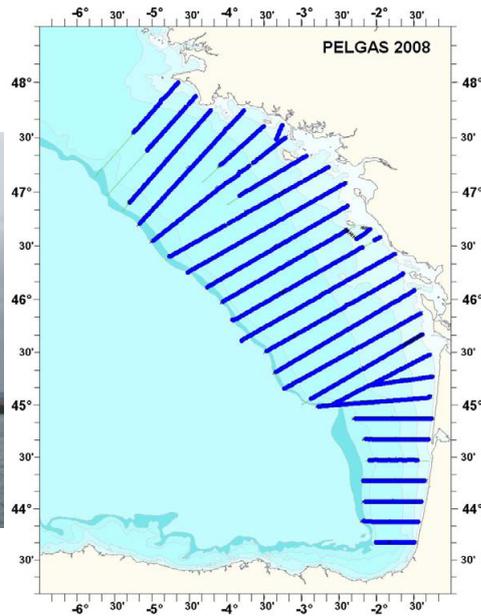


FIGURE 1.7 – Radiales suivies par le N/O Thalassa dans le Golfe de Gascogne durant la campagne PELGAS2008 (© Ifremer)

J'ai eu l'opportunité d'embarquer à bord du navire océanographique Thalassa (Fig. 1.6) du 21 mai 2015 au 1er juin 2015, dans le cadre de la mission PELGAS 2015 ([pel15]). Cet embarquement m'a permis d'intervenir à différents niveaux.

J'ai d'abord intégré l'équipe en charge de la détection par acoustique des bancs de poisson. Avant tout, il fallait effectuer un contrôle constant du bon fonctionnement des sondeurs et de l'enregistrement des données acoustiques. De plus, je consignais les événements de type chalutage ou interruption de radiale<sup>10</sup>. En cas de variation dans la forme ou l'intensité des échos de type banc de poisson, je devais prévenir le chef de mission pour décider de la nécessité d'un prélèvement d'échantillon.

J'ai aussi aidé au tri par espèce des poissons après les chalutages, afin d'obtenir des fractions massiques par espèce. Ensuite, une classification par taille par pas de 0,5cm était réalisée sur un sous-échantillonnage des espèces comme l'anchois ou la sardine.

Cette expérience m'a donné du recul sur la méthode actuelle d'évaluation de biomasse de l'Ifremer. L'étape vraiment critique à bord est l'*écho-typage* des échos acoustiques.

Ce procédé combine l'information de pêche du chalut avec l'expérience de l'opérateur qui sait à quelle espèce correspond une forme et une intensité particulière d'un banc de poisson.

Il est donc nécessaire de partager ce savoir-faire entre les habitués des campagnes en mer et les nouveaux venus.

10. radiale : ligne virtuelle suivie par le navire lors d'un levé acoustique (exemple en Fig. 1.7).

## Chapitre 2

# Etat de l'art et définition de l'index d'une cible

Ce chapitre résume les conclusions tirées de la recherche bibliographique afin d'éclairer sur la manière dont le projet va être mené.

### 1 La vessie natatoire, réflecteur principal

Dans le chapitre 1, section 1, il a été rapidement évoqué que la rétro-diffusion acoustique d'un poisson est due majoritairement à son organe de flottabilité, la vessie natatoire.

Cet organe est une poche composée d'une membrane fine emprisonnant du gaz, principalement du di-oxygène et du di-azote, située le long de la colonne vertébrale du poisson (Fig. 1.5). Le fort contraste d'impédance de cette poche avec l'eau ([CH94]) est responsable d'au moins 90% de l'écho acoustique d'un poisson adulte ([Foo80]), car l'intensité de la réflexion de l'onde acoustique sur une cible n'est liée qu'à une forte différence d'impédance avec le milieu environnant ([Leg11], p.53-54).

Le reste du poisson, principalement sa chair, a une impédance très proche de l'eau ([CH94]). Ainsi, nous considérerons que la chair et les arêtes du poisson ont la même impédance que le milieu ambiant. Le corps du poisson, excepté sa vessie natatoire, peut donc être vu comme appartenant au milieu ambiant. L'interface eau/corps du poisson sera transparente : l'onde acoustique ne sera pas déviée par la chair du poisson, mais seulement par son organe de flottabilité.

Comme premier résultat, nous admettons que la modélisation acoustique de la vessie natatoire est représentative de l'ensemble du poisson. Cette approche est similaire à celle de la publication [DS90], et s'appuie sur les conclusions de la publication [Foo80].

### 2 Le calcul de l'index de cible

#### 2.1 L'index de cible - définition

Dans un milieu élastique tel que l'eau, les ondes acoustiques<sup>1</sup> peuvent se propager sur de grandes distances ([Lur98], p.11). L'absorption par le milieu et la divergence géométrique réduisent l'intensité de l'onde acoustique loin de sa source, jusqu'à ce que son niveau soit suffisamment faible par rapport au bruit ambiant<sup>2</sup> pour que l'onde devienne indétectable.

---

1. onde acoustique ou onde sonore : perturbation mécanique se propageant dans un milieu matériel, grâce à des compressions-dilatations du milieu.

2. bruit ambiant : ce qui est perçu par un système acoustique en l'absence de signal utile et de bruit généré par son porteur. [Lur98]

Considérons une onde acoustique se propageant dans l'eau.

Une cible acoustique<sup>3</sup> est un objet avec une densité différente de celle du milieu de propagation initial.

Cette différence d'impédance entre le milieu de propagation initial et la cible fera que la partie de l'onde acoustique atteignant l'objet sera réfléchiée de manière complexe.

On considère que l'onde acoustique incidente est en champ lointain, c'est-à-dire suffisamment loin de la source acoustique pour la considérer comme plane ([Leg11], p.100).

L'index de cible est le rapport entre l'intensité rétro-diffusée par la cible en champ lointain, ramenée à 1 mètre de la cible, notée  $I_{\text{diffusé à 1m}}$  et l'intensité de l'onde incidente, notée  $I_{\text{incident}}$  ([Leg11], p.79). Dans la littérature, cet index de cible est souvent noté TS, en référence à la traduction anglaise *Target Strength* et est défini tel que ([Leg11], p.174) :

$$TS = 10 \log_{10} \frac{I_{\text{diffusé à 1m}}}{I_{\text{incident}}} \quad (2.1)$$

L'unité de l'index de cible est le  $dBm^2$ .

Le rapport  $\frac{I_{\text{diffusé à 1m}}}{I_{\text{incident}}}$  est conventionnellement défini comme la section efficace de diffusion  $\sigma$ . Il est courant d'introduire aussi la fonction de diffusion  $f$  (aussi appelée *longueur de diffusion* [MSC98], p.237) qui est reliée à la section efficace de diffusion  $\sigma$  par la relation ([MSC98], p.238) :

$$\sigma = |f|^2 \quad (2.2)$$

L'index de cible peut ainsi se réécrire ([MSC98], p.240) :

$$TS = 10 \log_{10} \sigma = 20 \log_{10} |f| \quad (2.3)$$

Dans la littérature analysant les modèles de diffusion, il est courant de normaliser le TS par la grande dimension de la forme géométrique utilisée ([MPF<sup>+</sup>13], p.2). Cela permet de s'affranchir de l'influence des dimensions de la cible. Dans le cas d'un cylindre de longueur  $L$ , l'index de cible normalisé noté  $nTS$  vaut :

$$nTS = 10 \log_{10} \frac{\sigma}{L^2} = 20 \log_{10} \frac{|f|}{L} = TS - 20 \log_{10} L \quad (2.4)$$

## 2.2 L'index de cible - dépendance fréquentielle et matérielle

Il est courant d'exprimer l'index de cible en fonction du terme adimensionné  $ka$  (Eq. 2.5), qui représente la dimension de la cible par rapport à la longueur de l'onde incidente :

$$ka = \frac{2\pi}{c} fa \quad (2.5)$$

avec  $c$  la célérité de l'onde dans le milieu<sup>4</sup>,  $f$  la fréquence de l'onde et  $a$  la dimension caractéristique de la cible.

Cette représentation avec une dépendance en  $ka$  (Eq. 2.5) de l'index de cible peut varier fortement selon les propriétés physiques de la cible : densité et célérité du son dans la cible.

---

3. cible acoustique : objet sur lequel l'onde acoustique se réfléchit.

4. célérité de l'onde acoustique de l'ordre de 1500m/s dans l'eau

### Cas d'un corps rigide

Un cas maintes fois abordé dans la littérature scientifique est la cible de type sphère rigide (Fig. 2.1), qui possède une impédance infinie et conduit à trois domaines fréquentiels ([Lur10], p.88-89).

Si la cible est petite devant la longueur d'onde ( $ka \ll 1$ , Fig. 2.1), on se situe dans le domaine de Rayleigh. L'index de cible croît à l'ordre 4 en fonction de la fréquence, mais la valeur de cet index reste très faible, rendant la cible difficilement détectable par acoustique.

Au contraire, si la cible est grande devant la longueur d'onde ( $ka \gg 1$ , Fig. 2.1), on se situe dans le domaine de l'optique géométrique. L'index de cible tend vers une valeur asymptotique établie par les dimensions de la sphère, et perd donc sa dépendance à la fréquence.

Entre ces deux domaines, il existe un domaine dit *interférentiel* ( $ka$  proche de 1, Fig. 2.1) où les ondes rampantes (notion abordée dans [Ube85]) interfèrent avec les ondes diffusées par la cible, faisant osciller la valeur de l'index de cible.

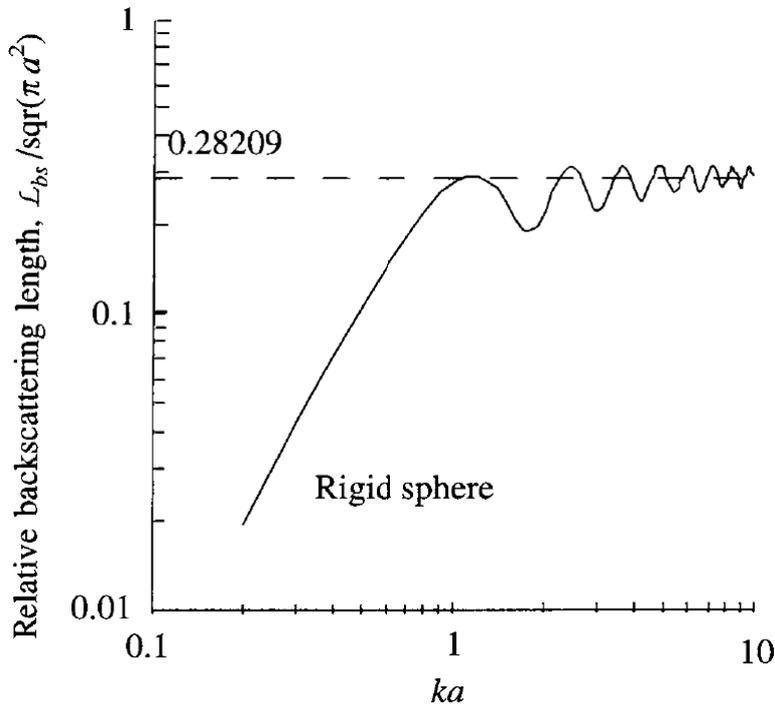


FIGURE 2.1 – Index de cible normalisé d'une sphère rigide ([MSC98], p.283)

### Cas d'un corps fluide

Dans le cas d'une cible de type sphère gazeuse (Fig. 2.2 - trait plein), on observe une résonance très forte en basse fréquence ( $ka \simeq 0.01$ ). Pour  $ka \leq 0.01$ , on retrouve le domaine de Rayleigh de la sphère rigide. Au dessus de la résonance principale, le domaine interférentiel n'est plus présent. En haute fréquence, l'index de cible de la sphère gazeuse tend vers celui de la sphère rigide, même si on observe des résonances d'ordre supérieur dues au fluide ([SGU79]).

## 2.3 L'index de cible - méthodes de calcul

Le calcul de l'index de cible nécessite de résoudre l'équation des ondes homogène :

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (2.6)$$

avec  $k$  le nombre d'onde et  $p$  le champ de pression.

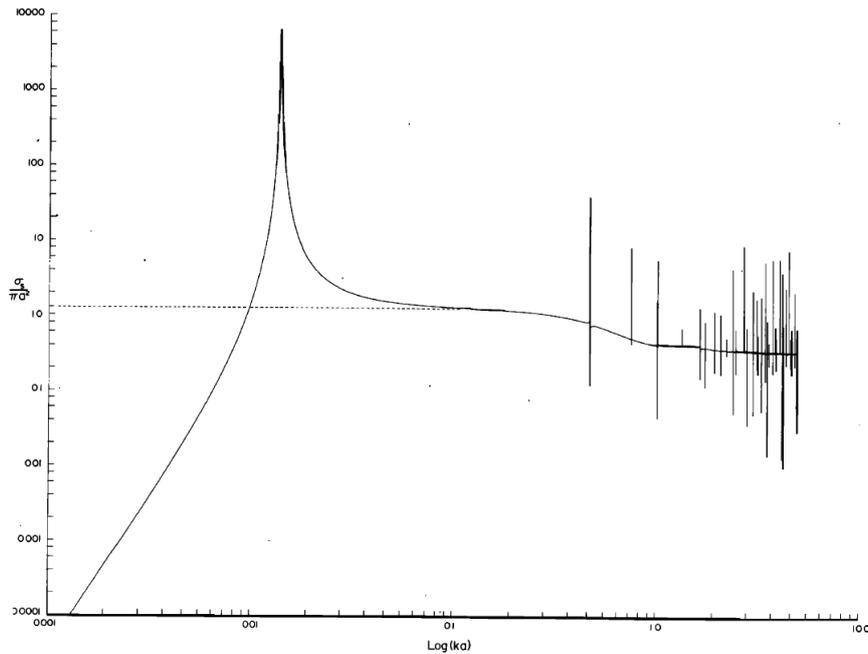


FIGURE 2.2 – Index de cible d’une sphère gazeuse (trait plein) et d’une sphère infiniment souple (trait pointillé) ([SGU79], Fig. 1)

Selon le domaine fréquentiel considéré (Sec. 2.2), le choix de la méthode de calcul d’index de cible peut différer.

En basse fréquence, dans le domaine de Rayleigh, la cible acoustique peut être modélisée par un monopole ou un dipole.

Autour du domaine *interférentiel*, l’équation des ondes (Eq. 2.6) peut être résolue analytiquement sur des formes géométriques simples, possédant des symétries fortes, par une approche dite *modale*. Cette méthode utilise un développement en séries harmoniques, de symétrie identique à la cible acoustique. Il faut en effet que la cible et le champ de pression aient une symétrie identique afin de pouvoir résoudre les conditions aux frontières.

L’avantage de cette méthode est qu’elle donne une solution *exacte* sur un large domaine fréquentiel. En très basse fréquence, cette approche est limitée par le fait qu’elle ne modélise pas les effets de viscosité et thermique. En très haute fréquence, il peut y avoir des instabilités numériques car la solution converge lentement.

En très haute fréquence seulement, des solutions dites *asymptotiques* permettent de modéliser par un sinus cardinal l’index de cible ([Sta88], Eq. 37).

Enfin, pour modéliser la réponse acoustique de formes complexes, il est nécessaire de se baser sur la théorie des éléments finis ou des intégrales de frontière afin de résoudre l’équation des ondes. Cette méthode est cependant lourde à implémenter et coûteuse en temps de calcul.

### 3 Résumé des enjeux du stage

#### 3.1 Objectif global du projet TOMOFISH

A terme, le projet TOMOFISH vise à construire, par une modélisation de la réponse acoustique, un index de cible individuel représentatif des petits poissons pélagiques du Golfe de Gascogne.

Durant la journée, ces poissons ont un comportement grégaire<sup>5</sup> ce qui facilite leur détection par acoustique en créant des échos forts et spatialement étendus (Chap. 1, Sec. 3).

Si la distribution de nage du banc est suffisamment aléatoire et sa densité limitée (Fig. 1.1), il est possible de déterminer cette abondance à partir d'un index de cible individuel donnant le comportement acoustique moyen d'un poisson du banc.

Pour calculer cet index de cible, il faut prendre en compte la variabilité de taille, de forme et de taux de gonflement de vessie et d'orientation des poissons. Cela fait, l'écho-intégration linéaire conduira à une valeur d'abondance correcte.

#### 3.2 Représentativité des échantillons

La particularité du projet TOMOFISH est de se baser sur des géométries réelles haute résolution (Chap. 1, Sec. 2.2) pour construire l'index de cible individuel. Cette approche donne accès à des informations précises sur la géométrie réelle des poissons pélagiques, utiles pour construire notre modèle acoustique.

Cependant, il faut émettre des réserves sur la représentativité des échantillons en terme de taille, de forme et de taux de gonflement de vessie car (1) pour le moment le nombre d'échantillons dont je dispose est limité et (2) les prélèvements ont pu modifier artificiellement ces paramètres. En effet, la principale inconnue est de savoir si le poisson vide partiellement sa vessie lors du prélèvement, comme abordé dans le Chap. 1, Sec. 2.1.

Ce second questionnement a été résolu avec l'acclimatation des poissons en bassin dans le cas de la manipulation avec l'aquarium de La Rochelle (Chap. 1, Sec. 2.1) car il était possible de déterminer visuellement les poissons qui ne dégazaient pas après l'euthanasie. Seuls ces derniers ont été tomographiés. Dans le cadre de mon stage, l'UMR SUBATECH m'a fourni la géométrie réelle tri-dimensionnelle haute résolution de 8 de ces sardines adultes (Annexe 1).

Lors des campagnes PELGAS (Chap. 1, Sec. 3), il est fréquent d'observer des bancs de sardine en surface, cependant la dynamique du banc fait qu'il ne reste pas plusieurs jours en surface comme nos sardines prélevées. Il est donc possible que nos vessies natatoires aient un taux de gonflement artificiellement élevé même si, par la suite, on admettra que ce taux de gonflement est plausible.

#### 3.3 De la modélisation acoustique à la modélisation géométrique

Rappelons avant tout que le projet TOMOFISH vise à terme à modéliser un index de cible individuel moyen d'un poisson appartenant à un banc.

Théoriquement, pour aboutir à cet index, il est nécessaire de connaître l'angle de nage, les dimensions et la forme de chaque poisson ; sous forme de moyenne ou de distribution de valeurs.

Des travaux ([Ols71]) basés sur des mesures *in-situ* ont montré qu'il était valable de modéliser l'angle de nage d'un banc de poissons par une distribution normale d'angles.

Les géométries haute résolution des échantillons dont je dispose (Annexe 1) permettent d'accéder à des dimensions et formes de vessie natatoire réalistes.

---

5. grégaire : se dit d'une espèce animale qui vit en groupe ou en communauté, mais sans structure sociale. [Lar]

La problématique se pose de comment extraire et exploiter ces informations de géométrie, car le nombre d'échantillon est limité; donc on ne peut pas dire que leur distribution est représentative de celle du banc. On doit donc voir ces données comme des géométries particulières possibles de sardines adultes.

Ainsi, pour modéliser l'index de cible individuel moyen d'un banc de poisson, il ne serait pas cohérent de simplement se baser sur ces géométries réelles car ces données fournissent des formes et dimensions *possibles* plutôt que *représentatives*.

C'est pourquoi, au début de mon stage, le choix a été fait de se ramener à des formes géométriques simples modélisables acoustiquement (Chap. 2, Sec. 2.3), tout en conservant une fidélité avec la géométrie réelle.

Après un inventaire des travaux sur la rétro-diffusion<sup>6</sup> acoustique d'objets de géométrie semblables aux vessies natatoires, les formes suivantes ont été retenues : le *cylindre fini droit*, le *cylindre fini uniformément courbé* et l'*ellipsoïde*<sup>7</sup> (Fig. 2.3).

En effet, (1) des travaux ont permis de calculer leur réponse acoustique formelle sur une large plage fréquentielle (Chap. 4, Sec. 1.1) et (2) ces formes simplifiées correspondent à une forme moyenne de vessie natatoire.

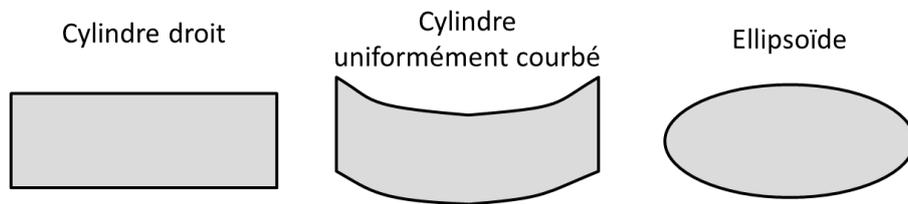


FIGURE 2.3 – Formes géométriques simples modélisant la vessie natatoire, en vue 2D.

La seconde assertion est justifiée par le fait que d'autres travaux utilisent ces formes pour modéliser des vessies natatoires ([DS90] et [RS04]). De plus, l'annexe 2 montre la correspondance entre la géométrie réelle de nos échantillons et les formes géométriques simples.

Ce choix de modèle acoustique nous fait perdre la description des formes exactes des vessies mais permet d'établir une distribution de tailles et de taux de gonflement des vessies natatoires à partir de géométries simples. Il est donc nécessaire de passer par une modélisation géométrique de la vessie natatoire (Chap. 3), où différentes hypothèses de dimensionnement seront considérées<sup>8</sup>.

### 3.4 Objectifs du stage

La première étape est l'implémentation d'outils informatiques, via le logiciel Matlab, permettant d'extraire des descripteurs géométriques des formes réelles, de dimensionner des formes simples et de travailler avec de multiples hypothèses.

Les modèles acoustiques retenus sont basés sur une approche dite *modale* (Sec. 2.3), réputée donnée une solution exacte, mais qui présente des approximations dans le cas du cylindre fini (Chap. 4, Sec. 1.1). Cela implique des domaines de validité fréquentiel, angulaire et géométrique limités que nous devons déterminer.

6. rétro-diffusion : diffusion de l'onde acoustique réfléchiée par un objet dans le sens inverse à la direction d'incidence.

7. l'ellipsoïde choisi est un ellipsoïde de révolution allongé selon son axe principal.

8. les intervalles de valeurs possibles pour le dimensionnement des formes de type *cylindre* ou *ellipsoïde* seront construit à partir des scans tri-dimensionnels réels

Ensuite, il faudra analyser la sensibilité de chaque modèle à ses paramètres d'entrée : dimensions et angle de nage. Cela permettra de comparer les modèles entre eux, ainsi que de voir quel paramètre d'entrée peut induire la plus grande variation de réponse acoustique.

L'impact de la forme sur l'index de cible sera étudié en (1) comparant la réponse acoustique d'un cylindre droit, d'un cylindre courbé et d'un ellipsoïde puis (2) en comparant la réponse acoustique d'une géométrie réelle face à nos modélisations. Le second point permettra aussi de déterminer les hypothèses de dimensionnement géométrique à conserver et de savoir si rester fidèle à la forme géométrique réelle implique une meilleure estimation de l'index de cible *théorique*.

Pour calculer l'index de cible *théorique* de nos échantillons, il est nécessaire de se baser sur la géométrie réelle (Annexe 1). La très haute résolution de nos scans permettrait d'utiliser efficacement la théorie des éléments finis (Sec. 2.3) mais engendrerait un temps de calcul de plusieurs jours pour chaque vessie, pour les hautes fréquences. De plus, le coût important d'un logiciel utilisant les éléments finis est un facteur bloquant.

Un compromis en terme de temps de calcul et de complexité d'implémentation a été trouvé avec le modèle du *cylindre déformé* (Chap. 4, Sec. 1.1.5) qui utilise la géométrie réelle d'un échantillon pour calculer une réponse acoustique suffisamment fidèle, sous certaines conditions.

## Chapitre 3

# Modélisation géométrique de la vessie natatoire

### 1 Introduction

Pour modéliser un index de cible représentatif, nous avons choisi de le calculer par une approche modale<sup>1</sup>. Cette méthode nécessite l'emploi de formes géométriques simples (Chap. 4, Sec. 1.1). L'enjeu est donc d'imaginer comment dimensionner ces formes géométriques simples à partir de formes réelles de vessie (Fig. 3.1).

Dans le cadre de mon stage, il m'a été fourni initialement la géométrie de 8 sardines adultes issues de la manipulation avec l'aquarium de La Rochelle (Annexe 1), possédant toutes une vessie gonflée.

La première étape de la modélisation géométrique consiste à extraire des descripteurs géométriques de ces données réelles. La seconde étape revient à choisir comment utiliser les descripteurs de notre jeu de données pour dimensionner les formes simplifiées (Fig. 3.1). A l'issue de ce travail, nous aurons plusieurs hypothèses de dimensionnement retenues.

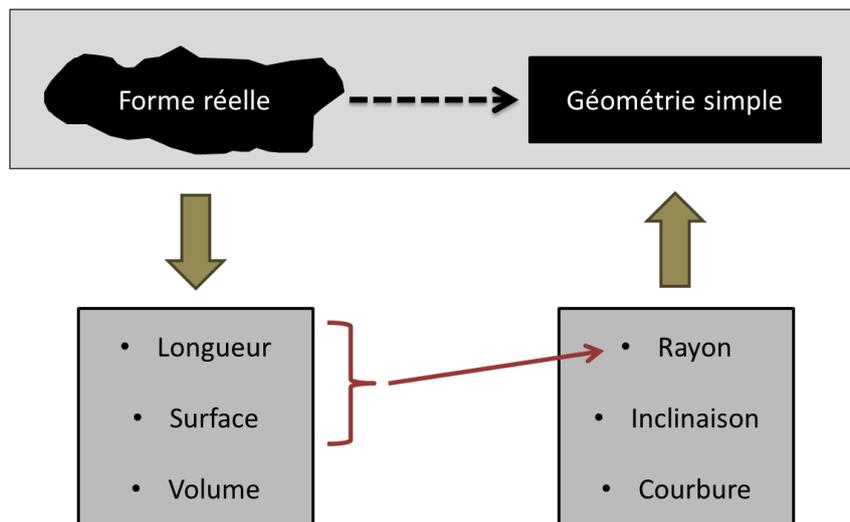


FIGURE 3.1 – Extraction des paramètres calculables sur la forme réelle (longueur, surface, volume) puis dimensionnement des formes géométriques simples (longueur, rayon) à partir de descripteurs de la forme réelle.

1. approche modale : résolution de l'équation des ondes par une série modale.

Enfin, les géométries réelles serviront aussi à construire les intervalles de valeurs possibles de nos descripteurs de formes simplifiées (Sec. 4).

### 1.1 La donnée (format)

Les données brutes fournies par l'UMR SUBATECH sont des fichiers décrivant une surface polygonale tri-dimensionnelle, pour la vessie natatoire et l'enveloppe corporelle externe du poisson. Une surface polygonale est décrite par un ensemble de sommets et un ensemble de faces ([def]).

Initialement, les fichiers sont dans un format propriétaire. Il faut donc utiliser une routine permettant de lire leur contenu puis de les convertir en données importables vers le logiciel Matlab ([Mat]). De plus, l'unité des dimensions spatiales est le voxel<sup>2</sup>. Connaissant la résolution de la tomographie, de l'ordre de 77 $\mu$ m, les géométries sont converties dans un espace métrique.

### 1.2 Convention d'orientation

Afin d'avoir un unique repère poisson, nous allons adopter la convention de la référence [TNF09] (Fig. 3.2) pour la dénomination et l'orientation des axes. L'axe X correspond à l'axe longitudinal du poisson, orienté de la queue vers la tête. L'axe Y correspond à l'axe transverse horizontal, orienté de la gauche vers la droite. L'axe Z correspond à l'axe transverse vertical, orienté du haut vers le bas.

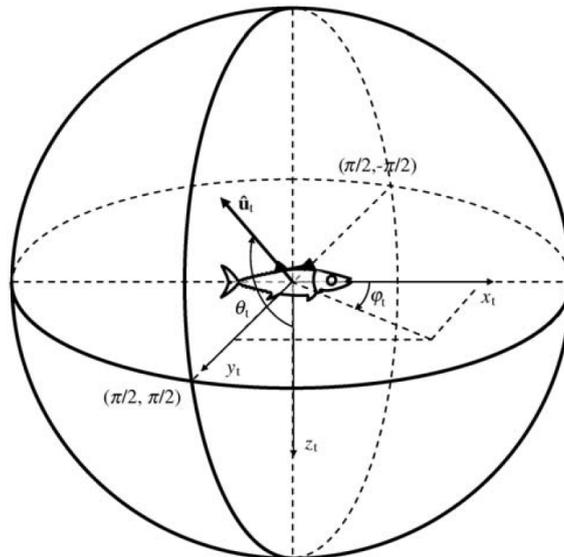


FIGURE 3.2 – Convention sur les axes du repère poisson  $(x_t, y_t, z_t)$  ([TNF09])

Par la suite, les formes géométriques introduites posséderont une symétrie de révolution selon l'axe  $X_s$  et leur centre sera confondu avec le centre géométrique de la vessie natatoire.

## 2 Extraction des descripteurs géométriques

La première étape de la modélisation géométrique est d'extraire des descripteurs géométriques de nos données réelles. Ces informations serviront à dimensionner nos formes simplifiées.

Pour décrire l'orientation de la vessie natatoire, nous introduisons un paramètre d'inclinaison. Pour décrire les dimensions de la vessie natatoire, nous introduisons une dimension longitudinale et une dimension transversale. Le rapport de ces longueurs sera appelé *aplatissement*. Pour décrire la forme de la vessie natatoire, nous introduisons un paramètre de courbure.

2. voxel : pixel tri-dimensionnel

Cette partie va donc définir les descripteurs géométriques, ainsi que leurs méthodes d'extraction.

### 2.1 Implémentation numérique

La première étape consiste à la lecture des géométries brutes (Sec. 1.1), puis à leur transfert dans le repère poisson  $(X_p, Y_p, Z_p)$  (Fig. 3.7), suivant la convention d'orientation définie précédemment (Sec. 1.2).

Afin de pouvoir numériquement extraire les différents paramètres, nous découpons la vessie natatoire en tranches de 0,1mm selon l'axe  $X_p$  du poisson (Fig. 3.3). Chaque tranche possède un centre, une longueur, une largeur et une hauteur locales. Pour garder une cohérence avec cette approche, tous les paramètres géométriques calculés par la suite le seront dans le repère poisson  $(X_p, Y_p, Z_p)$ .

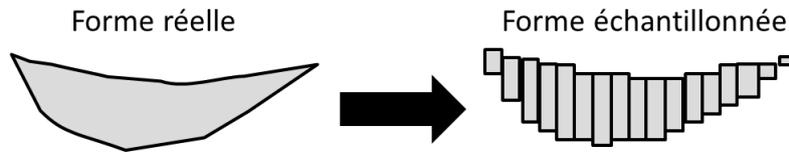


FIGURE 3.3 – Découpage de la vessie natatoire en tranches de 0,1mm selon l'axe  $X_p$  du poisson.

### 2.2 Longueur de la vessie natatoire : $L_{vessie}$

Le corps du poisson et sa vessie natatoire sont caractérisés par des nuages de point.

La longueur du poisson correspond à sa longueur totale : de la tête jusqu'à l'extrémité de la queue ([BB15], p.12).

La longueur de sa vessie natatoire  $L_{vessie}$  est aussi calculée dans le repère poisson  $(X_p, Y_p, Z_p)$ , comme la distance entre les bornes extrêmes selon la coordonnée  $X_p$  (Fig. 3.4).

La hauteur  $H$  et la largeur  $W$  locales de la vessie natatoire peuvent aussi être calculées pour chaque tranche (Fig. 3.3), comme la distance entre les bornes extrêmes selon la coordonnée  $Z_p$  et la coordonnée  $Y_p$  (Fig. 3.4) d'une tranche donnée.

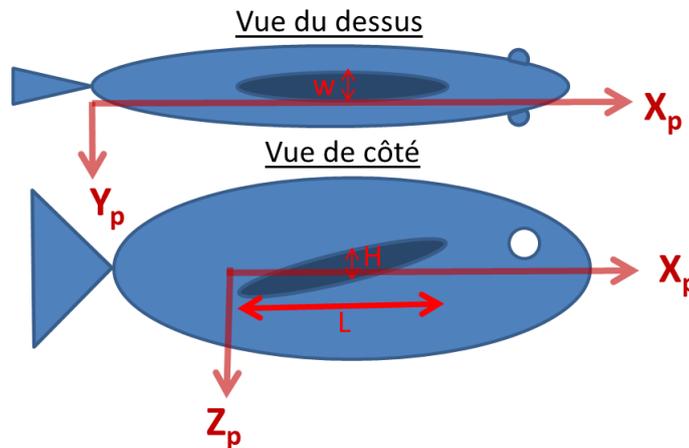


FIGURE 3.4 – Définition de la longueur ( $L$ ), la largeur ( $W$ ) et la hauteur ( $H$ ) de la vessie natatoire dans le repère poisson  $(X_p, Y_p, Z_p)$ .

### 2.3 Rayon équivalent : $R$

Les formes simplifiées modélisant géométriquement la vessie natatoire ont une symétrie de révolution par rapport à l'axe principal de la vessie natatoire (Fig. 2.3). Nous voulons donc nous ramener à deux paramètres pour dimensionner la vessie natatoire : une dimension longitudinale et une dimension transversale. Le rapport de ces deux paramètres sera défini comme l'*aplatissement*.

Il faut donc se ramener à un seul paramètre pour le dimensionnement transversal.

Initialement, on peut approximer la vue en coupe d'une vessie natatoire (plan  $(Y_v, Z_v)$ ) par une ellipse paramétrée par la largeur et la hauteur locales de l'organe. En introduisant un rayon équivalent, avec comme hypothèse la conservation de l'aire, nous allons considérer que l'ellipse peut être simplifiée en un cercle (Fig. 3.5).

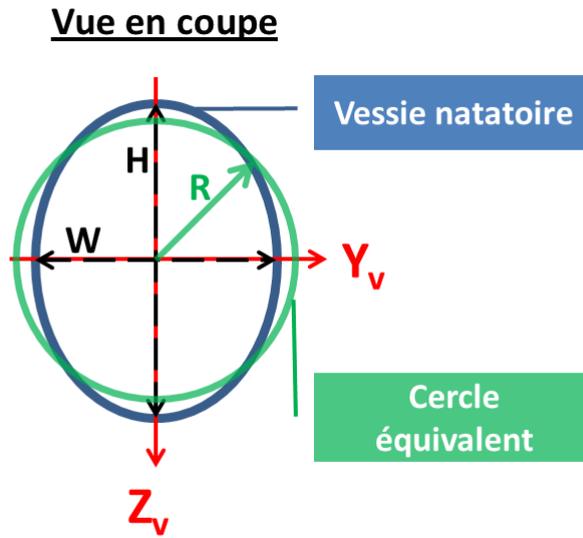


FIGURE 3.5 – Définition du rayon équivalent  $R$  - vue en coupe de la vessie natatoire dans le plan  $(Y_v, Z_v)$

L'hypothèse de conservation de l'aire entre une ellipse et un disque donne l'égalité suivante :

$$\pi HW = \pi R^2 \quad (3.1)$$

On en déduit l'expression du rayon équivalent :

$$R = \sqrt{HW} \quad (3.2)$$

Ainsi, nous pouvons maintenant associer à chaque tranche de la vessie natatoire (Fig. 3.3) un rayon équivalent  $R$  local.

### 2.4 Partie significative de la vessie natatoire

La forme réelle de la vessie natatoire montre que la majeure partie du volume est présente sur la partie centrale bombée (Annexe 1). Les extrémités, au contraire, sont généralement fines. L'intensité de la réponse acoustique étant liée en partie aux dimensions de la cible, il serait cohérent de penser que l'essentiel de la contribution à l'index de cible est due à la partie centrale bombée de l'organe.

Pour sélectionner cette partie dite *représentative* ou *significative* de la vessie natatoire, on introduit un seuillage sur le rayon équivalent  $R$  (Fig. 3.6). Soit  $R_{max}$  le rayon équivalent maximum de la vessie natatoire,  $R$  le rayon équivalent local et  $p$  un réel défini entre 0 et 1. Alors les zones représentatives de la vessie natatoire vérifient la relation :

$$R \geq p * R_{max} \tag{3.3}$$

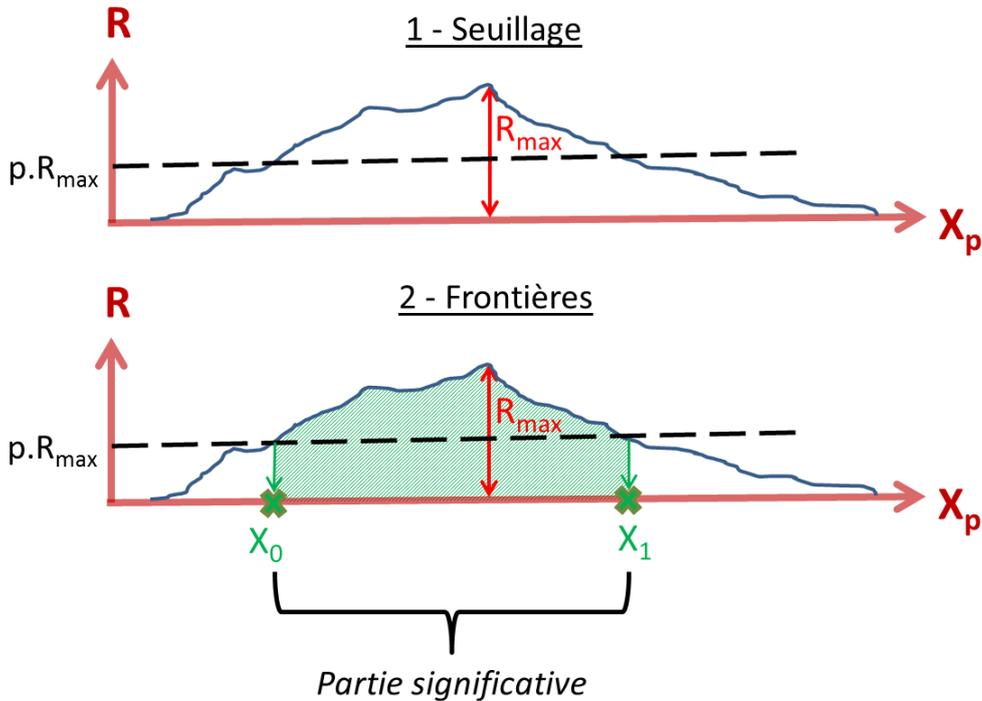


FIGURE 3.6 – Définition de la partie significative de la vessie natatoire.

Cette notion de partie significative servira à considérer l'influence des extrémités dans la réponse acoustique globale de la vessie natatoire, en introduisant de nouvelles possibilités de dimensionnement.

### 2.5 Inclinaison de la vessie natatoire : $\theta_b$

Le seul désalignement notable entre le poisson et la vessie natatoire est dans le plan  $(Z,X)$  (REF). L'inclinaison de la vessie natatoire  $\theta_b$  est donc par rapport à l'axe longitudinal du poisson (Fig. 3.7) dans le plan  $(Z_p, X_p)$ .

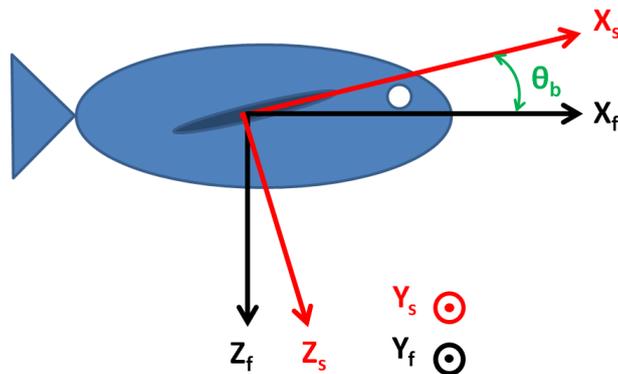


FIGURE 3.7 – Inclinaison de la vessie natatoire  $(X_v, Y_v, Z_v)$  par rapport au corps du poisson  $(X_p, Y_p, Z_p)$

Pour calculer l'inclinaison, une régression linéaire est effectuée sur la position de la partie centrale ou supérieure<sup>3</sup> de chaque tranche de la vessie natatoire (Fig. 3.3).

La figure 3.8 présente les coordonnées de la partie centrale ou supérieure de chaque tranche de la vessie natatoire, et les inclinaisons calculées associées, pour une sardine de notre jeu de données (Annexe 1).

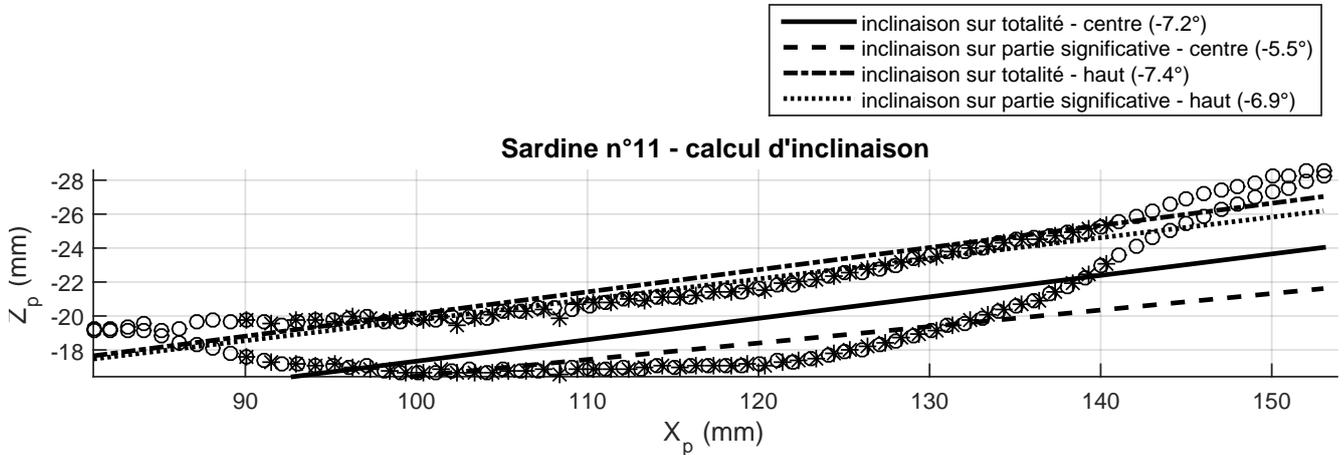


FIGURE 3.8 – Calcul de l'inclinaison de la vessie natatoire de la sardine n°11 (Annexe 1, Fig. 21) par régression linéaire. Les cercles représentent l'ensemble de la vessie natatoire, et les croix la partie significative.

## 2.6 Courbure de la vessie natatoire : $\gamma_{max}$

L'analyse de nos géométries réelles (Annexe 1) a conduit à noter la présence d'une courbure plus ou moins régulière sur la partie supérieure de la vessie natatoire, dans le plan  $(Z_p, X_p)$ .

Il est possible d'évaluer la contribution de cette courbure sur la réponse acoustique dans le cas d'un cylindre courbé ([Sta89]). Ce paramètre va donc être déterminé géométriquement.

Pour calculer la courbure, une régression linéaire est effectuée sur la position de la partie centrale ou supérieure de chaque tranche de la vessie natatoire (Fig. 3.3).

La figure 3.9 présente les coordonnées de la partie centrale ou supérieure de chaque tranche de la vessie natatoire, et les courbures  $\gamma_{max}$  calculées associées, pour une sardine de notre jeu de données (Annexe 1).

## 2.7 Surface et volume de la vessie natatoire

Les données brutes sont des fichiers décrivant une surface polygonale tri-dimensionnelle, pour la vessie natatoire et l'enveloppe corporelle externe du poisson. Une surface polygonale est décrite par un ensemble de sommets et un ensemble de faces ([def]).

Le logiciel *Matlab* ([Mat]) peut directement calculer à partir d'une surface polygonale une surface et un volume associé. Ainsi, en considérant que les géométries initiales ont été acquises à haute résolution<sup>4</sup>, on peut considérer que ces valeurs de surface et de volume sont exactes et correspondent à la géométrie réelle.

3. la partie supérieure a plus d'influence que la partie inférieure car l'onde arrive du dessus.

4. voxels de 77 $\mu$ m.

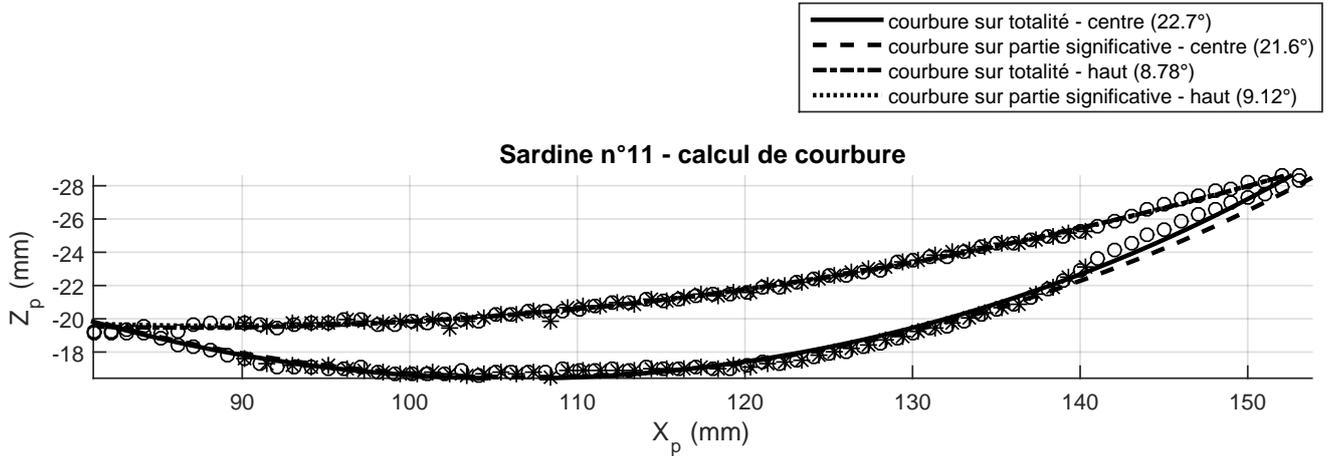


FIGURE 3.9 – Calcul de la courbure de la vessie natatoire de la sardine n°11 (Annexe 1, Fig. 21) par régression linéaire. Les cercles représentent l’ensemble de la vessie natatoire, et les croix la partie significative.

### 3 Dimensionnement des formes simplifiées

Le rôle du dimensionnement est d’adapter au mieux les formes simplifiées<sup>5</sup> (Chap. 2, Sec. 3.3) à la forme réelle de la vessie natatoire.

Pour ce faire, il est possible de jouer sur la valeur des différents descripteurs géométriques de ces formes :

- la longueur, notée  $L_{forme}$ , qui caractérise la dimension longitudinale ;
- l’aplatissement, noté  $a/b_{forme}$ , qui caractérise le rapport entre la dimension longitudinale et la dimension transversale (Sec. 2.3) ;
- la courbure ;

De plus l’inclinaison entre la forme géométrique simplifiée modélisant la vessie natatoire et le corps du poisson peut aussi être estimée de différentes manières (Sec. 2.5).

#### 3.1 Rayon équivalent tronqué $R_p$ et longueur tronquée $L_p$

La notion de partie significative (Sec. 2.4) envisage de dimensionner la vessie natatoire par un cylindre de longueur réduite  $L_p$ . Le critère utilisé, représenté par le paramètre  $p$ , était de conserver un rayon équivalent  $R$  supérieur à une valeur minimum (Eq. 3.3).

D’après la figure 3.6,  $L_p = X_1 - X_0$ .

$R_p$  correspond à la moyenne des rayons équivalents  $R$  respectant la condition (3.3).

L’introduction de cette longueur tronquée  $L_p$  et de ce rayon  $R_p$  offre de nouvelles possibilités de dimensionnement.

#### 3.2 Liste des dimensionnements possibles

La longueur  $L_{forme}$  de la forme géométrique simplifiée peut être définie comme :

- la longueur totale  $L_{vessie}$  de la vessie natatoire :  $L_{forme} = L_{vessie}$
- la longueur tronquée  $L_p$  de la vessie natatoire :  $L_{forme} = L_p$

5. formes simplifiées : *cylindre droit, cylindre courbé et ellipsoïde*

L'aplatissement  $a/b_{forme}$  de la forme géométrique simplifiée peut être défini comme le rapport entre la longueur de la forme simplifiée  $L_{forme}$  et :

- le rayon équivalent (Sec. 2.3) maximum de la vessie natatoire :  $a/b_{forme} = \frac{L_{forme}}{2R_{max}}$
- le rayon tronqué de la vessie natatoire :  $a/b_{forme} = \frac{L_{forme}}{2R_p}$
- le rayon obtenu par conservation de la surface de la vessie natatoire
- le rayon obtenu par conservation du volume de la vessie natatoire

Les différents choix de dimensionnement pour la courbure sont résumés dans la section 2.6.

### 3.3 Dimensionnements retenus

L'index de cible est un *indice de rétro-diffusion surfacique*, lié à la surface apparente de la cible. La surface réelle de la vessie natatoire est donc un paramètre dimensionnant de l'index de cible.

Ainsi, nos choix de dimensionnements seront basés sur une conservation de cette surface réelle.

Le premier choix retenu est de conserver la longueur totale de la vessie natatoire  $L_{vessie}$  et d'y associer un rayon obtenu par conservation de la surface de la vessie natatoire.

Le second choix retenu est de mieux modéliser la partie centrale bombée de la vessie et de réduire l'importance des extrémités. Ainsi, on aurait meilleure fidélité à la forme réelle par rapport au premier choix qui surestime l'importance des extrémités et sous-estime la partie centrale. Pour ce faire, on utilise la longueur tronquée  $L_p$  de la vessie natatoire et on y associe un rayon obtenu par conservation de la surface de la vessie natatoire.

Concernant le calcul de la courbure et de l'inclinaison, il a été observé qu'utiliser les valeurs obtenues par régression linéaire sur la partie supérieure de la vessie natatoire (Fig. 3.8 et Fig. 3.9) donnaient des réponses acoustiques plus proches de la réalité (Chap. 4, Sec. 4.14).

Ce seront donc ces valeurs de courbure et d'inclinaison qui serviront pour la modélisation acoustique (Tables 3.1 et 3.2).

## 4 Descripteurs géométriques de nos jeux de données

La table 3.1 résume les paramètres statistiques des descripteurs géométriques extraits de notre jeu de données : moyenne et écart-type.

Cependant, ces paramètres ne sont pas fiables car nos échantillons ne passent pas le test du  $\chi^2$ , principalement à cause du faible nombre d'éléments<sup>6</sup>. Ainsi, il faut prendre ces valeurs à titre indicatif, et ne pas se baser sur la table 3.1 pour construire des distributions de longueur, aplatissement ou courbure.

Descripteur	Valeur moyenne	Ecart-type
$L_{poisson}$	17cm	1,6cm
$L_{vessie}$	6,6cm	0,7cm
$L_{vessie}/L_{poisson}$	38,8%	1,4%
$S_{vessie}$	11,7cm <sup>2</sup>	2,3cm <sup>2</sup>
$V_{vessie}$	2,3cm <sup>3</sup>	0,7cm <sup>3</sup>
Taux de gonflement	4,6%	0,6%
Aplatissement cylindre	12,4	0,6
Inclinaison	6,8°	0,8°
Courbure	6,8°	2,3°

TABLE 3.1 – Descripteurs de la géométrie du jeu de données *Sardines de La Rochelle*

6. nous ne disposons que de huit poissons.

Le rapport  $L_{vessie}/L_{poisson}$  peut être considéré comme constant si on ramène l'écart-type à la moyenne (Annexe 4, Fig. 34). Ainsi, il suffit de connaître la taille du poisson pour en déduire la taille de sa vessie natatoire.

Cela justifie que les lois d'index de cible (Eq. 1.1) utilisent des longueurs moyennes de poisson plutôt que d'organe de flottabilité.

### Intervalle de valeurs possibles pour nos descripteurs géométriques

On peut en premier lieu choisir les valeurs des descripteurs minimales et maximales prises par l'ensemble des huit *Sardines de la Rochelle* (Annexe 4, Fig. 33), et ensuite établir un intervalle de valeurs possibles (Table 3.2 - colonne 2).

Nous pouvons aussi déduire des statistiques de chaque descripteur (Table 3.1) son intervalle de confiance à 95% (Table 3.2 - colonne 3).

Cependant, vu que nos descripteurs ne suivent pas une loi normale, l'étude de sensibilité des modèles acoustiques (Chap. 4, Sec. 3) utilisera la première définition : les descripteurs géométriques prendront des valeurs comprises entre les bornes minimales et maximales des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2).

Descripteur	Intervalle en se basant sur les bornes min/max	Intervalle 95% confiance
$L_{poisson}$	[15,3 ; 19,4]cm	[12,2 ; 21,8]cm
$L_{vessie}$	[5,8 ; 7,5]cm	[4,5 ; 8,7]cm
$L_{vessie}/L_{poisson}$	[36,5 ; 40,7]%	[34,6 ; 43]%
$S_{vessie}$	[9,2 ; 15,5] $cm^2$	[4,8 ; 18,6] $cm^2$
$V_{vessie}$	[1,6 ; 3,6] $cm^3$	[0,2 ; 4,4] $cm^3$
Taux de gonflement	[3,4 ; 5,5]%	[2,8 ; 6,4]%
Aplatissement cylindre	[11,5 ; 13,2]	[10,6 ; 14,2]
Inclinaison	[5,5 ; 8,1] $^\circ$	[4,4 ; 9,2] $^\circ$
Courbure	[3,2 ; 9,7] $^\circ$	[0 ; 13,7] $^\circ$

TABLE 3.2 – Intervalles des descripteurs de la géométrie du jeu de données *Sardines de La Rochelle*

## Chapitre 4

# Modélisation acoustique de la vessie natatoire

## 1 Etat de l'art - modèles de calcul d'index de cible

### 1.1 Présentation des modèles retenus

Décrire la manière exacte dont une onde acoustique est diffusée par un objet (Chap. 2, Eq. 2.1) nécessite de résoudre l'équation des ondes (Chap. 2, Eq. 2.6) en champ lointain et d'appliquer des conditions aux frontières cohérentes. Cela s'avère très complexe (Chap. 2, Sec. 2.3) et n'a été résolu analytiquement, de manière *exacte*, que pour des géométries possédant des symétries fortes comme le plan infini, la sphère ([Uri83], p.302), le cylindre infini ([Ray45]) et le sphéroïde ([Fur88]).

Des travaux ont aussi conduit à des résultats approchés dans le cas du cylindre fini droit ([Sta88]) et du cylindre fini uniformément courbé ([Sta89]). Ces dernières formes nécessitent d'employer des approximations<sup>1</sup> pour résoudre l'équation des ondes et y associer des conditions aux frontières ([CH94]).

Enfin, il est aussi possible de calculer l'index de cible sur des formes complexes en les découpant dans le sens de la longueur en une infinité de cylindres élémentaires ([CH94] et [Sta89]), comme réalisé dans le chapitre 3, figure 3.3. Cela permet de se passer de la théorie des éléments finis pour calculer des réponses acoustiques de géométries réelles mais ajoute des approximations supplémentaires.

L'enjeu est donc d'avoir une parfaite connaissance des hypothèses et approximations utilisées par le modèle pour l'appliquer dans son domaine de validité angulaire et fréquentiel.

Notre étude se focalise sur la réponse acoustique de la vessie natatoire d'un poisson pélagique (Chap. 2, Sec. 1). Cette cible est un corps fluide, remplie d'un gaz dont la composition est proche de l'air. Dans le chapitre 3, la forme réelle de la vessie natatoire a été modélisée par des formes géométriques simplifiées, afin d'estimer une réponse acoustique exacte.

Après avoir passé en revue les modèles de calcul d'index de cible existants se basant sur des géométries simplifiées concordantes avec la vessie natatoire, il a été décidé de retenir les cibles acoustiques suivantes :

- Cylindre droit, fini et fluide ([Sta88]) ;
- Cylindre uniformément courbé, fini et fluide ([Sta89]) ;
- Ellipsoïde fluide ([Fur88])
- Forme réelle échantillonnée en cylindres élémentaires ([CH94] et [Sta89]) ;

---

1. Méthode de Kirchhoff ([CH94]), méthode du débit volumique ([Sku71], Sec. 18.3, Chap. 21), ...

Tous ces modèles acoustiques ont été implémentés numériquement sous forme de routines Matlab, et validés à partir de publications. Pour plus de détails concernant la validation, il faut se référer à l'annexe 3.

### 1.1.1 Hypothèses et approximations des modèles

- l'onde acoustique atteint la cible en champ lointain, ainsi l'onde acoustique incidente est toujours supposée plane.
- l'impédance ne dépend que du milieu traversé et vaut  $\rho c$ , avec  $\rho$  la masse volumique du milieu et  $c$  la célérité de l'onde acoustique ([Leg11], p.53).
- la cible et le milieu l'environnant sont homogènes.
- il n'existe pas de phénomènes d'absorption, de dispersion et de non-linéarité dans le cylindre et le milieu insonifié ([Sta88]).
- le poisson se situe à la surface, donc il n'est pas nécessaire de modéliser la compression de la vessie avec la profondeur par une loi de Boyle.

### 1.1.2 Modèle acoustique - cylindre droit fini fluide ([Sta88])

Ce modèle acoustique calcule l'index de cible d'un cylindre droit fluide de longueur finie  $L$ .

Le fait que le cylindre soit fluide signifie qu'il n'est soumis qu'à des ondes de compression et qu'il n'existe pas d'ondes de cisaillement. De plus, la masse volumique relative entre l'intérieur du cylindre et le milieu ambiant est notée  $g$  et la vitesse du son relative entre l'intérieur du cylindre et le milieu ambiant est notée  $h$ .

Dans le cas du cylindre fini, le problème est que les conditions aux frontières sont basées sur une symétrie cylindrique et que l'onde diffusée en champ lointain a une symétrie sphérique. Il n'est donc pas possible de se baser sur une approche modale classique pour résoudre l'équation des ondes.

Cependant, il est possible de représenter la diffusion d'un cylindre infini par un débit volumique par unité de longueur ([Sku71], Sec. 18.3, Chap. 21). L'approximation employée pour calculer la diffusion du cylindre fini est d'intégrer le débit volumique par unité de longueur du cylindre infini sur la longueur du cylindre fini ([Sta88], p.57).

Cela revient à négliger les effets de bord<sup>2</sup> du cylindre, et donc se limiter à des ondes incidentes proches de la normale.

Suite à ces approximations, l'auteur aboutit à la fonction de rétro-diffusion d'un cylindre droit fluide de longueur finie  $L$  ([Sta88], Eq. 28) :

$$f_{\text{cylindre droit}} = \frac{-iL}{\pi} \text{sinc}(\Delta) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n B_n \quad (4.1)$$

avec  $\Delta$  qui vaut ([Sta89], p.693) :

$$\Delta = k_0 L \langle \vec{r}_i, \vec{r}_c \rangle \quad (4.2)$$

$\vec{r}_i$  est la direction de l'onde incidente et  $\vec{r}_c$  le vecteur tangent à l'axe principal de la cible acoustique au point d'impact.

et  $B_n$  vaut ([Sta89], p.692) :

$$B_n = \frac{-\epsilon_n}{1 + iC_n} \quad (4.3)$$

où  $\epsilon$  est le facteur de Neumann et  $C_n$  vaut, dans le cas d'un corps fluide ([Sta88], Eq. 12) :

$$C_n = \frac{[J'_n(x_1)N_n(x_0)]/[J_n(x_1)J'_n(x_0)] - gh[N'_n(x_0)/J'_n(x_0)]}{[J'_n(x_1)J_n(x_0)]/[J_n(x_1)J'_n(x_0)] - gh} \quad (4.4)$$

2. effets de bord : diffusion de l'onde acoustique par les extrémités du cylindre.

où  $J_n$  est une fonction de Bessel de première espèce et  $N_n$  une fonction de Bessel de deuxième espèce, aussi appelée fonction de Neumann.

$$x_0 = k_0 b \sin \theta \text{ et } x_1 = k_1 b \sin \theta \quad (4.5)$$

Tous les symboles sont rappelés dans la table des symboles 5 en fin de rapport.

### 1.1.3 Modèle acoustique - cylindre uniformément courbé fini fluide ([Sta89])

Ce modèle acoustique calcule l'index de cible d'un cylindre fluide de longueur finie  $L$  et de courbure uniforme  $\gamma_{max}$  (Fig. 4.1).

C'est une version complexifiée du modèle précédent ([Sta88]), qui se base sur les mêmes approximations pour résoudre l'équation des ondes<sup>3</sup>.

Grâce à cette approximation, l'auteur détermine la section efficace de rétro-diffusion d'un cylindre fluide de longueur finie  $L$  et de courbure uniforme  $\gamma_{max}$  ([Sta89], Eq. 26) :

$$\sigma_{\text{cylindre uniformément courbé}} = \frac{L^2}{\pi^2 \gamma_{max}^2} \left| \int_0^{\gamma_{max}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n B_n e^{i2k\rho_c(1-\cos\gamma)} d\gamma \right|^2 \quad (4.6)$$

On en déduit la fonction de rétro-diffusion d'un cylindre uniformément courbé fluide de longueur finie  $L$  en utilisant l'équation 2.2 du chapitre 2 :

$$f_{\text{cylindre uniformément courbé}} = \frac{-iL}{\pi \gamma_{max}} \int_0^{\gamma_{max}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n B_n e^{i2k\rho_c(1-\cos\gamma)} d\gamma \quad (4.7)$$

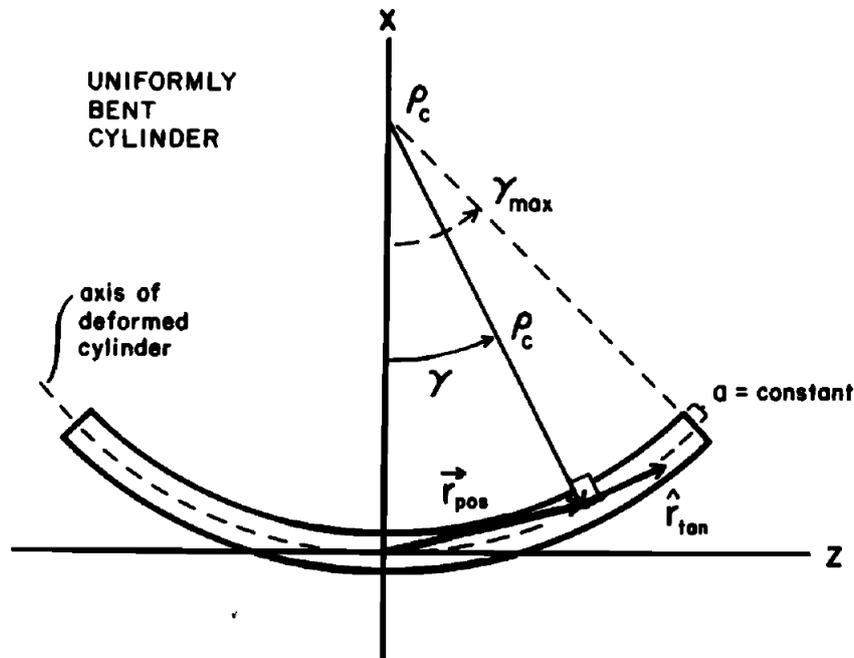


FIGURE 4.1 – Cylindre uniformément courbé ([Sta89], Fig. 4)

3. méthode du débit volumique ([Sku71], Sec. 18.3, Chap. 21).

### 1.1.4 Modèle acoustique - ellipsoïde de révolution fluide ([Fur88])

Ce modèle acoustique calcule l'index de cible d'un ellipsoïde de révolution fluide de demi-grand axe  $a$  et de demi-petit axe  $b$  en se basant sur une approche modale.

Cette fois-ci, la forme géométrique<sup>4</sup> permet directement d'aboutir à une réponse acoustique exacte (Chap. 4, Sec. 1.1), sans l'utilisation d'approximations comme dans le cas du cylindre droit fini (Sec. 1.1.2) qui limiterait la validité du modèle a des angles proches de la normale.

La complexité réside dans l'implémentation numérique qui nécessite d'utiliser des fonctions harmoniques ellipsoïdales. Ces fonctions sont difficiles à programmer et très coûteuses en temps de calcul, particulièrement si on cherche à estimer une réponse acoustique en haute fréquence. Du coup, les simulations basées sur ce modèle dans le cadre du projet se sont limitées à une fréquence maximale de 120kHz, qui peut déjà nécessiter plusieurs jours de calcul.

### 1.1.5 Modèle acoustique - cylindre déformé fini fluide ([Sta89])

Ce modèle acoustique calcule l'index de cible d'une forme complexe pouvant être représentée par une succession de cylindres élémentaires d'épaisseur infinitésimale  $L_e$ .

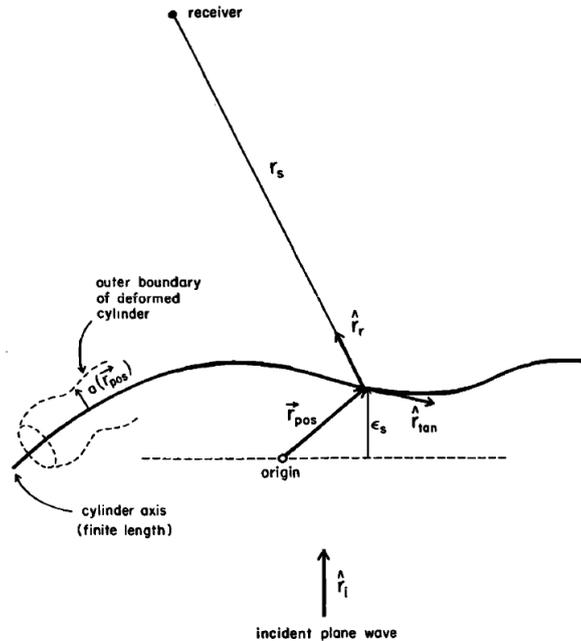


FIGURE 4.2 – Cylindre déformé ([Sta89], Fig. 1)

A condition d'un échantillonnage suffisamment fin, la réponse acoustique fournie par ce modèle correspond à la réponse acoustique *réelle* de la forme géométrique complexe. D'après la publication [SC00], il faut que :

$$L_e \ll \lambda \quad (4.8)$$

avec  $\lambda$  la longueur de l'onde acoustique et  $L_e$  l'épaisseur d'un cylindre élémentaire.

---

4. sphéroïde

Nous avons discrétisé les formes complexes de notre jeu de données *La Rochelle* en cylindres de longueur 1mm. De plus, toutes les simulations sont limitées à une fréquence maximale de 200kHz, ce qui donne une longueur d'onde dans l'eau de l'ordre de 8mm.

Même en haute fréquence, nous respectons donc cette condition (Eq. 4.8).

Ce modèle se base sur une sommation cohérente de la contribution acoustique de chaque cylindre élémentaire. L'index de cible de chaque cylindre élémentaire est issu du modèle *cylindre droit fluide* ([Sta88]). Ainsi, les effets de bord ne sont pas pris en compte, ce qui est judicieux car les cylindres élémentaires sont adjacents.

Fonction de rétro-diffusion d'un cylindre déformé ([Sta89], Eq. 8) :

$$f_{\text{cylindre déformé}} = \frac{-i}{\pi} \int_{r_{pos}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n B_n e^{i2k \langle \vec{r}_i, \vec{r}_{pos} \rangle} |dr_{pos}| \quad (4.9)$$

avec  $r_{pos}$  non normalisé. Les vecteurs  $\vec{r}_i$  et  $\vec{r}_{pos}$  sont représentés sur la figure 4.2.

## 2 Domaines de validité des modèles

### 2.1 Domaine de validité fréquentiel

D'après les données des campagnes PELGAS ([pel15]), la taille des sardines adultes est comprise entre 15cm et 24cm. En s'appuyant sur le rapport  $L_{vessie}/L_{poisson}$  issu de notre modélisation géométrique (Chap. 3, Table 3.2), la taille des vessies natatoires est comprise entre 5,8cm et 9,3cm. Cela nous permet de calculer notre domaine fréquentiel en  $ka$  (Eq. 2.5) sur une plage de fréquence de 18kHz à 200kHz :

$$ka = \frac{2\pi}{c} f \frac{1}{2} L_{vessie} \in [2; 39] \quad (4.10)$$

Nos modèles de calcul d'index se basent sur une approche modale (Chap. 2, Sec. 3.3) qui, dans le domaine fréquentiel qui nous intéresse, est la plus adaptée car elle donne une solution quasi-exacte sur l'ensemble du domaine fréquentiel.

Il est à noter que l'approche modale issue de ces modèles ne tient pas compte des phénomènes thermiques et de viscosité au niveau de la résonance principale (située autour de  $ka = 0,04$  d'après Fig. 4.3) car la résolution de l'équation des ondes se base sur l'équation homogène des ondes. En outre, il peut y avoir des problèmes de divergence numérique en très haute fréquence ( $ka \gg 50$ , à justifier). Cependant, notre domaine fréquentiel (Eq. 4.10) exclue ces deux zones, nous résolvons donc de manière exacte la réponse acoustique de notre forme géométrique parfaite.

### 2.2 Domaine de validité matériel

Les modèles acoustiques utilisés décriront la diffusion acoustique de l'organe de flottabilité du poisson ; la vessie natatoire. Cet organe est considéré comme un corps fluide homogène, de composition proche de l'air (Chap. 1, Sec. 1). La vessie natatoire est donc plus exactement un corps gazeux. Modèles acoustiques adaptés à : corps rigide, élastique ou fluide. On se trouve dans le troisième cas.

Dans le cas d'un corps fluide, les conditions aux frontières généralement retenues pour résoudre l'équation des ondes (Eq. 2.6) sont la continuité des pressions et des vitesses normales à l'interface corps/milieu ambiant. Si l'on fait tendre vers zéro l'impédance du fluide, c'est-à-dire qu'on le considère comme semblable à du vide, alors on se retrouve dans le cas limite du corps infiniment souple. Cet état n'a pas de réalité physique car il impose comme condition aux frontières une pression hydrostatique nulle.

Pour des paramètres géométriques adaptés aux données *La Rochelle*, nous avons tracé la réponse fréquentiel d'un cylindre fini fluide et d'un cylindre fini infiniment souple dans le cas du modèle de calcul d'index [Sta88] (Fig. 4.3).

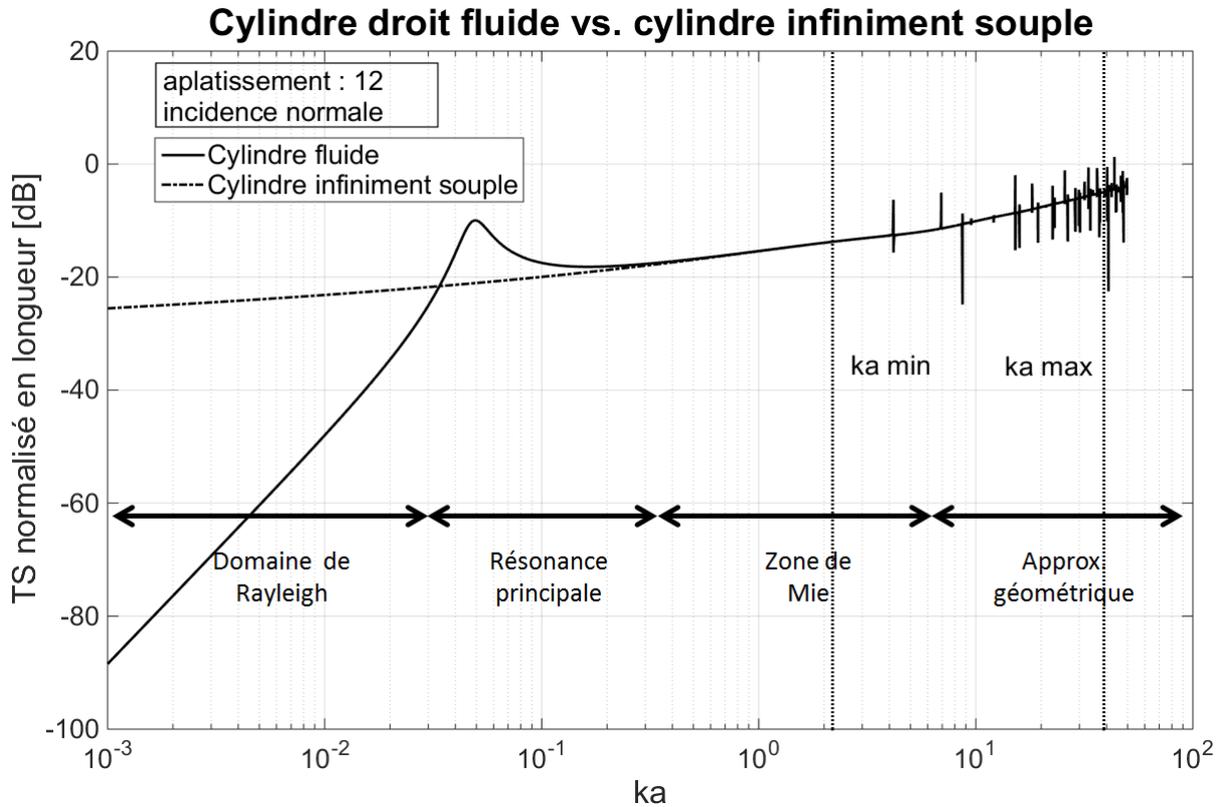


FIGURE 4.3 – Index de cible d'un cylindre gazeux (trait plein) et d'un cylindre infiniment souple (trait pointillé). Calcul basé sur [Sta88].

Pour des  $ka$  suffisamment grands ( $ka > 1$ ), le comportement d'un corps infiniment souple est identique à celui d'un corps gazeux (Fig. 4.3), à ceci près que le corps infiniment souple ne présente pas de résonances multiples (résultat similaire dans [SGU79]). Nous pouvons en conclure que pour le jeu de données qui nous intéresse, dont le domaine fréquentiel est connu (Eq. 4.10, bornes visibles sur Fig. 4.3), la réponse acoustique est la même, que nos cibles soient gazeuses ou infiniment souples.

Ainsi, la connaissance exacte de la composition du gaz présent dans la vessie natatoire n'est pas nécessaire pour avoir une réponse acoustique fidèle, et on peut se contenter de l'approximer par du vide sous réserve de rester dans notre domaine fréquentiel.

Les résonances multiples pour le cylindre fluide de la figure 4.3 sont expliquées par le passage par zéro de la fonction de Bessel de première espèce  $J_n(x_1)$  qui fait théoriquement tendre le rapport  $\frac{J'_n(x_1)}{J_n(x_1)}$  vers une valeur infinie dans l'équation 4.4. La figure 4.4 montre la corrélation entre le passage par zéro de la fonction de Bessel  $J_n$  et la résonance locale induite sur le terme  $B_n$  (Eq. 4.3), dans le cas  $n = 0$  (premier terme de la série modale de l'éq. 4.1).

Ces résonances d'ordre supérieur sont présentes sur des plages de  $ka$  très réduites. Ainsi, en intégrant la réponse acoustique sur la largeur de bande d'un sondeur acoustique, la contribution de ces résonances deviendrait négligeable.

De plus, leur forte amplitude est due à la symétrie parfaite du cylindre. Si on considère une cible réelle comme une vessie natatoire, la forme complexe non symétrique de l'organe engendrerait des niveaux de résonances multiples beaucoup plus faible bien que plus étalés, et positionnées à des fréquences différentes de ce que l'on observe dans le cas du cylindre parfait (Fig. 4.3).

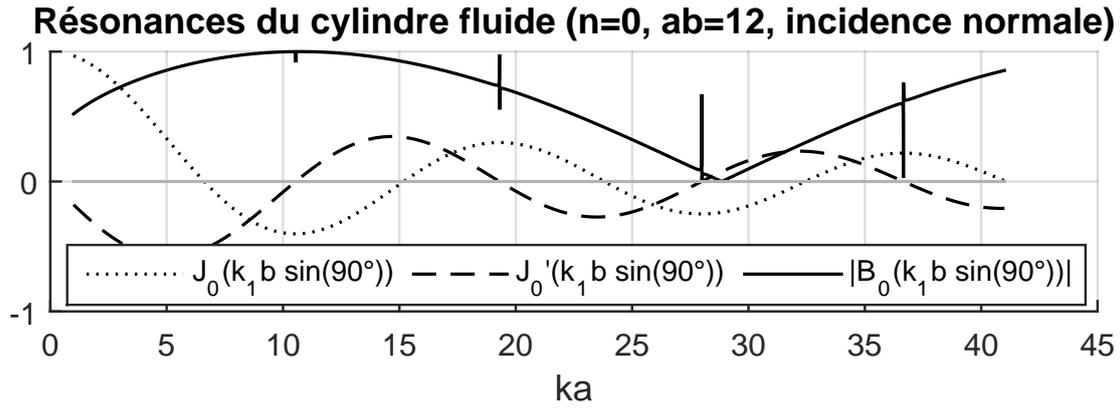


FIGURE 4.4 – Résonances du terme  $|B_0|$  (Eq. 4.3) lors du passage par zéro de la fonction de Bessel  $J_0$

On peut donc en conclure que leur contribution est négligeable sur une bande de fréquence.

Par la suite, nous considérerons que les vessies natatoires sont composées de vide. Ainsi, l'équation 4.4 du chapitre 4 se simplifie en :

$$C_n = \frac{N_n(x_0)}{J_n(x_0)} \quad (4.11)$$

Si la vessie se comprime avec la profondeur, on s'attend cependant à ce que la densité du gaz augmente et que l'aplatissement augmente. Si on compte étudier le TS d'une vessie en profondeur, il faudrait donc contrôler que notre conclusion est toujours valable avec ces nouvelles observations.

### 2.3 Domaine de validité angulaire

Le modèle *ellipsoïde* ([Fur88]) n'utilise pas d'approximations dans son approche modale qui engendrerait des limites de validité angulaire. Il est donc valide pour tout angle (Chap. 4, Sec. 1.1.4).

Au contraire, le modèle *cylindre fini droit* ([Sta88]) nécessite d'utiliser des approximations (Chap. 4, Sec. 1.1.2) qui réduisent son domaine de validité angulaire.

Cependant, l'auteur se limite à dire que le modèle est valide pour des angles proches de l'incidence normale, sans faire d'étude quantitative.

L'étude suivante portera donc sur les angles maximaux valides pour le modèle *cylindre droit fini* ([Sta88]).

Les modèles *cylindre droit courbé* et *cylindre droit déformé* ([Sta89]) dérivent du *cylindre droit fini*, donc les conclusions seront proches entre ces modèles.

La publication [Ye97] résout aussi l'équation des ondes dans le cas d'un cylindre fluide fini, mais en utilisant l'intégrale de Kirchhoff comme approximation au lieu du débit volumique. Les deux auteurs arrivent à des modèles acoustique du cylindre droit fini identiques (Eq. 15, [Ye97] et Eq. 28, [Sta88]), si on exclue la contribution des bords du cylindre.

Cependant, l'intérêt de la publication [Ye97] est d'ajouter la possibilité de prendre en compte ces effets de bord. Pour ce faire, les contributions de la partie centrale du cylindre ([Ye97], Eq. 15) et des bords du cylindre ([Ye97], Eq. 18) sont calculées séparément puis sommées de manière cohérente.

Ce modèle *avancé* du cylindre fluide fini va maintenant être comparé au modèle *classique* que nous utilisons (Fig. 4.5), et ainsi permettre d'estimer un domaine de validité angulaire.

L'incidence normale d'une onde acoustique sur le cylindre correspond à un angle de  $90^\circ$ . Les valeurs des descripteurs géométriques utilisés pour générer la figure 4.5 sont les moyennes des données *Sardines*

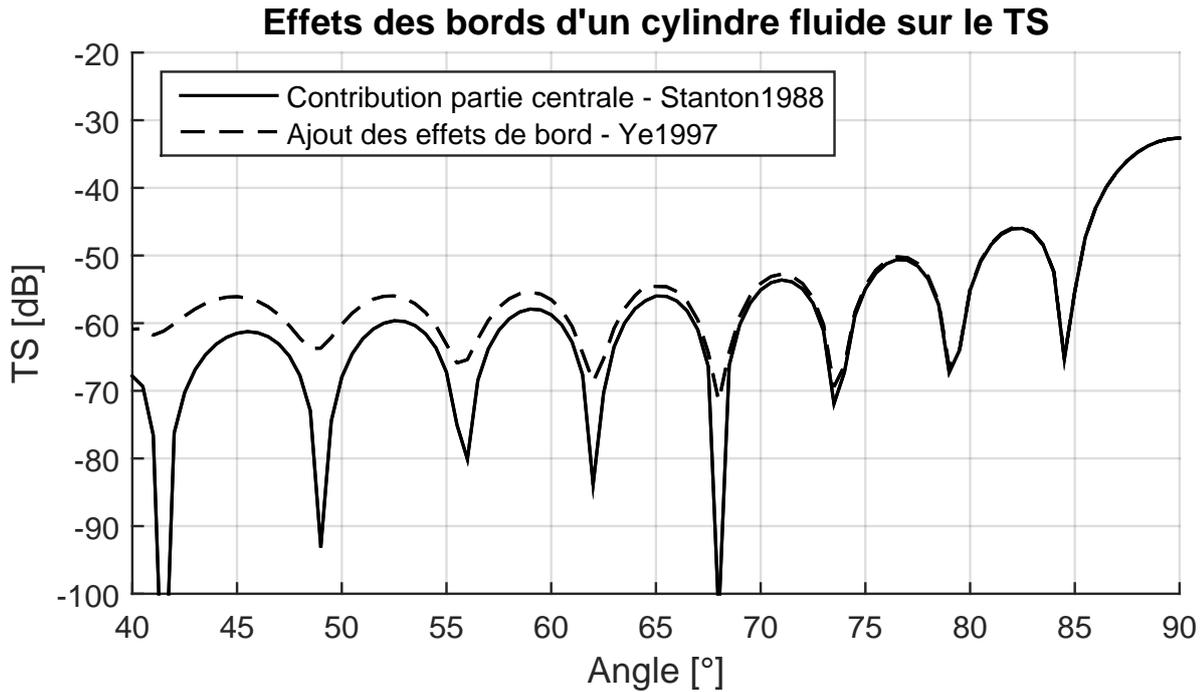


FIGURE 4.5 – Comparaison de modèles acoustiques *cylindre droit fini*, avec (–, [Ye97]) et sans (–, [Sta88]) prise en compte des effets de bord.

de La Rochelle car le domaine de validité angulaire est sensible à l'aplatissement ([PS95]), donc il est nécessaire d'utiliser des valeurs réalistes.

Sur le troisième pic de directivité angulaire (Fig. 4.5, angle de  $77^\circ$ ), on observe un écart de 0,5dB entre les index de cible des modèles acoustiques *cylindre droit fini*, avec ([Ye97]) et sans ([Sta88]) prise en compte des effets de bord.

Sur le quatrième pic de directivité angulaire (Fig. 4.5, angle de  $65^\circ$ ), l'ajout des effets de bord augmente de 1,5dB la valeur de l'index de cible.

Pour le pic de directivité suivant (Fig. 4.5, angle de  $58^\circ$ ), l'écart dépasse 2dB.

Il apparait aussi que lorsqu'on ajoute la contribution des effets de bord, les creux de directivité sont moins marqués à plus de  $20^\circ$  de la normale.

La publication [PS95] étudie -entre autres- les domaines de validité angulaire des modèles *cylindre fini* de Stanton ([Sta88] et [Sta89]). Ces résultats sont à prendre avec précaution car basés sur des corps rigides ou solides-élastiques, or l'étude ici présentée s'intéresse à des corps fluides ou infiniment souples (Chap. 4, Sec. 2.2).

Un seuil de 2dB d'écart pour établir le domaine de validité angulaire.

Dans le cas d'un cylindre rigide fini, ayant un aplatissement de  $10^5$ , le modèle est validé pour des angles jusqu'à  $30^\circ$  de la normale ([PS95], p.786). Dans le cas d'un cylindre solide/élastique fini, toujours avec un aplatissement de 10, le domaine de validité est réduit à  $10/20^\circ$  de la normale ([PS95], p.790).

Si on s'appuie sur le seuil de 2dB de [PS95] pour déterminer un domaine angulaire sur la comparaison des modèles cylindre fini fluide avec/sans effets de bord (Fig. 4.5), on trouve un domaine de validité allant jusqu'à  $30^\circ$  par rapport à la normale.

5. valeur proche de l'aplatissement de nos données La Rochelle.

Ce résultat semble cohérent car dans l'ordre de grandeur des bornes de validité d'un cylindre droit de [PS95], bien que la composition de la cible soit différente.

Suite à notre étude, nous considérerons donc que le domaine de validité du *cylindre fini droit* ([Sta88]) s'étend jusqu'à 30° de la normale.

Pour les modèles *cylindre fini courbé* et *cylindre fini déformé* ([Sta89]), la courbure naturelle de la vessie natatoire tend à orienter les bords vers le haut, comme sur la figure 4.1. La contribution des bords du cylindre devrait donc être plus importante pour des angles d'incidence proche de la normale.

Ainsi, le domaine de validité de ces deux derniers modèles devrait être réduit par rapport au *cylindre droit fini*.

Par la suite, nous n'utiliserons pas le modèle de cylindre fini qui tient compte des effets de bord ([Ye97]), car nous n'avons aucune certitude que cette approche donne des niveaux de réponse acoustique réalistes loin de la normale. En effet, il n'existe pas d'étude basée sur ce modèle qui permette de valider le niveau en amplitude des pics de directivité loin de la normale.

## 2.4 Domaine de validité d'aplatissement

Le modèle *ellipsoïde* ([Fur88]) n'utilise pas d'approximations dans son approche modale qui engendrerait des limites de validité d'aplatissement (Chap. 4, Sec. 1.1.4). Il est donc valide pour tout aplatissement.

Le modèle *cylindre fini droit* ([Sta88]), du fait de son approximation de négliger les effets de bord, nécessite d'avoir une géométrie allongée, c'est-à-dire une valeur d'aplatissement supérieure à 1 ([Sta88], p.57), pour que la contribution des bords en terme de surface reste faible même pour des incidences éloignées de la normale.

Ce résultat peut être étendu au cylindre fini courbé.

Les données *La Rochelle* ont des valeurs d'aplatissement autour de 12, qui respectent donc bien la condition d'avoir une géométrie allongée. On est donc bien dans le domaine de validité d'aplatissement de nos modèles.

### 3 Etude de sensibilité des modèles aux paramètres d'entrée

L'index de cible individuel d'un poisson dépend de la fréquence de l'onde acoustique (Chap. 2, Sec. 2.2) et des caractéristiques intrinsèques à la cible (orientation, forme, dimensions et composition).

La cible acoustique, initialement le poisson, a été réduite à l'organe de flottabilité : la vessie natatoire (Chap. 4, Sec. 1.1.1).

La nécessité de ramener la géométrie de l'organe de flottabilité du poisson à des formes simples (Chap. 2, Sec. 3.3) a conduit à dimensionner la vessie avec un nombre limité de descripteurs géométriques : une longueur, un aplatissement et une courbure.

Ces descripteurs caractérisent les dimensions et la forme de la vessie natatoire. De ce fait, une variation de ces paramètres induit une variation de l'index de cible TS.

Il va donc falloir étudier la sensibilité de chaque modèle acoustique (Chap. 4, Sec. 1.1.2, 1.1.3 et 1.1.4), en (1) trouvant les variations maximales de chaque descripteur géométrique, en se basant sur les résultats de la Table 3.2, puis en (2) y associant une variation maximale de l'index de cible. Tous les résultats seront considérés en basse fréquence (38kHz) et en haute fréquence (120kHz).

Pour trouver les variations maximales des descripteurs géométriques, on peut soit se baser sur les bornes minimale et maximale du jeu de données (Table 3.2 - colonne 2), soit sur l'intervalle de confiance à 95% engendré par les descripteurs statistiques (Table 3.2 - colonne 3).

La fiabilité des intervalles engendrés par nos descripteurs géométriques statistiques étant limitée, car le nombre d'échantillons des données *La Rochelle* est faible, les analyses de sensibilité se baseront principalement sur les variations entre les bornes extrêmes des descripteurs (Table 3.2 - colonne 2), modélisées par des étoiles (\*) sur les figures.

Les résultats nous permettront (1) de comparer en terme de sensibilité les modèles acoustiques et (2) de déterminer quel descripteur induit la plus grande variation d'index de cible.

#### 3.1 Sensibilité à la longueur de la vessie natatoire

La taille de la vessie natatoire est définie par sa longueur. En traçant l'index de cible TS<sup>6</sup> (Eq. 2.3) en fonction de la longueur de la vessie natatoire (Fig. 4.6), on caractérise donc la sensibilité de nos modèles acoustiques à la taille de la cible.

Pour cette analyse, l'aplatissement et la courbure ont pour valeurs les moyennes de notre lot de données (Table 3.1). De plus, on se place en incidence normale.

La table 4.1 résume les écarts de TS observés sur les bornes extrêmes de longueur vessie des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2), pour les différents modèles acoustiques.

En basse fréquence (38kHz - Fig. 4.6 - partie haute), tous les modèles acoustiques ont la même sensibilité à la longueur.

En haute fréquence (120kHz - Fig. 4.6 - partie basse), la sensibilité à la longueur augmente légèrement dans le cas du cylindre droit, et diminue dans le cas du cylindre courbé et de l'ellipsoïde.

Les lois de TS se basent sur une variation du TS en fonction de la longueur de l'ordre de  $20\log_{10}L_{cm}$  (Chap. 1, Eq. 1.1), que ce soit pour une fréquence de 38kHz ou de 120kHz ([KH03]).

Or, notre modélisation montre un résultat contraire : la sensibilité augmente en fonction de la fréquence dans le cas du cylindre droit, et diminue pour les autres modèles cylindre courbé et ellipsoïde.

De plus, l'ordre de grandeur est différent. Si on continue à étudier les écarts d'index de cible TS sur les bornes extrêmes du jeu de données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2), alors en se basant sur

6. on ne se base pas sur l'index de cible normalisé en longueur nTS (Eq. 2.4) car ce dernier s'affranchit de la taille de la cible.

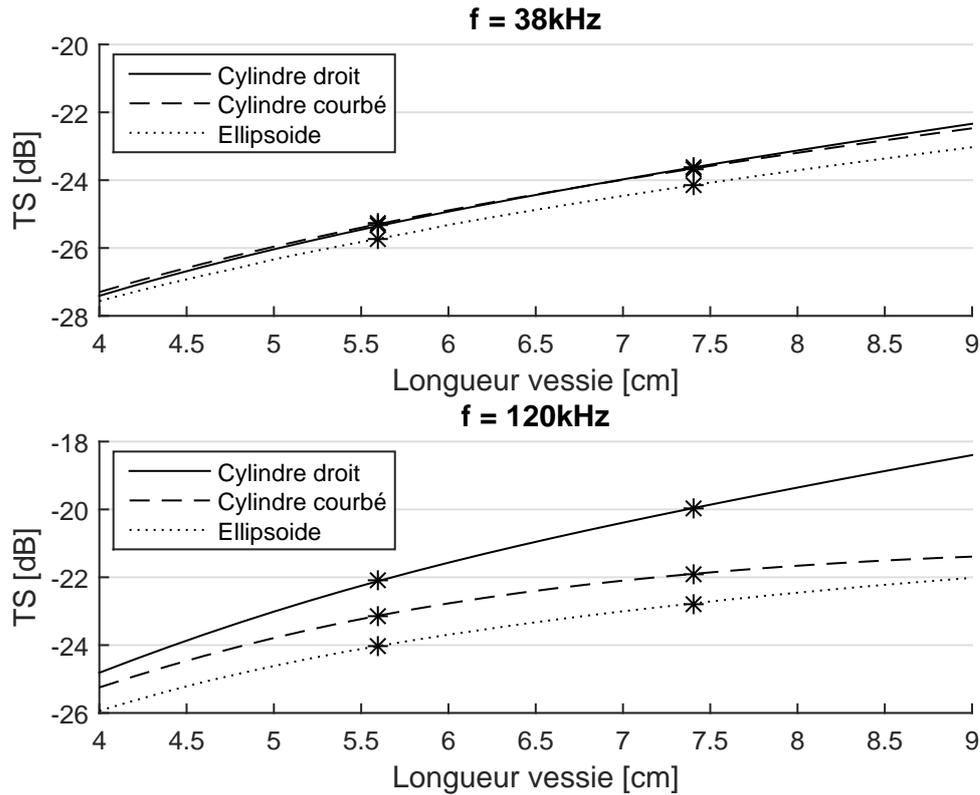


FIGURE 4.6 – Index de cible TS en fonction de la longueur de la vessie. Les valeurs d’aplatissement et de courbure sont les moyennes de la Table 3.1. On se place en incidence normale.

Modèle	38kHz	120kHz
Cylindre droit	1,6dB	2,1dB
Cylindre courbé	1,6dB	1,2dB
Ellipsoïde	1,6dB	1,3dB

TABLE 4.1 – Ecart de TS sur les bornes extrêmes en longueur du jeu de données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2)

une loi de TS on trouve un écart de 2,4dB. Pour nos modèles, cet écart est sensiblement plus faible (Table 4.1).

Soit les lois de TS surestiment la sensibilité à la longueur, soit nos modèles sous-estiment la sensibilité à la longueur.

### 3.2 Sensibilité à la taille et à la forme de la vessie natatoire : aplatissement

Les figures 4.7 et 4.8 représentent l'index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de l'aplatissement du cylindre, pour différentes fréquences. Dans le cas du modèle ellipsoïde, l'aplatissement utilisé est différent et correspond à celui calculé sous l'hypothèse de conservation de la surface pour la forme ellipsoïdale.

Pour cette analyse, la longueur et la courbure valent les moyennes de notre lot de données (Table 3.1). De plus, on se place en incidence normale.

Comme la longueur de la vessie est constante, la valeur de nTS en fonction de l'aplatissement peut être associée à la valeur de nTS en fonction du taux de gonflement.

L'intervalle d'aplatissement entre 10 et 25 (Fig. 4.8) est représentatif du taux de gonflement de sardines à différentes profondeurs<sup>7</sup>. Si on se concentre sur un jeu de données précis, où on a radiographié seulement des sardines avec un fort taux de gonflement, alors l'intervalle de taux de gonflement se restreint à [10; 14] (Fig. 4.7).

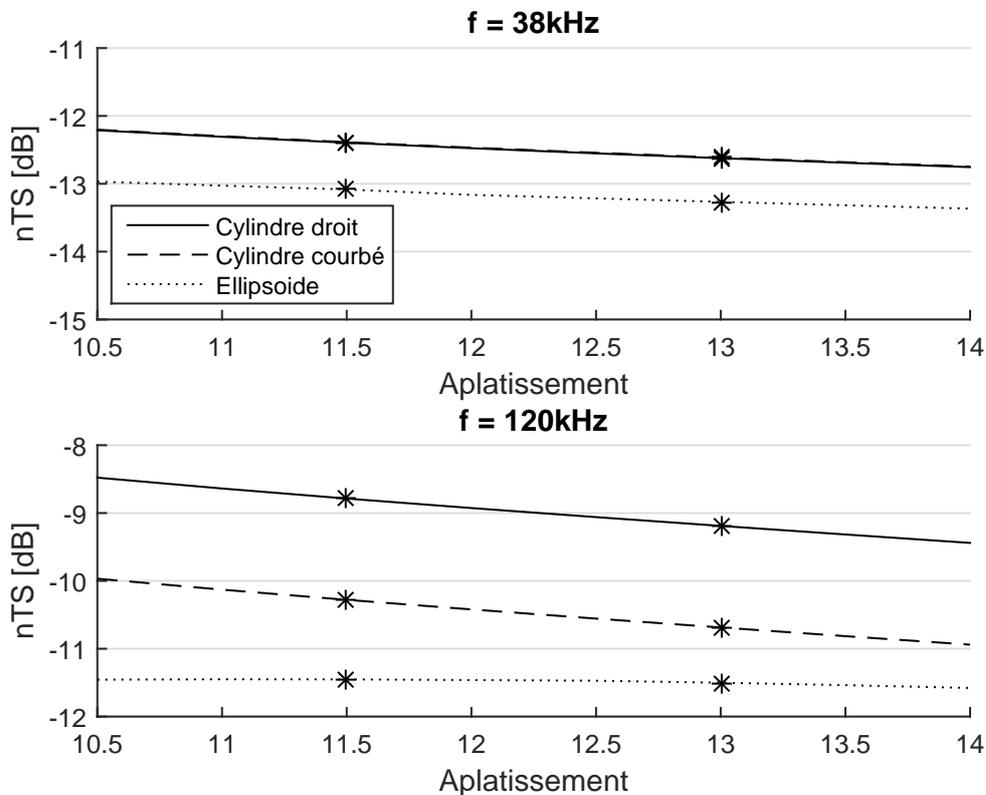


FIGURE 4.7 – Sensibilité à l'aplatissement de la vessie. Incidence normale.

La table 4.2 résume les écarts de TS observés sur les bornes extrêmes d'aplatissement des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2), pour les différents modèles acoustiques.

En basse fréquence (38kHz - Fig. 4.7 et Fig. 4.8 - parties hautes), tous les modèles acoustiques ont la même sensibilité à l'aplatissement.

En haute fréquence, pour des taux de gonflement forts (120kHz - Fig. 4.7 - partie basse), la sensibilité à l'aplatissement augmente dans le cas du cylindre droit et du cylindre courbé, et devient quasiment nulle dans le cas de l'ellipsoïde.

7. valeurs issues de plusieurs jeux de données

Modèle	38kHz	120kHz
Cylindre droit	0,2dB	0,4dB
Cylindre courbé	0,2dB	0,4dB
Ellipsoïde	0,2dB	0,05dB

TABLE 4.2 – Ecarts de TS sur les bornes extrêmes en aplatissement du jeu de données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2)

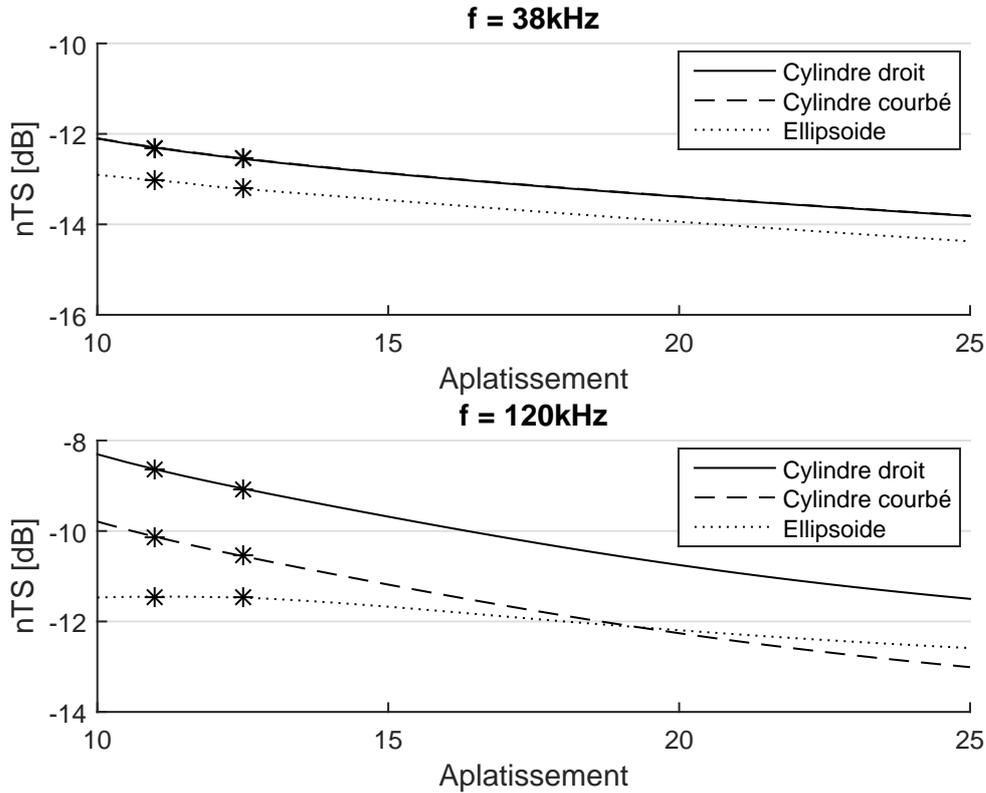


FIGURE 4.8 – Sensibilité à l'aplatissement de la vessie pour un large panel de taux de gonflement. Incidence normale.

Cependant, si on prend en considération des vessies natatoires peu gonflées, c'est-à-dire une valeur d'aplatissement élevée, alors on observe que le modèle ellipsoïde redevient sensible à l'aplatissement pour les hautes fréquences (120kHz - Fig. 4.8 - partie basse).

De manière générale, en se limitant aux bornes extrêmes d'aplatissement des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2), la sensibilité à l'aplatissement est faible pour tous les modèles et à toutes les fréquences ( Fig. 4.7 et Table 4.2).

### 3.3 Sensibilité à l'angle d'incidence

La figure 4.9 représente l'index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de l'angle d'incidence, pour différentes fréquences. Ce type de courbe représente la directivité angulaire des différents modèles.

Pour cette analyse, la longueur, l'aplatissement et la courbure valent les moyennes de notre lot de données (Table 3.1).

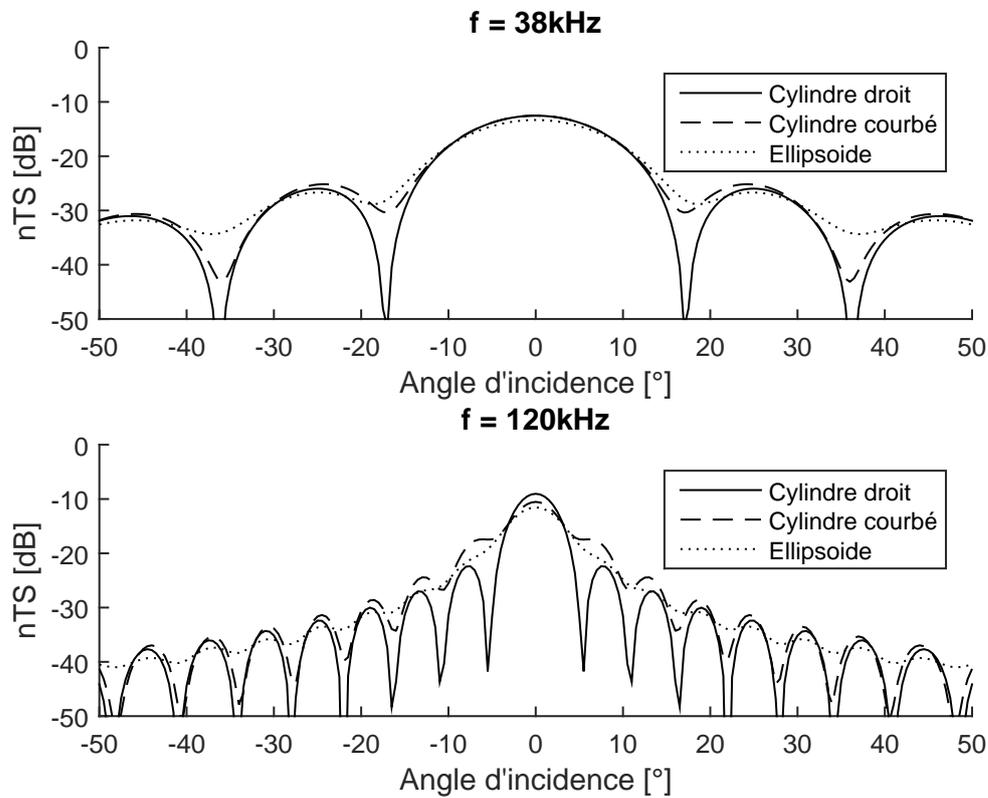


FIGURE 4.9 – Directivité angulaire selon la fréquence.

En basse fréquence (38kHz - Fig. 4.9 - partie haute), la directivité angulaire est proche pour tous les modèles.

En haute fréquence (120kHz - Fig. 4.9 - partie basse), le modèle cylindre droit est le plus directif. Les deux autres modèles sont beaucoup moins directifs et donc moins sensibles à un changement de comportement de nage du poisson.

Dans cette étude, la seule différence entre les modèles acoustiques est qu'ils utilisent des formes géométriques différentes. Cette modélisation a donc mis en évidence l'impact de la forme de la cible acoustique sur la directivité angulaire en haute fréquence (120kHz - Fig. 4.9 - partie basse). Cet impact est beaucoup plus modéré en basse fréquence, voire quasiment négligeable (38kHz - Fig. 4.9 - partie haute).

Ainsi, en basse fréquence, ce sont les dimensions de la cible qui traduisent la directivité angulaire et l'amplitude de la réponse acoustique, alors qu'en haute fréquence la forme a aussi une influence non négligeable.

### 3.4 Sensibilité à la courbure

La courbure caractérise la forme de la vessie natatoire.

La figure 4.10 représente l'index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de la courbure de la vessie natatoire, pour différentes fréquences. L'index de cible est calculé avec le modèle acoustique cylindre courbé (Chap. 4, Sec. 1.1.3) seulement, car les autres modèles ne tiennent pas compte de ce paramètre géométrique.

Pour cette analyse, la longueur et l'aplatissement valent les moyennes de notre lot de données (Table 3.1).

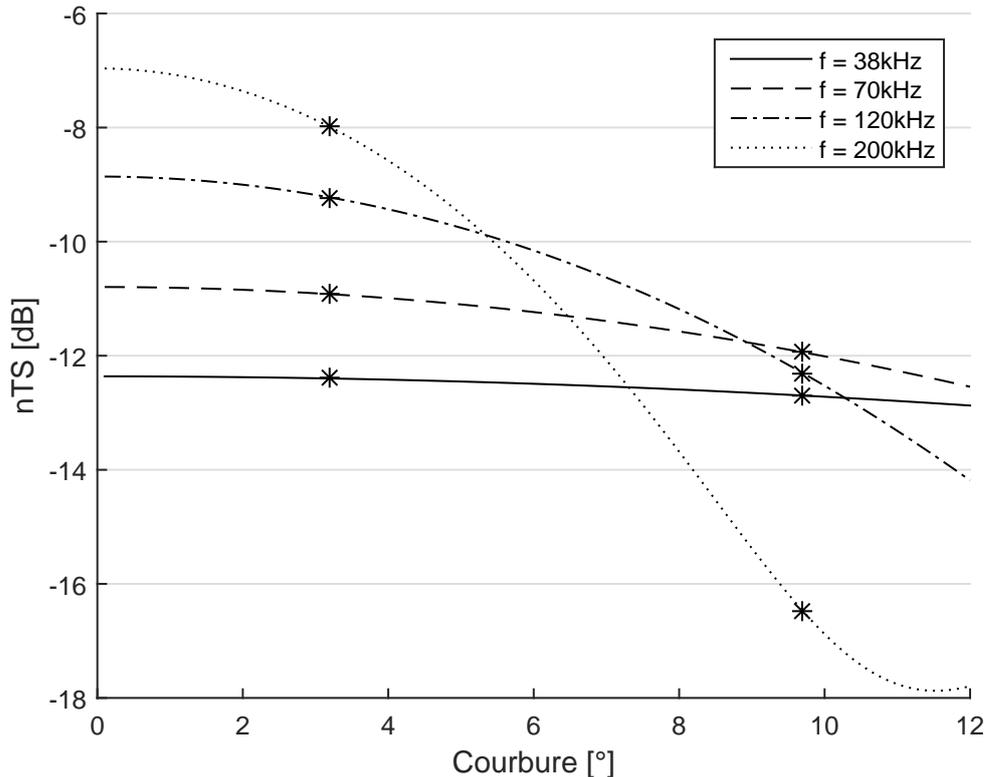


FIGURE 4.10 – Index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de la courbure de la vessie, pour le modèle acoustique cylindre courbé (Chap. 4, Sec. 1.1.3). Les valeurs de longueur et d'aplatissement sont les moyennes de la Table 3.1. On se place en incidence normale.

La table 4.3 résume les écarts de TS observés sur les bornes extrêmes de courbure des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2), pour le modèle cylindre courbé, en incidence normale.

Modèle	38kHz	70kHz	120kHz	200kHz
Cylindre courbé	0,3dB	1dB	3,1dB	8,5dB

TABLE 4.3 – Ecart de TS sur les bornes extrêmes en courbure du jeu de données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2)

En basse fréquence (38kHz - Fig. 4.10 et Table 4.3), le modèle acoustique cylindre courbé est peu sensible à la courbure : variation de l'ordre de 0,5dB pour 12 degrés de courbure.

En haute fréquence (200kHz - Fig. 4.10 et Table 4.3), le modèle acoustique cylindre courbé est fortement sensible à la courbure : variation de l'ordre de 11dB pour 12 degrés de courbure.

Modifier la courbure du cylindre revient à modifier sa forme. Les résultats sont donc cohérents avec ceux de l'étude de sensibilité de l'angle de nage, où la forme a un impact sur l'amplitude de la réponse acoustique seulement en haute fréquence.

La figure 4.11 représente l'index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de l'angle d'incidence, pour différentes valeurs de courbure et de fréquence. Elle permet d'étudier l'influence de la courbure sur la directivité angulaire.

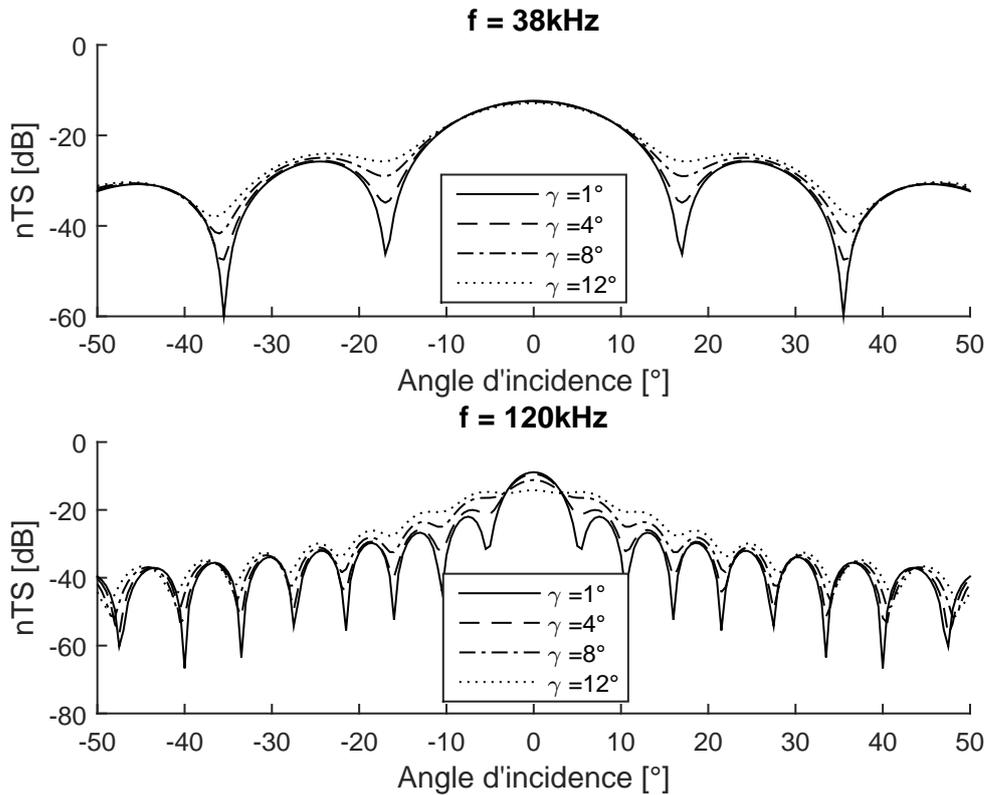


FIGURE 4.11 – Sensibilité à la courbure de la vessie. Influence sur la directivité angulaire. Modèle cylindre courbé.

En basse fréquence (38kHz - Fig. 4.11 - partie haute), la variation de courbure a un impact faible sur la directivité angulaire.

En haute fréquence (120kHz - Fig. 4.11 - partie basse), faire augmenter la courbure du cylindre courbé tend à faire fortement diminuer sa directivité angulaire. Pour une courbure de  $1^\circ$ , la directivité angulaire est très proche de celle du cylindre droit, alors que pour des courbures fortes, la directivité angulaire est proche de celle de l'ellipsoïde (Fig. 4.9).

Ces résultats montrent que la courbure, donc la forme, a un impact sur la directivité angulaire de la réponse acoustique seulement en haute fréquence. Cela est cohérent avec les conclusions de l'étude de sensibilité de l'angle de nage.

### 3.5 Conclusions

Les conclusions sont construites à partir des écarts d'index de cible calculés sur les bornes extrêmes des descripteurs des données *La Rochelle* (Table 3.2 - colonne 2).

En basse fréquence, les variations d'index de cible sont principalement dues à la longueur de la vessie natatoire, ainsi que plus modérément à l'angle de nage du poisson.

De plus, tous les modèles ont des sensibilités équivalentes.

En haute fréquence, la courbure et l'angle de nage créent les plus grandes variabilités d'index de cible.

La courbure n'est applicable qu'au cylindre courbé, donc ce modèle peut présenter plus de variabilité dans sa réponse acoustique que les autres, en haute fréquence.

Le cylindre droit est le modèle qui a la plus grande sensibilité à l'angle de nage (ie. directivité angulaire la plus forte).

De manière générale, l'ellipsoïde est le modèle qui présente les sensibilités les plus faibles en haute fréquence.

Le modèle cylindre droit est celui qui présente la sensibilité angulaire la plus forte, et le modèle cylindre courbé combine une forte sensibilité angulaire et à la courbure, bien que sa directivité angulaire reste plus faible que le cylindre droit.

La sensibilité à l'angle de nage est en réalité plus faible car on s'intéresse au TS individuel d'un *banc* de poisson (Chap. 2, Sec. 3.3), donc l'index de cible est moyenné sur une distribution d'angles de nage ([DS90]), ce qui réduit la sensibilité de ce paramètre car c'est la valeur d'index maximum en incidence normale qui dimensionne la réponse acoustique (Chap. 4, Sec. 4.14).

Ainsi, en basse fréquence, c'est plutôt le dimensionnement de la taille de la cible acoustique qui est critique, alors qu'en haute fréquence c'est plutôt le dimensionnement de la forme de cette cible qui est décisif.

#### Remarque quant à la sensibilité à l'aplatissement

Pour les aplatissements particulièrement faibles (ie. taux de gonflement fort) que nous considérons, la variabilité d'index de cible reste faible.

Lorsqu'un intervalle très large de taux de gonflement est balayé (Fig. 4.8), l'écart maximum d'index de cible est de 2dB en basse fréquence et 3dB en haute fréquence pour les modèles cylindre droit et courbé; et de 1dB pour le modèle ellipsoïde.

Actuellement, il est difficile de connaître la variabilité réelle des taux de gonflement au sein d'un même banc de poisson, ainsi que le taux de gonflement pour une profondeur donnée. Il est possible que l'influence de l'aplatissement soit supérieure à ce que l'on trouve ici.

## 4 Validation du dimensionnement géométrique

### 4.1 Réponse acoustique *réelle* de la vessie natatoire

Le modèle acoustique *cylindre déformé* (Chap. 4, Sec. 1.1.5), à condition d'un échantillonnage suffisamment fin de la géométrie réelle de la vessie natatoire, donne un index de cible fidèle à la réalité ([SC00]).

Ce modèle correspondra donc à la réponse acoustique de référence des sardines de *La Rochelle* (Annexe 4, Fig. 33).

### 4.2 Moyennage de la réponse acoustique sur une distribution de nage

Dans le chapitre 2, section 3.3, nous avons expliqué que le projet TOMOFISH vise à terme à modéliser un index de cible individuel moyen d'un poisson appartenant à un banc. Des travaux ont montré qu'il est raisonnable de modéliser la distribution d'angles de nage d'un banc par une loi normale ([Ols71]) :

	moyenne	écart-type
Nage horizontale	0°	15°
Banc qui plonge	-30°	15°

TABLE 4.4 – Comportements de nage d'un banc modélisés par une loi normale.

Le premier profil de nage de la table 4.4 correspond à un comportement standard de nage du banc, alors que le second profil est un comportement d'évitement du banc, gêné par le bruit d'un navire océanographique.

La réponse acoustique d'un poisson va maintenant être moyennée sur une distribution d'angles, de manière à obtenir le comportement acoustique d'un banc de poisson, au lieu d'un unique spécimen.

L'angle de nage  $\theta$  d'un poisson est donc une variable aléatoire associée à une densité de probabilité normale  $g(\theta)$ . La section de rétro-diffusion efficace moyenne  $\bar{\sigma}$  sera donc ([DS90], Eq. 4) :

$$\bar{\sigma} = \int_{\Delta\theta} \sigma(\theta)g(\theta)d\theta \quad (4.12)$$

On en déduit la réponse acoustique moyenne du poisson sous forme d'index de cible TS par :

$$\overline{TS} = 10 \log_{10} \bar{\sigma} \quad (4.13)$$

Cette réponse acoustique *moyenne* modélise l'index de cible individuel moyen d'un poisson appartenant à un banc, en prenant en compte le comportement de nage du banc.

Par la suite, cet indicateur sera conservé car plus représentatif d'un groupe de poissons.

### 4.3 Rappel des choix de dimensionnement

A l'issu du chapitre 3, deux choix de dimensionnement des vessies natatoires ont été retenus (Chap. 3, Sec. 3.3), chacun conservant la surface réelle :

- forme de longueur complète :  $L_{forme} = L_{vessie}$  ;
- forme de longueur tronquée :  $L_{forme} = L_p$  ;

Le premier choix s'attache à modéliser l'ensemble de la vessie mais est une représentation finalement assez grossière de la forme réelle (Annexe 2, Fig. 25) car la partie centrale est sous-estimée et les bords surestimés.

Le deuxième choix est plus fidèle à la forme réelle de la vessie (Annexe 2, Fig. 26) car il représente mieux la partie bombée et néglige une partie des extrémités de la vessie.

Ces choix de dimensionnement imposeront la géométrie utilisée pour les modèles acoustiques *cylindre droit* et *cylindre courbé* (Chap. 4, Sec. 1.1.2 et Sec. 1.1.3), et auront donc un impact sur leur index de cible. L'objectif est donc de déterminer quel dimensionnement permet d'avoir une réponse acoustique proche entre le modèle et la réalité<sup>8</sup>.

#### 4.4 Comparaison des directivités angulaire

La directivité angulaire de la sardine 3<sup>9</sup> de *La Rochelle* (Annexe 2) a été calculée pour les différents choix de dimensionnements et modèles acoustiques.

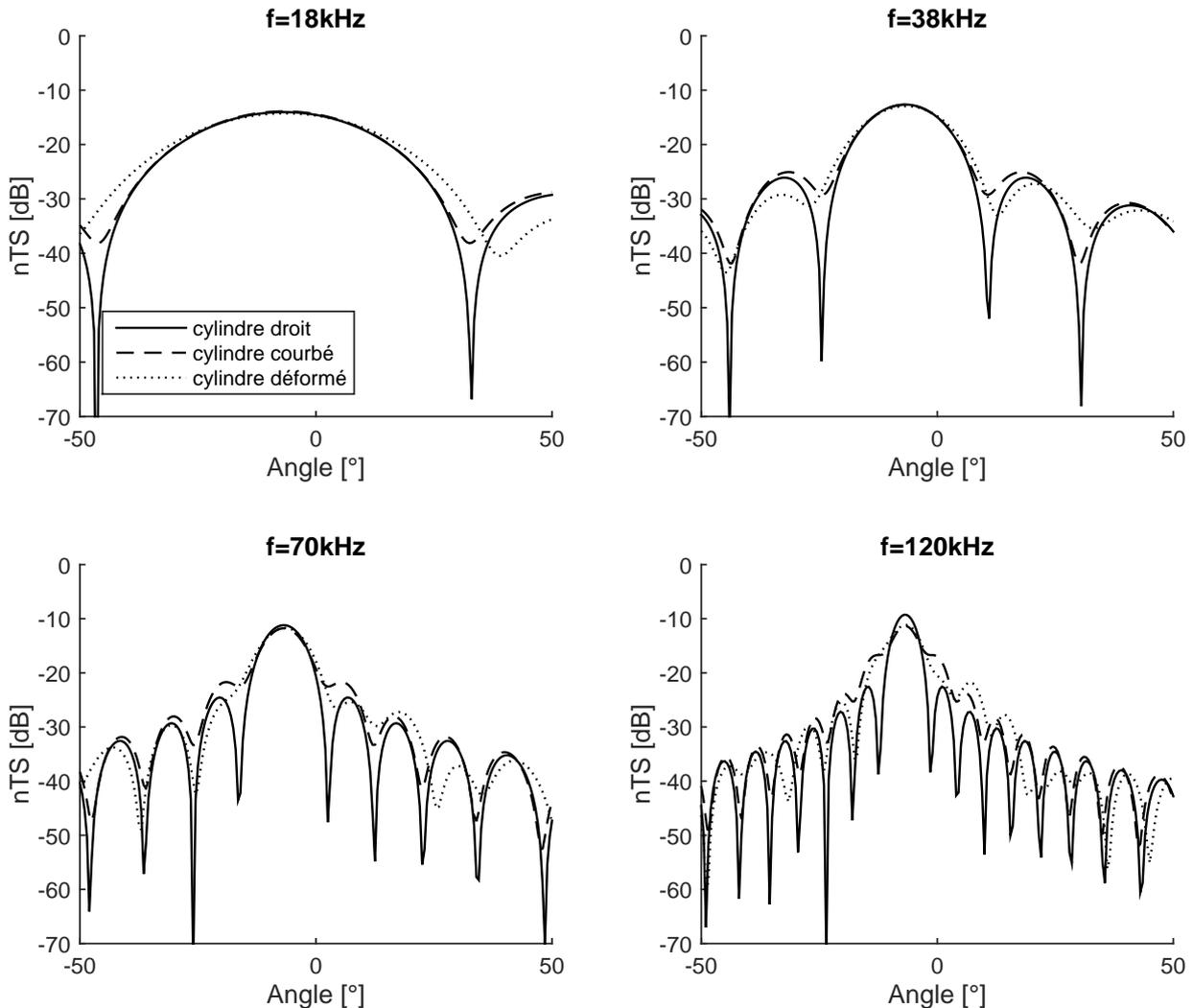


FIGURE 4.12 – Directivité angulaire de la sardine 3 des données *La Rochelle* (Annexe 4, Fig. 33), avec comme choix de dimensionnement  $L_{forme} = L_{vessie}$ .

Pour le choix de dimensionnement  $L_{forme} = L_{vessie}$ , en haute fréquence (Fig. 4.12 - 70kHz et 120kHz), les modèles de calcul d'index de cible *cylindre droit* et *cylindre courbé* ont des pics de directivité et des creux de directivité quasiment en phase avec la réponse acoustique réelle<sup>10</sup>.

En basse fréquence, (Fig. 4.12 - 18kHz et 38kHz), le modèle est légèrement plus directif que l'index de cible de référence.

8. la réponse acoustique de référence correspond à l'index de cible du *cylindre déformé* (Sec. 4.1).

9. une étude similaire a été menée sur les autres sardines du jeu de données, et les conclusions sont identiques.

10. réponse acoustique réelle : *modèle cylindre déformé*.

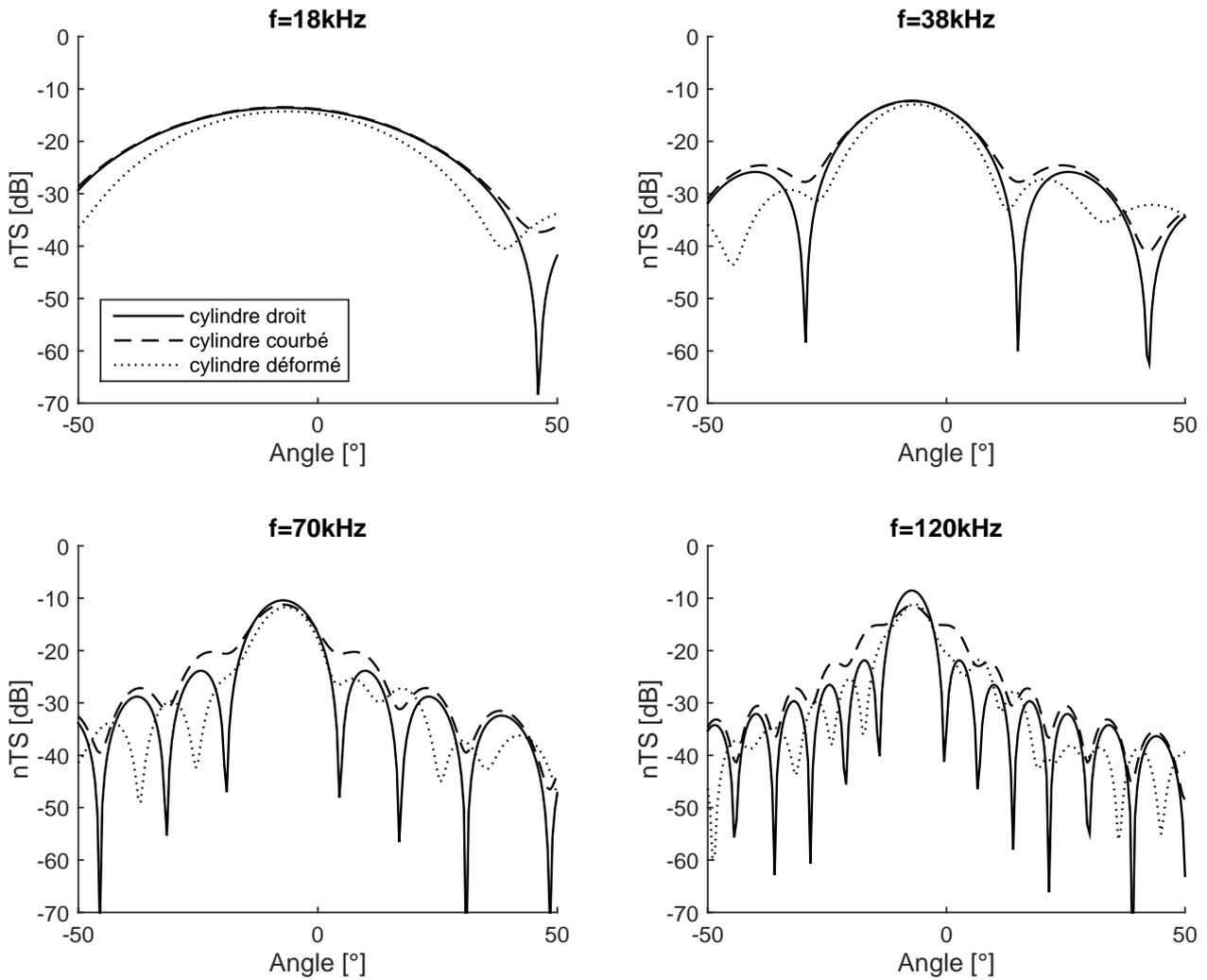


FIGURE 4.13 – Directivité angulaire de la sardine 3 des données *La Rochelle* (Annexe 4, Fig. 33), avec comme choix de dimensionnement  $L_{forme} = L_p$ .

Pour le choix de dimensionnement  $L_{forme} = L_p$  (Fig. 4.13), les modèles acoustiques *cylindre droit* et *cylindre courbé* sont moins directifs. Cela est dû à l'aplatissement plus faible de la forme géométrique. Il en résulte un déphasage entre les pics de directivité et les creux de directivité de ces modèles et la réalité.

La réponse acoustique angulaire d'un unique poisson est donc mieux représentée par un dimensionnement se basant sur la longueur totale de la vessie natatoire.

Ce résultat n'est cependant pas représentatif d'un banc de poisson, c'est pourquoi l'étude va maintenant être complétée par l'utilisation d'un index de cible moyenné sur une distribution de nage  $\overline{TS}$  (Eq. 4.13).

#### 4.5 Comparaison de la réponse acoustique sur une distribution de nage

Maintenant, l'index de cible moyenné sur une distribution d'angles de nage (Eq. 4.13) va permettre d'étudier la correspondance de nos dimensionnements avec la réalité sur différents comportements de nage d'un banc de poisson.

Cet index est tracé en fonction de  $ka$  (Eq. 4.10), pour des fréquences comprises entre 18kHz et 200kHz. Il est donc possible de visualiser la dépendance fréquentielle de la réponse acoustique réelle<sup>11</sup>, ainsi que des modèles *cylindre droit* et *cylindre courbé*.

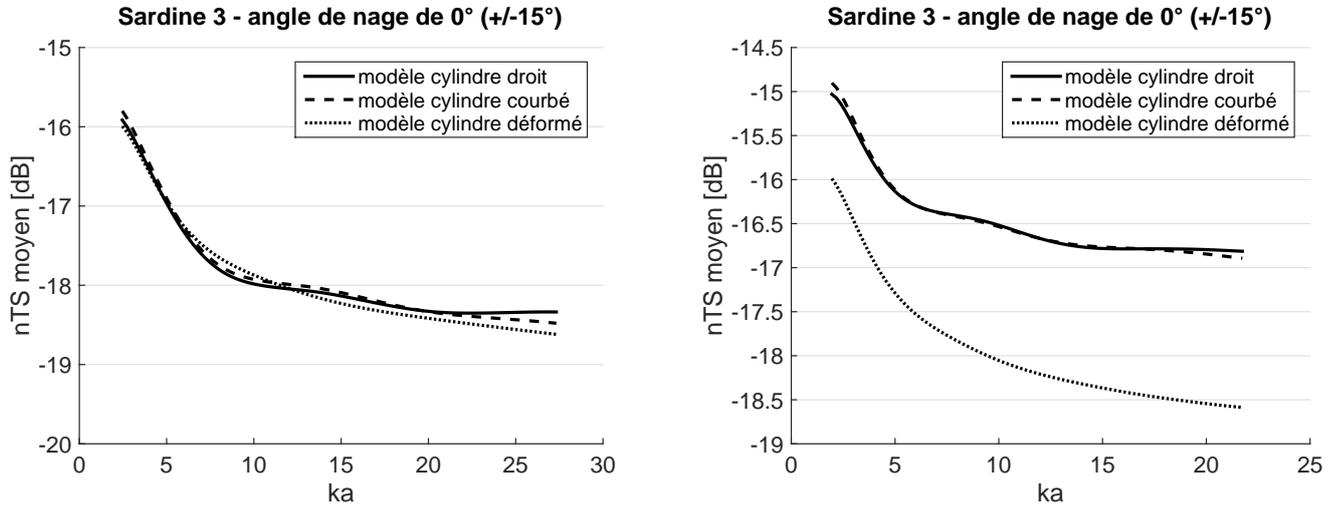


FIGURE 4.14 – Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage horizontale ( $\pm 15^\circ$ ) pour la sardine 3 (Annexe 4, Fig. 33). A gauche, le choix de dimensionnement est  $L_{forme} = L_{vessie}$  et à droite,  $L_{forme} = L_p$ .

Pour une distribution de nage horizontale, modélisée par une moyenne nulle et un écart-type de  $15^\circ$  (Table 4.4), le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_{vessie}$  donne une réponse acoustique fidèle à la réalité, alors que le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_p$  s'écarte d'1dB avec la réalité en basse fréquence, et de 2dB en haute fréquence.

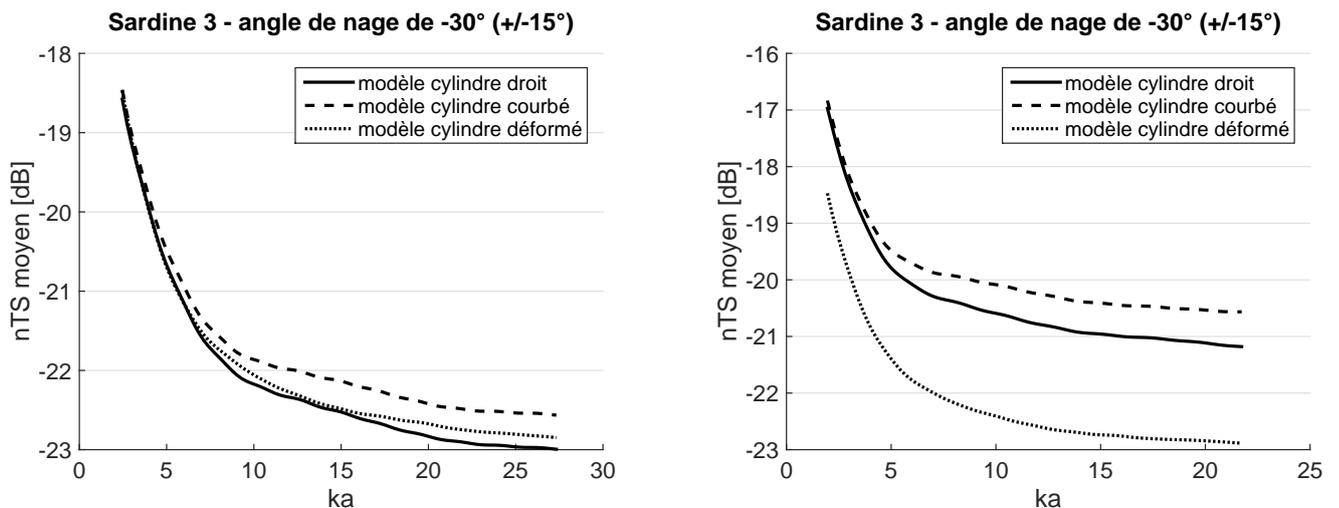


FIGURE 4.15 – Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage plongeante de  $-30^\circ$  ( $\pm 15^\circ$ ) pour la sardine 3 (Annexe 4, Fig. 33). A gauche, le choix de dimensionnement est  $L_{forme} = L_{vessie}$  et à droite,  $L_{forme} = L_p$ .

11. modèle *cylindre déformé*

Pour une distribution de nage plongeante, modélisée par une moyenne de  $-30^\circ$  et un écart-type de  $15^\circ$  (Table 4.4), le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_{vessie}$  donne une réponse acoustique fidèle à la réalité, alors que le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_p$  s'écarte d'1,5dB avec la réalité en basse fréquence, et de 2dB en haute fréquence.

Bien que le dimensionnement  $L_{forme} = L_p$  conserve une meilleure fidélité avec la forme réelle de la vessie natatoire, il s'écarte de la réponse acoustique réelle d'un banc de poissons. Le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_{vessie}$ , bien que plus grossier, aboutit à une réponse acoustique moyenne fidèle.

Nous pouvons retenir que :

- la fidélité à la géométrie réelle n'engendre pas une fidélité à la réponse acoustique d'un ensemble de poissons ;
- le dimensionnement géométrique  $L_{forme} = L_{vessie}$  (Chap. 3, Sec. 3.3) permet de faire correspondre nos modèles au comportement acoustique d'un banc ;

## 5 Réponse acoustique moyenne sur une distribution de nage de l'ensemble des données *La Rochelle*

On étudie toujours l'index de cible moyenné sur une distribution d'angles de nage (Eq. 4.13), mais pour l'ensemble des 8 sardines cette fois (Fig. 4.16). La représentation sous forme de barres d'erreur permet d'avoir localement la valeur moyenne et la variabilité de réponse acoustique sur l'ensemble des poissons de *La Rochelle*.

L'axe  $ka$  (Eq. 4.10) représente la dépendance fréquentielle, sur des fréquences comprises entre 18kHz et 120kHz.

La validation du dimensionnement (Sec. 4) conclue que conserver la surface de la vessie natatoire réelle et utiliser comme longueur de la forme simplifiée  $L_{forme} = L_{vessie}$  donne un résultat acoustique proche de la réalité. Ce choix a donc été conservé ici. Le dimensionnement géométrique utilisé par les modèles est celui retenu précédemment :  $L_{forme} = L_{vessie}$ .

En terme de valeur moyenne, l'ensemble des modèles acoustiques<sup>12</sup> reste proche de la réalité. On observe un très faible écart de l'ordre de 0,2dB en fréquence moyenne (environ 70kHz), qui n'est pas significatif en regard des autres incertitudes.

Ce résultat prouve que, pour le dimensionnement retenu, si on prend l'ensemble des données *La Rochelle* (Annexe 4, Fig. 33), nos modèles donnent des réponses acoustiques représentatives d'un banc de poisson, sur une large plage fréquentielle.

Pour une fréquence donnée, l'écart-type est équivalent entre tous les modèles simplifiés. De plus, tous ses modèles ont un écart-type qui diminue lorsque la fréquence augmente.

Cela peut être expliqué par l'influence de la forme prépondérante sur l'influence des dimensions en haute fréquence (Sec. 3.5). Chaque modèle se basant sur une forme géométrique donnée, il n'y a pas de variabilité de ce paramètre. De plus, la valeur moyenne diminuant avec la fréquence, cela tend aussi à baisser l'écart-type.

Au contraire, la réponse acoustique de référence a un écart-type indépendant de la fréquence. Pour les faibles fréquences, sa valeur est similaire à l'écart-type des modèles. Mais, en moyenne et haute fréquence, sa valeur est supérieure aux modèles simplifiés.

Cet écart en haute fréquence traduit la variabilité des formes décrite par le modèle de référence.

---

12. cylindre droit, cylindre courbé et ellipsoïde.

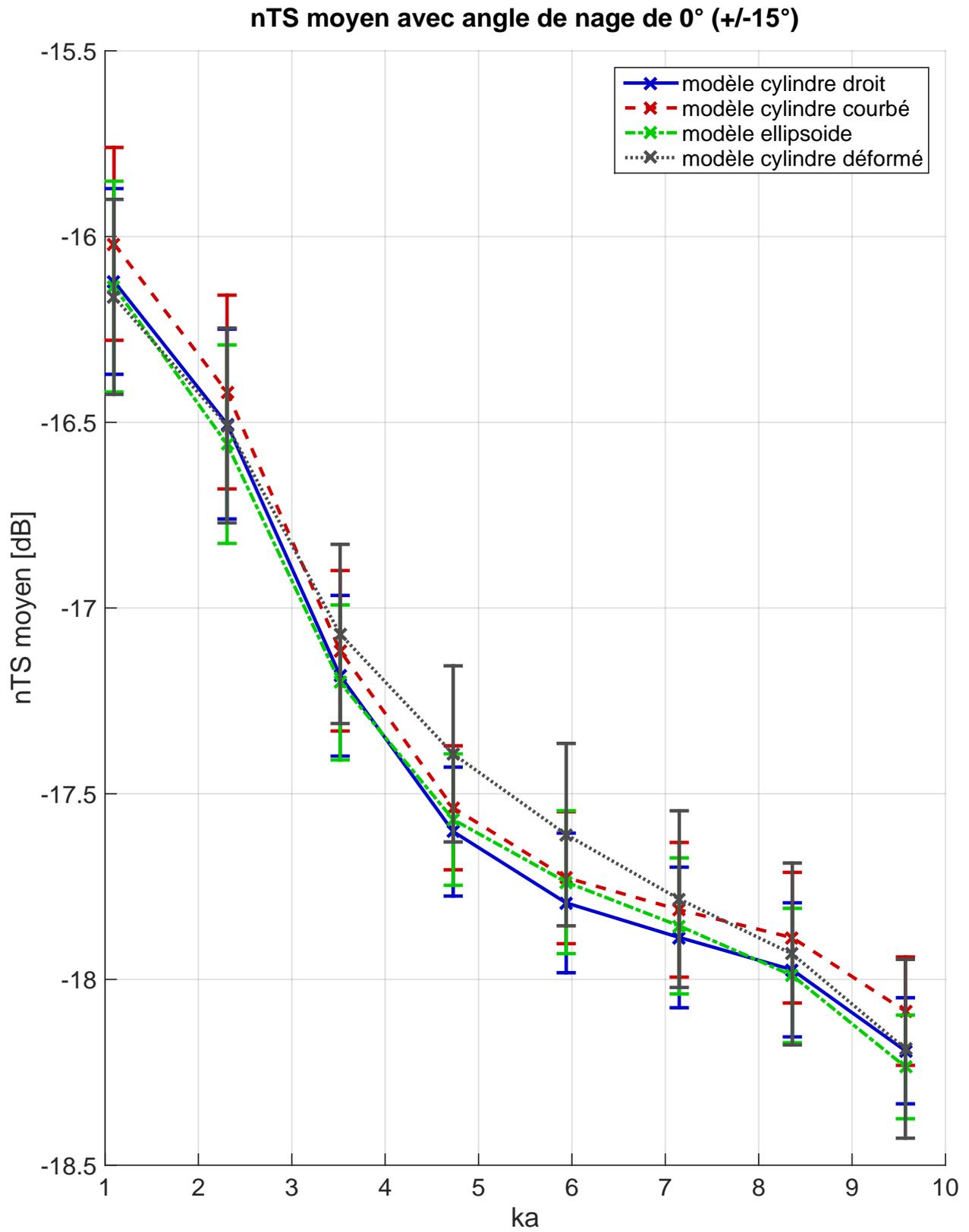


FIGURE 4.16 – Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage horizontale ( $\pm 15^\circ$ ) avec comme choix de dimensionnement  $L_{forme} = L_{ vessie}$ .

## Conclusion

Avant tout, le stage a permis de mettre en place une bibliothèque d'outils informatiques; que ce soit pour :

- traiter des géométries brutes de poisson
- dimensionner des formes simplifiées utilisables par les modèles acoustiques
- intégrer et valider des modèles de calcul d'index de cible issus de la littérature
- comparer ces modèles en terme de directivité angulaire, comportement fréquentiel

Un large choix de paramétrage est laissé à l'utilisateur, que ce soit pour :

- le dimensionnement des formes simplifiées
- les gammes d'angle, de fréquence et d'aplatissement
- le comportement de nage du banc

Ces outils sont donc adaptables à d'autres jeux de données ou paramètres, ainsi que personnalisables.

L'étude de validité des modèles acoustiques a montré :

- la non-nécessité de connaître avec précision la composition des vessies natatoires.
- que les géométries de notre jeu de données placent les modèles dans leur domaine de validité fréquentiel et d'aplatissement.
- qu'il existe une forte incertitude sur la validité angulaire des modèles hors de l'incidence normale.

L'étude de sensibilité des modèles a mis en évidence la prépondérance de la forme de la vessie sur la réponse acoustique en haute fréquence, et des dimensions de la vessie en basse fréquence.

Le travail sur les données *La Rochelle* a déterminé quel dimensionnement donnait une réponse acoustique proche de la *réalité* (Chap. 4, Sec. 4). Il en résulte que conserver une fidélité à la forme de la vessie ne donnait pas un index de cible valable. Ces résultats sont particulièrement encourageants et doivent maintenant être validés sur des mesures *in-situ* d'index de cible.

## Table des symboles

- $L_{vessie}$  : longueur de la vessie natatoire
- $L_p$  : longueur tronquée de la vessie natatoire
- $L_{forme}$  : longueur de la forme simplifiée
- $b$  : rayon de la forme simplifiée
- $\gamma_{max}$  : courbure de la forme simplifiée
- $\rho_c$  : rayon de courbure de la forme simplifiée
- 
- $k_0$  : nombre d'onde dans l'eau
- $k_1$  : nombre d'onde dans la forme simplifiée
- $\theta$  : angle d'incidence de l'onde acoustique sur la forme simplifiée
- 
- $\vec{r}_i$  : vecteur donnant la direction de l'onde acoustique incidente
- $\vec{r}_c$  : vecteur tangent à l'axe principal de la forme simplifiée
- $r_{pos}$  : vecteur entre le centre de la forme simplifiée et le cylindre élémentaire considéré
- $L_e$  : longueur d'un cylindre élémentaire
- 
- $J_n$  : fonction de Bessel de première espèce
- $N_n$  : fonction de Bessel de deuxième espèce, aussi appelée fonction de Neumann

# Bibliographie

- [BB15] Vincent Badts and Jacques Bertrand. *Guide de la mensuration des espèces en halieutique*, 2012 (accessed August 05, 2015). <http://archimer.ifremer.fr/doc/00001/6237/7655.pdf>.
- [CH94] Clarence S. Clay and John K. Horne. Acoustic models of fish : The atlantic cod (*gadus morhua*). *Journal of the Acoustical Society of America*, 96(3) :1661–1668, 1994.
- [DBdLBR15] Mathieu Doray, Laurent Berger, Xavier de La Bernardie, and Manuella Rabiller. Rapport interne du projet tomofish pour l’année 2014. Technical report, Ifremer, Nantes, 2015.
- [DCNB<sup>+</sup>10] M. Dickey-Collas, R. D. M. Nash, T. Brunel, C. J. G. van Damme, C. T. Marshall, M. R. Payne, A. Corten, A. J. Geffen, M. A. Peck, E. M. C. Hatfield, N. T. Hintzen, K. Enberg, L. T. Kell, and E. J. Simmonds. Lessons learned from stock collapse and recovery of north sea herring : a review. *ICES Journal of Marine Science*, 67(9) :1875–1886, 2010.
- [def] *Définition d’un fichier décrivant une géométrie tri-dimensionnelle*. [http://www.hodge.net.au/sam/blog/wp-content/uploads/obj\\_format.txt](http://www.hodge.net.au/sam/blog/wp-content/uploads/obj_format.txt).
- [DMP12] Mathieu Doray, Jacques Masse, and Pierre Petitgas. Pelagic fish stock assessment by acoustic methods at ifremer. Technical report, Département Écologie et Modèles pour l’Halieutique, Centre Ifremer de Nantes, Nantes, 2012.
- [DS90] Manh A. Do and Aspi M. Surti. Estimation of dorsal aspect target strength of deep-water fish using a simple model of swimbladder backscattering. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87 :1588–1596, 1990.
- [Foo80] Kenneth G. Foote. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish : A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67 :2084–2089, 1980.
- [Foo83] Kenneth G. Foote. Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73 :1932–1940, 1983.
- [Foo87] Kenneth G. Foote. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *Journal of the Acoustical Society of America*, 82 :981–987, 1987.
- [Fur88] Masahiko Furusawa. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 9 :13–24, 1988.
- [Gun93] Donald R. Gunderson. *Surveys of fisheries resources*. John Wiley and Sons, New York, 1993.
- [Ifremer] *Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer (Ifremer)*. <http://wwz.ifremer.fr/>.
- [KH03] Donhyug Kang and Doojin Hwang. Ex situ target strength of rockfish (*sebastes schlegeli*) and red sea bream (*pagrus major*) in the northwest pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 60(3) :538–543, 2003.
- [Lar] *Dictionnaire LAROUSSE Français en ligne*. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>.
- [LCD15] Gilles Le Cornec and Mathieu Doray. *Caractérisation de la réponse acoustique individuelle des clupéidés du golfe de Gascogne : le projet TOMOFISH*, 2014 (accessed March 31, 2015). <http://archimer.ifremer.fr/doc/00210/32128/>.

- [Leg11] Michel Legris. Systèmes sonars de bathymétrie et d'imagerie. *Formation continue - Acoustique sous-marine - ENSTA Bretagne*, 2011. v1.1.
- [Lic14] Loïc Lichawski. Modélisation de la vessie natatoire de petits poissons pélagiques par tomographie rayons x en vue de la caractérisation de leur réponse acoustique. Mémoire de stage de 3ème année, Télécom Physique Strasbourg, 2014.
- [Lur98] Xavier Lurton. *Acoustique sous-marine - Présentation et applications*. Editions Ifremer, Plouzané, France, 1st edition, 1998.
- [Lur10] Xavier Lurton. *An introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*. Springer-PRAXIS, Plouzané, France, 2nd edition, 2010.
- [MAI96] Kazushi Miyashita, Ichiro Aoki, and Tadashi Inagaki. Swimming behaviour and target strength of isada krill (*euphausia pacifica*). *ICES Journal of Marine Science*, 53(2) :303–308, 1996.
- [Mat] *MATLAB - High-level technical computing language and interactive environment for algorithm development*. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [MPF<sup>+</sup>13] Gavin J. Macaulay, Héctor Peña, Sascha M. M. Fässler, Geir Pedersen, and Egil Ona. Accuracy of the kirchhoff-approximation and kirchhoff-ray-mode fish swimbladder acoustic scattering models. *PLoS ONE*, 8(5), 2013.
- [MSC98] Herman Medwin and Clarence S. Clay. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. ACADEMIC PRESS, USA, 1st edition, 1998.
- [Ols71] K. Olsen. Orientation measurements of cod in lofoten obtained from underwater photographs and their relation to target strength. *ICES Journal of Marine Science*, 1971.
- [pel15] *La campagne PELGAS*, 2014 (accessed June 22, 2015). <http://wwz.ifremer.fr/peche/Le-role-de-l-Ifremer/Observation/Donnees-halieuistiques/Donnees-de-campagne-en-mer/Campagnes-DCF/Pelgas2/Pelgas>.
- [PRI] *Groupe PRISMA, Physics of Radiation InteractionS with Matter and Applications*. Nantes. <http://www-subatech.in2p3.fr/fr/recherche/nucleaire-et-sante/prisma/presentation>.
- [PS95] Chris Partridge and R. Edgar Smith. Acoustic scattering from bodies : Range of validity of the deformed cylinder method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(2) :784–795, 1995.
- [Ray45] Lord Rayleigh. *Theory of Sound*, volume II. Dover Publications, New York, 1945.
- [Rem15] Barbara Remond. *Les couches diffusantes du golfe de Gascogne : caractérisation acoustique, composition spécifique et distribution spatiale*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015.
- [RS04] D. Benjamin Reeder and Timothy K. Stanton. Acoustic scattering by axisymmetric finite-length bodies : An extension of a two-dimensional conformal mapping method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2) :729–746, 2004.
- [SC00] Timothy K. Stanton and Dezhang Chu. 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, 2000.
- [SGU79] K. A. Sage, Jacob George, and H. Uberall. Multipole resonances in sound scattering from gas bubbles in a liquid. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65 :1413–1422, 1979.
- [Sku71] E. Skudrzyk. *The Foundations of Acoustics*. Springer, New York, 1971.
- [SM05] John Simmonds and David MacLennan. *Fisheries acoustics - Theory and practice*. Blackwell Science, Carlton, Victoria, Australia, 2nd edition, 2005.
- [Sta88] T. K. Stanton. Sound scattering by cylinders of finite length. i. fluid cylinders. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83 :55–63, 1988.

- [Sta89] T. K. Stanton. Sound scattering by cylinders of finite length. iii. deformed cylinders. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2) :691–705, 1989.
- [Sub] *Unité mixte de recherche SUBATECH*. Nantes. <http://www-subatech.in2p3.fr/fr/>.
- [TMB08] Verena M. Trenkel, Valérie Mazauric, and Laurent Berger. The new fisheries multibeam echosounder me70 : description and expected contribution to fisheries research. *ICES Journal of Marine Science*, 65(4) :645–655, 2008.
- [TNF09] Yong Tang, Yasushi Nishimori, and Masahiko Furusawa. The average three-dimensional target strength of fish by spheroid model for sonar surveys. *ICES Journal of Marine Science*, 66(6) :1176–1183, 2009.
- [Ube85] Herbert Uberall. Acoustic scattering from elastic cylinders and spheres : surface waves (watson transform) and transmitted waves. *Diffusion et Diffraction*, 2(5) :353–357, 1985.
- [Uri83] Robert J. Urick. *Principles of underwater sound*. McGraw-Hill Book Company, the United States of America, 3rd edition, 1983.
- [Ye97] Zhen Ye. A novel approach to sound scattering by cylinders of finite length. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102 :877–884, 1997.

# Table des figures

1.1	Conditions à respecter pour avoir une écho-intégration linéaire ([SM05], Fig. 5.18, p. 193) . . . . .	3
1.2	Illustration d'une pêche à la senne (©Ifremer). . . . .	5
1.3	Tomographe à rayons X de l'UMR SUBATECH : EasyTom XL 150 / RX Solutions. Au centre, un "sarcophage" en polystyrène maintenant le poisson sur une plateforme rotative. . . . .	5
1.4	Exemple de vue en coupe d'une sardine adulte. L'organe clair est la vessie natatoire. . . . .	5
1.5	Exemple d'un scan tri-dimensionnel haute résolution d'un hareng adulte issu d'une micro-tomographie par rayons X. L'organe visible en jaune est la vessie natatoire. . . . .	6
1.6	N/O Thalassa (© Ifremer) . . . . .	7
1.7	Radiales suivies par le N/O Thalassa dans le Golfe de Gascogne durant la campagne PELGAS2008 (© Ifremer) . . . . .	7
2.1	Index de cible normalisé d'une sphère rigide ([MSC98], p.283) . . . . .	10
2.2	Index de cible d'une sphère gazeuse (trait plein) et d'une sphère infiniment souple (trait pointillé) ([SGU79], Fig. 1) . . . . .	11
2.3	Formes géométriques simples modélisant la vessie natatoire, en vue 2D. . . . .	13
3.1	Extraction des paramètres calculables sur la forme réelle (longueur, surface, volume) puis dimensionnement des formes géométriques simples (longueur, rayon) à partir de descripteurs de la forme réelle. . . . .	15
3.2	Convention sur les axes du repère poisson ( $x_t, y_t, z_t$ ) ([TNF09]) . . . . .	16
3.3	Découpage de la vessie natatoire en tranches de 0,1mm selon l'axe $X_p$ du poisson. . . . .	17
3.4	Définition de la longueur (L), la largeur (W) et la hauteur (H) de la vessie natatoire dans le repère poisson ( $X_p, Y_p, Z_p$ ). . . . .	17
3.5	Définition du rayon équivalent $R$ - vue en coupe de la vessie natatoire dans le plan ( $Y_v, Z_v$ ) . . . . .	18
3.6	Définition de la partie significative de la vessie natatoire. . . . .	19
3.7	Inclinaison de la vessie natatoire ( $X_v, Y_v, Z_v$ ) par rapport au corps du poisson ( $X_p, Y_p, Z_p$ ) . . . . .	19
3.8	Calcul de l'inclinaison de la vessie natatoire de la sardine n°11 (Annexe 1, Fig. 21) par régression linéaire. Les cercles représentent l'ensemble de la vessie natatoire, et les croix la partie significative. . . . .	20
3.9	Calcul de la courbure de la vessie natatoire de la sardine n°11 (Annexe 1, Fig. 21) par régression linéaire. Les cercles représentent l'ensemble de la vessie natatoire, et les croix la partie significative. . . . .	21
4.1	Cylindre uniformément courbé ([Sta89], Fig. 4) . . . . .	26
4.2	Cylindre déformé ([Sta89], Fig. 1) . . . . .	27
4.3	Index de cible d'un cylindre gazeux (trait plein) et d'un cylindre infiniment souple (trait pointillé). Calcul basé sur [Sta88]. . . . .	29
4.4	Résonances du terme $ B_0 $ (Eq. 4.3) lors du passage par zéro de la fonction de Bessel $J_0$ . . . . .	30
4.5	Comparaison de modèles acoustiques <i>cylindre droit fini</i> , avec (-, [Ye97]) et sans (-, [Sta88]) prise en compte des effets de bord. . . . .	31

4.6	Index de cible TS en fonction de la longueur de la vessie. Les valeurs d'aplatissement et de courbure sont les moyennes de la Table 3.1. On se place en incidence normale. . . . .	34
4.7	Sensibilité à l'aplatissement de la vessie. Incidence normale. . . . .	35
4.8	Sensibilité à l'aplatissement de la vessie pour un large panel de taux de gonflement. Incidence normale. . . . .	36
4.9	Directivité angulaire selon la fréquence. . . . .	37
4.10	Index de cible normalisé nTS (Eq. 2.4) en fonction de la courbure de la vessie, pour le modèle acoustique cylindre courbé (Chap. 4, Sec. 1.1.3). Les valeurs de longueur et d'aplatissement sont les moyennes de la Table 3.1. On se place en incidence normale. . . . .	38
4.11	Sensibilité à la courbure de la vessie. Influence sur la directivité angulaire. Modèle cylindre courbé. . . . .	39
4.12	Directivité angulaire de la sardine 3 des données <i>La Rochelle</i> (Annexe 4, Fig. 33), avec comme choix de dimensionnement $L_{forme} = L_{vessie}$ . . . . .	42
4.13	Directivité angulaire de la sardine 3 des données <i>La Rochelle</i> (Annexe 4, Fig. 33), avec comme choix de dimensionnement $L_{forme} = L_p$ . . . . .	43
4.14	Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage horizontale ( $\pm 15^\circ$ ) pour la sardine 3 (Annexe 4, Fig. 33). A gauche, le choix de dimensionnement est $L_{forme} = L_{vessie}$ et à droite, $L_{forme} = L_p$ . . . . .	44
4.15	Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage plongeante de $-30^\circ$ ( $\pm 15^\circ$ ) pour la sardine 3 (Annexe 4, Fig. 33). A gauche, le choix de dimensionnement est $L_{forme} = L_{vessie}$ et à droite, $L_{forme} = L_p$ . . . . .	44
4.16	Index de cible nTS (Chap. 2, Eq. 2.4) moyenné sur une distribution de nage horizontale ( $\pm 15^\circ$ ) avec comme choix de dimensionnement $L_{forme} = L_{vessie}$ . . . . .	46
17	Vessie natatoire de la sardine adulte n°2 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	54
18	Vessie natatoire de la sardine adulte n°3 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	54
19	Vessie natatoire de la sardine adulte n°4 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	54
20	Vessie natatoire de la sardine adulte n°9 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	54
21	Vessie natatoire de la sardine adulte n°11 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	55
22	Vessie natatoire de la sardine adulte n°12 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	55
23	Vessie natatoire de la sardine adulte n°17 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	55
24	Vessie natatoire de la sardine adulte n°19 du lot de <i>La Rochelle</i> . . . . .	55
25	Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre droit. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface. . . . .	56
26	Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre droit tronqué. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface. . . . .	56
27	Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre uniformément courbé. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface. . . . .	57
28	Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un ellipsoïde. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface. . . . .	57
29	Validation de l'implémentation du modèle acoustique cylindre fluide fini droit [Sta88] à partir de la figure 30. . . . .	58
30	Figure 5 issue de la référence [MAI96]. La rétro-diffusion du krill est calculée à partir du modèle acoustique cylindre fluide fini [Sta88]. . . . .	58
31	Validation de l'implémentation du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89] à partir de la figure 32. . . . .	59
32	Figures 6.c et 8 issues de la référence [Sta89]. La rétro-diffusion du krill est calculée à partir du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89]. . . . .	59
33	Tableau résumant les descripteurs géométriques des 8 sardines des données <i>La Rochelle</i> . . . . .	60
34	Rapport des longueurs des sardines <i>La Rochelle</i> . . . . .	60

1 Annexe 1 : Géométries des sardines issues de la manipulation avec l'aquarium de La Rochelle (Chap. 1, Sec. 2.1)

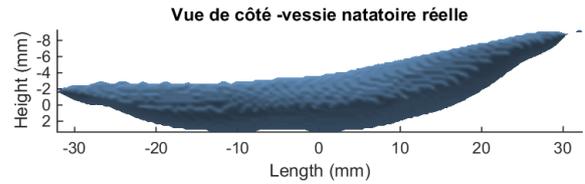
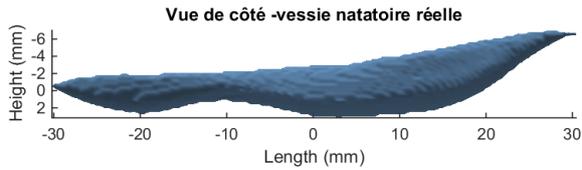
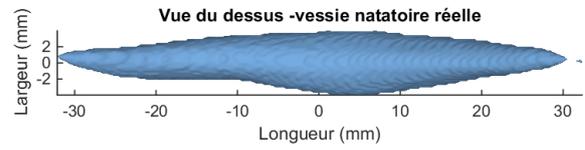
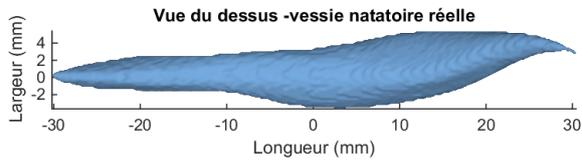


FIGURE 17 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°2 du lot de La Rochelle.

FIGURE 18 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°3 du lot de La Rochelle.

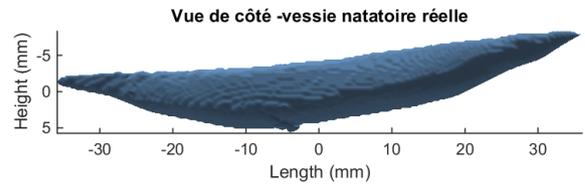
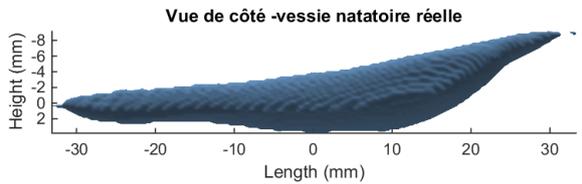
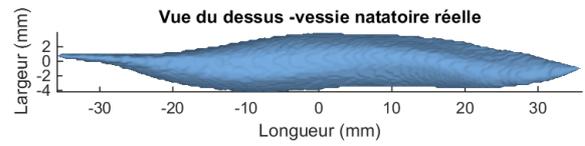
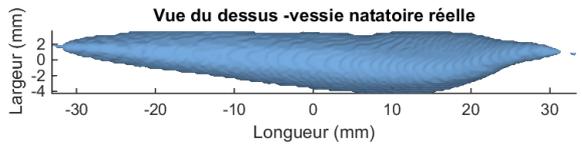


FIGURE 19 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°4 du lot de La Rochelle.

FIGURE 20 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°9 du lot de La Rochelle.

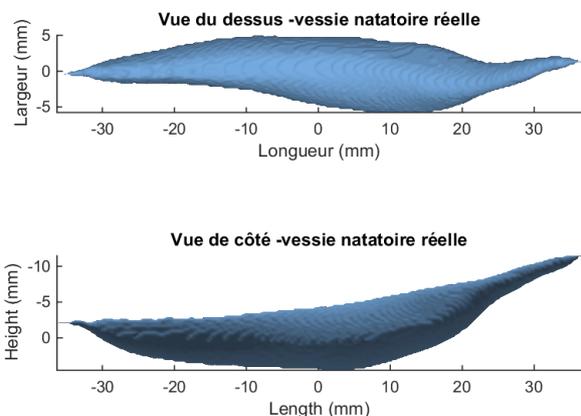


FIGURE 21 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°11 du lot de La Rochelle.

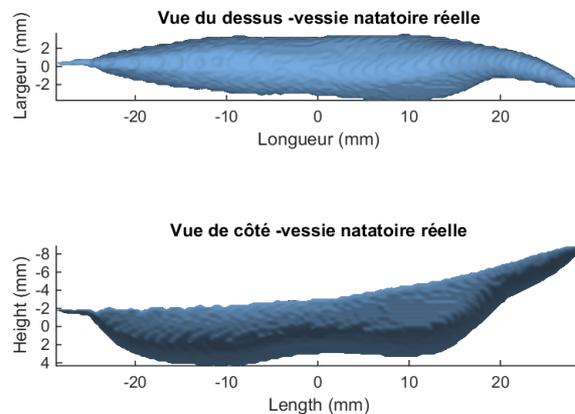


FIGURE 22 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°12 du lot de La Rochelle.

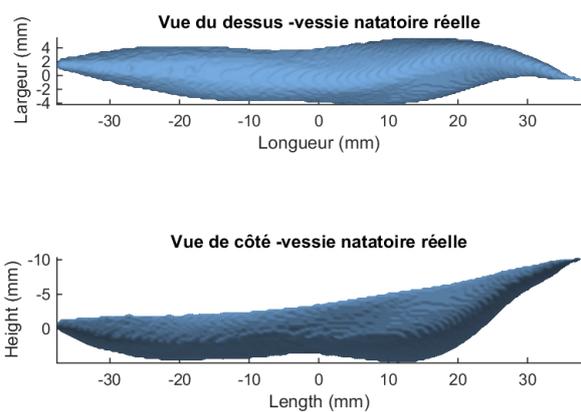


FIGURE 23 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°17 du lot de La Rochelle.

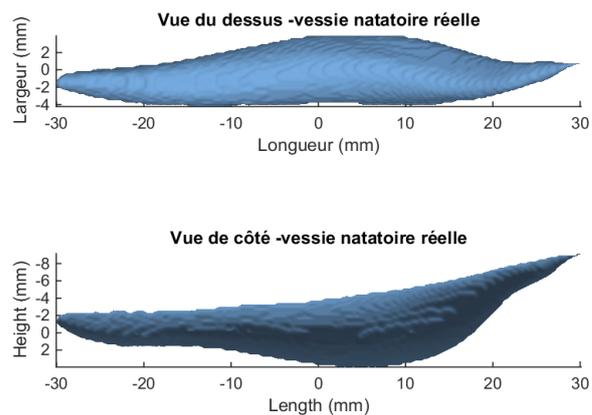


FIGURE 24 – Vessie natatoire de la sardine adulte n°19 du lot de La Rochelle.

## 2 Annexe 2 : Corrélation entre les formes géométriques simples et les formes réelles de vessies natatoires

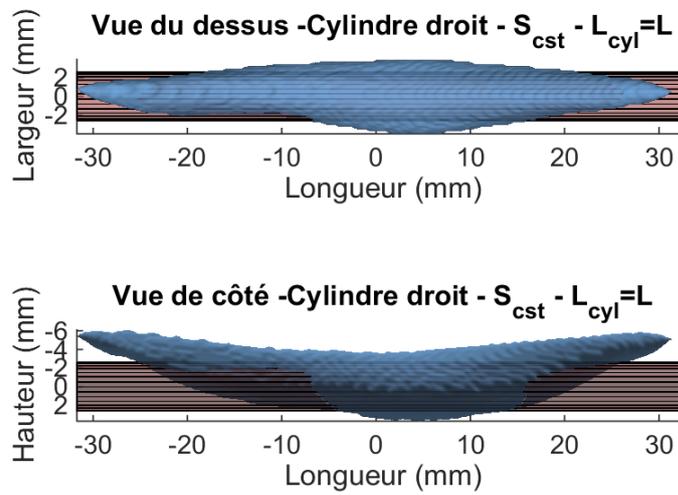


FIGURE 25 – Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre droit. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface.

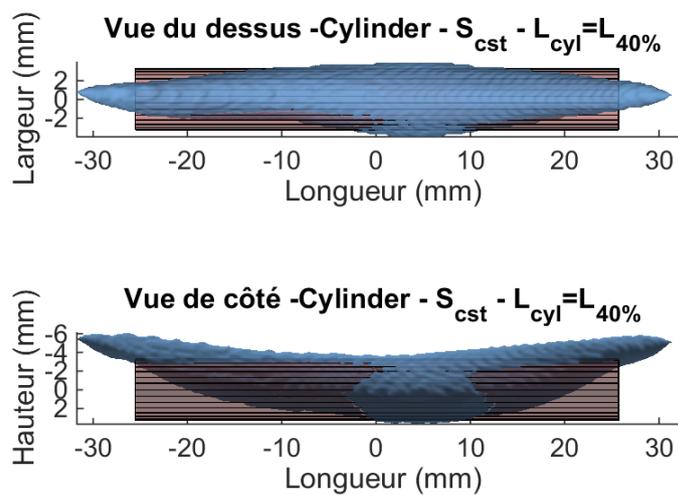


FIGURE 26 – Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre droit tronqué. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface.

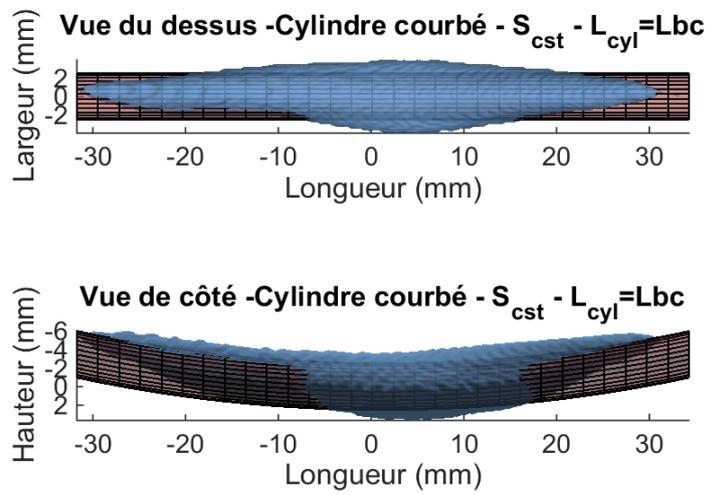


FIGURE 27 – Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un cylindre uniformément courbé. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface.

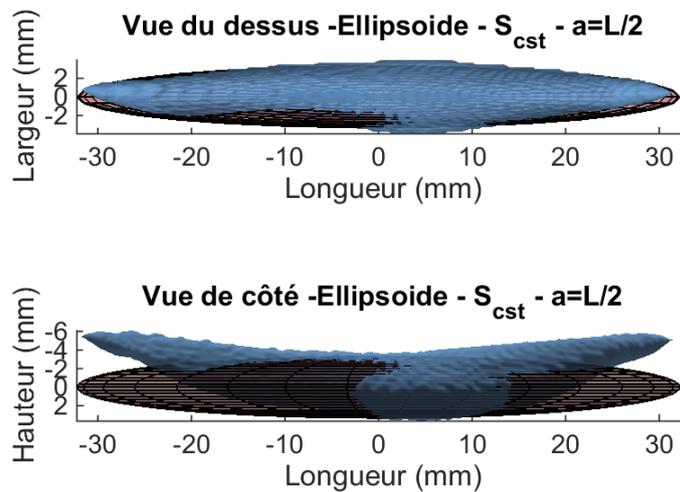


FIGURE 28 – Vessie natatoire de la sardine n°3 modélisée par un ellipsoïde. Le dimensionnement se base sur la longueur réelle de la vessie et une hypothèse de conservation de la surface.

### 3 Annexe 3 : Validation de l'implémentation des modèles acoustiques

#### 3.1 Validation du modèle acoustique cylindre fluide fini droit [Sta88]

Pour valider l'implémentation numérique du modèle cylindre fluide fini droit [Sta88] (Chap. 4, Sec. 1.1.2), je me suis basé sur la figure 5 de la référence [MAI96] qui utilise ce modèle pour calculer la rétro-diffusion de krill. Le résultat de la référence [MAI96] est rappelé dans ce rapport par la figure 30.

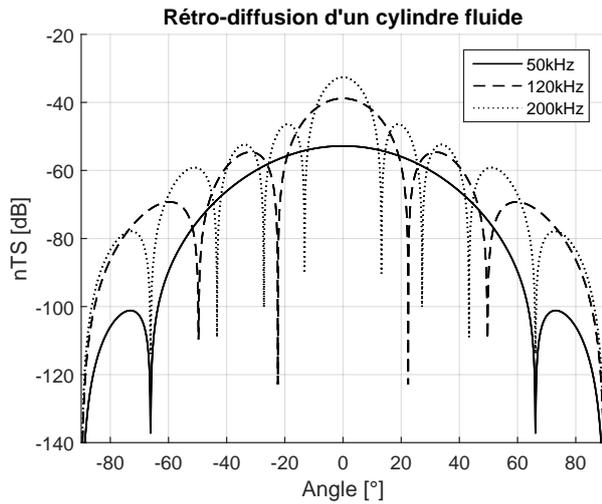


FIGURE 29 – Validation de l'implémentation du modèle acoustique cylindre fluide fini droit [Sta88] à partir de la figure 30.

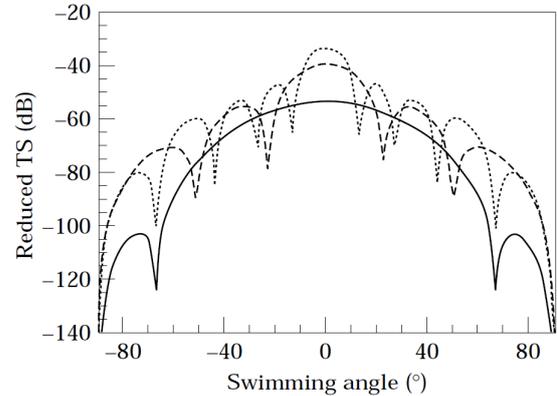


Figure 5. Backscattering patterns of isada krill (16.4 mm in body length) at 50 kHz (—), 120 kHz (---), and 200 kHz (···).

FIGURE 30 – Figure 5 issue de la référence [MAI96]. La rétro-diffusion du krill est calculée à partir du modèle acoustique cylindre fluide fini [Sta88].

La figure 29 est le résultat de notre implémentation numérique du cylindre fluide fini droit [Sta88], en utilisant les mêmes paramètres que la référence [MAI96].

On retrouve les mêmes formes de courbes et valeurs d'index de cible entre les figures 30 et 29. Notre implémentation numérique est donc validée.

La forme un peu plus lisse des courbes de la figure 29 peut être expliquée par la résolution angulaire plus forte utilisée dans notre simulation numérique.

### 3.2 Validation du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89]

Pour valider l'implémentation numérique du modèle cylindre fluide fini courbé [Sta89] (Chap. 4, Sec. 1.1.3), je me suis basé sur les figures 6.c et 8 de la référence [Sta89] qui utilise ce modèle pour calculer la rétro-diffusion de krill. Le résultat de la référence [Sta89] est rappelé dans ce rapport par la figure 32.

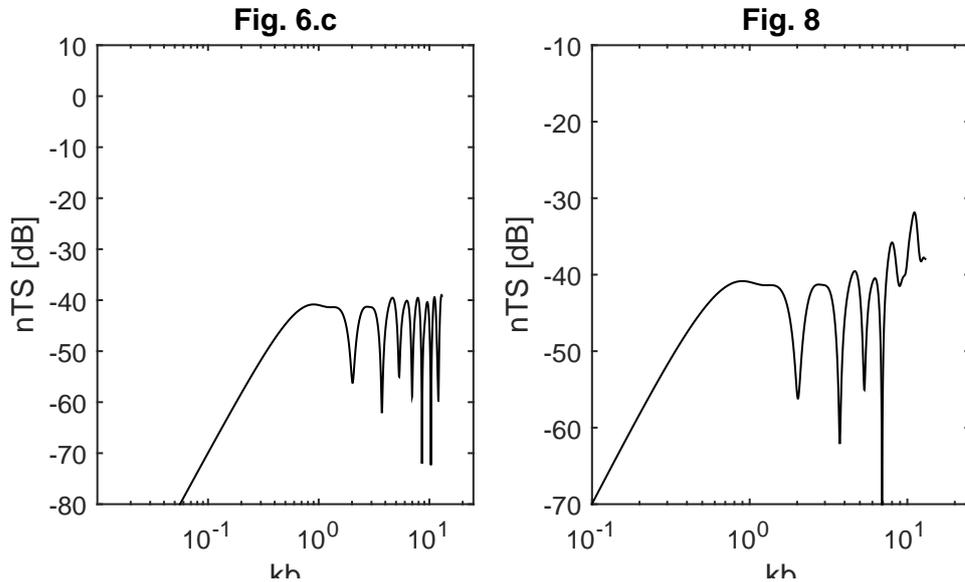


FIGURE 31 – Validation de l'implémentation du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89] à partir de la figure 32.

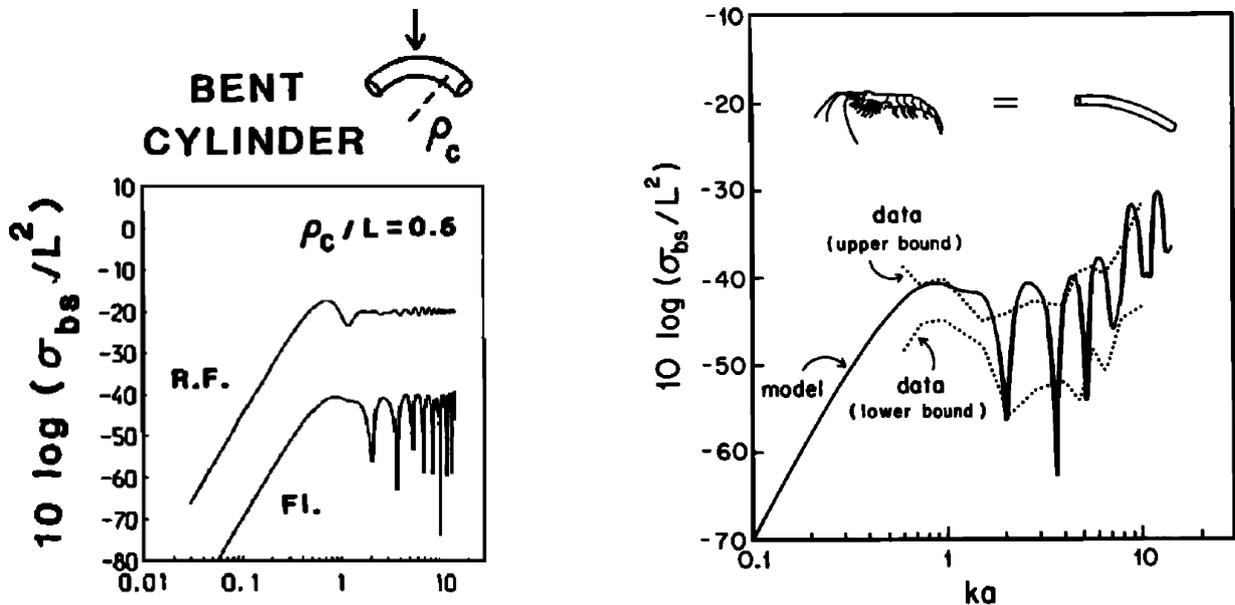


FIGURE 32 – Figures 6.c et 8 issues de la référence [Sta89]. La rétro-diffusion du krill est calculée à partir du modèle acoustique cylindre fluide fini courbé [Sta89].

La figure 31 est le résultat de notre implémentation numérique du cylindre fluide fini courbé [Sta89], en utilisant les mêmes paramètres que la référence [Sta89].

On retrouve les mêmes formes de courbes et valeurs d'index de cible entre les figures 31 et 32. Notre implémentation numérique est donc validée.

#### 4 Annexe 4 : Rapport constant entre la longueur du corps du poisson et la longueur de sa vessie natatoire

Index	Longueur corps (cm)	Longueur vessie (cm)	Rapport des longueurs (%)	Surface (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Taux de gonflement (%)
2	15,4	6,1	39,3	9,2	1,6	3,4
3	15,9	6,4	40,7	10,6	1,8	5
4	16,6	6,6	39,9	11,3	2,1	4,5
9	18,3	7,2	39,4	13,2	2,5	4,1
11	19,1	7,3	38,2	13,9	3,2	4,9
12	15,3	5,7	37,5	9,4	1,8	5
17	19,4	7,5	38,8	15,5	3,6	5,5
19	16,5	6	36,5	10,4	2	4,6

FIGURE 33 – Tableau résumant les descripteurs géométriques des 8 sardines des données *La Rochelle*.

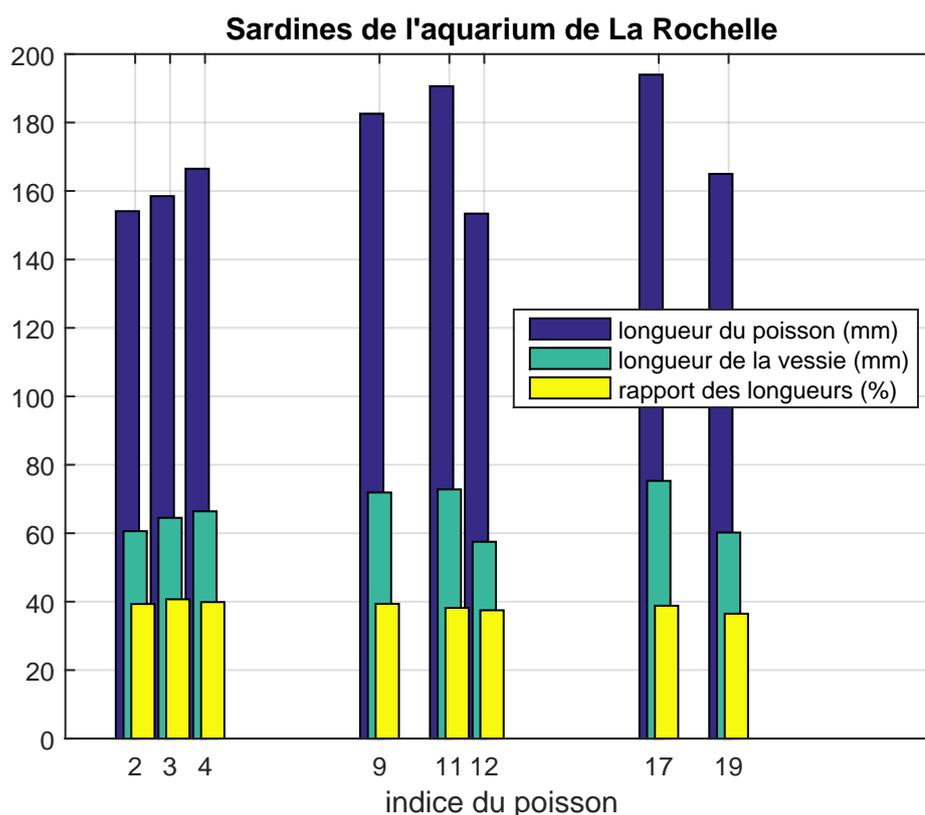


FIGURE 34 – Rapport des longueurs des sardines *La Rochelle*.