

# NOTIONS D'ACOUSTIQUE APPLIQUÉE À L'HALIEUTIQUE ET L'ÉCOLOGIE AQUATIQUE

Jean Jacques LÉVÉNEZ, Anne LEBOURGES-DHAUSSY, Erwan JOSSE  
2006

## PLAN

### 1) HISTORIQUE

### 2) OUTILS

#### 2-1) Les principes

#### 2-2) Sondeurs

2-2-1) Principes de fonctionnement d'un sondeur

2-2-2) Principes de fonctionnement d'un transducteur monofaisceau

2-2-3) Principes de fonctionnement d'un transducteur à faisceau scindé (dual-beam) ou partagé (split-beam)

2-2-4) Le volume insonifié, les zones aveugles

2-2-5) Niveau d'émission et sensibilité à la réception

2-2-6) Réflexion acoustique par les organismes marins

2-2-7) Équation du sonar

2-2-8) Les deux principales méthodes d'évaluation des ressources : l'écho-intégration et l'écho-comptage.

#### 2-3) Sonars

#### 2-4) Sondeurs multifaisceaux halieutiques

#### 2-5) Sonars 3D et caméras acoustiques

#### 2-6) Marques acoustiques

### 3) APPLICATIONS

#### 3-1) Domaines d'application

#### 3-2) Évaluations des ressources

#### 3-3) Études comportementales

#### 3-4) Approches écosystémiques

3-4-1) Les résultats des campagnes « ECOTAP » et de travaux qui s'en sont inspiré

3-4-2) Les apports du Symposium CIEM de Montpellier 2002

3-4-3) Les nouvelles voies ouvertes par l'acoustique multifréquentielle

## TEXTE

### 1) HISTORIQUE

La propagation du son dans l'eau est un phénomène largement utilisé par la faune aquatique pour repérer congénères, proies et prédateurs (ligne latérale des poissons par exemple), pour les localiser avec précision (dauphins, globicéphales...) ou même comme arme pour étourdir les proies (certaines crevettes et mammifères).

Chez les humains, il semble que la première exploitation pratique de effets de la propagation du son dans l'eau fut faite en 1490 par Léonard de Vinci. A cette époque il écrivit : « Si vous arrêtez votre navire, plongez une extrémité d'un long tube dans l'eau et mettez l'autre

extrémité à votre oreille, vous pourrez entendre des navires situés à une grande distance de vous ».

En 1870, Jules Verne dans « Vingt mille lieues sous les mers » décrit avec virtuosité cette capacité par : « Les moindres bruits se transmettaient avec une vitesse à laquelle l'oreille n'est pas habituée sur la terre. En effet, l'eau est pour le son un meilleur véhicule que l'air, et il s'y propage avec une rapidité quadruple. [...] Des bruits profonds, nettement transmis par ce milieu liquide, se répercutaient avec une majestueuse ampleur ». Cette propriété était encore largement utilisée durant la première guerre mondiale, en améliorant simplement l'expérience de Léonard de Vinci d'abord par l'utilisation d'un second tube distant du premier, parfois orientable, et mis près de l'autre oreille : l'effet stéréo permettait ainsi d'apprécier grossièrement la direction de l'origine du son. Un peu plus tard le système fut encore amélioré en assemblant deux systèmes d'une douzaine de tubes orientables montés à bâbord et à tribord dans les fonds des navires : ce système améliorerait largement le repérage des sources de bruits qu'on localisait avec une précision de l'ordre du  $\frac{1}{2}$  degré.

Un des paramètres les plus importants de la propagation du son est sa célérité. Il est probable que la première mesure de la vitesse de propagation du son dans l'eau fut faite en novembre 1826 dans le lac de Genève par le physicien suisse Daniel Colladon et le mathématicien français Charles Sturm. Ils eurent l'idée d'utiliser la différence de temps entre l'arrivée de deux signaux synchrones : un signal aérien lumineux et un signal acoustique sous-marin. Pour réaliser leur ingénieuse et néanmoins dangereuse expérience, ils ancrèrent deux bateaux, un de chaque côté du Lac de Genève à 13847 mètres de distance l'un de l'autre. Une cloche suspendue sous un bateau était frappée par un levier qui au même moment allumait au moyen d'une bougie un tas de poudre à canon, ce qui provoquait un éclair lumineux très visible.

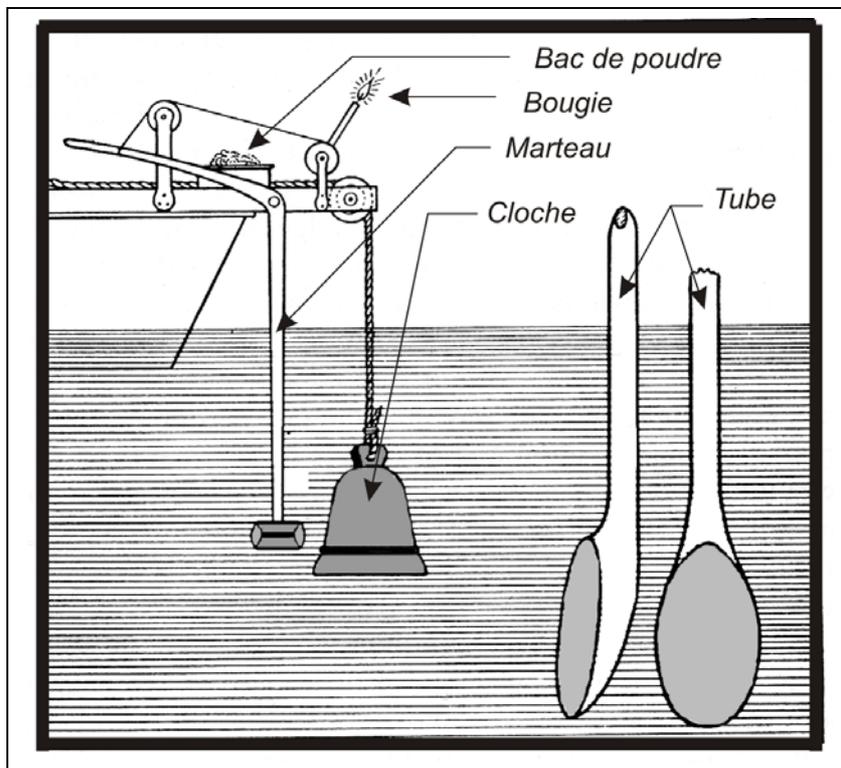


Fig. 1 : Dispositif expérimental de Colladon et Sturm pour mesurer la célérité du son dans l'eau, (d'après Clay & Medwin, 1977)

Un observateur placé sur le second bateau écoutait dans un tube placé dans l'eau et mesurait le temps écoulé entre l'éclair lumineux et le son de la cloche. Cette expérience fut répétée plusieurs fois alors que la température de l'eau était de 8°C. Elle permit d'obtenir dans ces conditions un temps moyen de 9,4 secondes, ce qui conduit à calculer une vitesse de propagation du son dans l'eau égale à  $13\,487 : 9,4$ , soit 1435 mètres par seconde. Un calcul actuel de la vitesse de propagation du son dans l'eau dans les conditions expérimentales de Colladon et Sturm donnerait 1435 m/s, ce qui souligne l'extraordinaire degré de précision de leurs résultats étant donné les moyens de mesure de l'époque ! Histoire trop belle sans doute, car en 1965 il fut démontré que dans ces conditions expérimentales, cette incroyable précision était le pur fruit du hasard et que seuls les deux premiers chiffres du résultat étaient significatifs...

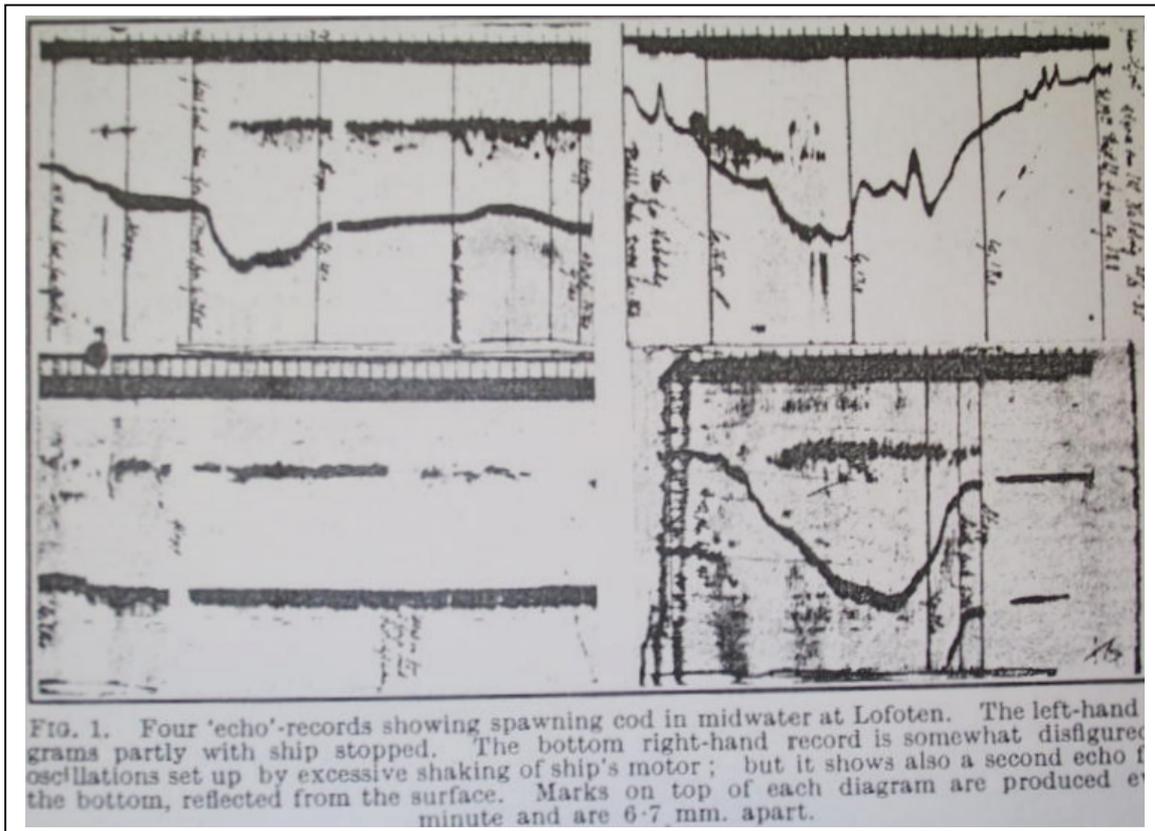
Plus tard dans le XIX<sup>ème</sup> siècle de nombreux physiciens s'intéressèrent aux problèmes de « transduction », c'est-à-dire au phénomène de conversion d'énergie électrique en énergie sonore et vice versa. La magnétostriction, ou aptitude de certains matériaux à changer de forme quand ils sont soumis à un champ magnétique fut découverte vers 1840, découverte qui conduisit à l'invention du téléphone attribuée, dans un premier temps et après de longues procédures, en 1876 à Alexander Graham Bell, avant que soit rétabli en 2002 seulement la justice de reconnaître Antonio Meucci comme le véritable inventeur en 1860 du téléphone. Le pendant de la magnétostriction est l'effet piézo-électrique, découvert quant à lui en 1880 par Jacques et Pierre Curie. L'effet piézo-électrique est la capacité offerte par certains cristaux de charger électriquement leurs faces quand ils sont soumis à une contrainte mécanique. On avait donc avant la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle découvert deux effets qui seront utilisés pour émettre et recevoir du son dans l'eau, amenant ainsi des éléments de réponse à la fort intéressante question : « comment voir sous l'eau ? ».

La collision du Titanic avec un iceberg, la nuit du 14 au 15 avril 1912, amenant à la perte de centaines de vies humaines, eut un formidable retentissement dans l'opinion publique et déclencha probablement une urgente nécessité de se doter de moyens de détection sous-marine. Le même mois, L. R. Richardson fit breveter en Angleterre une procédure de télémétrie acoustique puis le mois suivant (10 mai 1912) un nouveau brevet du protocole permettant de détecter au moyen de leur écho la présence de grands objets immergés. Le 29 janvier 1913, R. A. Fessenden qui travaillait sur le même problème déposa aux États Unis un brevet pour un prototype de source électroacoustique sous-marine et il réussit le 27 avril 1914 à détecter un iceberg distant de 2 miles.

Pendant ce temps en Europe le déclenchement de la première guerre mondiale mit en évidence le besoin absolu de pouvoir détecter les sous-marins militaires de l'ennemi. Le physicien français P. Langevin développa un transducteur assez puissant pour que l'onde sonore produite traverse la Seine à Paris : c'était durant l'hiver 1915-1916. Les alliés britanniques purent grâce à R. W. Boyle reproduire le même résultat en été 1916 : ils utilisèrent le sigle « ASDIC » (pour Anti-Submarine Division – *ics* dans un premier temps, puis Allied Submarine Devices Investigation Committee) pour désigner leurs expériences alors secrètes et ce sigle resta en usage des années chez les britanniques pour désigner les systèmes sondeurs/sonars en général. Un progrès majeur fut encore réalisé en 1917 par P. Langevin qui eut l'idée de construire une source sonore faite d'un sandwich de matériau piézo-électrique (quartz) entre deux plaques de métal et utilisa les tout récents amplificateurs à tube. La grande puissance de cette source sonore permettait une portée de 8 km et a permis pour la première fois en 1918 de détecter l'écho d'un sous-marin distant de 1500 m.

Pendant l'entre deux guerres les avancées dans le domaine de l'électronique furent très significatives et trouvèrent d'importantes applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine, avec en particulier les amplificateurs et les systèmes de visualisations des informations des sondeurs/sonars pour les utilisateurs. Les fréquences ultrasonores permirent d'augmenter la directivité des systèmes tout en réduisant la taille des appareils.

Il fallut néanmoins attendre 1925 pour que soit commercialisé en Angleterre et aux États-Unis les « fathometers » destinés à mesurer la profondeur des océans. En 1926, Rallier du Bathy fut sans doute le premier à rapporter l'utilisation d'un « sondeur ultra-sonore » pour la pêche à la morue sur les bancs de Terre Neuve. En 1929, Kimura démontra qu'un sondeur pouvait détecter des poissons dans un enclos. Au début des années 30, le capitaine anglais R. Balls a utilisé un « échomètre » pour détecter les bancs de harengs en Mer du Nord. En 1935 le norvégien O. Sund publia un article dans Nature « Echo Sounding in Fisheries Research » dans lequel il montre des échogrammes de morues concentrées dans une couche de 10 mètres au dessus du fond.



**Fig. 2 : Premiers échogrammes publiés montrant des échos de morues en période de ponte à Lofoten (d'après Nature, 8 juin 1935).**

Sund fut sans doute le premier à établir des cartes d'abondance de la morue et à informer les pêcheurs sur les zones et profondeurs où la morue était la plus abondante. En 1935 toujours, plusieurs types de sonars/sondeurs étaient opérationnels et en 1938, en prévision de la seconde guerre mondiale, débutèrent les premières productions de masse de sonars si bien qu'à l'entrée en guerre un grand nombre de navires américains étaient équipés à la fois en matériel d'écoute et de détection.

Pendant l'entre deux guerre encore, les recherches scientifiques permirent d'aborder l'étude des phénomènes de propagation du son dans les océans. De remarquables différences dans les capacités de détection des sonars étaient observées au cours de la journée : de bons échos étaient détectés le matin alors que l'après midi ces échos étaient faibles, voire inexistants. Après l'invention du premier bathythermographe en 1937 par A. F. Spielhaus, il devint évident qu'une faible stratification thermique provoquait une réfraction du son vers le fond des océans avec pour conséquence d'atténuer ou de supprimer la détection des cibles

qui se trouvaient alors dans une « zone d'ombre ». Durant cette période aussi fût acquise une bonne compréhension des phénomènes d'absorption du son dans l'eau, et des valeurs très précises de coefficients d'absorption furent calculées.

De chaque côté de l'Atlantique, la période de la seconde guerre mondiale fut marquée par une intense activité de recherche focalisée sur les propriétés du son dans l'eau. Ainsi aux États-Unis la « National Defense Research Committee » (NDRC) finança un grand nombre de scientifiques pour qu'ils s'intéressent à tous les aspects de la propagation du son dans l'eau. Les Américains remplacèrent le nom ASDIC par celui plus compréhensible de SONAR (SOund Navigation And Ranging). Un grand nombre des concepts actuels et des applications pratiques trouvent leur origine à cette période.

Sachant détecter des poissons par un sondeur grâce à leur échos, restait à quantifier ces échos, c'est-à-dire pouvoir estimer quelle quantité de poissons ils représentaient. Middtun et Seatersdal en 1957 proposèrent les premières tentatives d'estimation d'abondance en comptant le nombre d'échos individuels de poissons sur un échogramme en papier enregistré en Mer de Barents. Richardson *et al.* en 1959 affinèrent la méthode en prenant en compte l'amplitude de l'écho, qui est lié à la taille des poissons, qu'ils mesuraient sur un tube cathodique. Dans les années 60 plusieurs appareils de comptage automatique d'écho couplés à un sondeur furent proposés : le compteur d'impulsions (Mitson et Wood, 1961), le compteur de cycles (Dowd, 1968), et il fallut attendre 1965 pour que Dragsund et Olsen inventent l'échointégrateur qui met à profit la relation entre la densité de poissons et le carré du voltage de leur écho, technique toujours largement utilisée à notre époque.

Dans les années 80, l'échointégration devint une technique d'usage très répandu pour les évaluations de biomasses. Les sondeurs à double faisceaux (dual beam) furent mis au point aux USA par Biosonics dans le but de compléter et d'affiner les résultats de campagnes d'échointégration par des mesures *in situ* des index de réflexion acoustique (TS : target strength) des poissons. Les sphères standard de calibration des sondeurs firent leur apparition et des protocoles standardisés de calibration adoptés par la communauté scientifique. SIMRAD en Norvège mit au point la technique des faisceaux scindés (Split-Beam) apportant en plus de la mesure de TS la possibilité de repérer précisément la position des poissons dans le faisceau acoustique et par conséquent de suivre la trajectoire de ceux-ci (tracking). Les données des sondeurs devinrent numériques et la transition entre intégrateurs analogiques et numériques devint irréversible.

Les années 90 virent progresser les techniques et méthodes d'analyse des signaux acoustiques. Les processus d'analyse de TS s'affinèrent, les paramètres morphologiques et énergétiques des bancs de poissons devinrent accessibles automatiquement. L'utilisation du sonar omnidirectionnel redevint d'usage courant dans les campagnes d'évaluation d'abondance, tant pour évaluer les biomasses très proches de la surface qui échappent aux sondeurs que pour étudier les phénomènes d'évitement des bancs à l'approche des navires. Les techniques de statistiques spatiales (géostatistique) développées pour les besoins miniers furent adaptées aux besoins de l'acoustique pour préciser les intervalles de confiance des estimations en prenant en compte les effets de distribution spatiale des biomasses (question de non-indépendance des échantillons successifs) et pour étudier le comportement des populations (taille et distribution géographique des agrégations).

Les années 2000 voient se développer un intérêt croissant pour la classification et l'identification des réflecteurs acoustiques (poissons, plancton...) par l'usage d'analyses multifréquentielles, c'est-à-dire par l'observation et l'analyse des mesures acoustiques synchrones faites par des sondeurs opérant à différentes fréquences. L'emploi de technique « large bande », c'est-à-dire utilisant une onde acoustique balayant une grande gamme de fréquences, se développe au niveau des sondeurs et des sonars, entre autres dans le but de mieux identifier les détections.

## 2) OUTILS

### 2-1) Les principes

Le principe de l'écho-localisation est simple : une impulsion sonore est émise dans l'eau, se propage, se réfléchit sur un objet (fond, poisson, plancton etc...), et revient vers l'émetteur. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal permet de calculer la distance à laquelle se situe le réflecteur. Si l'émission est directive on obtient aussi une indication sur la direction où se situe cette cible par rapport à l'émetteur. Si l'impulsion sonore est dirigée vers le bas, un écho est reçu du fond de la mer et la profondeur d'eau sous un navire est facile à mesurer.

Un peu de théorie ?

Onde acoustique :

La plus simple manière de produire une onde acoustique est de faire vibrer une surface alternativement d'avant en arrière. C'est ce que l'on fait en frappant sur un tambour ou sur un gong : sa surface se met en vibration, les particules d'air à son contact se mettent en mouvement et transfèrent ce mouvement aux particules voisines, etc. puisque le milieu (air) est compressible. On a généré une onde acoustique.

Une de ses caractéristiques est sa fréquence. Lorsque l'on frappe la surface d'un gong, sa surface quitte sa position zéro pour atteindre un maximum de déformation, puis repasse par la position zéro pour atteindre un maximum de l'autre côté et repasse à nouveau par la position zéro. Un nouveau cycle commence alors et ainsi de suite... Le nombre de cycles effectués par unité de temps est appelé fréquence  $f$  de la vibration et il s'exprime en Hertz (Hz) qui est le nombre de cycles par seconde. La gamme des fréquences utilisées en acoustique sous-marine s'étale de 10 Hz à 1 MHz, et pour les applications halieutiques de 10 kHz à 500 kHz.

Une seconde caractéristique est son amplitude, qui est caractérisée par l'extension du déplacement de la surface du gong, autrement dit par la distance séparant ses deux positions atteintes lors des maxima de déformation. Cette amplitude est transmise de proche en proche aux particules du milieu et plus cette amplitude est grande, plus le son que l'on entend est fort. Cette amplitude représente un mouvement sur place autour d'une position d'origine, mouvement caractérisé par une vitesse particulière. On comprend aussi intuitivement que les vibrations de la surface du gong exercent alternativement une augmentation de la pression quand la surface s'approche des particules, suivie d'une diminution de cette pression quand la surface s'en éloigne. Cette variation de pression est une autre caractéristique des ondes acoustiques, et dans la pratique c'est la grandeur la plus utilisée en acoustique sous-marine : elle s'exprime en Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Newton par m}^2$ ).

Lorsqu'un son est produit, il se propage dans toutes les directions (théoriquement) autour de la source et forme une vague sphérique de variation de pression acoustique encore appelée onde sonore : il en résulte qu'à chaque point du milieu la pression acoustique varie avec le temps. Au cours du temps, cette même pression se répartit sur une surface de plus en plus grande (surface d'une sphère) et à chaque instant cette pression décroît en fonction de la distance à la source sonore.

En fait la pression  $p_0$  se répartissant sur une sphère dont l'accroissement de surface est proportionnel au carré de la distance  $R$  à son centre, on peut préciser (dans un milieu

acoustiquement parfait sans absorption moléculaire) que la pression acoustique  $p_i$  en un point  $i$  diminue en fonction du carré de sa distance à la source :

$$p_i = P_0 / 4\pi R^2$$

Il s'agit donc d'une atténuation de la pression par dispersion géométrique.

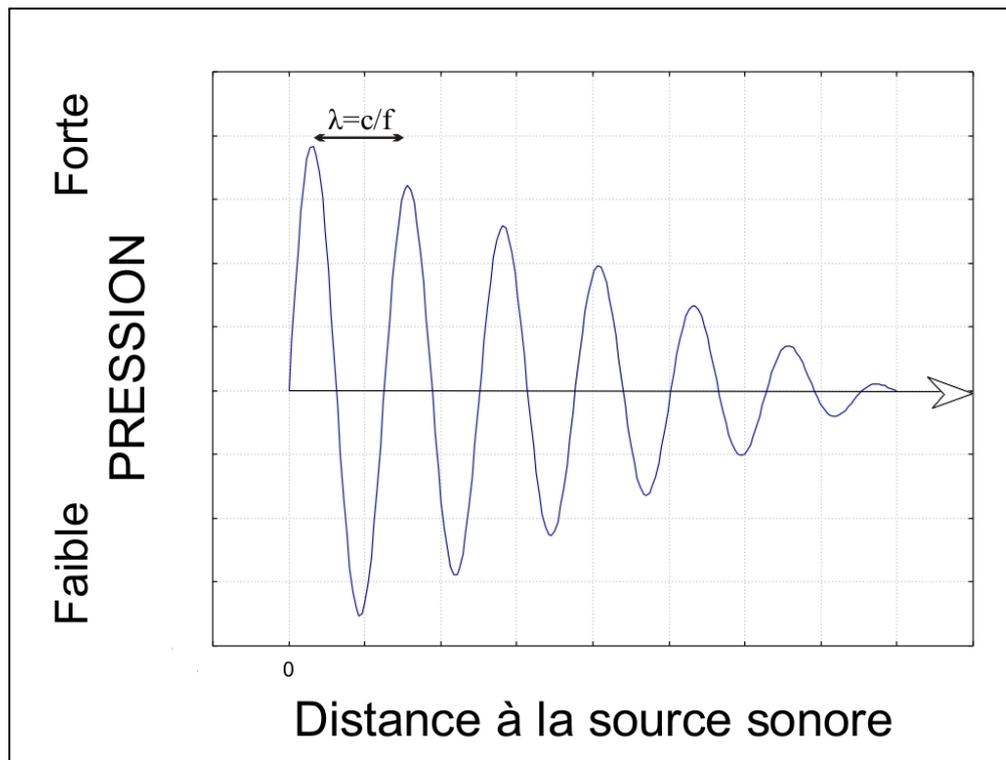


Fig. 3 : Atténuation de la pression acoustique en fonction de l'éloignement à la source.

Autre caractéristique importante, la vitesse à laquelle l'onde acoustique se propage dans le milieu ou célérité «  $c$  ». Elle ne dépend ni de l'amplitude, ni de la fréquence du son mais est uniquement imposée par les caractéristiques mécaniques du milieu de propagation, en particulier sa densité  $\rho$  et son module d'élasticité  $k$  (ou inverse de la compressibilité).

La relation s'écrit :  $c = \sqrt{k/\rho}$  avec :  $c$  en m/s,  $k$  en N/m<sup>2</sup>,  $\rho$  en kg/m<sup>3</sup>

À titre d'illustration, la vitesse de propagation du son dans l'air est d'environ 340 m/s, dans l'eau de mer d'environ 1500 m/s, dans les sédiments de 1500 à 2500 m/s, et dans l'acier de 5000 à 6000 m/s.

La densité d'un milieu n'étant pas constante mais variant entre autre avec la température, on peut en déduire que la célérité du son dépend aussi de ce paramètre. Ainsi pour de l'eau de mer dont la densité dépend à la fois de la concentration en sels et de la température, on peut

construire le graphique suivant qui indique la valeur de la célérité en fonction de ces deux paramètres :

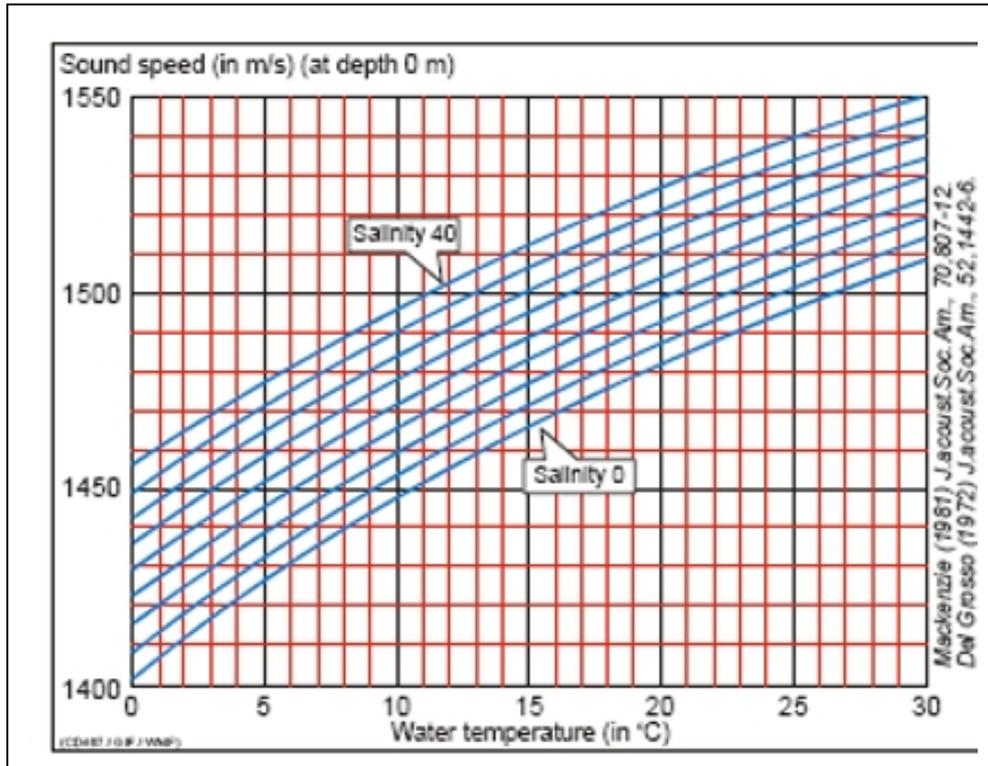


Fig. 4 : Célérité du son en fonction de la température et de la salinité (d'après Mackenzie, 1981, et Del Grosso, 1972, doc. SIMRAD).

En fait, si l'on cherche plus de précision, il faut aussi prendre en considération que si la célérité du son dans l'eau de mer augmente avec la température, elle augmente aussi avec la salinité et la pression, ce qui signifie que la célérité change avec la période de la journée, les saisons, la profondeur, la proximité géographique d'embouchures de fleuves etc. Une relation simplifiée permettant de calculer la célérité en prenant en compte ces paramètres peut s'écrire :

$$c = 1449,2 + 4,6t - 0,055t^2 + 0,00029t^3 + (1,34 - 0,01t)(S - 35) + 0,016z$$

Avec  $c$  en m/s,  $t$  température en °C,  $S$  salinité en ‰ et  $z$  profondeur en m.

Connaissant ces paramètres, on peut en déduire quelques autres :

- la période  $T$  (durée en seconde d'une vibration élémentaire) se déduit de la fréquence  $f$  par la relation  $T = \frac{1}{f}$
- la longueur d'onde  $\lambda$  (distance parcourue par le signal acoustique pendant une période  $T$  pour une célérité  $c$  du son donnée), s'écrit  $\lambda = cT = c/f$

Intensité et puissance acoustique :

L'énergie d'un gong dépend de l'amplitude de ses oscillations. Plus il a été frappé fort, plus grande sont les amplitudes de ses vibrations, et par conséquent plus grandes sont les amplitudes des oscillations de pression acoustique et de mouvements de particules qu'il a transmis dans le milieu. En un point donné du milieu, l'énergie transmise par une onde acoustique se compose de l'énergie cinétique des particules en mouvement et de l'énergie potentielle due aux différences de pression. Lorsqu'on rapporte à une unité de temps cette énergie totale alors qu'elle traverse une surface de  $1 \text{ m}^2$  perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde acoustique, on définit la notion d'intensité acoustique  $I$ . L'intensité acoustique  $I$  moyenne est donc la valeur moyenne du flux d'énergie par unité de surface et de temps. On démontre qu'à chaque instant, elle est liée à la pression  $p$  par la relation :

$$I = \overline{p^2} / \rho c \text{ en W/m}^2$$

avec  $\overline{p}$  pression acoustique moyenne en  $\mu\text{Pa}$ ,  $c$  célérité en  $\text{m/s}$  et  $\rho$  densité de l'eau en  $\text{kg/m}^3$  ; le terme  $\rho c$  est appelé impédance acoustique du milieu.

On peut noter que dans le cas d'une onde harmonique simple,  $\overline{p^2} = 1/2 p_p^2$  avec  $p_p$  = pic d'amplitude de pression et la relation peut aussi s'écrire  $I = p_p^2 / 2\rho c$ .

Cette intensité  $I$  étant équivalente à une quantité d'énergie sonore  $E$  par unité de surface, on en déduit (dans un milieu acoustiquement parfait sans absorption moléculaire) qu'elle s'atténue par dispersion géométrique en raison de la distance  $R$  à la source sonore selon :

$$I = E / 4\pi R^2$$

La puissance acoustique  $P$  reçue sur une surface  $S$  est le produit de cette intensité ( $I$ ) par la surface  $S$  et on a alors :

$$P = I.S = \overline{p^2} S / \rho c \text{ en W}$$

avec  $\overline{p}$  pression acoustique moyenne en  $\mu\text{Pa}$ ,  $c$  célérité en  $\text{m/s}$  et  $\rho$  densité de l'eau en  $\text{kg/m}^3$  et  $S$  surface en  $\text{m}^2$

#### Notation décibélique

En acoustique, la dynamique (écart entre les plus faibles et les plus fortes valeurs) est de très grande amplitude ; pour éviter de travailler avec de très grands nombres, par convention la notation décibélique a été adoptée. Par définition, un décibel (du nom de Graham Bell) est une unité sans dimension égale à 10 fois le logarithme à base 10 du rapport de 2 intensités acoustiques  $dB = 10 \log I_i / I_0$  et dans le cas des ondes planes  $dB = 20 \log \overline{p_i} / \overline{p_0}$  étant donné que l'intensité est égale au carré de la pression.

Réciproquement, on calcule  $\frac{I_i}{I_0} = 10^{\frac{dB}{10}}$  et  $\frac{\overline{p_i}}{\overline{p_0}} = 10^{\frac{dB}{20}}$

En acoustique sous-marine, l'intensité de référence  $I_0$  est l'intensité qui correspond à une pression de 1  $\mu\text{Pa}$ , soit  $I_0 = 6,51 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$ .

NB : en acoustique aérienne la référence est celle de sensibilité de l'oreille humaine, soit  $\overline{p_0} = 20 \mu\text{Pa}$  et  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , soit une différence voisine de 62 dB entre les deux systèmes de référence.

Cette méthode revient à remplacer la notion « classique » de mesure de grandeur par celle de mesure de niveau de grandeur.

Pour fixer les idées, on peut construire le tableau de correspondance suivant entre niveau en dB et facteur multiplicatif pour des intensités acoustiques :

Niveau dB	Facteur multiplicatif
-40	x 0,0001
-30	x 0,001
-20	x 0,01
-10	x 0,1
0	x 1
10	x 10
20	x 100
30	x 1000
40	x 10000

Par extension, cette notation s'étend à d'autres grandeurs, comme les intensités, les pressions, les voltages, les conversions de TS individuelle en TS par kg etc...

### Absorption moléculaire

En fait, les milieux transmetteurs ne sont jamais acoustiquement parfait et on doit faire face, en plus de l'atténuation par dispersion géométrique, à de l'absorption moléculaire  $\alpha$ . Cette absorption relève de plusieurs effets dont ceux de la viscosité, de la conduction thermique et de la relaxation. Pour ne pas entrer dans trop de détails, il suffit de se rappeler que cette absorption moléculaire est d'autant plus grande que la salinité de l'eau et la fréquence acoustique sont élevées. On peut estimer la valeur de  $\alpha$  par lecture du graphique suivant :

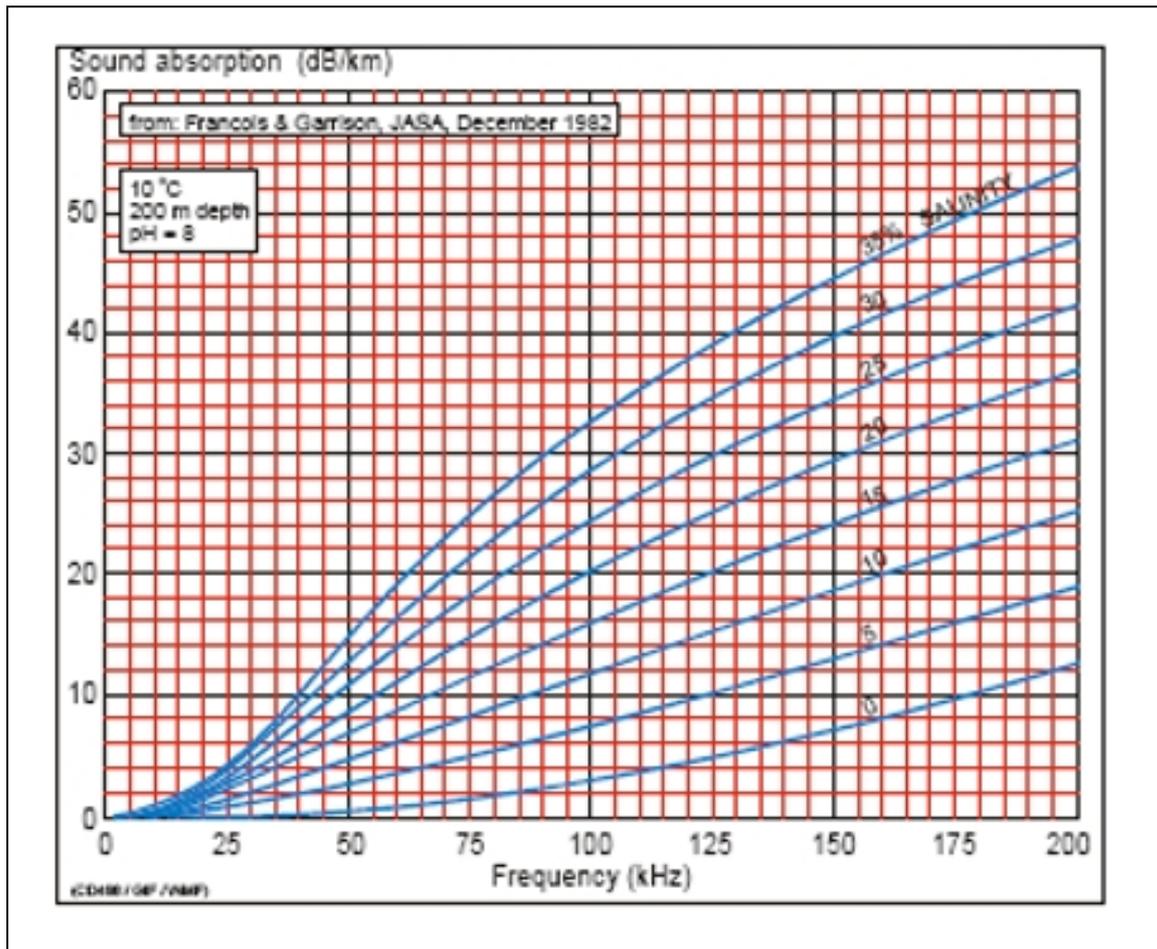
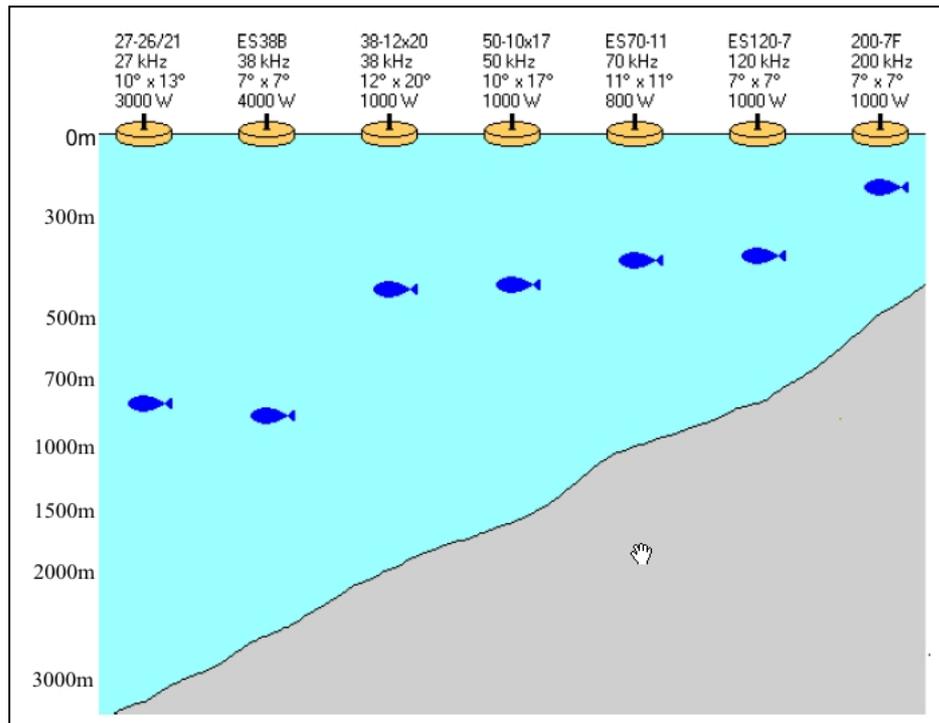


Fig. 5 : Absorption du son dans l'eau en fonction de la fréquence et de la salinité (d'après Francois et Garrison, 1982, doc. SIMRAD).

La conséquence directe de ce phénomène est que plus la fréquence acoustique utilisée est élevée, moins la portée sera grande. Ainsi à titre purement indicatif, on peut grossièrement estimer que dans de bonnes conditions de propagation en eau de mer, un sondeur de 12 kHz aura une portée maximale voisine de 8 km, un sondeur de 38 kHz une portée voisine de 1000 m, un sondeur de 120 kHz une portée voisine de 200 m.

Pour une détection à la plus grande distance possible, il faut choisir une fréquence basse, un grand transducteur (concentration de l'énergie dans un petit faisceau), et une grande puissance d'émission. L'illustration suivante (SIMRAD ES60 Instruction manual) indique pour quelques types de transducteurs la distance maximale de détection des poissons et du fond.



**Fig. 6 : Illustration des portées de détection des poissons et du fond pour différents types de sondeurs (doc. SIMRAD).**

D'autres pertes d'énergie, plus aléatoires et difficiles à prendre en compte sont les pertes liées à la présence de bulles d'air dans l'eau de mer. Ces bulles sont générées de manière naturelle dans le milieu par les vagues et l'activité biologique ou générées par l'activité humaine (sillage de bateaux ...). Rarement ces pertes sont prises en considération dans les calculs d'abondance d'organismes marins du fait de leur caractère imprévisible. Elles peuvent cependant atténuer considérablement le signal, voire le masquer totalement...

#### Impulsion acoustique :

Une impulsion acoustique ou « ping » est une onde sonore de durée déterminée  $\tau$  qui est transmise dans le milieu par un sondeur.

Cette durée  $\tau$  est liée à la période  $T$  et au nombre de période  $n$  dans un ping par :

$$\tau = n.T$$

La longueur  $l$  correspondante de l'impulsion transmise dans l'eau se calcule par le produit de cette durée  $\tau$  par la vitesse de propagation du son dans le milieu  $c$  et on a la série de relations suivantes :

$$l = c.\tau = cnT = cn \frac{1}{f} \quad l \text{ étant exprimée en m, } c \text{ en m/s, } T \text{ exprimé en s, } f \text{ exprimé en Hz}$$

Du fait de l'inertie des transducteurs, une quinzaine de périodes sont nécessaires pour que l'onde transmise soit bien formée. Cela veut dire que, comme  $\tau = n.T = n \frac{1}{f}$ , la durée de l'impulsion acoustique peut être d'autant plus petite que la fréquence  $f$  est élevée tout en conservant  $n = 15$ .

Par exemple à 38 kHz la durée minimale des l'impulsions sera,  $\tau = n \frac{1}{f} = 15 \frac{1}{38000} = 0,4ms$  tandis qu'à à 200 kHz elle pourra descendre à 0,075ms .

Dans la pratique, on utilise des durées d'impulsion supérieures à ce minimum, et typiquement à la fréquence 38 kHz, on utilise une durée d'impulsion de 1ms, ce qui correspond à 38 cycles et à une longueur d'impulsion de 1,5 m.

## 2-2) Sondeurs

### 2-2-1) Principes de fonctionnement d'un sondeur

Un sondeur dans le langage courant est un appareil destiné à émettre verticalement des ondes sonores et à recevoir les échos.

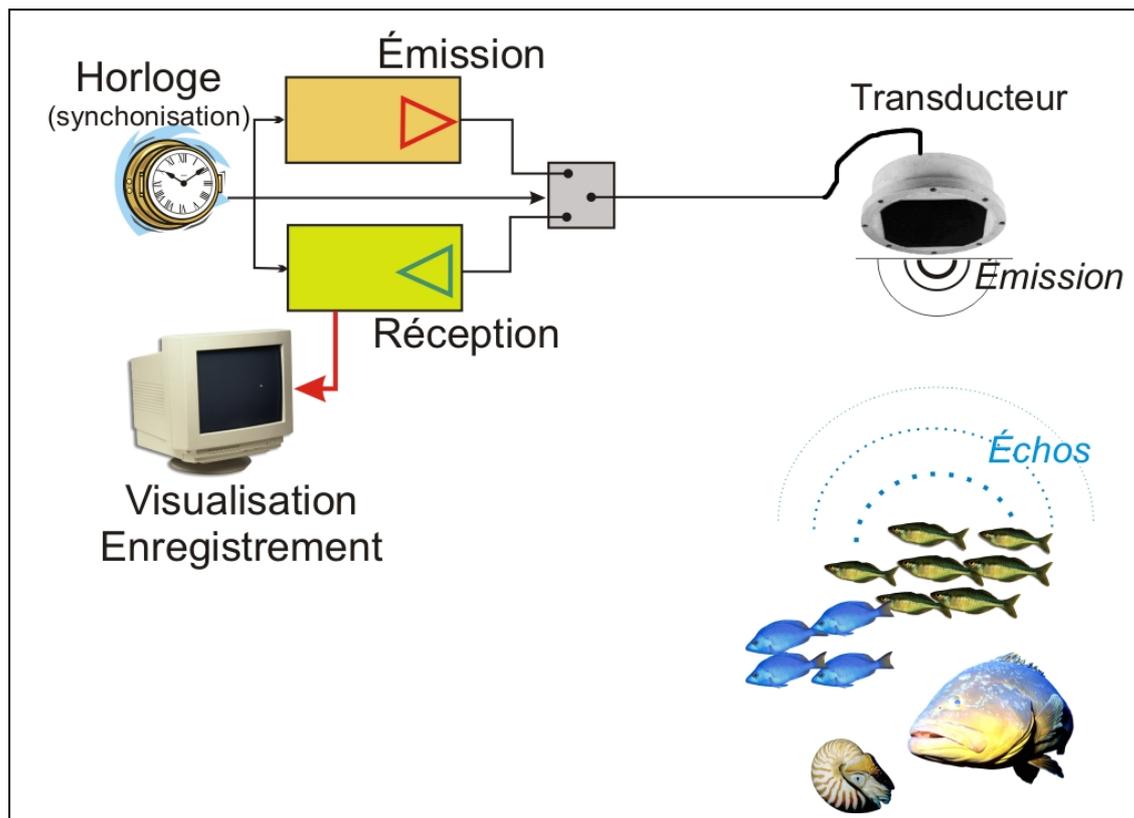
Un sondeur est donc plus particulièrement destiné à mesurer des hauteurs d'eau (bathymétrie) et à détecter en pleine eau les organismes réfléchissant (plancton, poissons pélagiques, bancs de poissons etc.). Ils sont donc particulièrement utilisés dans le domaine de la pêche. Dans le domaine scientifique les sondeurs sont utilisés par les biologistes pour les études écosystémiques, par les éthologistes pour des études comportementales, par les halieutes pour les évaluations d'abondance des ressources (pélagiques principalement), mais aussi en géosciences marines qui utilise des outils spécialisés comme les sondeurs de sédiments ou la géosismique.

Très schématiquement, un système sondeur se compose d'un étage d'émission, d'un étage de réception, d'une horloge qui synchronise les deux, d'un transducteur qui émet les ondes acoustiques et reçoit les échos, et d'un dispositif de restitution des échosondages (écran de visualisation, dispositif d'enregistrement des informations).

L'étage d'émission a deux rôles principaux qui sont la mise en forme d'un signal électrique (fréquence, forme de l'enveloppe) et son amplification.

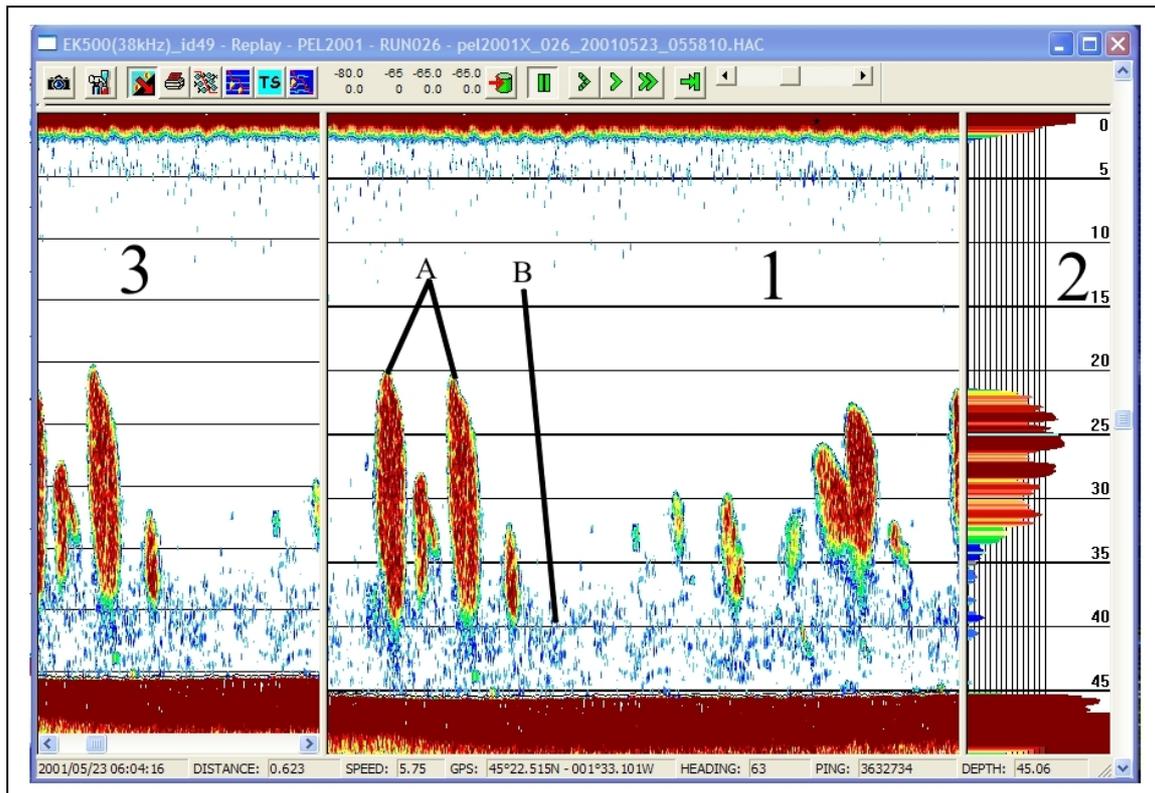
Sur ordre de l'horloge qui déclenche au même moment l'étage de réception, ce signal électrique est envoyé vers le transducteur (directif et orienté verticalement vers le bas) dont le rôle à ce moment là est de transformer le signal électrique provenant de l'étage d'émission en signal acoustique qui est transmis dans l'eau. Le signal acoustique transmis dans l'eau a la même fréquence, la même forme et la même durée que le signal électrique généré dans l'étage d'émission. Ce transducteur transformera ensuite à la réception les échos acoustiques provenant du milieu en un signal électrique (volts) de même caractéristiques (fréquence et forme de l'enveloppe) destiné à l'étage de réception.

L'étage de réception filtrera le signal électrique, convertira le voltage en intensité, et lui appliquera différents types d'amplification avant de l'envoyer sur un écran de visualisation et éventuellement sur un système de stockage de l'information.



**Fig. 7 : Illustration schématique du fonctionnement d'un sondeur**

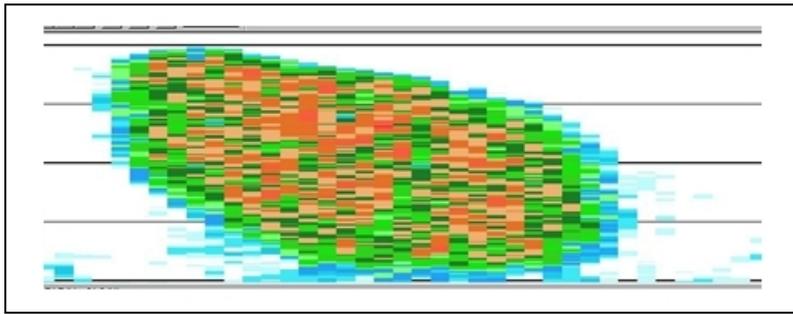
Que peut-on observer sur un écran de sondeur ?



**Fig. 8 :** Exemple d'échogramme obtenu dans le golfe de Gascogne à l'aide d'un sondeur travaillant à 38 kHz (fichier d'exemple MOVIES +, Ifremer).

Sur un échogramme on distingue un écran principal **1**, un écran oscilloscope **2** et une possibilité d'historique **3**. Sur cet écran principal sont détectés des bancs de poissons en **A** (d'autres se distinguent sur la droite de l'écran), du poisson dispersé près du fond en **B**. L'épaisse bande marron en bas de l'écran représente l'écho du fond tandis que la bande marron plus fine en haut de l'écran représente le début d'émission. En **2** l'oscilloscope retranscrit à la fois par la longueur des traits que par leur couleur l'intensité de l'écho en fonction de la profondeur : dans cet exemple, l'oscilloscope représente une coupe verticale sur l'émission en cours de l'énergie réfléchiée par le banc de poisson que l'on voit apparaître en **1** ; le marron représente ici des échos plus forts que le rouge puis le jaune, le vert et le bleu. En **3** se trouve un historique des sondages précédents, ce qui permet à un observateur s'étant brièvement absenté de savoir ce qui s'est passé pendant son absence. Tout en bas de la figure sont affichés des informations relatives à la marche du navire (date, heure, vitesse, position GPS, cap suivi, profondeur...) tandis que tout en haut sont disposés plusieurs outils de réglages et de calculs.

Il convient néanmoins de ne pas se laisser abuser par les différences d'échelles horizontale et verticale d'un échogramme qui tassent latéralement l'information : les bancs sont en réalité beaucoup plus larges qu'ils n'apparaissent. Le banc A de droite de l'image précédente représenté avec la même échelle horizontale et verticale a donc en réalité l'allure suivante.



**Fig. 9 : Représentation du premier banc apparaissant à la figure précédente avec des échelles horizontales et verticales identiques (fichier d'exemples MOVIES +, Ifremer).**

Notons encore que selon la fréquence et la puissance utilisée, un sondeur est tout à fait capable de détecter de petits organismes comme les copépodes par exemple.

Tout ceci illustre assez bien les énormes possibilités d'un sondeur pour observer et mesurer ce qui se passe sous la surface de l'eau.

#### 2-2-2) Principes de fonctionnement d'un transducteur mono faisceau

De manière générale, on appelle transducteur un appareil qui convertit une forme d'énergie en une autre. Un transducteur qui convertit de l'énergie acoustique en énergie électrique est appelé hydrophone et un transducteur convertissant de l'énergie électrique en énergie acoustique est appelé projecteur. On parle aussi couramment d'antenne de réception ou d'antenne d'émission ou plus communément de bases de sondeur ou sondes. Les transducteurs de haute précision utilisés avec de très faibles énergies acoustiques et électriques sont aussi appelés hydrophones.

La plupart des sondeurs actuels utilisent le même transducteur pour l'émission et la réception, mais certains sont constitués de deux antennes, une d'émission et une de réception, généralement disposées de manière perpendiculaire pour permettre de réduire les angles d'observation. Pour transformer des signaux électriques en signaux acoustique et vice-versa, on utilise la propriété de certains matériaux de se déformer sous l'action de courants électriques, soit par effet piézoélectrique ou sa variante l'électrostriction, soit par effet magnétostrictif.

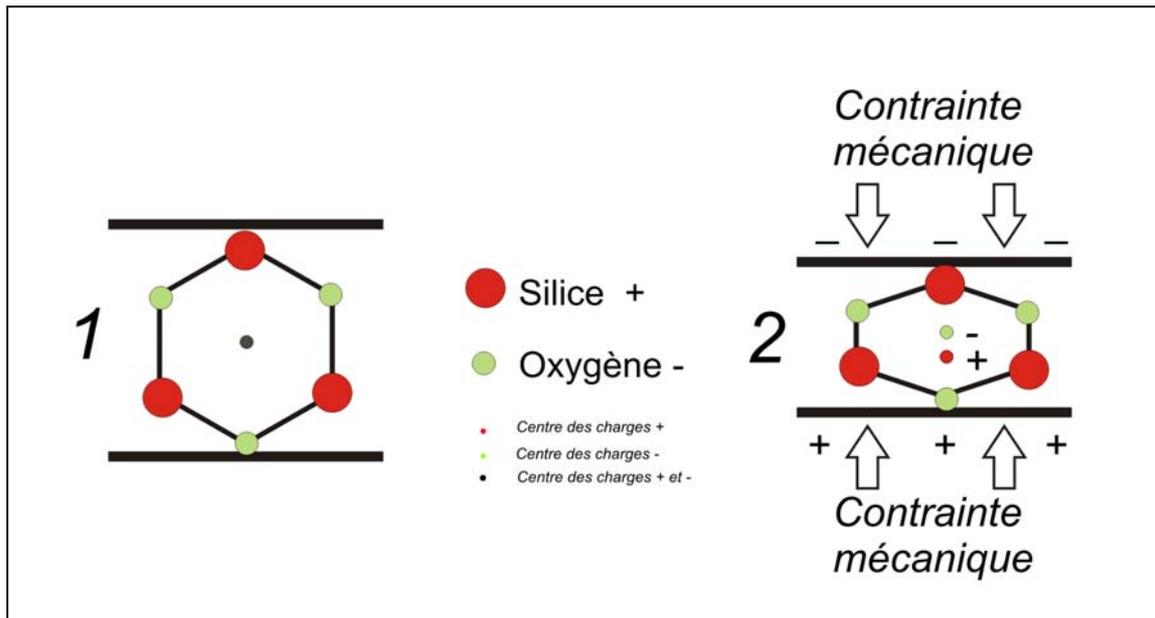


Fig. 10 : Illustration le principe de l'effet piézo-électrique.

Effet piézo-électrique dans un cristal de quartz :

+ en **1** le cristal est au repos, les centres des charges électriques + et - coïncident, les faces ne sont pas chargées électriquement

+ en **2**, l'application d'une contrainte mécanique fait s'aplatir le cristal, les centres des charges positives et négatives se séparent et on obtient une différence de potentiel entre les faces du cristal. Cet effet est réversible, effet piézo-électrique inverse, qui fait qu'une application d'un champ électrique sur les faces du cristal provoque une déformation mécanique.

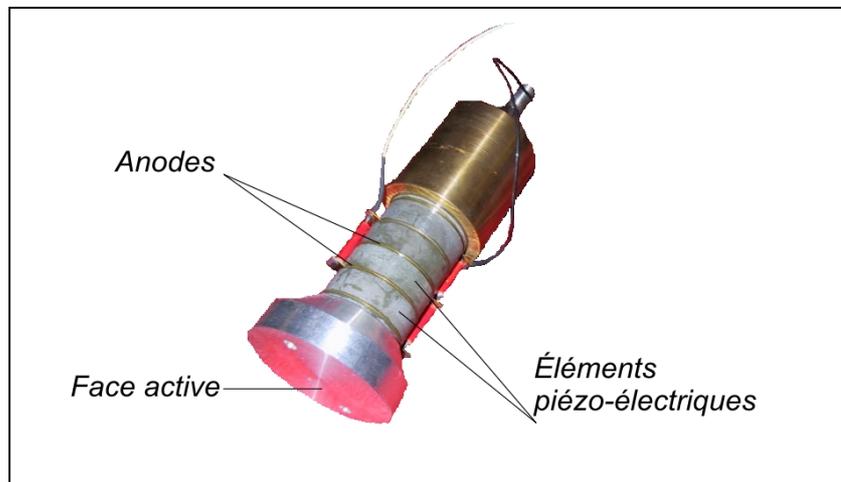
Le quartz est un exemple de ces cristaux qui ont été largement utilisés dans le passé.

Ainsi l'énergie électrique issue d'un sondeur est convertie en énergie acoustique par le transducteur et, toujours au niveau de ce même transducteur, les échos sonores provenant de la réflexion du son sur un obstacle sont transformés en énergie électrique interprétable par l'électronique du sondeur.

Les principales qualités d'un transducteur doivent être la *linéarité* et la *réversibilité*. Un transducteur est linéaire quand il reproduit un signal acoustique de forme équivalente au signal électrique qu'il reçoit ou quand il reproduit un signal électrique de forme équivalente au signal acoustique qu'il reçoit, et il est réversible quand il est capable de convertir de l'énergie acoustique en énergie électrique et inversement.

Bien que l'on ne puisse passer sous silence l'utilisation de transducteurs magnétostrictifs, surtout à l'époque où les transducteurs électrostrictifs pouvaient exploser sous l'effet de la pression quand ils étaient immergés trop profond, on peut considérer que depuis les années

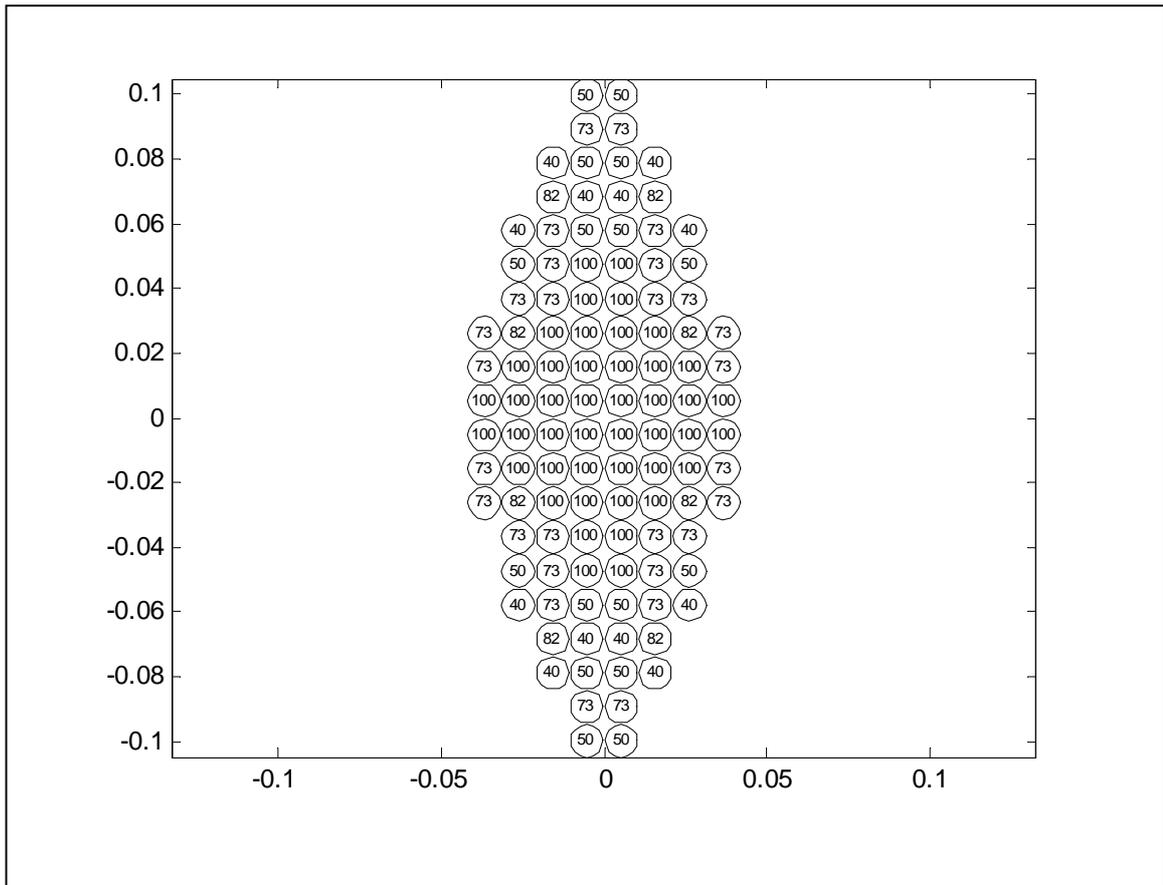
50, les transducteurs utilisés en halieutique sont essentiellement des transducteurs électrostrictifs constitués d'éléments de céramique (par exemple du titanate de barium ou du zirconate titanate de plomb PZT) placés entre deux fines électrodes. Si on applique un voltage entre ces électrodes, on fera se modifier l'épaisseur du transducteur. Quand ce voltage est alternatif, le transducteur vibre : ses expansions et contractions alternatives provoquent dans le milieu des compressions et des dépressions, donc des ondes sonores.



**Fig. 11 : Élément actif d'un transducteur (d'après doc. SIMRAD)**

Un élément actif de transducteur peut par exemple être constitué d'un empilement de 4 ou 5 éléments piézo-électriques séparés par des électrodes. Un transducteur comporte plusieurs dizaines de ces éléments actifs placés côte à côte dans un ordre rigoureux avant d'être noyés dans de la résine.

Les transducteurs constitués d'un seul élément actif ne sont guère utilisés que dans la recherche acoustique. Pour pratiquement tous les autres usages, les transducteurs sont constitués d'un assemblage méticuleux de plusieurs éléments actifs. L'association de plusieurs éléments actifs dans un transducteur lui permet d'être plus sensible dans la mesure où plusieurs éléments génèrent d'avantage de voltage (s'ils sont connectés en série) ou plus de courant (s'ils sont connectés en parallèle) qu'un élément unique exposé au même champ acoustique



**Fig. 12 : Exemple d'assemblage d'éléments actifs dans un transducteur (doc. SIMRAD)**

Cet exemple d'assemblage d'éléments actifs est celui d'un transducteur Simrad 120 kHz  $4 \times 10^\circ$ . La distance entre chaque élément est de l'ordre d'une longueur d'onde, donc de 1,25 cm pour un transducteur de 120 kHz.

La forme du faisceau dépend de la position des éléments actifs dans le transducteur, de la pondération d'intensité appliquée à chaque élément et aussi des délais d'excitation qui leurs sont appliqués.

Cet assemblage et le fait le transducteur soit bafflé (disposant d'un dispositif de concentration de l'énergie vers la face active), implique qu'un transducteur n'agit pas comme une source acoustique ponctuelle dont l'onde acoustique se propagerait de manière sphérique (sauf en très basse fréquence), mais au contraire il est conçu pour être directif, concentrant selon un axe déterminé le maximum d'énergie acoustique avec pour corolaire une meilleure capacité à faire une discrimination entre sons provenant de différentes directions et ainsi améliorer le rapport signal-bruit..

En fait, au-delà d'une certaine distance appelée champ proche ou distance de Fresnel dans laquelle l'énergie acoustique se distribue de manière hétérogène, l'onde acoustique se propage dans plusieurs lobes : un lobe principal concentrant le maximum d'énergie est entouré de plusieurs couronnes de lobes secondaires (le plus souvent indésirables) dans lesquels l'énergie est de plus en plus diluée au fur et à mesure de leur éloignement du lobe principal. Dans le cas le plus simple et à la fois le plus fréquent, les transducteurs sont monofréquentiels et le lobe principal se développe autour d'un axe acoustique perpendiculaire en son centre à la face active du transducteur et le long duquel

l'énergie est maximale. Si on s'en écarte l'énergie décroît jusqu'à ce qu'on obtienne un premier zéro du diagramme de réponse avant de croître à nouveau sur le premier des lobes secondaires et ainsi de suite.

Chez certains transducteurs spécialement conçus pour des applications spécifiques le lobe principal peut être « dépointé », c'est-à-dire orienté dans une direction prédéfinie par l'opérateur (cas des transducteurs du sondeur multifaisceaux halieutique par exemple).

Les transducteurs focalisent ainsi la puissance acoustique dans une direction privilégiée au cours de l'émission et ils sont également plus sensibles aux échos provenant de cette même direction. Ceci permet de mieux séparer les échos des cibles rapprochées et de réduire les bruits parasites provenant d'autres directions.

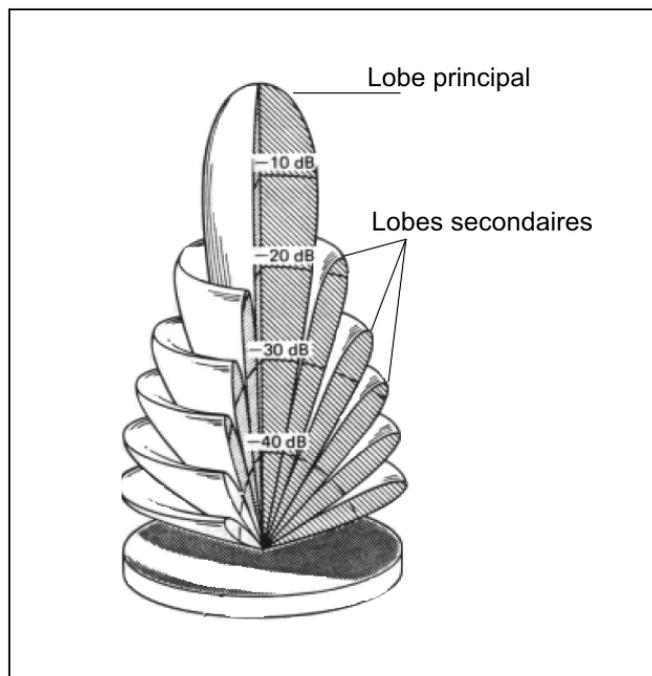


Fig. 13 : Exemple de représentation de diagramme de directivité (Eckart, 1968)

Dans la zone proche du transducteur, des interférences limitent la possibilité de mesures acoustiques. Ces mesures doivent donc se faire au-delà d'une distance minimale  $R$  (distance de Fresnel) que l'American National Standard Institute a fixé à :

$$R = \frac{A}{\lambda}$$

où  $A$  = surface active du transducteur en  $m^2$   
 $\lambda$  = longueur d'onde en mètre

Au-delà du champ proche se situe le champ lointain (zone de Fraunhofer) dans lequel les phénomènes d'interférence ont disparu et où l'énergie acoustique décroît avec le carré de la distance.

La directivité des transducteurs a pour conséquence directe que l'intensité des échos provenant d'une même cible dépendra de ses coordonnées angulaires ( $\theta, \varphi$ ) en radians par rapport à l'axe acoustique, soit autrement dit, de la position de cette cible par rapport à l'axe

de sensibilité maximale du transducteur. Il convient donc, pour les estimations de biomasse par acoustique, de corriger cet effet ; à cette fin une des trois méthodes suivantes peut être utilisée :

- soit la fonction de directivité  $b(\theta, \varphi)$  qui décrit dans un plan le diagramme de directivité. La fonction de directivité s'applique sur le trajet aller et sur le trajet retour de l'onde acoustique et devient  $b^2(\theta, \varphi)$  dont on calcule la moyenne :

$$\overline{b^2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} b^2(\theta, \varphi) \sin \theta / 2\pi d\theta d\varphi,$$

équation qui pour des transducteurs avec directivité symétrique s'écrit :

$$\overline{b^2} = \int_0^{\pi/2} b^2(\theta) \sin \theta d\theta$$

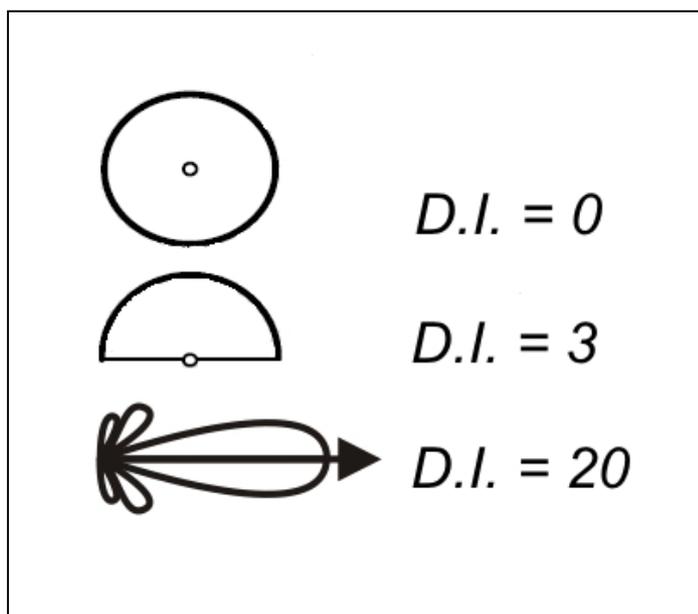
- soit le facteur de directivité  $D$  ou plus généralement son expression en décibels dB soit l'index de directivité  $D.I.$  qui décrit le rapport de l'intensité à l'émission dans l'axe acoustique à la moyenne des intensités à l'émission selon toutes les directions

le facteur de directivité  $D$  est égal au rapport de l'intensité radiée le long de l'axe acoustique sur l'intensité moyenne radiée selon toutes les directions.

$$D = \frac{I_0}{I_m} \text{ avec } I_0 = \text{intensité radiée le long de l'axe acoustique}$$

$I_m = \text{intensité moyenne radiée selon toutes les directions}$

$$\text{et } D.I. = 10 \log(D)$$



**Fig. 14 : Valeur de D.I. en fonction de l'ouverture du lobe principal : plus la valeur de D.I. est élevée, plus le lobe principal est étroit.**

$D.I.$  peut se calculer soit à partir de la surface de la face active des transducteurs par :

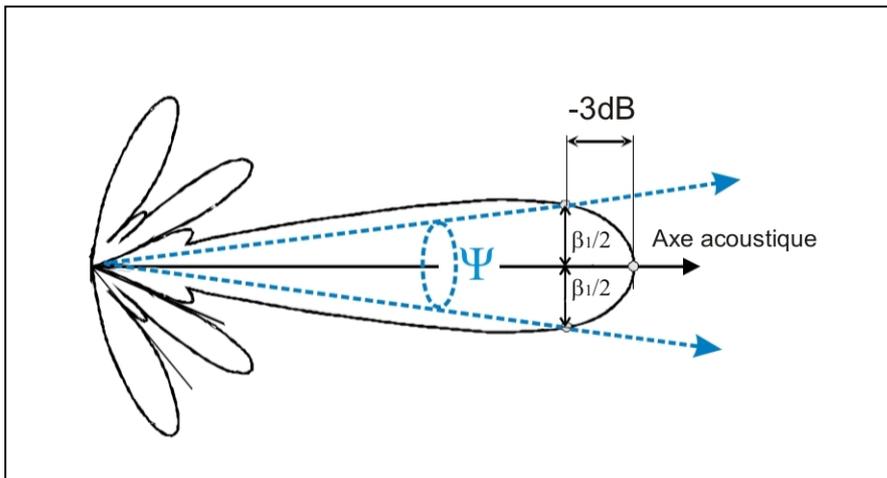
$$D.I. = 10 \log \frac{4\pi A}{\lambda^2} \text{ avec } A = \text{surface active du transducteur en m}^2 \\ \text{et } \lambda = \text{longueur d'onde en m}$$

$D.I.$  peut aussi se calculer à partir des angles du faisceau

$$D.I. = 10 \log \frac{2,5}{\sin\left(\frac{\beta_1}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta_2}{2}\right)}$$

$\beta_1$  et  $\beta_2$  étant les angles en degrés du faisceau aux points -3dB du diagramme de directivité. (NB : dans le cas de transducteurs à faisceaux circulaires,  $\beta_1 = \beta_2$ ).

- soit encore le faisceau de directivité équivalente  $\Psi$  qui décrit un faisceau idéal de forme conique et de directivité uniforme égale à 1 à l'intérieur du cône et égale à 0 à l'extérieur de celui-ci.



**Fig. 15 : Illustration de la différence entre faisceau réel et faisceau de directivité équivalente  $\Psi$ .**

Pour des transducteurs circulaires, Urick (1975) calcule  $\Psi$  par :

$$10 \log \Psi = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2\pi a} \right) + 7,7 \text{ dB/Sr} \text{ pour } a > 2\lambda$$

où :  $\lambda$  = longueur d'onde en mètre  
 $a$  = rayon de la face active du transducteur

et on a encore

$$10 \log \Psi = 10 \log \frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{5800}, \quad \beta_1 \text{ et } \beta_2 \text{ étant les angles en degrés du faisceau aux points } -3\text{dB}$$

Toujours pour les transducteurs circulaires, Forbes et Nakken (1972) estiment la valeur de par :

$\Psi = 2\pi(1 - \cos \theta) \approx \pi\theta^2$ ,  $\theta$  étant le demi-angle en radian aux points -3 dB du diagramme de directivité.

Par exemple pour un faisceau de  $10^\circ$ , on calcule approximativement :

$$10 \log \Psi = 10 \log \frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{5800} = 10 \log \left( \frac{10 \times 10}{5800} \right) = -17,6 \text{dB} \approx 10 \log \pi\theta^2 = 10 \log \pi \left( \frac{5}{360} \cdot 2\pi \right)^2 = -16,2 \text{dB}$$

### 2-2-3) Principes de fonctionnement d'un transducteur à faisceau scindé (dual-beam) ou partagé (split-beam)

Dans un transducteur mono faisceau,  $\Psi$  définit globalement le volume échantillonné, et on considère donc que toute cible située à l'intérieur de ce cône sera détectée et que toute cible à l'extérieur ne le sera pas. Cependant, cette approche globalisante, si elle convient bien pour quantifier les énergies par unité de volume échantillonné, est prise à défaut lorsqu'il s'agit de travailler de manière plus précise sur des cibles isolées, que ce soit pour des études de comportement ou des mesures d'index individuel de réflexion acoustique  $TS_i$ .

Dans le cas d'un mono faisceau la seule information disponible est : la cible est à l'intérieur du cône acoustique. Or pour des études plus fines, connaître la position de la cible dans le faisceau acoustique est indispensable. Pour des mesures d'index de réflexion acoustique  $TS_i$  où il faut connaître précisément la valeur de la fonction de directivité à l'endroit où se situe la cible afin d'en corriger la valeur mesurée, et pour des études comportementales, il faut en plus connaître la position exacte de la cible à chaque émission de manière à suivre à la fois sa trajectographie et les variations de son  $TS_i$ .

Pour répondre à ces problèmes, 2 types de transducteurs ont été mis au point dans les années 80, d'abord les Dual-Beam (Biosonics) puis les Split-Beam (SIMRAD), types que l'on peut d'ailleurs maintenant trouver en association Dual-Beam/Split-Beam.

Le principe de fonctionnement d'un Dual-Beam est très simple : il ne s'agit en effet que de combiner dans un seul transducteur circulaire un faisceau étroit et un faisceau large ayant des axes acoustiques confondus et des gains identiques sur cet axe. On émet une impulsion sur le faisceau étroit et on reçoit les échos simultanément sur le faisceau étroit et le faisceau large.

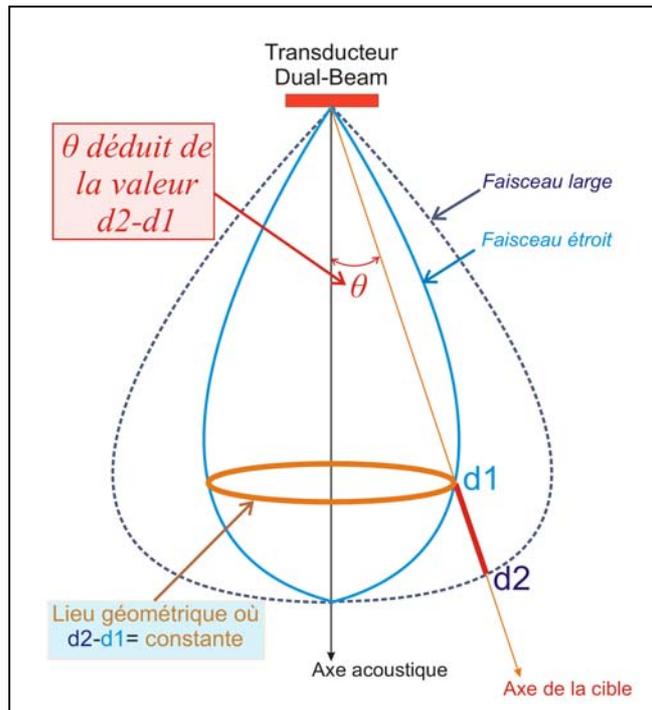


Fig. 16 : Principe de fonctionnement d'un « Dual-Beam » (Lévénéz, US004-IRD).

La différence du niveau d'un écho identifié dans les deux faisceaux n'est plus alors due qu'à la différence de directivité  $d1$  et  $d2$  entre ces deux faisceaux. Si cette différence est nulle, alors la cible se situe précisément dans l'axe acoustique du transducteur. Dans tous les autres cas la cible se situe dans un lieu géométrique de forme circulaire centré sur l'axe acoustique. Connaissant la différence  $d2-d1$ , on connaît l'écart angulaire  $\theta$  de position de la cible à l'axe acoustique et on peut donc connaître la valeur de la fonction de directivité  $b(\theta, \varphi)$  qu'il faudra appliquer à la mesure de  $TS$  de cette cible pour avoir le  $TS_i$ .

Le principe du Split-Beam est un peu plus complexe. Le transducteur est électroniquement scindé en 4 parties égales qui sont associées 2 à 2 pour former 4 « demi-faces de transducteur ». Le trajet effectué par l'onde sonore entre la cible (dans le cas d'une cible désaxée) et chacune des demi-faces du transducteur est différent. Cette différence se traduit par un délai temporel dans la détection de l'écho et donc par une différence de phase instantanée entre les signaux reçus sur ces demi-transducteurs.

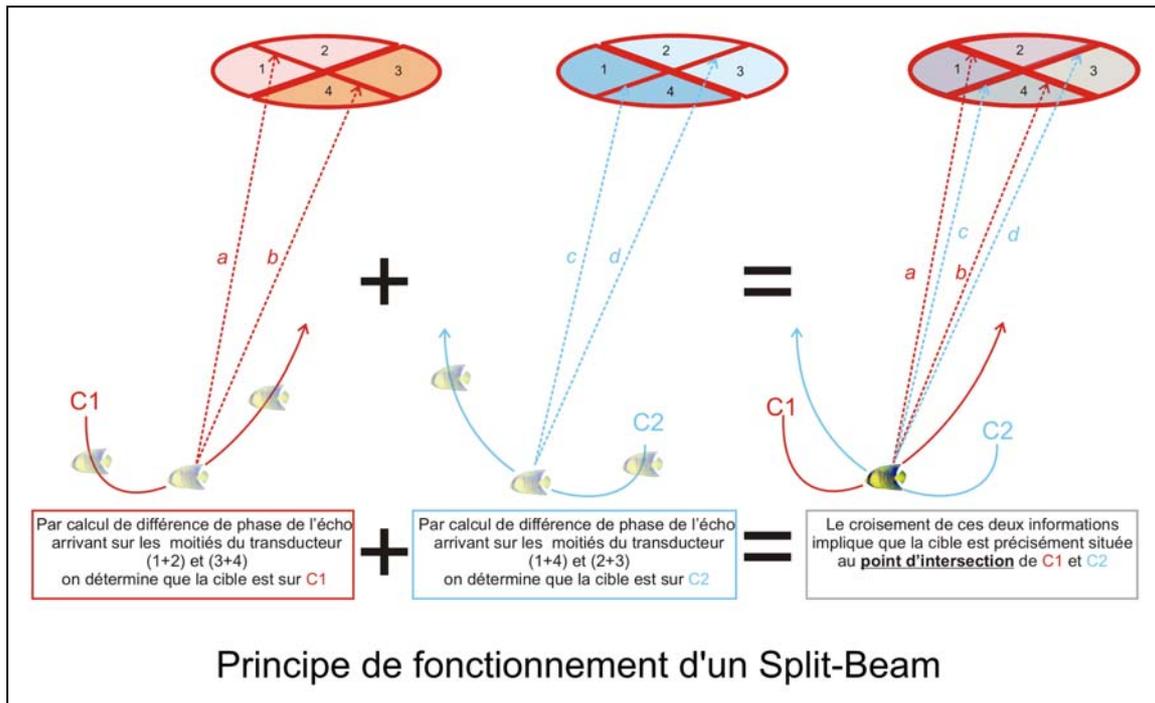


Fig. 17 : Principe de fonctionnement d'un « Split-Beam » (Lévénéz, US004-IRD).

La mesure de cette différence de phase sur deux demi-transducteurs conduit à calculer un lieu géométrique de provenance de l'écho (arc de cercle) et de manière similaire on calcule un lieu géométrique de provenance de l'écho sur les deux autres demi-transducteurs. Le croisement de ces deux lieux géométrique se fait en un point qui est la position de la cible. Connaissant précisément la position de la cible dans le faisceau, on peut corriger son  $TS$  mesuré de l'effet de directivité pour avoir le  $TS_i$ . La différence avec le Dual-Beam qui positionne la cible quelque part sur un cercle, on détermine ici la position précise de la cible dans le faisceau. Le rapprochement entre la position déterminée au long d'émissions successives permet de calculer les paramètres de déplacement de la cible pendant le temps d'observation, *ie* vitesse, direction, profondeur : les études du comportement peuvent alors commencer.

En pratique, chaque écho individuel est échantillonné et c'est la valeur maximale de ces échantillons qui est utilisée pour calculer la valeur de  $TS$ . Bien qu'une brève durée d'impulsion accroisse la résolution en distance, elle augmente la bande passante ( $BW=2/\tau$ ) et en conséquence réduit le rapport signal/bruit. Il est donc recommandé de ne pas utiliser des impulsions trop courtes lorsqu'on veut effectuer des mesures de  $TS$  *in situ* de manière à s'assurer d'une part que l'écho puisse atteindre son maximum et d'autre part permettre une mesure d'angle entre la cible et l'axe acoustique qui soit précise et stable.

#### 2-2-4) Le volume insonifié, les zones aveugles

Dans un faisceau idéal de directivité 1 à l'intérieur du cône et 0 à l'extérieur, le volume total insonifié par impulsion à un instant donné est proportionnel au carré de la distance  $R$  au transducteur, à l'ouverture du faisceau  $\Psi$  et à la longueur d'impulsion  $l = \Delta R = c\tau$

On a alors :  $V_{ii} = R^2 \Psi \Delta R = R^2 \Psi c \tau$  ou si est grand par rapport à :  $V_{ii} = \int_{R1}^{R2} R^2 \Psi dR$

Par contre si on s'intéresse non plus au volume insonifié, mais au volume échantillonné, il faut tenir compte du fait que les échos ne sont reçus simultanément que d'une tranche de profondeur  $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$  et par conséquent le volume instantané échantillonné est égal à la

moitié du volume total insonifié, soit :  $V = \frac{V_u}{2} = R^2 \Psi \frac{c\tau}{2} = A \frac{c\tau}{2}$ .

Ce volume est conventionnellement appelé volume de confusion.

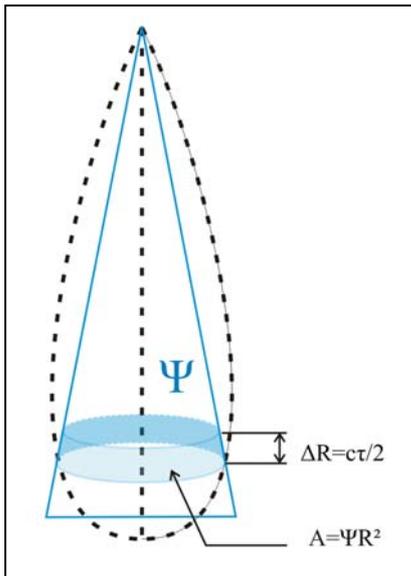
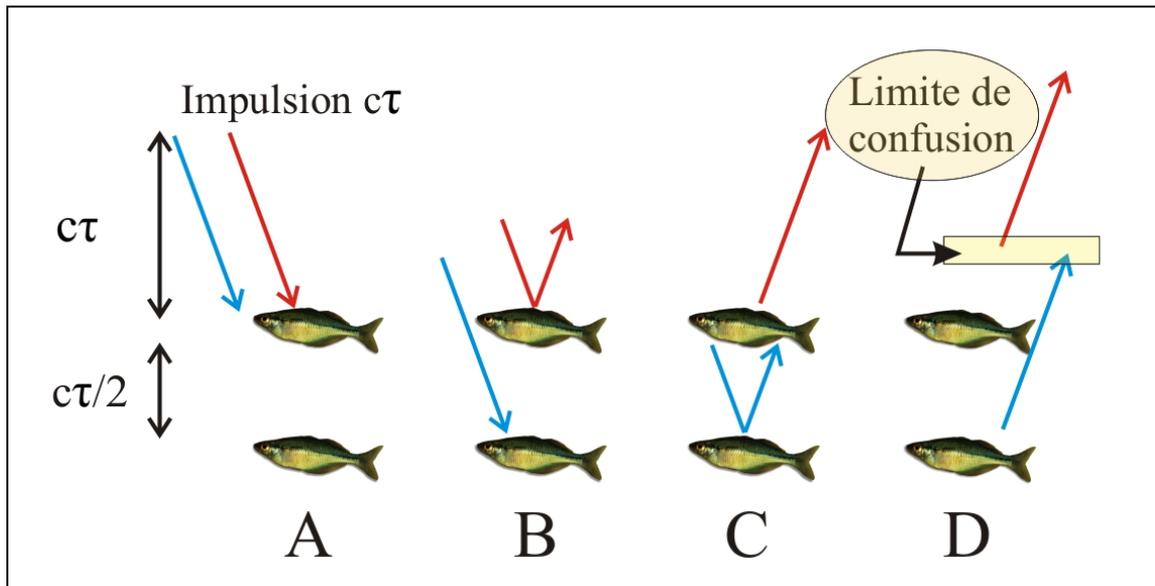


Fig. 18 : Représentation du volume unitaire d'échantillonnage.

Ce volume est par conséquent la plus petite unité échantillonnée par un sondeur ; on comprend alors que pour un angle équivalent  $\Psi$  donné, une petite longueur d'impulsion apportera un échantillonnage issu d'un plus petit volume et donc une meilleure résolution des échos.

Les échos étant reçus simultanément d'une tranche d'eau d'épaisseur  $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$  il est nécessaire pour pouvoir distinguer séparément les échos de 2 cibles qu'elles soient séparées au moins de cette distance.



**Fig. 19 : Schéma explicatif de la distance limite de confusion.**

On peut effectivement remarquer dans l'illustration ci-dessus deux poissons (considérés comme des sources ponctuelles) séparés verticalement d'une distance  $\Delta R = c\tau/2$  qui sont insonifiés par une impulsion de longueur  $c\tau$ . En A, le premier poisson reçoit l'impulsion. En B le premier poisson a réfléchi la moitié de la longueur de l'impulsion quand le second poisson commence à être insonifié. En C, le premier poisson a totalement réfléchi l'impulsion alors que le second n'en a réfléchi que la moitié. En D le second poisson a totalement réfléchi l'impulsion tandis que l'écho du premier s'en est éloigné d'une distance  $c\tau/2$  mais on voit alors que l'écho du second poisson suit immédiatement celui du premier et on se trouve en limite de confusion des échos. Si les deux poissons avaient été plus proches, leurs échos se seraient partiellement mêlés, ou bien totalement mêlés s'ils avaient été situés exactement au même niveau. Par contre s'ils avaient été éloignés d'une distance supérieure à  $c\tau/2$ , leurs échos auraient été séparés et les poissons auraient pu être distingués de manière individuelle.  $c\tau/2$  est appelé distance de confusion des échos, et comme le processus se vérifie dans la totalité du cône acoustique, on appelle volume de confusion tout volume limité par les bords du faisceau ayant une hauteur de  $c\tau/2$ .

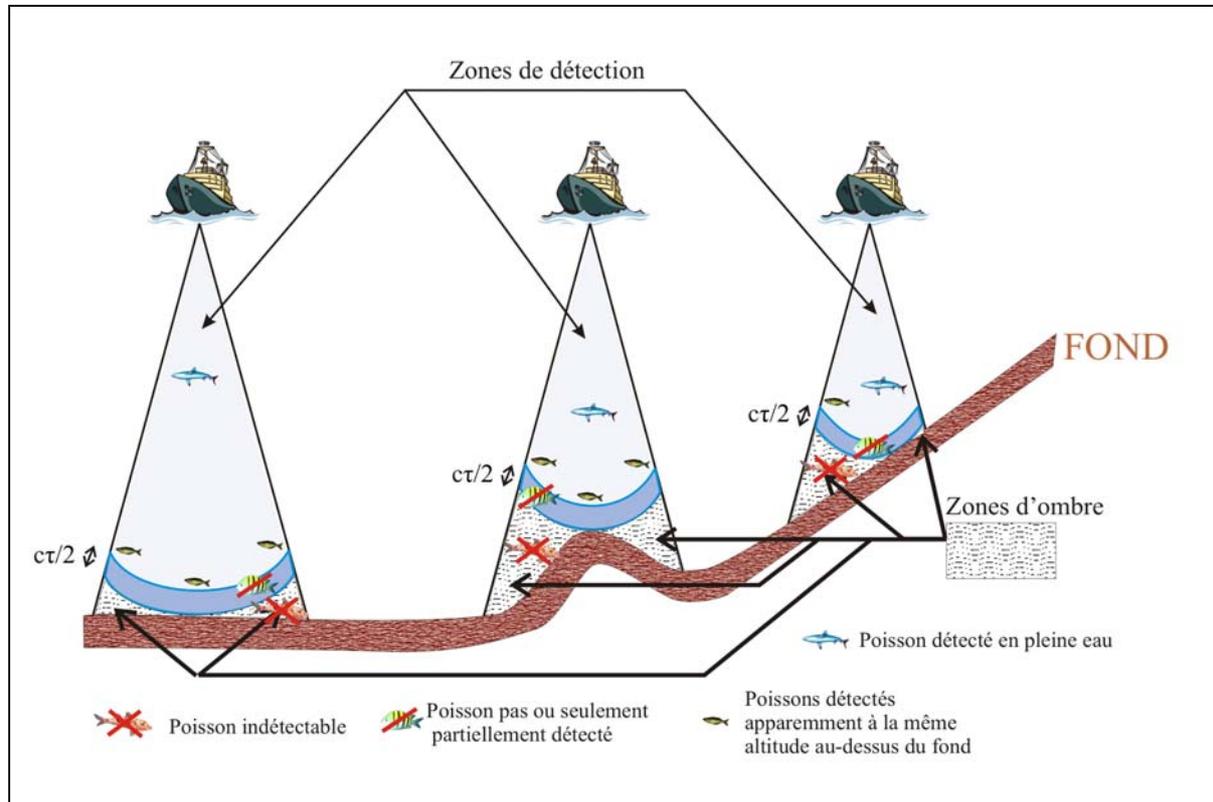
En pleine eau, lorsqu'il s'agit de poisson, si le volume de confusion provoque une gêne réelle lorsqu'il s'agit d'individualiser des poissons pour effectuer des mesures spécifiques, il ne l'est plus du tout lorsqu'il est question de travailler sur de densités de poissons. Par contre, lorsqu'on s'approche très près du fond de la mer, le volume de confusion devient un handicap plus sérieux car l'écho du fond est si fort qu'il masque ceux des poissons sur une hauteur importante, ce qui biaise irrémédiablement les mesures sur les espèces démersales. Ce biais se produit évidemment directement au niveau de la plus proche distance fond-transducteur sur une hauteur de  $c\tau/2$ , mais en plus dans tout le faisceau où est générée une zone d'ombre dans laquelle les échos sont masqués. Dans cette zone d'ombre, en première approximation, la détection d'un poisson est impossible s'il est situé à une altitude  $h$  au dessus du fond inférieure à :

$$h = R(1 - \cos \theta) \quad , \text{ avec } R = \text{profondeur de l'eau entre le transducteur et le fond, } \theta =$$

angle de positionnement du poisson dans le faisceau par rapport à l'axe acoustique.

Dans le cas d'un fond irrégulier, la zone d'ombre est plus importante que sur un fond plat, la profondeur  $R$  considérée étant celle de la partie du fond qui dans le faisceau est la plus proche du transducteur.

(Si l'on veut être plus précis, l'épaisseur dorso-ventrale du poisson peut être prise en considération de même que les algorithmes de détection du fond).



**Fig. 20 : Zones de détection et zones d'ombre : de manière générale, plus le fond est accidenté, plus la zone d'ombre est grande et moins les poissons positionnés près du fond sont accessibles au sondeur (d'après Diner).**

#### 2-2-5) Niveau d'émission et sensibilité à la réception

Le niveau d'émission acoustique SL (source level) fourni par un transducteur est défini par :

$$SL = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right), \text{ avec } I_1 \text{ intensité mesurée à un mètre de la source acoustique et}$$

$I_0$  qui est l'intensité de référence en acoustique sous-marine :  $I_0 = 6,504 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$

Ce niveau dépend de la puissance électrique qui excite ses éléments mais aussi de sa capacité à convertir de l'énergie électrique en énergie acoustique, donc de son rendement, et encore de sa capacité à concentrer l'énergie dans un faisceau, donc de son gain en directivité. Il se mesure à la distance standard de 1 mètre dans l'axe acoustique du faisceau.

Le niveau à l'émission est alors défini par :

$$SL = 170,8 + 10 \log P_e + 10 \log \eta + DI$$

avec :  $SL$  niveau d'émission en dB/1 $\mu$ Pa/1m  
 $P_e$  puissance électrique en watts  
 $\eta$  rendement électroacoustique (50 à 80% pour céramiques)  
 $DI$  indice de directivité en dB

Il y a plusieurs manières voisines de calculer  $SL$ . Tout d'abord se rappeler que que l'intensité  $I$  est définie par le rapport d'une puissance sur une surface :

$$I = \frac{E}{4\pi R^2} = \text{Puissance} \cdot 10^{\text{Gain}/10} / 4\pi R^2 = \frac{\overline{p^2}}{\rho c}$$

À la distance de référence 1 mètre, on a donc :

$$\frac{\overline{p_1^2}}{4\pi} = \text{Puissance} \cdot 10^{\text{Gain}/10} \cdot \rho c$$

$$\text{et : } SL = 10 \log \left( \frac{\overline{p_1^2}}{p_0^2} \right) = 10 \log \left( \frac{\left( \text{Puissance} \cdot 10^{\text{Gain}/10} \cdot \rho c / 4\pi \right)}{(10^{-6})^2} \right)$$

$p_0$  étant pression de référence de 1  $\mu$ Pa =  $10^{-6}$  Pa.

Soit par exemple un sondeur qui tire à 300 W, avec un gain de 27 dB,  $c=1500$  m/s et  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> : on a alors  $SL = 222.54$  dB re. 1  $\mu$ Pa

Si on part de la définition, on peut écrire :

$$SL = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \text{ et comme } I \text{ est le rapport d'une puissance sur une surface}$$

$$SL = 10 \log \left( \frac{\left( \frac{P_1}{A_1} \right)}{I_0} \right), I_0, I_1, P_1 \text{ et } A_1 \text{ étant respectivement les intensités, puissance et}$$

surfaces mesurées à 1 mètre de la source, ce qui implique que  $A_1 = 4\pi R^2 = 4\pi$ .

Sachant d'autre part que l'intensité de référence  $I_0 = 6,504 \times 10^{-19}$  W/m<sup>2</sup>, on peut calculer :

$$SL = 10 \log \left( \frac{\left( \frac{P_1}{4\pi} \right)}{6,504 \cdot 10^{-19}} \right) = 10 \log \left( \frac{P_1}{4\pi \cdot 6,504 \cdot 10^{-19}} \right) \text{ soit encore :}$$

$$SL = 10 \log(p_1) - 10 \log(4\pi \cdot 6,504 \cdot 10^{-19}) = 10 \log(p_1) + 170.8 \text{ dB re. } 1 \mu\text{Pa.}$$

Si on reprend l'exemple numérique précédent d'un sondeur tirant à 300 W avec un gain de 27 dB, on calcule  $SL = 222.57$  dB re. 1  $\mu$ Pa.

À la réception, un transducteur convertit de l'énergie acoustique en énergie électrique en fonction de sa sensibilité à la réception  $VR$  (voltage response) selon :

$$VR = 20 \log \left( \frac{U}{P} \right)$$

avec  $VR$  sensibilité à la réception en dB V/ $\mu$ Pa  
 $P$  pression acoustique au niveau du transducteur en  $\mu$ Pa  
 $U$  tension générée aux bornes du transducteur en volts

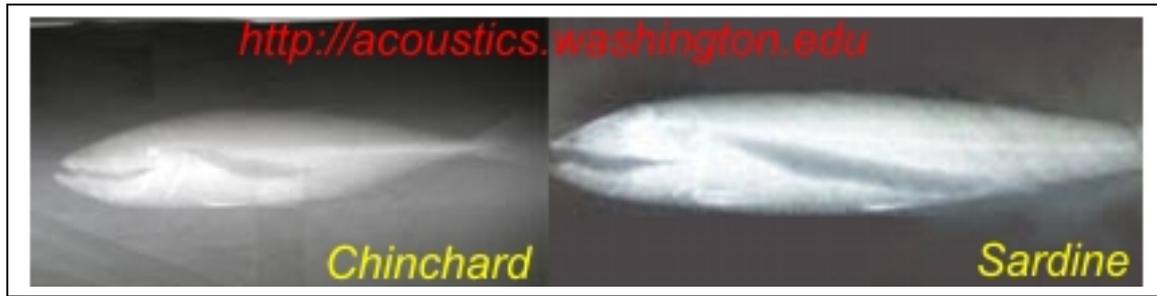
#### 2-2-6) Réflexion acoustique par les organismes marins

Pour qu'un organisme réfléchisse de l'énergie acoustique, il est indispensable qu'un ou plusieurs éléments de son anatomie aient une impédance acoustique  $\rho c$  différente de celle du milieu transmetteur, l'eau. La densité  $\rho$  est un facteur déterminant des capacités réfléchives d'une cible et on comprend aisément que des organismes piégeant de petites bulles de gaz (comme les pneumatophores ou certaines méduses par ex.) ou possédant une vessie natatoire gazeuse (poissons physoclistes ou physostomes) soient plus réfléchifs que des organismes qui n'en ont pas (cas du maquereau européen ou du listao).

Les expériences menées sur des poissons à vessie natatoire ont permis de mesurer qu'environ 85% de l'énergie acoustique totale réfléchié provenait de la vessie natatoire, les 15% restant provenant de la graisse, des os et de la chair. La quantité d'énergie réfléchié est proportionnelle à la quantité d'énergie reçue et aussi à la surface insonifiée (section perpendiculaire à l'onde acoustique incidente) que l'on nomme aire de réflexion ou aire acoustique  $\sigma_s$  et qui s'exprime en  $m^2$  :

$$\sigma_s = \frac{I_r}{I_i}, \text{ ou exprimé en dB : } TS = 10 \log \sigma_s = 10 \log \left( \frac{I_r}{I_i} \right)$$

La combinaison des phénomènes exposés ci-dessus, importance de la vessie natatoire et de la surface insonifiée, permet intuitivement de comprendre pourquoi l'énergie réfléchié est plus faible quand un poisson est insonifié de face que quand il est insonifié de dos par exemple. On imagine aussi aisément que la disposition, la forme, le volume et l'orientation de la vessie natatoire à l'intérieur de la cavité abdominale d'un poisson ont une importance capitale sur ses capacités à réfléchir de l'énergie acoustique.



**Fig. 21 : Exemples de radiographies de poissons montrant la disposition et la taille de leur vessie natatoire (zone plus sombre à l'intérieur du corps de l'animal).**

Par convention, cette surface sera rapportée à la surface insonifiée (perpendiculairement au trajet de l'onde acoustique) d'une sphère parfaitement réfléchissante de 1m de rayon  $R_s$  et on obtiendra ainsi ce qu'on appelle la surface équivalente réfléchissante  $\sigma_{bs}$  :

$$\sigma_{bs} = \frac{\sigma_s}{4\pi R_s^2} = \frac{\sigma_s}{4\pi} = \frac{I_r}{I_i}, \text{ ou encore : } \sigma_s = 4\pi \left( \frac{I_r}{I_i} \right),$$

ce qui devient exprimé en dB :  $TS = 10 \log \left( \frac{\sigma_s}{4\pi} \right) = 10 \log \sigma_{bs}$

Cette surface équivalente réfléchissante caractérise en fait la propriété de réflexion d'un objet comme étant une proportion de ce que réfléchirait une sphère parfaitement réfléchissante de 1 m de rayon.

La quantité d'énergie réfléchiée par un organisme en direction d'un transducteur s'appelle son indice de réflexion acoustique ou  $TS$  (target strength). Ce paramètre est essentiel pour convertir les densités relatives (moyennes des énergies reçues au niveau du sondeur) en densité absolues exprimées en poids ou en nombre d'individus par unité de volume.

Le  $TS$  est donc déterminant pour évaluer les biomasses, et c'est malheureusement un des facteurs les plus difficiles à mesurer ou à estimer dans la nature, car il dépend de plusieurs autres facteurs dont :

- l'espèce considérée. La présence ou l'absence de vessie natatoire, la forme générale de l'organisme, les allures morphologiques et morphométriques des vessies natatoires, sont des caractères spécifiques qui influent sur la valeur du  $TS$ .
- la taille pour une espèce donnée. Il existe une relation étroite entre le  $TS$  et la taille des organismes. Généralement, à une fréquence donnée, plus l'organisme est grand, plus son  $TS$  est élevé. Le  $TS$  augmente avec la surface insonifiée de l'organisme, donc avec environ le carré de sa longueur.
- l'orientation du poisson dans le faisceau acoustique. Le  $TS$  étant une fonction de la surface insonifiée, on comprend immédiatement que le  $TS$  d'un poisson insonifié dorsalement sera plus élevé que celui de ce même poisson insonifié de

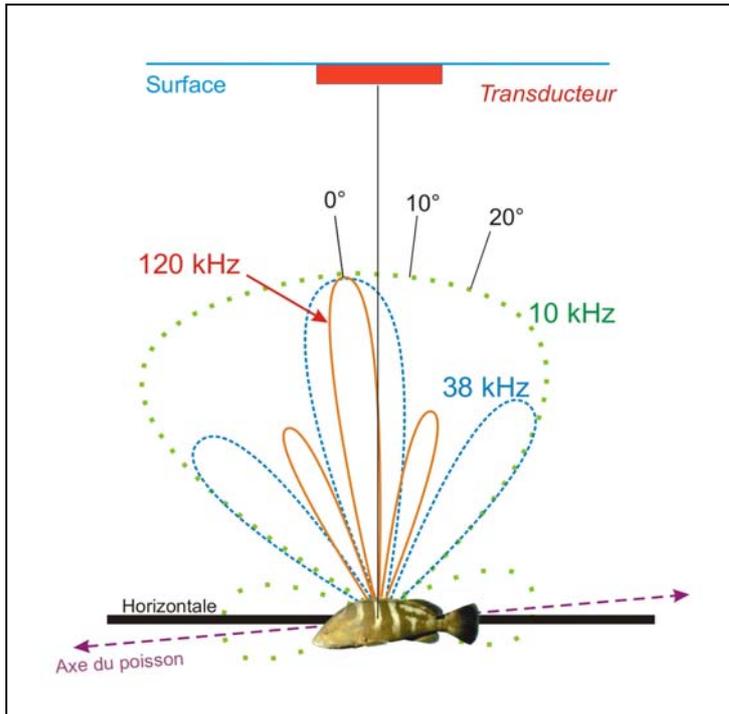
face. Mais de plus les organismes n'étant pas strictement des réflecteurs ponctuels, ils présentent, de manière similaire aux transducteurs, un diagramme de directivité. Dans les cas les plus simples pour les poissons, le maximum d'énergie est réfléchi quand le poisson, nageant en position horizontale, est insonifié dorsalement par un transducteur dont la face active est parallèle à l'axe longitudinal du poisson. Si le poisson nage vers le transducteur et est insonifié de face, son  $TS$  sera considérablement réduit, de même que si dans un comportement de fuite le poisson se met à plonger. Si la fréquence influe sur la valeur des  $TS$ , elle a aussi des effets la directivité du signal réfléchi. Plus la fréquence est basse, plus les lobes du diagramme de directivité d'un poisson sont larges et, par conséquent, moins la valeur du  $TS$  de ce poisson est dépendante de son orientation relative par rapport au transducteur. Enfin, il faut aussi noter que pour une fréquence acoustique donnée, plus le poisson est grand, plus les lobes de son diagramme de directivité seront étroits, et en conséquence plus ses changements d'orientation par rapport au transducteur entraîneront de grandes différences au niveau de son  $TS$ .

- la fréquence utilisée. En règle générale les fréquences élevées sont mieux réfléchies par les petits organismes et les fréquences basses par les grands. Pour des poissons avec vessie natatoire, une équation d'usage répandu pour estimer les effets de la fréquence sur les  $TS$  est celle de McCartney et Stubbs (1971) :

$$TS = 24,5 \log L - 4,5 \log \lambda - 26,4$$

ou  $L$  est la longueur du poisson en mètre  
 $\lambda$  la longueur d'onde en mètre  
 et  $TS$  l'index de réflexion acoustique en dB

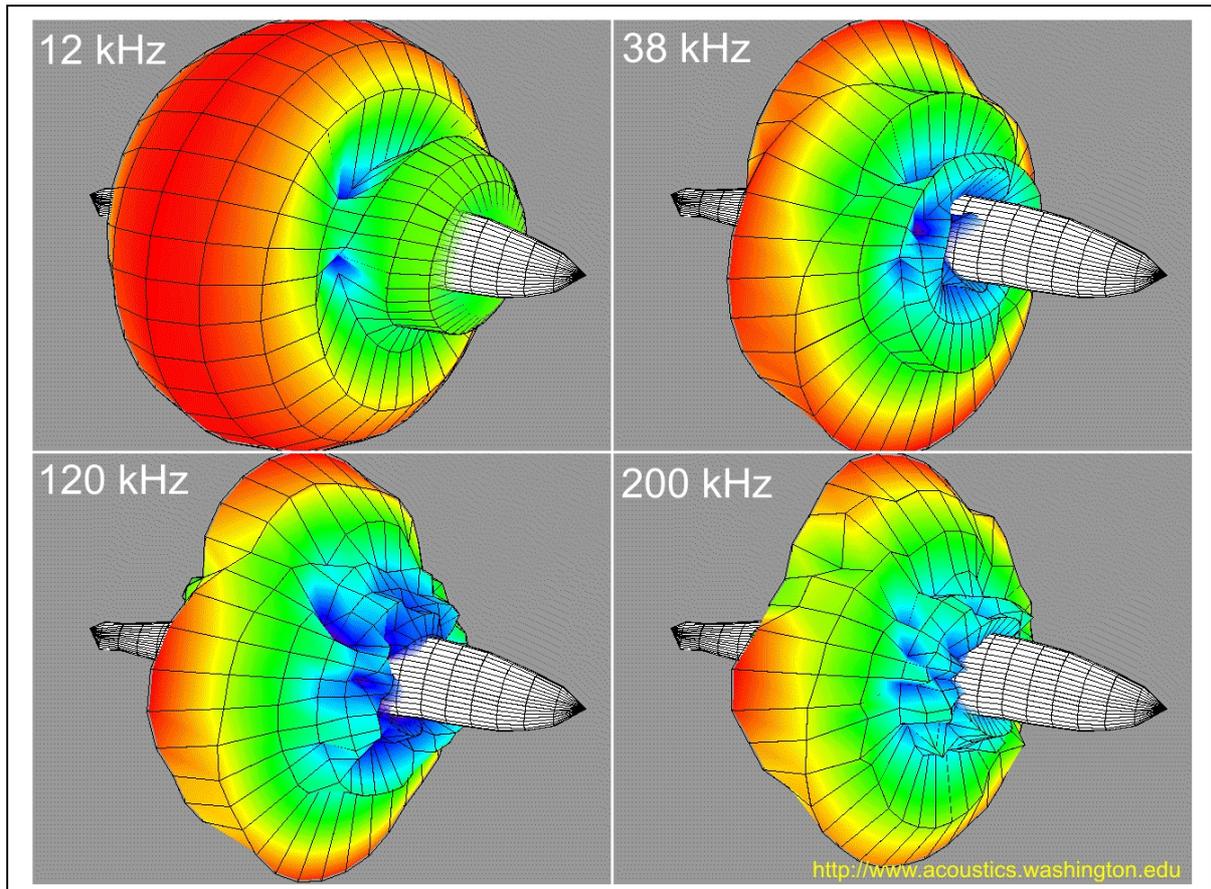
Cette équation, obtenue d'après les propres mesures des auteurs sur des poissons vivants, donne une idée approximative des changements de  $TS$  avec la fréquence. Valable quand  $0,8 < \frac{1}{L} < 20$ , l'équation indique que par rapport à une mesure à 38 kHz, le  $TS$  d'un poisson est supérieur d'environ 2dB à la fréquence 120 kHz.



**Fig. 22 : Illustration des différences de directivité de la réflexion d'un poisson aux fréquences de 10, 38 et 120 kHz. Le lobe principal est d'autant plus large que la fréquence est basse.**

On voit ici que la directivité de la réponse acoustique d'un poisson est plus grande (lobe principal plus fin) à la fréquence de 120 kHz qu'à celle de 38 kHz ou encore plus qu'à celle de 10 kHz. En conséquence la variabilité de la réponse acoustique d'un poisson sera plus sensible à l'inclinaison du poisson à haute fréquence qu'à basse fréquence.

La modélisation suivante, proposée par l'Université de Washington (School of Aquatic and Fishery Sciences), de la directivité de réponse acoustique d'un clupéidé en fonction de la fréquence, illustre en 3D le même phénomène.



**Fig. 23 : Modélisation de la directivité de réponse acoustique d'un clupéidé à 4 fréquences différentes : plus la fréquence est basse, plus le lobe principal de la réponse est large et régulier.**

Pour la fréquence de 38 kHz, il est admis que faute de mesures précises faites in situ, les équations suivantes peuvent être utilisées pour calculer des TS (Foote, 1987) :

- pour les physoclistes (gadidés...)  $TS = 20 \log L_{(cm)} - 67,4$
- pour les physostomes (clupéidés...)  $TS = 20 \log L_{(cm)} - 71,9$
- pour les poissons sans vessie natatoire (maquereau européen...)  $TS = 20 \log L_{(cm)} - 82,5$

$L_{(cm)}$  étant la longueur en centimètres des poissons.

On s'aperçoit d'après ces équations qu'à longueur égale, un poisson comme le maquereau européen qui est dépourvu de vessie natatoire réfléchit 10dB de moins, soit 10 fois moins d'énergie) qu'un poisson physocliste comme le merlan par exemple qui a une forme générale similaire.

Les relations précédentes peuvent être recombinaées pour calculer la longueur en cm d'un poisson connaissant son TS, et on a alors pour les physoclistes par exemple :

$$L_{(cm)} = 10^{\left(\frac{(TS+67,4)}{20}\right)}$$

Pour avoir en tête un ordre de grandeur des valeurs de TS en fonction de la longueur des poissons avec vessie natatoire, on peut se référer au tableau suivant :

TS (dB)	Longueur (cm)
-70	0,8
-60	2,5
-50	8
-40	25
-30	80

Il faut remarquer sur ce tableau qu'un poisson de 80 cm de long ne réfléchit vers le transducteur qu'un millième de l'énergie qu'il a reçue !

Il est d'usage courant, pour les besoins de calculs de biomasse, de convertir le TS individuel  $TS_i$  d'un poisson en son équivalent en poids  $TS_{kg}$ . On l'exprime alors en dB/kg en utilisant la relation :

$$TS_{kg} = TS_i + 10 \log(n), \text{ étant le nombre de poissons nécessaires pour faire 1 kg.}$$

Les relations taille-poids peuvent également être combinées avec les relations de  $TS_i$  pour obtenir directement le  $TS_{kg}$  à partir de la longueur du poisson.

#### 2-2-7) Équation du sonar

L'équation du sonar est une équation de conservation d'énergie. Le signal considéré est celui de l'écho reçu par le sondeur, et qui prend en considération dans le cas des systèmes actifs le niveau d'émission, la sensibilité à la réception, les pertes de propagation sur les chemins aller et retour du son (diffusion géométrique et absorption) et l'indice de rétrodiffusion de la cible.

On peut ainsi écrire :

$$EL = (SL + VR) - 2TL + TS \text{ si on s'intéresse à une cible isolée}$$

avec  $EL$  (Echo Level) niveau de l'écho reçu par le sondeur  
 $SL + VR$  (Source Level et Voltage Response) niveau d'émission et sensibilité à la réception  
 $2TL$  (Transmission Loss) pertes de propagation aller-retour  
 $TS$  (Target Strength) index de réflexion acoustique

ou si l'on s'intéresse à la réflexion d'une tranche d'eau :

$$EL = (SL + VR) - 2TL + Sv + V$$

$Sv$  (Scattering volume) étant la réverbération moyenne par unité de volume dans le volume total insonifié  $V$ . Notons que  $Sv$  peut aussi se noter  $Rv$  pour réverbération de volume.

Si dans une tranche d'eau on a une densité de  $n$  individus par  $m^3$ , on a la relation :

$$Sv = TS_i + 10 \log(n)$$

Dans les récepteurs, les pertes de propagation ( $2TL$ ) sont compensées par l'application au signal d'une amplification qui varie avec le temps. Cette amplification appelée TVG (Time Varied Gain) est nécessaire pour qu'une (ou plusieurs) cible(s) produise(nt) un écho identique quelle que soit la profondeur où elle(s) se trouve(nt). Cette fonction se conjugue en 2 versions : soit on veut conserver un même niveau d'écho pour des cibles identiques ( $40\log R + 2\alpha R$ ), soit on veut le conserver pour une même densité de cible ( $20\log R + 2\alpha R$ ).

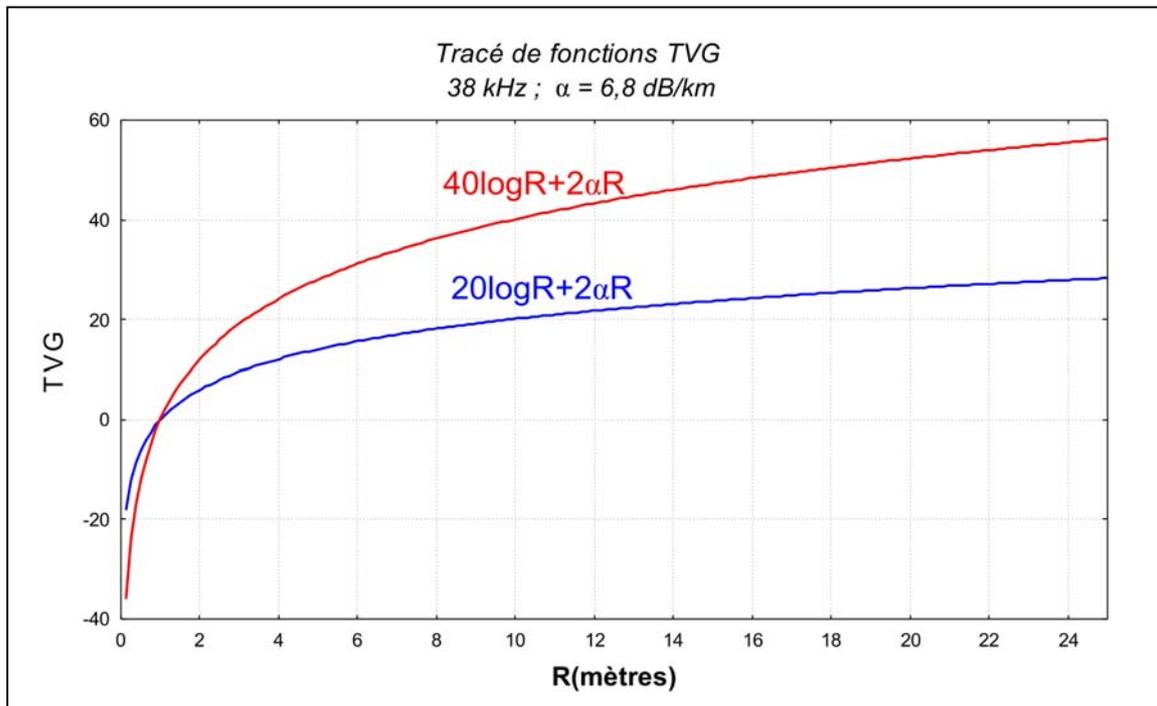


Fig. 24 : Courbes théoriques de TVG  $40\log R + 2\alpha R$  et  $20\log R + 2\alpha R$ .

Dans le premier cas on ne tient pas compte de l'augmentation du volume insonifié quand on s'éloigne du transducteur et on a alors une TVG de la forme  $40\log R + 2\alpha R$ . La déperdition d'énergie par diffusion géométrique est en effet de  $\frac{1}{R^2}$  sur le trajet aller et l'énergie réfléchi décroît de la même manière en fonction de  $\frac{1}{R^2}$  sur le trajet retour, soit une perte totale fonction de  $\frac{1}{R^4}$  : il faut donc la compenser par un facteur :

$$tl_g = R^4, \text{ soit en notation décibélique : } TL_g = 10\log R^4 = 40\log R$$

Il faut à cette déperdition géométrique ajouter la perte exponentielle par absorption qui est de  $\exp(-\alpha_a R)$  sur chaque trajet aller de l'onde acoustique, et on a au total une déperdition par absorption de  $[\exp 2(-\alpha_a R)]$  ; il faudra la compenser par :

$$tl_a = [\exp 2(\alpha_a R)], \text{ soit en décibel de : } TL_a = 2\alpha R$$

La compensation totale est donc :

$$TL = TL_g + TL_a = 40\log R + 2\alpha R$$

Cette compensation ou TVG permet à une cible unique de fournir un écho identique au niveau du sondeur quelle que soit sa distance au transducteur, donc quel que soit le volume insonifié dans lequel la cible est située.

Dans le second cas, on prend en considération que le volume insonifié s'accroît en raison du carré de la distance au transducteur et on a alors une TVG de la forme  $20 \log R + 2\alpha R$ .

Les déperditions sont les mêmes que dans le cas précédent mais on prend en considération que le volume échantillonné augmentera en fonction de  $R^2$ , carré de la distance au transducteur, et que donc à densité constante que le nombre de cibles insonifiées augmentera aussi en fonction de  $R^2$ .

À la déperdition géométrique fonction de  $\frac{1}{R^4}$  sera associée une augmentation du nombre de cible fonction de  $R^2$  : le bilan de ces deux phénomènes est de :

$$\left(\frac{1}{R^4}\right)(R^2) = \frac{1}{R^2} \text{ et la compensation se réduira à :}$$

$$tl_g = R^2, \text{ soit en décibel : } TL_g = 10 \log R^2 = 20 \log R$$

La compensation de la déperdition par absorption reste la même que dans le cas précédent, et la compensation totale devient alors :

$$TL = TL_g + TL_a = 20 \log R + 2\alpha R$$

2-2-8) Les deux principales méthodes d'évaluation des ressources : l'écho-intégration et l'écho-comptage.

L'équation du sonar nous donne à chaque instant le niveau de l'écho provenant d'une cible ou d'un ensemble de cibles situées à une distance  $R$  du transducteur. Ce qui nous intéresse maintenant, c'est de mettre en relation cette avec la quantité de cibles que nous voulons évaluer.

Deux situations sont à considérer : soit chaque écho provient d'un poisson isolé, soit un ensemble d'échos proviennent simultanément de plusieurs poissons ou de couches de petits organismes. Des échos multiples peuvent se produire alors que la densité de poissons est faible. Par exemple pour un faisceau circulaire de  $7^\circ$ , une impulsion de 1ms et une distance de 100 mètres, le volume échantillonné est voisin de 90 m<sup>3</sup>. Donc, si en moyenne il y a plus d'un poisson dans ce volume, on recevra des échos multiples...

Pour faire face à ces deux situations, deux techniques complémentaires peuvent être utilisées :

- soit on s'intéresse à des cibles individuelles et on cherchera en premier à les compter dans le volume échantillonné pour en estimer la densité, puis le plus souvent à mesurer des  $TS$  avant de les exploiter pour calculer des nombres de poissons présents dans la zone échantillonnée.
- soit, (et même si c'est forcément le cas pour les bancs et couches denses dans lesquels on ne peut par acoustique isoler des poissons individuels, c'est aussi applicable dans le cas de poissons individualisables) on s'intéresse directement à des densités de poissons et on mesurera des  $SV$  ou réverbération de volume que l'on extrapolera à l'ensemble de la zone étudiée. On fera alors de l'intégration par couche ou tranche d'eau.

Dans le deux cas on aura recours à un estimateur de  $TS$  qu'on appliquera aux résultats pour obtenir des biomasses par unité de surface puis des biomasses totales.

#### 2-2-2-8-1 : Principes d'évaluation de biomasse par écho-comptage.

Il s'agit là de compter un nombre d'échos situés au dessus d'un seuil de détection et de les attribuer à un volume d'échantillonnage. Selon la manière d'utiliser le sondeur, on adopte 2 types de calcul : soit on s'intéresse à ce qui se passe au niveau de chaque émission, soit on recherche à compter le nombre de poissons détectés tout au long d'un parcours en utilisant leur trace sur un enregistrement, donc en utilisant plusieurs échos du même poisson obtenus au cours d'émissions successives.

Dans le premier cas, chaque émission est supposée fournir un échantillon aléatoire de la population, et le volume échantillonné à chaque émission est donné par :

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \text{tg}\left(\frac{\beta_1}{2}\right) \cdot \text{tg}\left(\frac{\beta_2}{2}\right) \cdot (R_2^3 - R_1^3)$$

ou plus simplement par :

$$V = R^2 \cdot \Delta R \cdot \psi \text{ ou si } \Delta R \text{ est grand par : } V = \int_{R_1}^{R_2} R^2 \cdot \Psi \cdot dR, \psi \text{ étant l'angle solide à l'intérieur duquel les échos d'une cible donnée sont supérieur au seuil de détection.}$$

Le volume total échantillonné est alors donné par le produit du volume  $V$  par le nombre d'émissions.

Dans le second cas, si les traces (plusieurs échos successifs du même poisson) sont comptées sur un échogramme, le volume échantillonné est calculé par le triple produit de la largeur du cône à la profondeur considérée, de la hauteur de la tranche d'eau échantillonnée et de la distance parcourue par le navire. On a alors :

- largeur du cône à la profondeur considérée  $l = 2R \cdot \text{tg}(\beta/2) \approx 2R \cdot \theta$ ,  $\beta$  étant l'angle exprimé en degrés entre les points -3dB du diagramme de directivité ou  $\theta$  étant le demi-angle aux points -3 dB exprimé en radians dans lequel les échos d'un niveau donné sont au dessus du seuil
- $\Delta R$  la hauteur de la tranche d'eau considérée
- $D$  distance en mètres parcourue par le bateau
- et  $V = D \cdot 2R \cdot \Delta R \cdot \theta$ , ou si  $\Delta R$  est grand par  $V = D \cdot \int_{R_1}^{R_2} 2R \cdot \theta \cdot dR$

L'application de la TVG fait que l'angle effectif d'échantillonnage  $\theta$  de même que l'angle solide deviennent constant pour une TS donnée et les expressions des volumes échantillonnés peuvent s'écrire plus simplement par :

$$V = (R_2^3 - R_1^3) \cdot \Psi / 3 \quad \text{par émission et}$$

$$V = (R_2^2 - R_1^2) \cdot \theta \quad \text{par mètre parcouru}$$

L'intensité réfléchiée  $I_r$  par un poisson est proportionnelle à l'intensité incidente  $I_i$  et à son index de réflexion  $\sigma_{bs}$  :

$$I_r = I_i \cdot \sigma_{bs}$$

Dans le cas d'un poisson isolé, le niveau de l'écho arrivant au niveau du transducteur est donné par l'équation du sonar :

$$I_{spi} = I_0 \cdot \sigma_{bs} \cdot \left( \frac{e^{-2\beta R}}{R^4} \right) b^2_{(\theta, \varphi)}, \text{ soit exprimé en dB :}$$

$$EL = SL + TS - (40 \log R + 2\alpha R) + 20 \log b_{(\theta, \varphi)}$$

et si on fait l'hypothèse que l'index de réflexion, l'intensité de l'émission et la distance sont des constantes, alors ces expressions se résument à :

$$I_{spi} = k \cdot b^2_{(\theta, \varphi)} \text{ ou encore : } EL = K + 20 \log b_{(\theta, \varphi)}$$

Si les poissons sont répartis de manière aléatoire, le nombre d'échos provenant de chaque élément de l'angle solide  $\Psi$  formé par le faisceau acoustique sera identique. La relation entre  $\Psi$  et  $b^2_{(\theta, \varphi)}$  donnera le nombre relatif d'échos détectés en fonction de leur index de réflexion.

Dans l'ensemble du faisceau le nombre d'écho de poissons obtenu à chaque émission sera :

$$N = \rho \cdot R^2 \cdot \Delta R \cdot \Psi$$

avec dans le cas d'un transducteur circulaire, l'angle solide  $\Psi$  donné par :

$$\Psi = 2 \pi (1 - \cos \theta) \approx \pi \theta^2 \text{ pour les petits angles,}$$

et  $\rho$  étant la densité en nombre de poissons par  $m^3$ .

En pratique, cela revient à dessiner les isocontours de directivité par rapport à l'axe acoustique et à mesurer la surface angulaire ou l'angle solide généré par chacun de ces contours.

La TVG apportant la correction appropriée, l'amplitude des échos d'une cible d'index de réflexion donné ne dépend plus de sa distance  $R$  à la source mais uniquement de la fonction de directivité du transducteur, donc de ses coordonnées angulaires dans le faisceau.

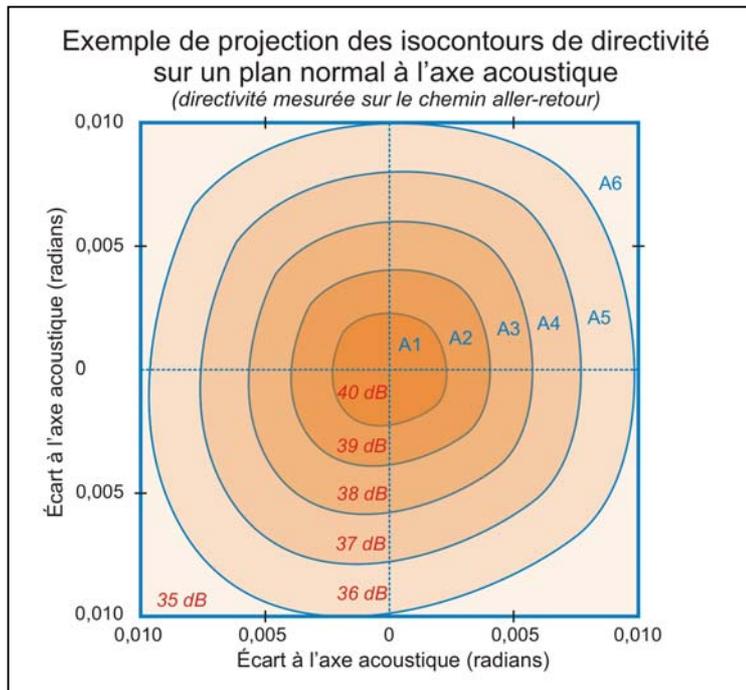


Fig. 25 : Exemple d'isocontours de directivité aller-retour d'un transducteur

Si on considère une tranche d'eau comprise entre les distances  $R_1$  et  $R_2$  dans un faisceau d'angle solide  $\Psi$ , le volume échantillonné à chaque émission est :

$$V = \int_{R_1}^{R_2} R^2 \cdot \Psi \cdot dR = (R_2^3 - R_1^3) \Psi / 3$$

Si on considère de plus qu'il y a une densité de  $\rho_1$  cibles par  $m^3$  dans ce volume, chacune ayant une TS individuelle de  $TS = -40$  dB, leur nombre  $N_1$  dans ce même volume est donné par :

$$N_1 = \rho_1 \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \rho_1 \cdot \Psi \cdot (R_2^3 - R_1^3)$$

Or ces cibles, étant donné leur TS de  $-40$  dB, ne pourront dans l'exemple de directivité illustré ci-dessus, être détectées que dans la partie centrale A1 du faisceau et la force de leur écho sera comprise entre 0 et 1 dB. Leur nombre détecté sera :

$$N_1 = \rho_1 \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \rho_1 \cdot \Psi \cdot (R_2^3 - R_1^3), \text{ avec dans ce cas } \Psi = A1.$$

De manière similaire, considérons maintenant une densité de  $\rho_2$  cibles de  $TS = -39$  dB. Leur nombre sera calculé par :

$$N_2 = \frac{1}{3} \cdot \rho_2 \cdot A_2 \cdot (R_2^3 - R_1^3) + \frac{1}{3} \cdot \rho_2 \cdot A_1 \cdot (R_2^3 - R_1^3)$$

et ainsi de suite pour des cibles de  $TS = -38$  dB etc...

En partant des cibles des plus fortes vers les plus faibles, une solution générale du système d'équation peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned} \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \cdot \rho_1 &= B_1 N_1 + B_2 N_2 + \dots + B_n N_n \\ \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \cdot \rho_{(2)} &= B_1 N_2 + B_2 N_3 + \dots + B_{(n-1)} N_n \\ \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \cdot \rho_{(3)} &= B_1 N_3 + B_2 N_4 + \dots + B_{(n-2)} N_n \dots etc \\ \dots \\ \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{3} \cdot \rho_{(n)} &= B_1 N_n \end{aligned}$$

Dans le cas de comptage d'échotracés,  $\Psi$  est remplacé par l'angle  $\theta$  et ce système d'équations devient :

$$\begin{aligned} (R_2^2 - R_1^2) \rho_1 &= C_1 N_1 + C_2 N_2 + \dots + C_n N_n \\ (R_2^2 - R_1^2) \rho_{(2)} &= C_1 N_2 + C_2 N_3 + \dots + C_{(n-1)} N_n \\ (R_2^2 - R_1^2) \rho_{(3)} &= C_1 N_3 + C_2 N_4 + \dots + C_{(n-2)} N_n \dots etc \\ \dots \\ (R_2^2 - R_1^2) \rho_{(n)} &= C_1 N_n \end{aligned}$$

les coefficients  $B_n$  et  $C_n$  ne dépendant que de la forme du faisceau acoustique.

On arrive ainsi à la détermination de densité absolue par classe de TS.

A distance parcourue constante pour une même tranche de profondeur, le nombre relatif de cibles de chaque catégorie peut être obtenu en comptant de manière aléatoire les échotracés de poissons passant dans le faisceau acoustique. Le système d'équation se simplifie alors en :

$$\begin{aligned} N_n &= \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 + \dots + \theta_n \rho_n \\ N_{(n-1)} &= \theta_1 \rho_2 + \theta_2 \rho_3 + \dots + \theta_{(n-1)} \rho_n \\ N_{(n-2)} &= \theta_1 \rho_3 + \theta_2 \rho_4 + \dots + \theta_{(n-2)} \rho_n \dots etc \\ \dots \\ N_1 &= \theta_1 \rho_n \end{aligned}$$

#### 2-2-2-8-2 : Principes d'évaluation de biomasse par écho-intégration.

Depuis 1965, on sait grâce à Dragsund et Olsen que la densité de poissons est proportionnelle au carré du voltage de leur écho, donc à l'intensité acoustique. Un écho-intégrateur va donc recueillir le signal en volt à la sortie de l'étage de réception d'un sondeur, le digitaliser si la sortie sondeur est analogique, l'élever au carré, calculer la valeur moyenne pour différents intervalles de profondeur définis par l'utilisateur et enfin le pondérer par différentes constantes liées à l'instrumentation et aux poissons.

Toute la théorie de l'écho-intégration est donc basée sur deux principes simples :

**1<sup>er</sup> principe** : l'intensité réfléchie  $I_r$  par un poisson est proportionnelle à l'intensité incidente  $I_i$  et à son index de réflexion  $\sigma_{bs}$  :

$$I_r = I_i \cdot \sigma_{bs}$$

**2<sup>ème</sup> principe** : l'intensité totale réfléchie  $I_{rTOT}$  par  $n$  cibles identiques est égale à  $n$  fois l'intensité réfléchie par une cible unique :

$$I_{rTOT} = nI_r = nI_i \sigma_{bs}$$

Selon ces principes, cela signifie aussi que 1000 kg de cibles identiques réfléchissent 1000 fois plus d'énergie qu'un kg de ces même cibles !

On peut aussi montrer que si plusieurs échos d'intensité  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , sont reçus simultanément, en moyenne l'intensité totale  $I_T$  est donnée par :

$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n$  et si les voltages correspondants sont  $V_1, V_2, \dots, V_n$ , alors :

$$V_T = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)}$$

NB : dans le cas de cibles isolées, on a la même relation pour  $I_T$ , mais  $V_T$  est simplement donné par :

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

De manière similaire, si on a  $n_1$  échos d'intensité  $I$  dans un écho multiple et  $n_2$  échos d'intensité  $I$  dans un second, on a :

$$I_{T1} = n_1 \cdot I \text{ et } I_{T2} = n_2 \cdot I \text{ et donc } I_T = I_{T1} + I_{T2} = (n_1 + n_2) \cdot I$$

et pour les voltages correspondants :

$$V_{T1} = \sqrt{n_1 \cdot V^2} = V \sqrt{n_1}, \quad \text{et} \quad V_{T2} = \sqrt{n_2 \cdot V^2} = V \sqrt{n_2} \quad \text{et} \quad \text{donc}$$

$$V_T = V_{T1} + V_{T2} = V \sqrt{n_1 + n_2}$$

On voit donc que le nombre de cible est directement proportionnel à l'intensité de l'écho, mais est proportionnel au carré du voltage. Un voltage étant plus facile à mesurer qu'une intensité, dans la pratique la technique d'écho-intégration utilisera cette seconde propriété.

Évidemment, si on rentre vraiment dans le détail, les choses peuvent se compliquer singulièrement, mais restons en là pour une bonne compréhension des principes.

Considérons une population de poissons de TS identiques. Si on prend un poisson isolé, le niveau de l'écho arrivant au niveau du transducteur est donné par l'équation du sonar :

$$I_{spi} = I_0 \cdot \sigma_{bs} \cdot \left( \frac{e^{-2\beta R}}{R^4} \right) b^2_{(\theta, \varphi)}, \text{ soit exprimé en dB :}$$

$$EL = SL + TS - (40 \log R + 2\alpha R) + 20 \log b_{(\theta, \varphi)}$$

Si on prend maintenant l'ensemble des poissons présents dans l'angle solide du faisceau, leur nombre est  $N = \rho \cdot R^2 \cdot \Delta R \cdot \Psi$  et en moyenne leur écho provient d'une position aléatoire dans le faisceau. L'épaisseur de la tranche d'eau d'où proviennent simultanément les échos est  $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$ , et on peut donc écrire pour l'intensité instantanée totale reçue au niveau du transducteur :

$$I_{sT} = I_0 \cdot \sigma_{bs} \cdot \frac{e^{-2\beta R}}{R^4} \cdot \int_{\Psi} \rho \cdot R^2 \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot b^2_{(\theta, \varphi)} \cdot d\psi$$

soit encore :

$$I_{sT} = I_0 \cdot N \sigma_{bs} \cdot \frac{e^{-2\beta R}}{R^2} \cdot \frac{c\tau}{2} \int_{\Psi} b^2_{(\theta, \varphi)} \cdot d\psi$$

et comme  $\int_{\Psi} b^2_{(\theta, \varphi)} \cdot d\psi$  est constant pour un transducteur donné et est égal à l'angle

solide équivalent  $\Psi$ , cette expression devient :

$$I_{sT} = I_0 \cdot N \sigma_{bs} \cdot \frac{e^{-2\beta R}}{R^2} \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot \Psi, \text{ soit exprimé en dB :}$$

$$EL = SL + TS + 10 \log N + 10 \log \frac{c\tau}{2} + 10 \log \Psi - (20 \log R + 2\alpha R)$$

Dans le cas de couches diffusantes, la notion de TS n'est plus appropriée : on parlera dans ce cas de  $s_v$  pour « volume-scattering coefficient » ou en français de  $r_v$  pour « réverbération de volume ».  $s_v$  est le rapport de l'intensité réverbérée vers la transducteur par unité de volume de couche réfléchissante sur l'intensité sonore incidente, ces deux intensités étant mesurées à un mètre du volume unitaire. On remplace alors dans cette équation  $N \cdot \sigma_{bs}$  par  $s_v$  et on obtient :

$$I_{sT} = I_0 \cdot s_v \cdot \frac{e^{-2\beta R}}{R^2} \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot \Psi, \text{ soit en dB :}$$

$$EL = SL + S_v + 10 \log \frac{c\tau}{2} + 10 \log \Psi - (20 \log R + 2\alpha R)$$

(NB : de manière plus générale,  $s_v = \frac{\sum \sigma_{bs}}{V}$  et s'exprime en  $m^{-1}$ ,  $V$  étant le volume du pulse en  $m^3$ ).

On a donc là le niveau d'intensité instantané reçu par un sondeur quand il y a un nombre  $N$  de poissons de  $TS$  connue par unité de volume échantillonné, *i.e.* par mètre cube. Or, pour quantifier une population de poisson, il va falloir calculer des valeurs moyenne par tranche de profondeur, donc de temps, sur chacune des émissions du sondeur. Comme on travaille généralement en volts plutôt qu'en intensité, on peut écrire le résultat de l'intégration sur une

émission dans une tranche d'eau insonifiée entre les temps  $t1$  et  $t2$  est correspondant à des distances  $R1$  et  $R2$  :

$EI_{(t1-t2)} = A.B. \int_{t1}^{t2} (V_t)^2 dt$ ,  $EI$  étant appelé intégrale de l'écho,  $A$  étant une constante dépendant des paramètres du système et  $B$  dépendant de la tranche d'eau considérée (effets de la TVG).

En pratique, l'intégration se fait sur des données discrétisées de cette émission et on a dans cette tranche d'eau :

$$EI_{(t1-t2)} = A.B. \sum_{i=1}^N V_i^2 / N, N \text{ étant le nombre d'échantillons pris en compte dans}$$

la tranche d'eau considérée, donc insonifiée entre les temps  $t1$  et  $t2$ .

Cette intégration dans une tranche d'eau sur une émission est elle-même cumulée puis moyennée sur plusieurs émissions successives correspondant à une unité de distance d'échantillonnage, ou bien la moyenne se fait sur le cumul des échantillons réalisés dans l'ensemble de la tranche d'eau sur l'unité de distance d'échantillonnage.

Si on s'intéresse à un poisson isolé d'index de réflexion  $\frac{\sigma_s}{4\pi}$  situé à la distance  $R$  de la source selon des angles  $\theta, \varphi$  par rapport à l'axe acoustique, la moyenne du carré du voltage de son écho à la sortie du sondeur peut s'écrire :

$$V_i^2 = p_0^2 \cdot \eta_x^2 \cdot b^2(\theta, \varphi) \left( \frac{\sigma_s}{4\pi} \right) \cdot G_0^2 \cdot \frac{G_R^2}{R^4} \cdot 10^{-2\alpha R}$$

$p_0$  étant la pression efficace transmise à 1 mètre de la source,

$\eta_x$  le gain du transducteur (sensibilité + directivité)

$\frac{\sigma_s}{4\pi} = \sigma_{bs}$  l'index de réflexion acoustique de la cible

$10^{-2\alpha R} / R^4$  la perte de propagation

$G_R^2$  la compensation TVG

et  $G_0$  le gain fixe du système.

Si on s'intéresse maintenant non plus à un poisson isolé mais à un volume insonifié dans lequel se situe ce poisson, la moyenne du carré du voltage en sortie de l'intégrateur sera celui généré par le poisson isolé multiplié par le produit du volume échantillonné  $c\tau/2$  et de la densité  $\rho_p$  de poisson.

La moyenne du carré du voltage provenant de la distance  $R$  de la source s'écrit alors :

$$\overline{V_R^2} = \rho_p \eta_x^2 p_0^2 \overline{b^2} \left( \frac{\sigma_s}{4\pi} \right) \pi c \tau \left( G_0 \cdot \frac{G_R^2 \cdot 10^{-2\alpha R}}{R^2} \right)$$

avec  $\overline{\sigma_s/4\pi}$  l'index de réflexion moyen des poissons et

$$\overline{b^2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} b^2(\theta, \varphi) \sin \theta / 2\pi d\theta d\varphi \text{ la directivité moyenne du faisceau}$$

Pour une tranche d'eau comprise entre  $R_1$  et  $R_2$  on a :

$$\overline{V_{R_1, R_2}^2} = \rho_p \eta_x^2 p_0^2 \overline{b^2} \left( \overline{\sigma_s/4\pi} \right) \pi c \tau G_0^2 \cdot 1/(R_2 - R_1) \int_{R_1}^{R_2} G_R^2 \cdot 10^{-2\alpha R} / R^2 \cdot dR$$

soit encore

$$EI_{(R_1-R_2)} = \rho_p = A \cdot B \cdot \overline{V_{R_1, R_2}^2}$$

avec  $A = 1/(\eta_x^2 \cdot p_0^2 \cdot \overline{b^2}) \cdot \left( \overline{\sigma_s/4\pi} \right) \pi c \tau G_0^2 =$  constante de paramètres indépendants

de la profondeur et :

$$B = \frac{R_2 - R_1}{\int_{R_1}^{R_2} G_R^2 \cdot 10^{-2\alpha R} / R^2 \cdot dR} = \text{facteur dépendant des caractéristiques de la TVG et de}$$

l'intervalle de profondeur considéré,  $EI_{(R_1-R_2)}$  sera exprimé en unité par  $m^3$ , unité dont la dimension sera cette donnée par l'unité dans laquelle sera exprimée  $\sigma_s$

La moyenne du carré des voltages ainsi obtenue et selon l'unité (nombre, poids...) de l'index de réflexion choisie sera équivalente à un nombre moyen ou à un poids moyen de poissons par mètre cube échantillonné entre les distance  $R_1$  et  $R_2$  dans une impulsion. Si le calcul se fait sur un parcours, la moyenne sera calculée en divisant la somme des carrés des voltages par le produit du nombre d'échantillons par tranche par le nombre de tirs effectués sur le parcours.

Si on multiplie cette moyenne (nombre ou poids de poissons par  $m^3$ ) par la hauteur d'eau échantillonnée ( $R_2 - R_1$ ), on obtient une densité en nombre ou poids moyen de poisson par  $m^2$  de surface prospectée.

La biomasse par tranche se calcule alors par extrapolation de cette valeur à la surface totale de l'aire d'étude et peut s'exprimer selon les milieux et les besoins en kg/ha, en tonnes/km<sup>2</sup>, en tonnes/nm<sup>2</sup>, etc...

En milieu maritime et par convention (MacLennan, Fernandes et Dalen, 2002), les données d'intégration sont exprimées en  $S_A$  ou « nautical area scattering coefficient » et s'exprime directement en  $m^2$  de surface réfléchissante par mille nautique carré. L'application d'une valeur moyenne de TS des cibles présentes dans la zone d'étude permet d'exprimer les résultats généralement en tonnes par mille nautique carré (t/nmi<sup>2</sup>) et en extrapolant à la surface prospectée d'exprimer le résultat en tonnes. Dans les milieux dulçaquicoles, il est fréquent d'exprimer les résultats d'intégration en kg de poissons par hectare.

Dans la pratique, arriver aux meilleurs estimateurs de biomasse présente dans une zone requiert beaucoup de calculs, car sauf en toute première approximation, on n'utilise pas une

valeur de TS moyenne, mais on va d'abord tendre à utiliser une expression de TS par espèce ou groupe d'espèces similaires, puis à la préciser par la distribution en taille de ces espèces dans la zone de prospection. Évidemment, cette opération présuppose que l'on ait :

- 1) échantillonné les populations présentes, les plus souvent par chalutage en milieu maritime, et
- 2) que les résultats des chalutages ne soient pas eux même biaisés.

La tendance actuelle, dans un contexte de préservation des ressources et des écosystèmes, est d'employer des méthodes non intrusives d'identification, ce qui a permis de développer des techniques d'identification uniquement basées sur l'analyse des données acoustiques. Les approches multifréquentielles sont privilégiées en association avec l'analyses d'autres variables externes (température, profondeur, caractéristiques morphométriques et énergétiques des bancs par exemple) pour l'identification des espèces.

Il y a donc entre la donnée brute d'intégration des échos et la présentation d'un indice de biomasse spécifique, une longue et méticuleuse progression au travers de plusieurs processus interdépendants.

### 2-3) Sonars

Les sonars, toujours dans le langage courant, présentent les mêmes principes de fonctionnement que les sondeurs mais contrairement (ou complémentirement) au sondeur qui travaille verticalement, les émissions et réception des sonars se font dans des plans obliques. Ils sont donc adaptés à l'observation du milieu autour d'un bateau, soit de façon directionnelle (frontale ou latérale par exemple) soit de façon omnidirectionnelle, soit encore en utilisant un mixage des deux possibilités.

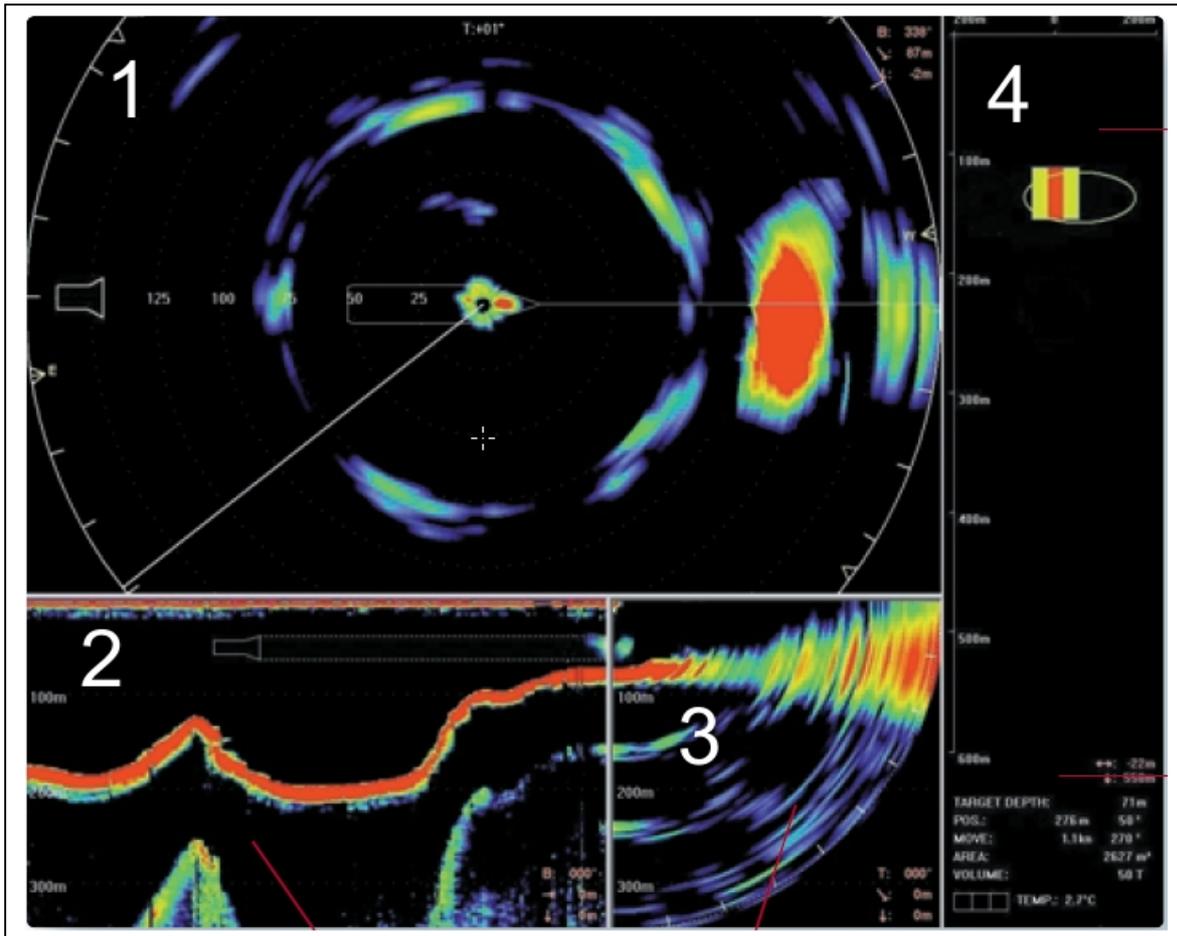


Fig. 26 : Représentation d'un écran de sonar multifaisceaux (Doc. SIMRAD)

L'illustration ci-dessus, tirée de la brochure du constructeur SIMRAD, représente l'écran de visualisation d'un sonar multifaisceaux utilisant un mixage de diverses possibilités qu'il offre lorsqu'en plus il est associé à de l'instrumentation acoustique de chalut. Dans l'écran principal **1** le chalutier est en position centrale et se dirige vers la droite : il détecte devant lui à environ 100 mètres un banc de poissons représenté par une grande tâche rouge. Derrière lui à 150 mètres se situe son chalut représenté par un logo en forme de cloche. Dans l'écran suivant **2** le sonar fonctionne comme un sondeur vertical et indique par une bande rouge l'évolution de la bathymétrie (entre 100 et 200 m ici) ; le chalut toujours représenté par le même logo en forme de cloche est positionné dans la tranche d'eau. Cette vue permet au capitaine du chalutier d'éviter que son chalut percute le fond et se déchire mais aussi lui permet de le positionner à la même profondeur que les bancs de poisson permettant de les capturer plus efficacement. L'écran **3** montre un des balayages de la tranche d'eau vers l'avant du bateau ; cette tranche d'eau va de l'horizontale jusqu'à l'aplomb du bateau et tir après tir se déplace dans un angle total de 90° selon un mouvement que l'on peut comparer à celui d'un éventail. Ce mode de représentation de l'information permet une bien meilleure représentation que celle d'un simple sondeur et permet de détecter des poissons qui ne seraient pas dans l'axe de déplacement du navire. L'écran **4** enfin indique la position relative du banc de poisson (rectangle jaune et rouge) et du chalut dont l'ouverture est matérialisée par une forme ovale.

Le traitement des données sonar est plus complexe que celui des données de sondeurs. En effet, le trajet des ondes acoustiques n'est plus linéaire si les conditions du milieu sont hétérogènes, principalement dans le cas de gradients thermiques.

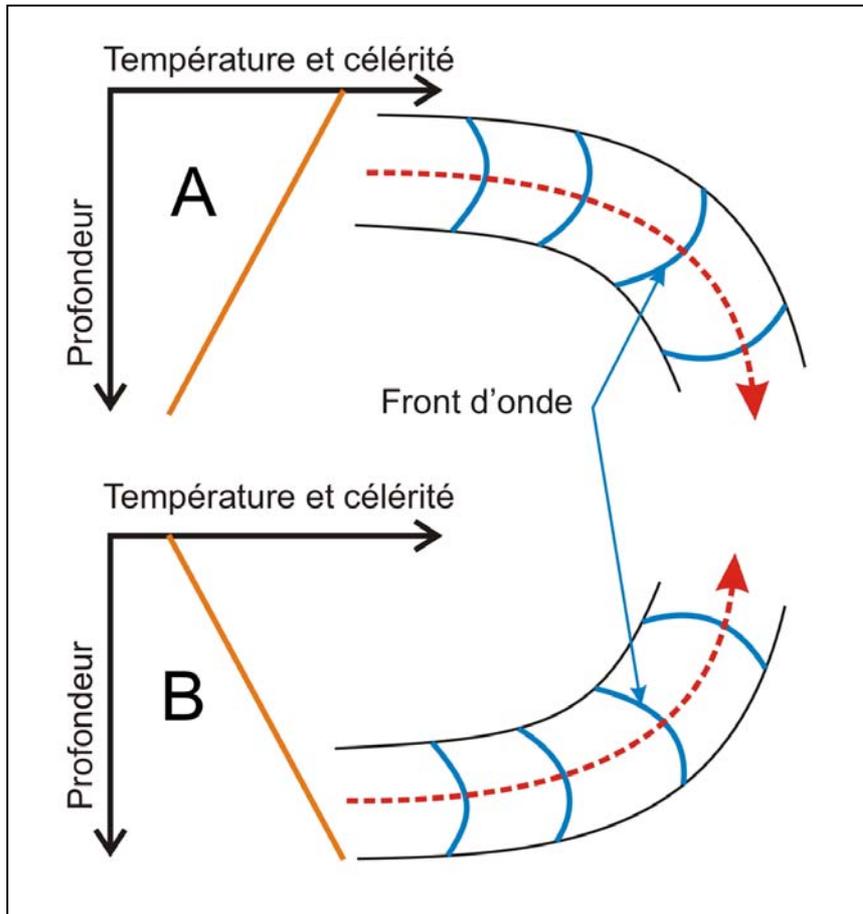


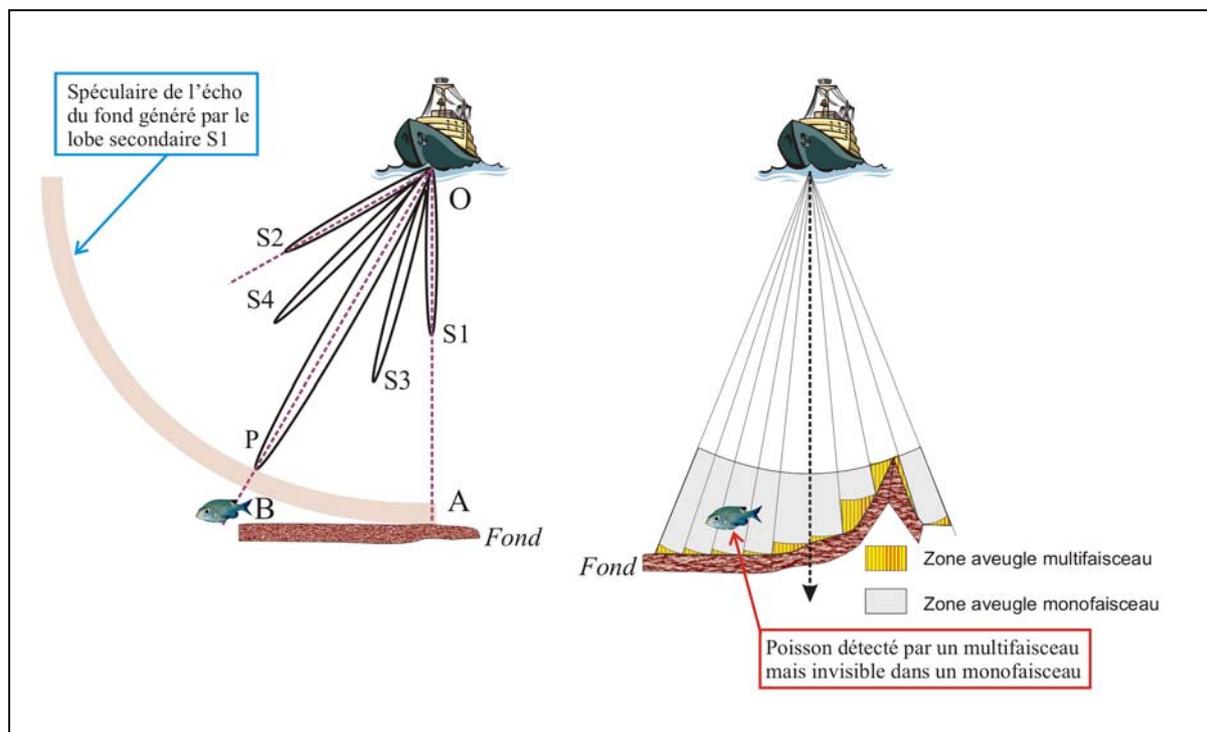
Fig. 27 : Modifications de la trajectoire d'une onde acoustique en fonction de gradients de température.

En **A**, on peut voir que la température et par conséquent la célérité décroissent en fonction de la profondeur. Dans un tir horizontal, la partie supérieure de l'onde acoustique se propage à plus grande vitesse que la partie inférieure. Ceci a pour conséquence que le faisceau s'incline vers le bas. Un observateur aura alors l'impression qu'une cible se situe près de la surface alors qu'en réalité elle se trouve en profondeur. Le phénomène inverse se produit en **B** quand la partie inférieure de l'onde se propage plus vite que la supérieure. Des zones aveugles sont générées dans de telles conditions de propagation.

D'autre part, en acoustique horizontale, la surface insonifiée, donc la valeur de TS d'un poisson, varie grandement en fonction de son orientation relative par rapport au sonar. En effet, si le poisson est vu latéralement, sa surface insonifiée sera importante et la valeur de son TS aussi. Par contre un même poisson vu de face ne présentera qu'une faible surface à l'onde acoustique et son TS sera faible. Ceci a pour conséquence que les évaluations d'abondance par échantillonnage en acoustique horizontale sont très imprécises et dans la pratique ne sont guère pratiquées. Par compte, l'aptitude des sonars à observer un grand volume d'eau autour d'un bateau est utilisée en complément des données d'acoustique verticale pour compter des bancs et étudier leur comportement à l'approche d'un navire.

## 2-4) Sondeurs multifaisceaux halieutiques

Les sondeurs multifaisceaux halieutiques sont des systèmes hybrides sonars-sondeurs dans la mesure où ils comprennent des faisceaux travaillant selon un axe vertical et d'autres travaillant latéralement par rapport aux premiers.



**Fig. 28 : Illustration du fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux halieutique : on remarque notamment l'importance d'avoir de faibles niveaux de lobes secondaires par rapport au lobe principal, et par rapport à un monofaisceau la considérable diminution de la zone aveugle et l'accroissement du volume échantillonné (d'après Diner N., com. pers.)**

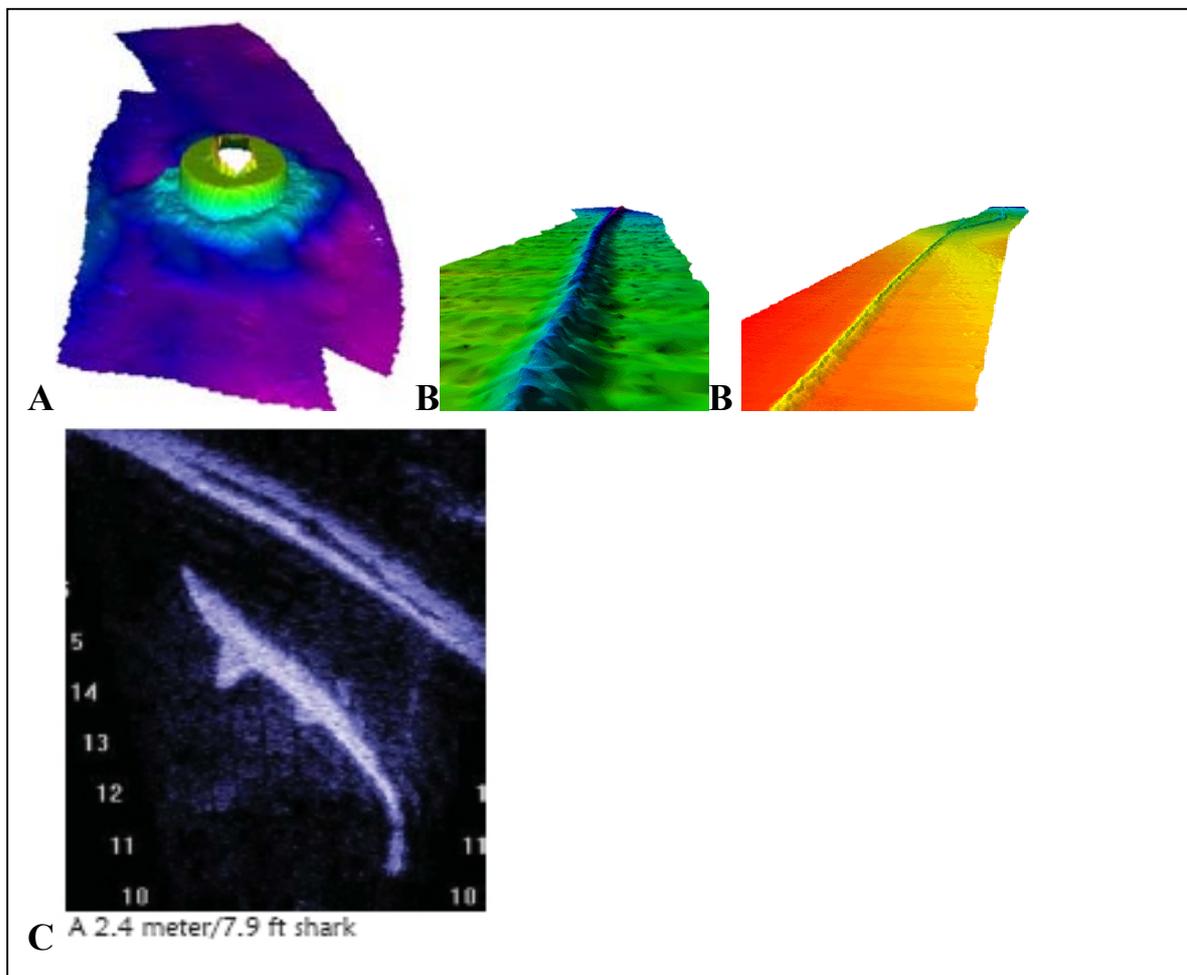
Une des principales difficultés est d'obtenir des lobes secondaires les plus faibles possible par rapport au lobe principal de manière à ne pas être gêné par les échos du fond présents dans les lobes secondaires quand on dépointe le lobe principal. Dans ce cas la distance OA est plus courte que la distance OB. Avant d'être perçu par le lobe principal, un écho du fond apparaîtra dans le lobe secondaire qui générera un spéculaire circulaire de rayon OA : il faut que ce spéculaire soit d'un niveau acoustique faible pour pouvoir être éliminé par seuillage du signal et pour ne pas masquer ou modifier l'écho du poisson en B. C'est techniquement la difficulté majeure de conception d'un multifaisceau.

Ils permettent une meilleure résolution angulaire (faisceaux de  $2^\circ$ ), d'accroître très sensiblement le volume échantillonné (30 faisceaux de  $2^\circ = 60^\circ$  au lieu d'un seul faisceau de  $7$  à  $12^\circ$ ) tout en laissant la possibilité de faire des mesures verticales calibrées (manière historique d'évaluer les biomasses de poissons). De plus ils permettent de réduire considérablement la zone aveugle près du fond par rapport à des sondeurs conventionnels.

Ces systèmes représentent la toute dernière génération des sondeurs scientifiques principalement destinés aux évaluations de ressources. Les premiers essais du premier modèle ont été faits en octobre 2005 sur la « Thalassa », navire de recherches de l'Ifremer.

## 2-5) Sonars 3D et caméras acoustiques

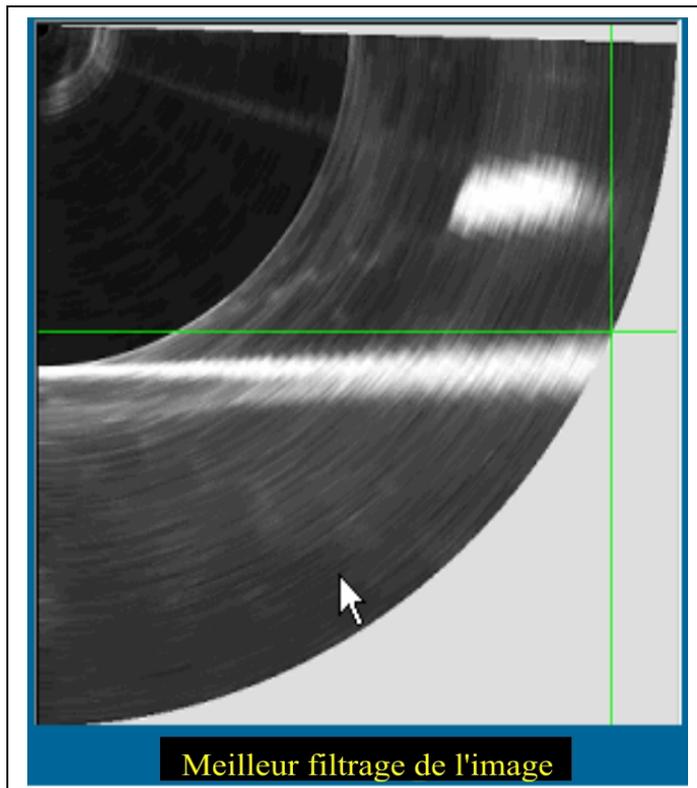
Ce sont en fait des sonars haute définition qui utilisent un très grand nombre de faisceaux. Les plus élaborés d'entre eux produisent des images ou des films similaires à ceux obtenus à l'aide d'une caméra vidéo sous-marine. Dans le principe, il s'agit de transmettre une impulsion sonore selon un angle important à partir de quelques éléments du transducteur et à la réception d'utiliser l'ensemble des éléments de ce transducteur pour recevoir les échos selon des angles très fins. Il est alors possible de construire une image en 3D des réflecteurs acoustiques. Leur portée est généralement faible en eau de mer du fait des fréquences élevées utilisées qui permettent une bonne résolution. Leurs applications sont multiples en halieutique, avec des aptitudes marquées pour les analyses de comportement, l'étude de la topographie des bancs et les observations en petits fonds. Deux constructeurs principalement fournissent du matériel pour des applications civiles, le danois Reson (<http://www.reson.com>) et l'américain Didson (<http://www.didson.com>).



**Fig. 29 : Exemples d'images obtenues par caméras acoustiques (doc. Constructeurs).**

Sont représentées ci-dessus des images acoustiques d'un pilier **A**, de 2 pipe-lines **B** et d'un requin **C**.

Pour les besoins de l'halieutique, les grandes potentialités de ces outils ont été adaptées, en particulier grâce au projet européen *AVITIS* dont l'IRD était leader. Ce projet avait pour objectif de développer des programmes de visualisation 2D des images d'un sonar multifaisceau RESON Seabat 6012, puis de permettre la représentation 3D du fond de la mer et des bancs de poissons dans le but d'étudier leurs comportements.



**Fig. 30 : Image d'un banc détecté sur un tir à l'aide d'un sonar RESON : à noter qu'il est englobé dans le spéculaire du fond (rapport Projet AVITIS, IRD).**

La tête du sonar (transducteur multifaisceaux) est située en haut à gauche de cette image. L'émission et la réception se font selon un angle de  $90^\circ$ , balayant entre l'horizontale (en frôlant la surface) et la verticale qui permet d'avoir des observations acoustiques sur une distance fixe dans un quart de cercle, ce qui s'appelle une fauchée. Cette image permet de repérer le fond (bande blanche horizontale sous la ligne horizontale verte de repère et surtout un banc de poissons matérialisé ici par une tâche blanche.

Lorsque plusieurs de ces fauchées successives sont combinées, on obtient une succession temporelle d'images en 2D qui permettent de mesurer les paramètres morphologiques des bancs et d'observer le comportement de ceux-ci. Sa position dans le milieu est mesurable et les liens avec les données environnementales, biotiques ou abiotiques, peuvent alors être étudiés.

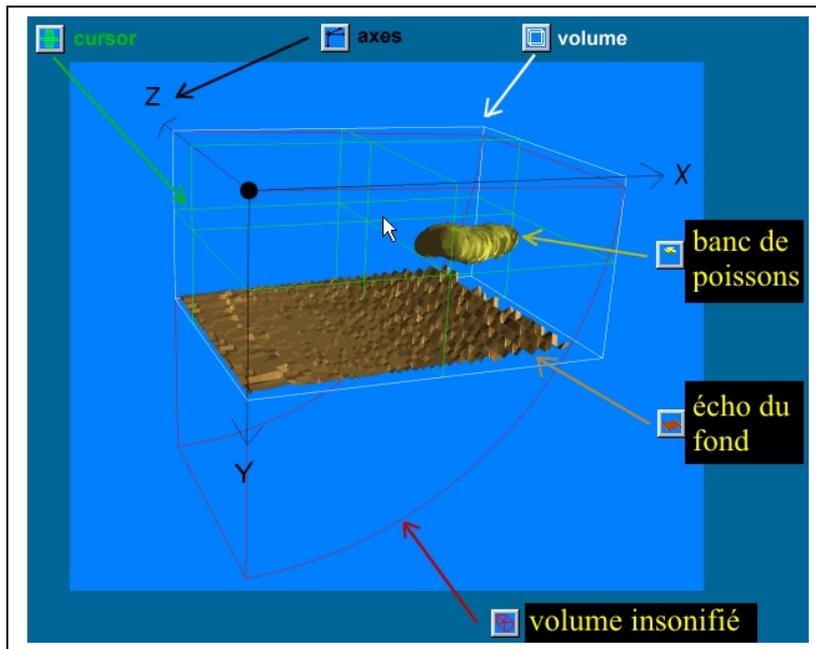


Fig. 31 : Reconstitution en 3D de l'image du fond et d'un banc de poisson détectés sur plusieurs tirs successifs d'un sonar RESON (Rapport projet AVITIS, IRD).

## 2-6) Marques acoustiques

Les marques acoustiques sont de petits émetteurs dont typiquement la taille varie de 15 mm à 150 mm pour des poids respectifs de 1 à 80 g. Elles sont placées soit dans la cavité abdominale des poissons, soit fixées sur leur dos. Plus les marques sont petites et moins elles possèdent de capteurs et par conséquent moins elles peuvent transmettre d'information sur leur milieu environnant (température, pression) et moins elles ont d'autonomie.

On considère qu'il existe deux grandes catégories de marques, celles qui émettent un signal à intervalle constant et qui sont adaptées au suivi de poissons se déplaçant rapidement et celles qui émettent un signal d'identification (RCODED tag) qui peuvent être utilisées en grand nombre dans une même zone et qui sont idéales pour détecter la présence/absence d'un poisson particulier dans une zone déterminée. Ces dernières sont particulièrement utiles pour étudier le comportement des poissons autour des dispositifs concentrateurs de poissons (FADs) et sont par exemple utilisées dans le programme Européen FADIO mené dans l'Océan Indien par l'IRD (<http://www.fadio.ird.fr/tags.htm>). Elles ont également dans un passé récent été largement utilisées dans le programme ECOTAP mené fin des années 90 en Polynésie Française par l'IRD, l'EVAM et l'Ifremer.

Parmi les plus connus des fabricants de marques acoustiques on trouve les canadiens VEMCO (<http://www.vemco.com>) et LOTEK (<http://www.lotek.com>) ou encore les américains HTI (<http://www.htisonar.com>) et les islandais Star-Oddi (<http://www.star-oddi.com>)



Fig. 32 : Exemple d'ensemble de marquage acoustique : noter le faible poids et la petite taille de la marque (doc. constructeur).

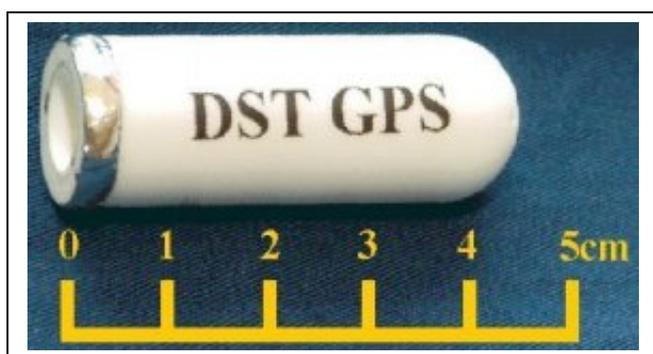
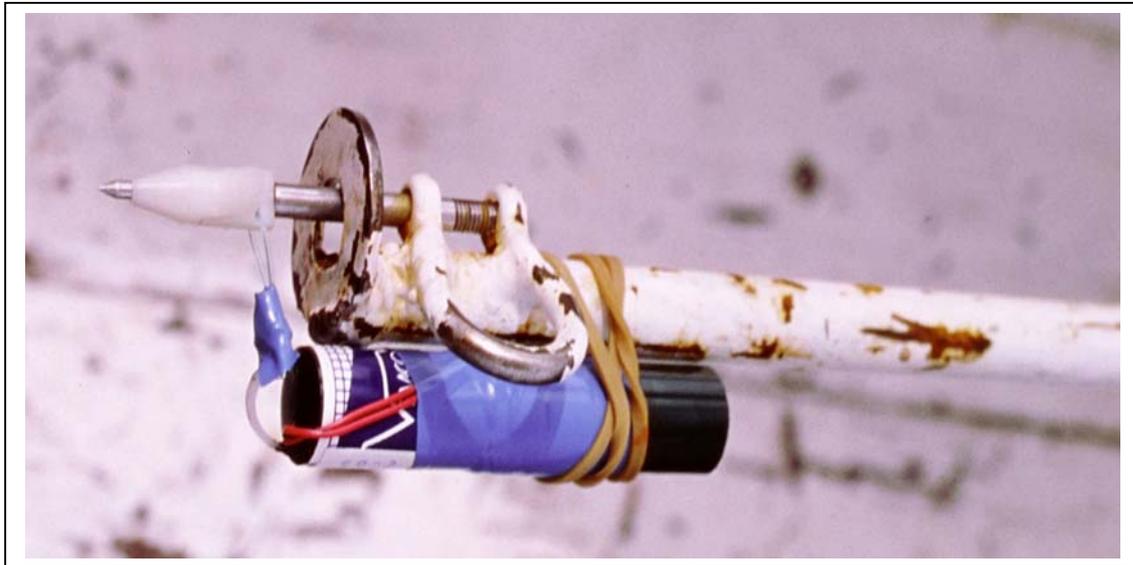
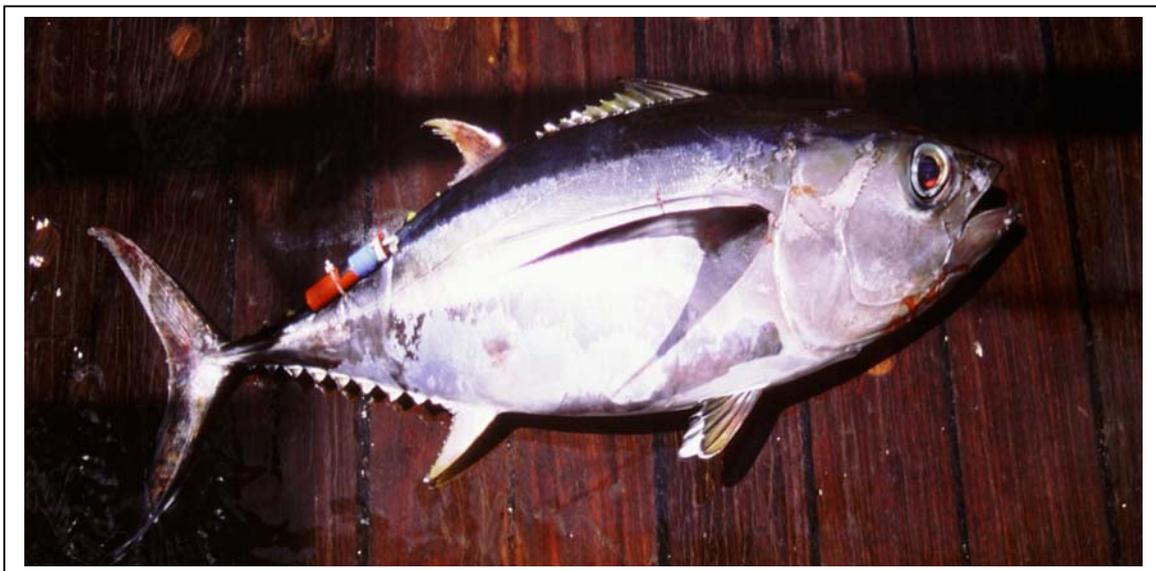


Fig. 33 : Exemple de marque acoustique « profondeur-température » + GPS (doc. constructeur).

Certaines de ces marques enregistrent classiquement la profondeur et la température en fonction du temps mais offrent la possibilité d'enregistrer la position GPS lorsqu'elles sont insonifiées par certains types de sonars (cf. marque ci-dessus, fruit d'une coopération Star-Oddi/Simrad).



**Fig. 34 : Harpon de marquage de thons utilisé lors des campagnes ECOTAP (photo ECOTAP, Josse, US004, IRD)**



**Fig. 35 : Thon marqué : on distingue la marque acoustique (rouge) entre la nageoire caudale et la nageoire dorsale (photo ECOTAP, Josse, US004, IRD)**

### 3) APPLICATIONS

#### 3-1) Domaines d'application : tous les milieux aquatiques

Le domaine d'utilisation de l'acoustique halieutique est extrêmement vaste, s'étendant des rivières, lacs, retenues de barrages, estuaires, plateaux continentaux, milieux hauturiers etc. Il s'adresse donc à des milieux profonds de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres, à de l'eau douce, de l'eau salée, hyper-salée. Il s'adresse aussi bien aux mesures sur des organismes de tailles millimétriques (plancton), centimétriques (poissons mésopélagiques), décimétriques (poissons habituels des plateaux continentaux), métriques (thonidés et poissons à rostre du grand large).

L'US « ACAPELLA » (<http://www.brest.ird.fr/us004/index.htm>) actuellement travaille en acoustique sur les petits fonds du chantier de l'UR « RAP » (<http://www.ird.sn/activites/rap/index.htm>) en milieu estuarien comme dans les bolons du Sine-Saloum ou dans le fleuve Gambie, mais encore dans les retenues des barrages de Sélingué et de Manantali.

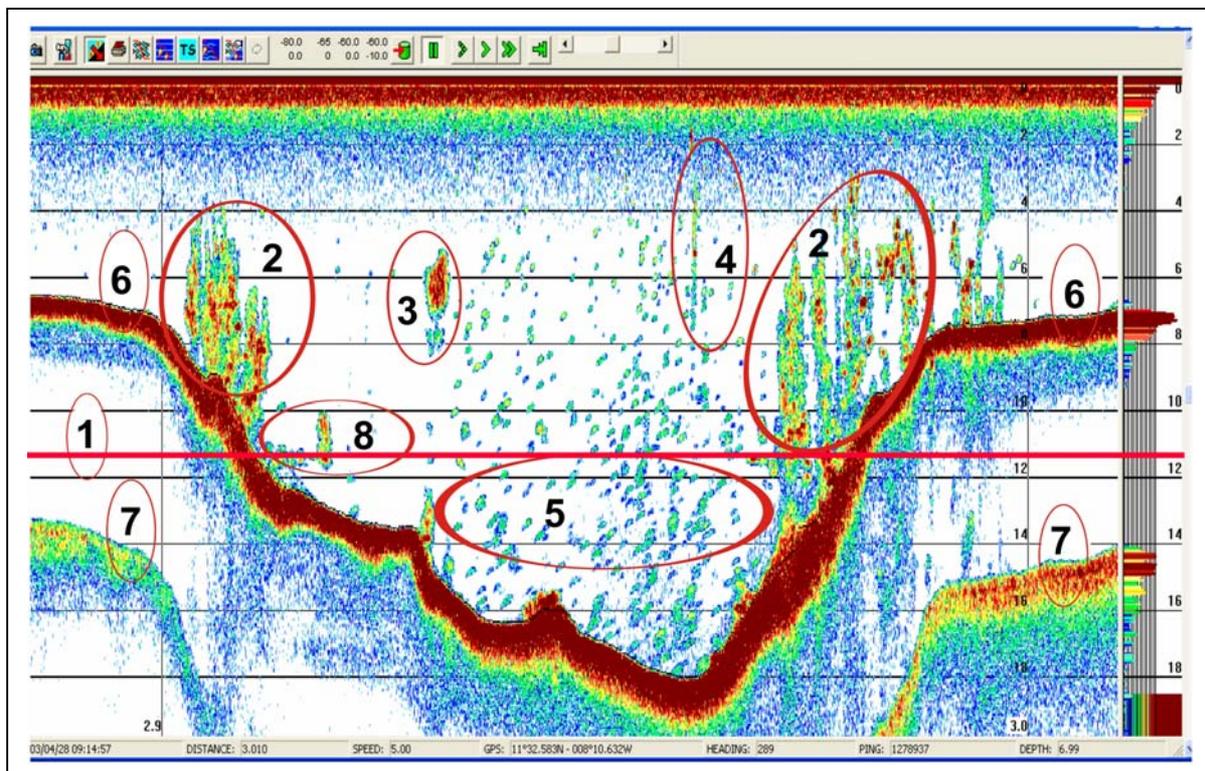
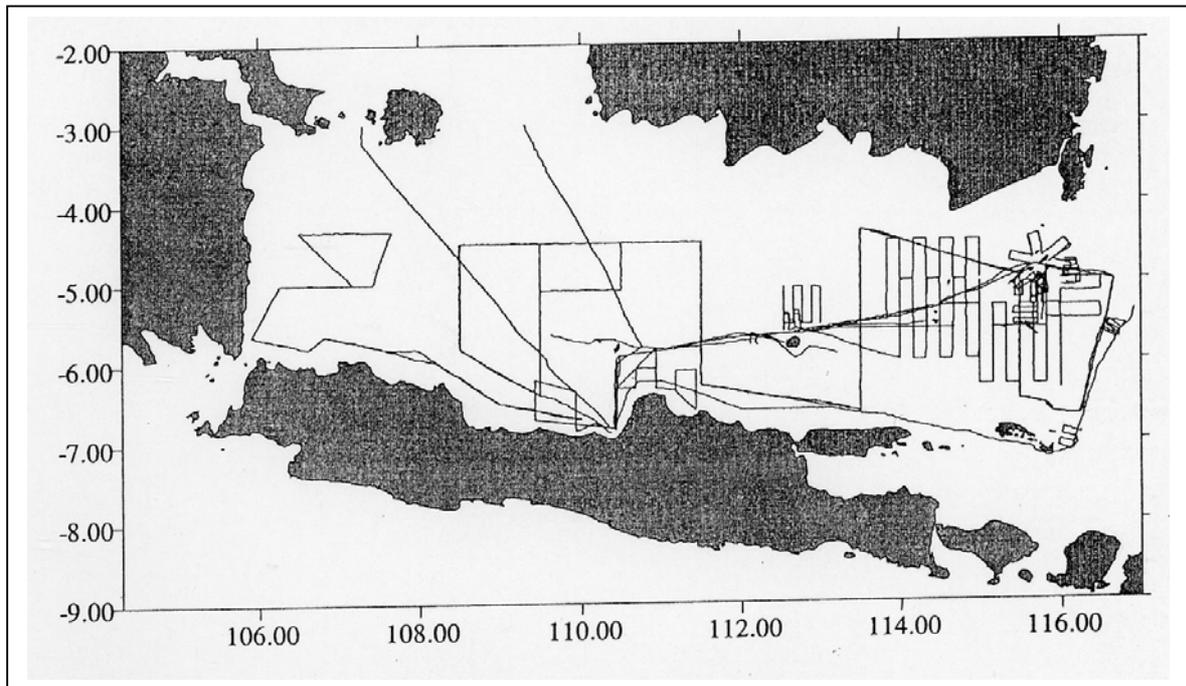


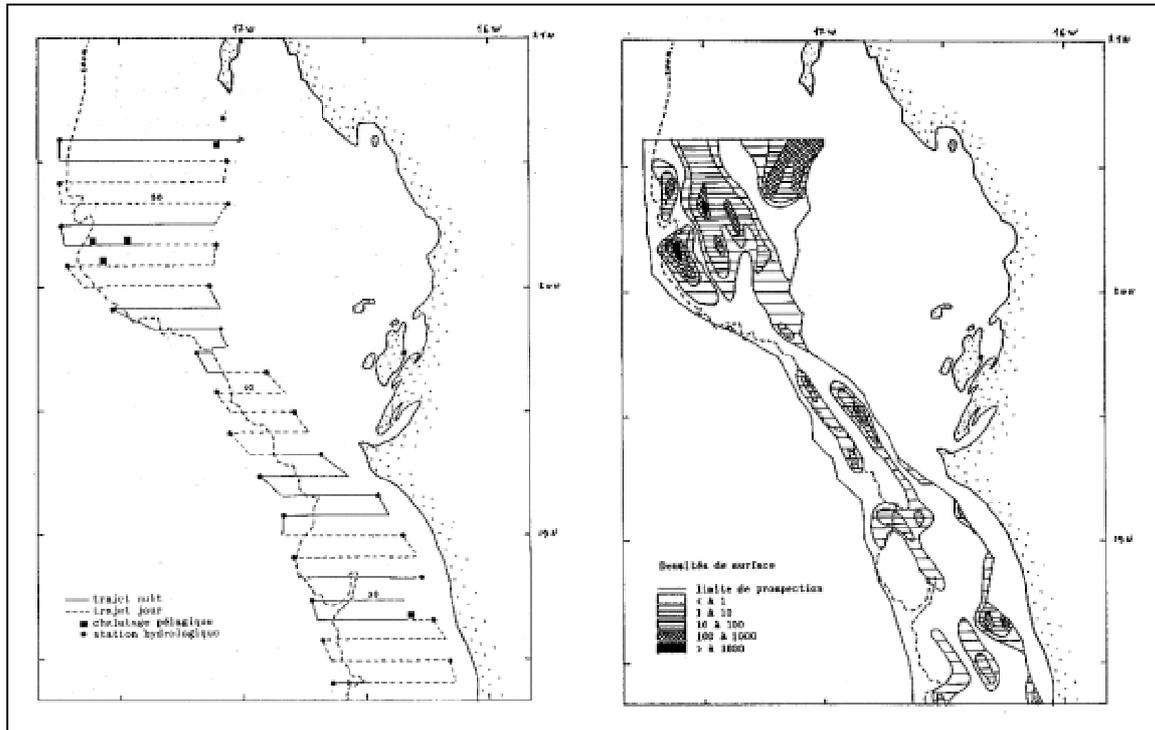
Fig. 36 : Exemple d'échogramme obtenu au barrage de Sélingué, frontière sénégal-malienne (Doc. Lebourges Dhaussy, US004, IRD).

Le trait rouge horizontal en **1** figure le niveau du fleuve Sénégal et on détecte en **2** les échos des arbres qui poussaient sur les anciennes rives. On a en **3** l'écho d'un banc de poisson tandis qu'en **5** on observe des échos de poissons dispersés. En **4** se distingue un chapelet de bulles remontant du fond, **6** et **7** représentant respectivement l'écho et le double-écho du fond. L'écho **8** demande à être interprété : s'agit-il d'un banc de poissons ou d'une branche pendante ?

Les applications de l'acoustique sur les plateaux continentaux européens sont historiquement les plus anciennes et dirigées vers l'évaluation et la cartographie des biomasses de poissons exploités ou exploitables. Des campagnes similaires, effectuées principalement dans le cadre d'évaluation de ressources, furent très nombreuses à l'ORSTOM puis à l'IRD, avec, pour ne citer que les plus nombreuses les campagnes du N/O Capricorne en Afrique de l'Ouest, du N/O Laurent Amaro et du N/O Louis Sauger au Sénégal, les campagnes « N'DIAGO » en Mauritanie, celles du N/O André Nizery et du N/O Antéa dans le golfe de Guinée et au Vénézuella, celle du N/O Bawal Putih 1 en Mer de Java...

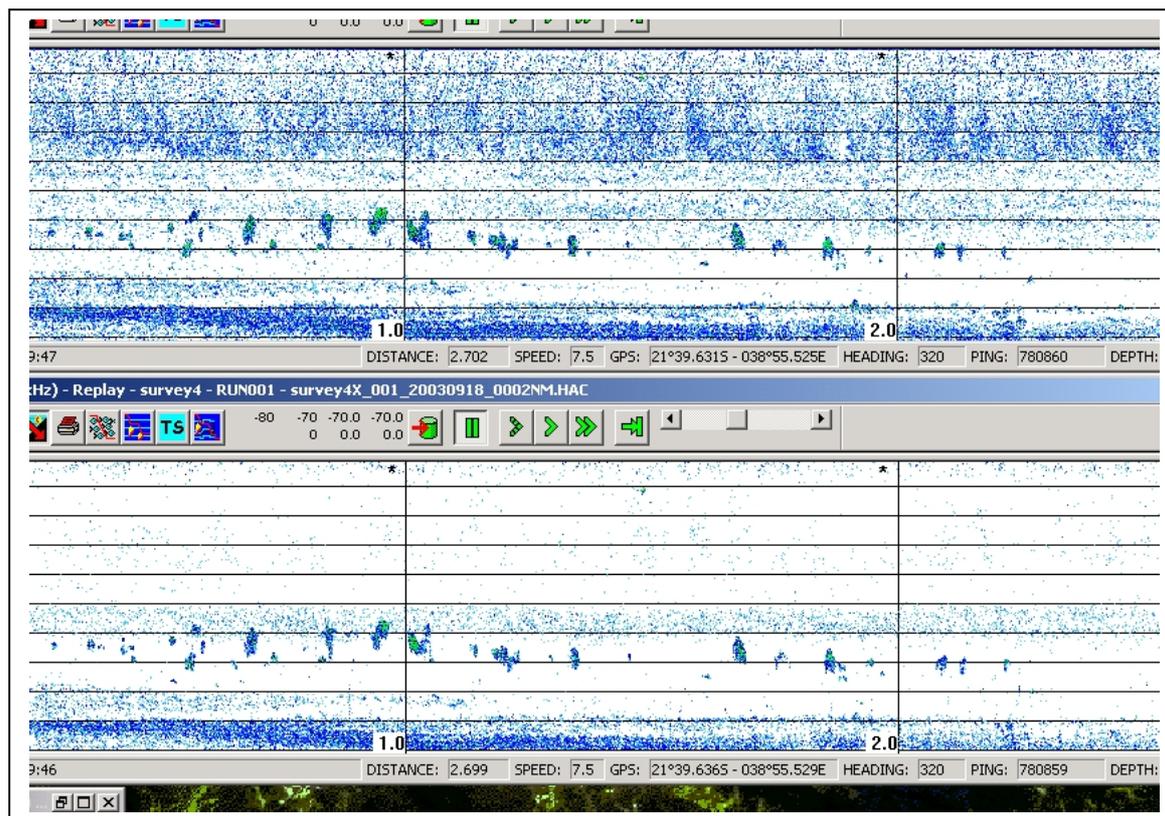


**Fig. 37 : Parcours de prospection acoustique effectué en mer de Java lors du projet « Pelfish » mené par l'IRD en coopération avec l'Indonésie.**



**Fig. 38 : Exemple de parcours et de résultat de prospection acoustique réalisé aux abords du Banc d'Argin par l'IRD en coopération avec l'Institut Mauritanien de Recherche Océanographique et des Pêches (Doc. Josse, US004, IRD).**

En milieu pélagique hauturier, l'acoustique aussi présente des applications. Les objectifs sont alors plus ambitieux que précédemment : il s'agit alors d'étudier les habitats des grands pélagiques haututiers (thons et poissons à rostre) décrits par leurs caractéristiques biotiques et abiotiques. Ce fut le cas lors des campagnes « PICOLO » menées dans les années 1993-1995 par l'IRD en zone Atlantique équatoriale, des campagnes « ECOTAP » menées par l'IRD en ZEE française de Polynésie, ou plus récemment en ZEE française du Canal du Mozambique lors des campagnes « ECOTEM » de l'IRD menées par l'UR « THETIS » (<http://www.brest.ird.fr/ur109/index.htm>) en collaboration avec l'US « ACAPELLA » (<http://www.brest.ird.fr/us004/index.htm>).



**Fig. 39 : Exemple d'échogrammes de bancs de mésopélagiques positionnés à environ 160 mètres sous la surface observés à 2 fréquences (38 et 120 kHz) dans le canal du Mozambique sur des fonds voisins de 3000 mètres. Ces bancs de mésopélagiques constituent une part importante de l'alimentation des grands pélagiques hauturiers, thons en particulier (campagnes ECOTEM, Lévénez, US004, IRD).**

### 3-2) Évaluations des ressources

Nous avons vu que dès que leurs performances l'ont permis, les sondeurs furent utilisés par les pêcheurs pour détecter les poissons (Balls au début des années 30), puis par les scientifiques pour détecter et cartographier les ressources (Sund, 1935), les quantifier par échocomptage (Middtun et Seatesdal en 1957) puis par échointégration (Dragsund et Olsen en 1965).

À l'IRD (ORSTOM en ces temps là) l'acoustique fût au début utilisée pour obtenir une première évaluation des ressources en poissons et leurs potentiels d'exploitation sur les côtes africaines. C'est par exemple le cas des campagnes de prospection du N/O Gérard Tréca sur le plateau continental sénégalais dans les années 50.

Vinrent ensuite la série des campagnes du N/O Capricorne, qui de 1973 à 1982 ont couvert tout ou partie des côtes d'Afrique de l'Ouest du Maroc au Golfe de Guinée, avec pour principaux objectifs d'établir des cartes d'abondance des principales espèces de petits pélagiques côtiers (sardinelles, chinchards, maquereaux en particulier), de connaître l'évolution inter-saisonnière et interannuelle de ces biomasses, d'évaluer leurs schémas migratoire saisonnier et d'indiquer les potentiels commercialement exploitables par les pays riverains, soit de manière autonome, soit dans le cadre d'accords de pêche avec des flottilles étrangères.

Après une courte période de recouvrement temporel avec les campagnes du N/O Capricorne, les campagnes d'évaluation étaient mises sous la responsabilité directe des pays riverains qui avaient entre temps équipé de matériel acoustique leurs navires de recherche, en 1982 pour le N/O Laurent Amaro au Sénégal et pour le N/O N'Diago en Mauritanie.

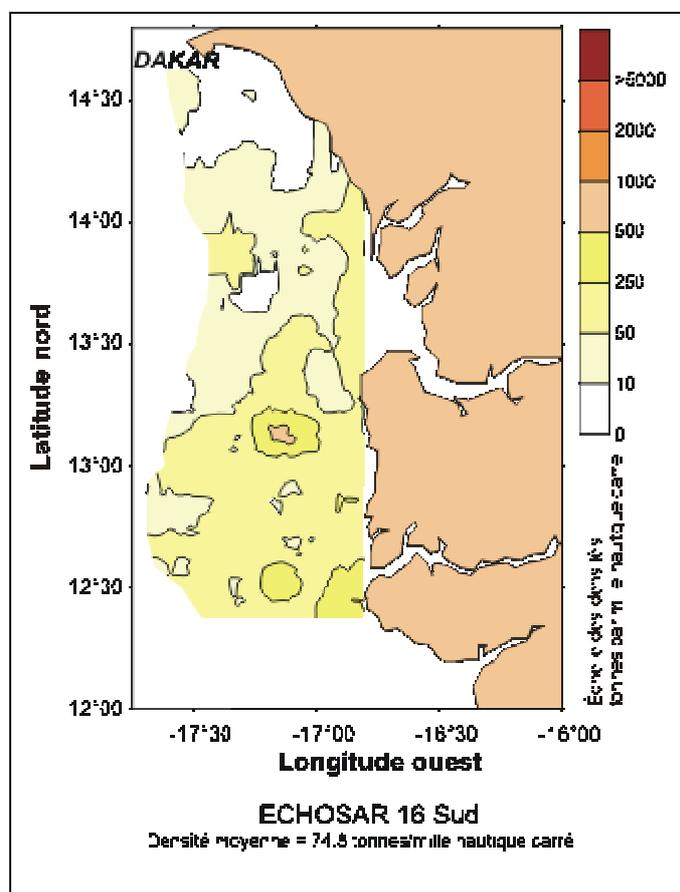


Fig. 40 : Exemple de représentation cartographique de résultat d'une campagne d'évaluation de biomasse de poissons par acoustique au Sénégal réalisée en coopération entre l'IRD et le Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaré (doc. Lévéné, US004, IRD).

Ces campagnes, pour différentes raisons techniques liées à la courte durée de vie de certains de ces petits pélagiques et à la qualité de certaines statistiques de pêche, ont été, et c'est d'ailleurs toujours le cas aujourd'hui, le socle des évaluations de biomasse.. Elles ont été à la base des négociations d'accords de pêche entre le Sénégal et les pays demandeurs de licences de pêche. Elles ont servi de support par exemple à la rédaction du volet « petits pélagique » du code de la pêche maritime sénégalaise.

Les campagnes de prospection acoustique à des fins d'évaluation des ressources n'ont cessé de prendre de l'ampleur. Elles sont, souvent en complément d'autres méthodes, utilisées de plus en plus fréquemment, tant dans les pays industrialisés que dans de plus en plus de pays inter tropicaux.

L'acoustique sert dans bien des cas de support à la gestion des pêches avec des applications immédiates (saumons de l'Alaska gérés au jour le jour), à court terme (arrêts de quelques jours ou semaines au Chili, arrêts biologiques de pêche 1 ou 2 mois par an en

zone sénégal-mauritanienne avec parfois de prolongations, allocation de quotas annuels en Europe), à moyen ou long terme avec des fermetures totales ou partielles de zones pour plusieurs mois ou années...

Les sonars, du fait de leur aptitude à explorer un grand volume d'eau autour du bateau et à identifier des échos proches de la surface qui échappent au sondeurs verticaux (tirant d'eau des bateaux auquel s'ajoute la zone champ proche des transducteurs, le faible volume échantillonné dans le cône acoustique à petite distance du transducteur et les inévitables phénomènes d'évitement des poissons à l'approche du bateau), sont pour le moins un complément très utile aux mesures faites au sondeur vertical quand ce n'est pas l'unique moyen d'observer des bancs de poissons proches de la surface. Ce fut le cas de nombreuses années pour l'évaluation des stocks de sardines qui de jour se cantonnaient en sub-surface et étaient totalement inaccessibles au sondeur.

Par technique de traitement d'image, il est possible d'automatiser le comptage des bancs détectés au sonar, et de là accéder à des techniques d'extrapolation pour affiner les mesures faites au sondeur.

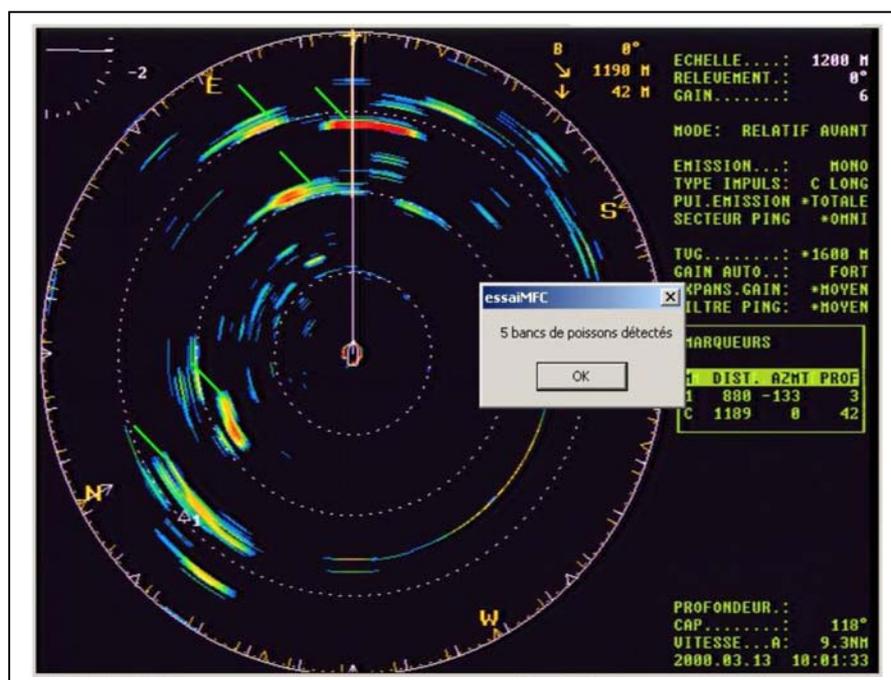


Fig. 41 : Comptage automatique de bancs sur des enregistrements d'image de sonar SR240. (collaboration ENSTBr, Ifremer, US004-IRD).

Sur cette image (fig. 41), 5 bancs ont été identifiés et marqués : leurs caractéristiques géométriques et énergétiques sont calculées par traitement d'image (travail ENSTBr, Ifremer, IRD-US004)

L'exemple suivant montre clairement l'apport du sonar dans la quantification d'échos proches de la surface.

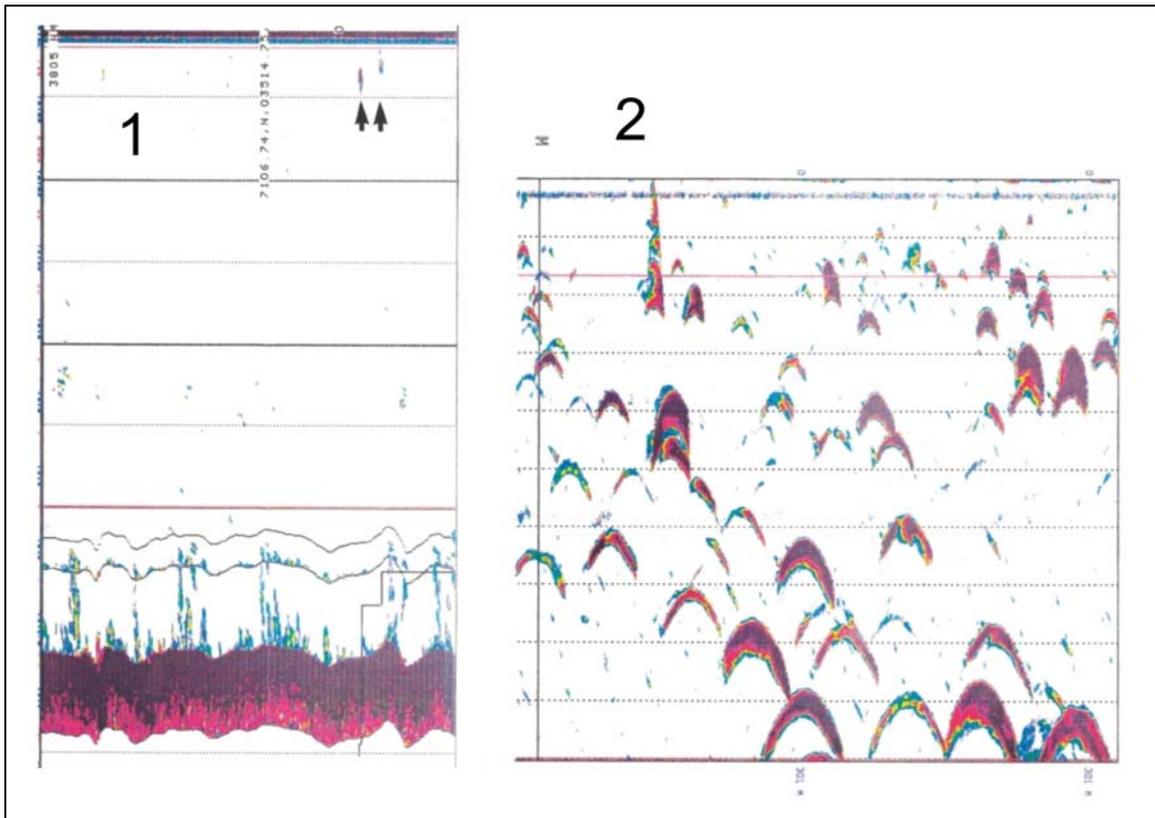


Fig. 42 : Enregistrements synchrones d'échos obtenus au sondeur vertical (1) et au sonar (2) (d'après Misund *et al.* 1996)

Comparaison de données sondeur et sonar où l'on ne distingue que 2 bancs près de la surface au sondeur **1** et une trentaine au sonar **2** orienté à 90° de l'axe du bateau avec un angle de tir de 5° sous l'horizontale. On a dans ce cas une sensible sous-estimation des biomasses au sondeur classique car d'une part les bancs proches de la surface ne sont pas tous dans la zone accessible au sondeur et car d'autre part un fort phénomène d'évitement existe quand les poissons sont trop proches du bateau (d'après Misund *et al.* 1996)

### 3-3) Études comportementales.

L'IRD a été un des pionniers de ce type d'étude, en mettant en place dès 1987 le programme EICHOANT, dont l'objectif était d'étudier le comportement des poissons tropicaux. Mais bien avant cela, dès 1974, le comportement des poissons éveillait la curiosité des scientifiques de l'IRD.

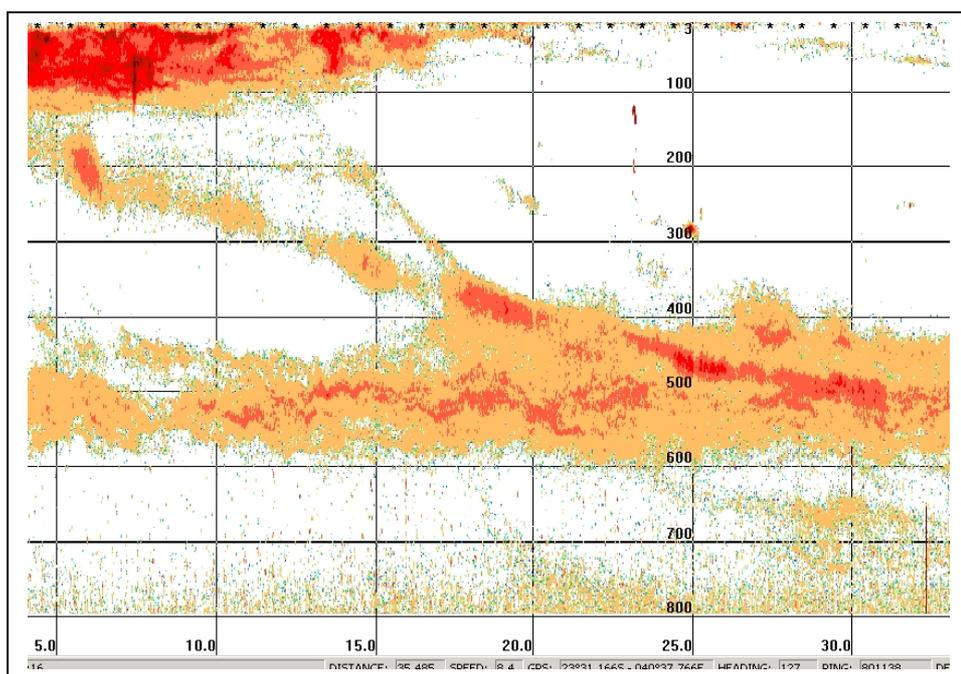
#### 3-3-1) Comportement naturel

##### 3-3-1-1) Effets du nyctémère

Dès 1974 en effet, au cours de la campagne GATE (Gerlotto, 1975), le domaine hauturier était exploré et des enregistrements acoustiques de micronecton réalisés sur une radiale comprise entre 2°N et 2°S sur le méridien 10 W. Des pêches d'identification au chalut étaient réalisées dans ces couches et les migrations nyctémérales de ces mésopélagiques étudiées. Il y a en particulier été montré que dans ces couches diffusantes, au moins deux populations cohabitaient qui se distinguaient par leur comportement migratoire. Il y a aussi été montré un affaiblissement de la force des échos durant la phase ascensionnelle

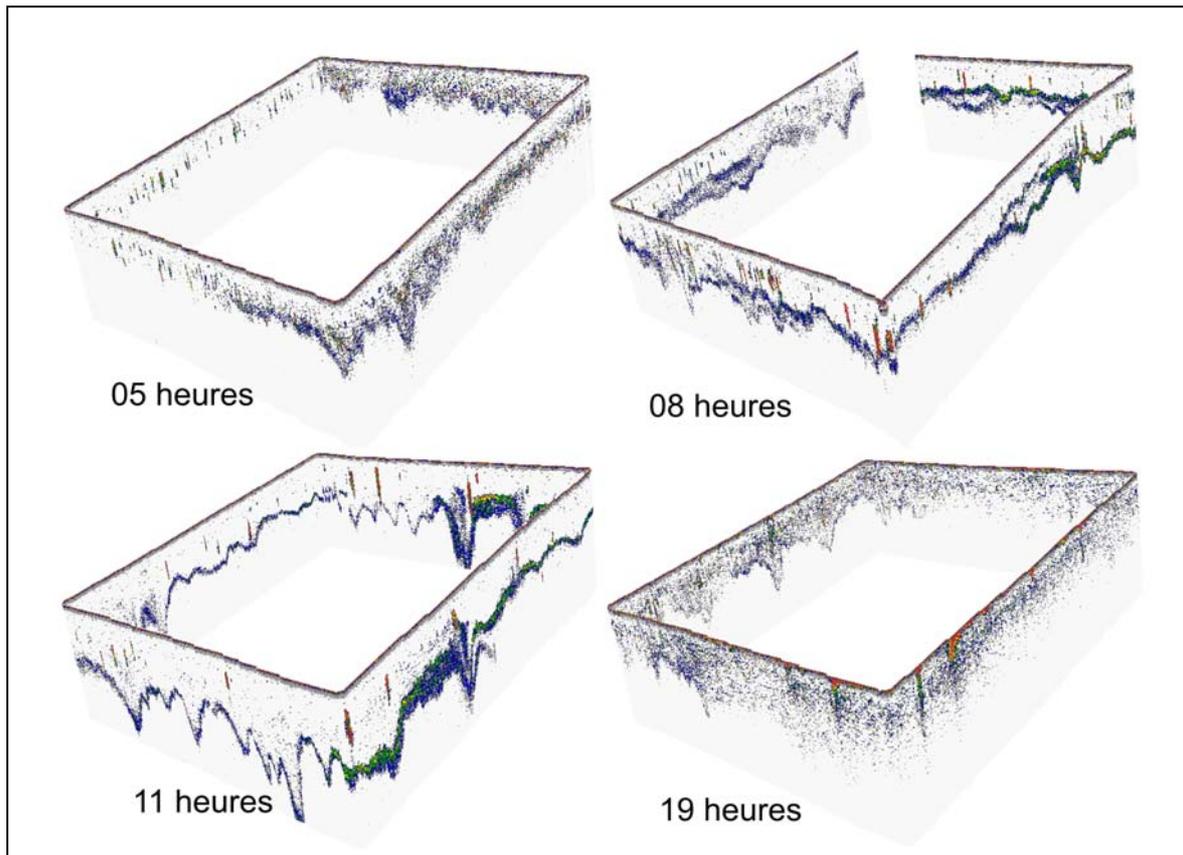
indiquant par là que « l'ampleur des échos peut être indépendant de la biomasse réelle des animaux à certaines périodes de la journée », sans toutefois qu'une explication y soit apportée. Il a aussi été montré que de nuit la position bathymétrique de ces couches était dépendante de la position de la thermocline. Un lien entre les données environnementales (température de l'eau) et l'abondance de mésopélagiques était donc dès cette époque établi par l'IRD en milieu tropical.

Au large, les périodes de l'aube et du crépuscule sont des moments de spectaculaires migrations bathymétriques de la DSL, constituée d'espèces mésopélagiques, qui remontent de fonds de 400 à 600 mètres vers les 100 premiers mètres sous la surface. Inversement, peu avant l'aube, cette couche redescend et se cantonne durant la journée sur des fonds de 400 à 600 mètres. Les bancs denses ne sont pratiquement présents que de jour : de nuit ils se diluent dans la couche de surface avant de se reconstituer de jour dans des sondes comprises généralement entre 150 et 300 mètres.



**Fig. 43 :** Exemple d'échogramme illustrant la descente de la DSL à l'aube. On constate que les échos denses présents dans les 100 premiers mètres entre les séquences 5 et 15 on disparu au-delà de la séquence 20. Dans le même temps, les échos inclus dans la couche 400 à 600 mètres se densifient. La descente des organismes, en 2 vagues principales dans cet exemple, est clairement visible. Des bancs denses, très rares de nuit, apparaissent de jour ; ils sont visibles entre 100 et 200 mètres avant la séquence 25. (campagnes ECOTEM, Canal du Mozambique, Lévénéz, US004-IRD.).

En zone plus côtière, on observe des comportements similaires des populations pélagiques, avec une dilution des bancs la nuit et une reconstitution de ceux-ci dès l'aube. La fig. 44 représente quelques échogrammes caractéristiques du changement de structuration spatiale des anchois, du crustacé *Munida* et du plancton en fonction des variations nycthémérales de l'éclairement. De nuit, à 05 et 19 heures les échos sont diffus dans la couche de surface tandis que de jour, à 08 et 11 heures les bancs compacts d'anchois se distinguent nettement au dessus d'une couche dense et continue de *Munida*.



**Fig. 44 : Vision en 3D d'une prospection acoustique en 'carré' (2 milles nautiques de large, 50 m de haut) durant la nuit (05 et 19 heures) et le jour (08 et 11 heures). On note que durant la nuit l'ensemble des communautés (plancton, anchois et un cructacé pélagique, la munida) sont dispersées en surface. De jour les anchois forment des bancs denses (taches rouges), les munitas migrent verticalement jusqu'à la profondeur de l'oxyclyne et forment des couches denses, alors que le zooplancton se disperse et migre en profondeur (il est alors moins observable). (D'après Mariano Gutiérrez, IMARPE, Bertrand *et al.*, IRD, ICES 2005).**

3-3-1-2) Les déplacements à petite échelle (comportement alimentaire, etc...)

Les déplacements liés au comportement alimentaire ont pu être mis en évidence par utilisation combinée de marques acoustiques et de sondeurs.

Il est probable qu'à l'IRD, la première expérimentation de marquage acoustique a eu lieu au Sénégal en 1981 lors de l'année internationale du listao. Deux listaos ont été marqués et suivis respectivement pendant 44 heures et 19 heures (Lévénéz, 1981). Les marques étaient à cette époque de taille considérable (11 x 1,6 cm) par rapport à la taille des poissons (55 et 53 cm... Il avait été décrit que le listao était peu actif en eaux froides mais pouvait se déplacer à plus de 4 nœuds en eaux chaudes, qu'il pouvait se déplacer sur près de 100 km à la vitesse moyenne de 2,1 nœuds en faisant des trajets l'éloignant puis le ramenant au point où il avait été marqué, qu'il pouvait plonger jusqu'à atteindre des eaux de température inférieure à 14°C, avec un record à 9,5°C qui correspond à une profondeur supérieure à 400 m où le taux d'oxygène est seulement de 1,5 ml/l ! Un comportement de « poisson d'épave » avait aussi été noté lorsque le poisson s'est mis sous le bateau et qu'il a été possible de le faire suivre le bateau dans une direction fixée. Le poisson avait à ce moment reproduit un

comportement que mettront à profit les canneurs basques pour garder quelques semaines les mattes de thons sous leurs bateaux, arrivant même à se transmettre les mattes d'un bateau à l'autre !

Ce type d'expérimentation a été largement complété durant le programme ECOTAP mené par l'IRD en Polynésie française entre juillet 95 et août 97. Parmi les nombreux objectifs de ce programme trouvent place des études du comportement des thons, en particulier de leurs déplacements horizontaux et verticaux ainsi que de leur relation trophique avec la couche diffusante profonde (DSL : deep scattering layer).

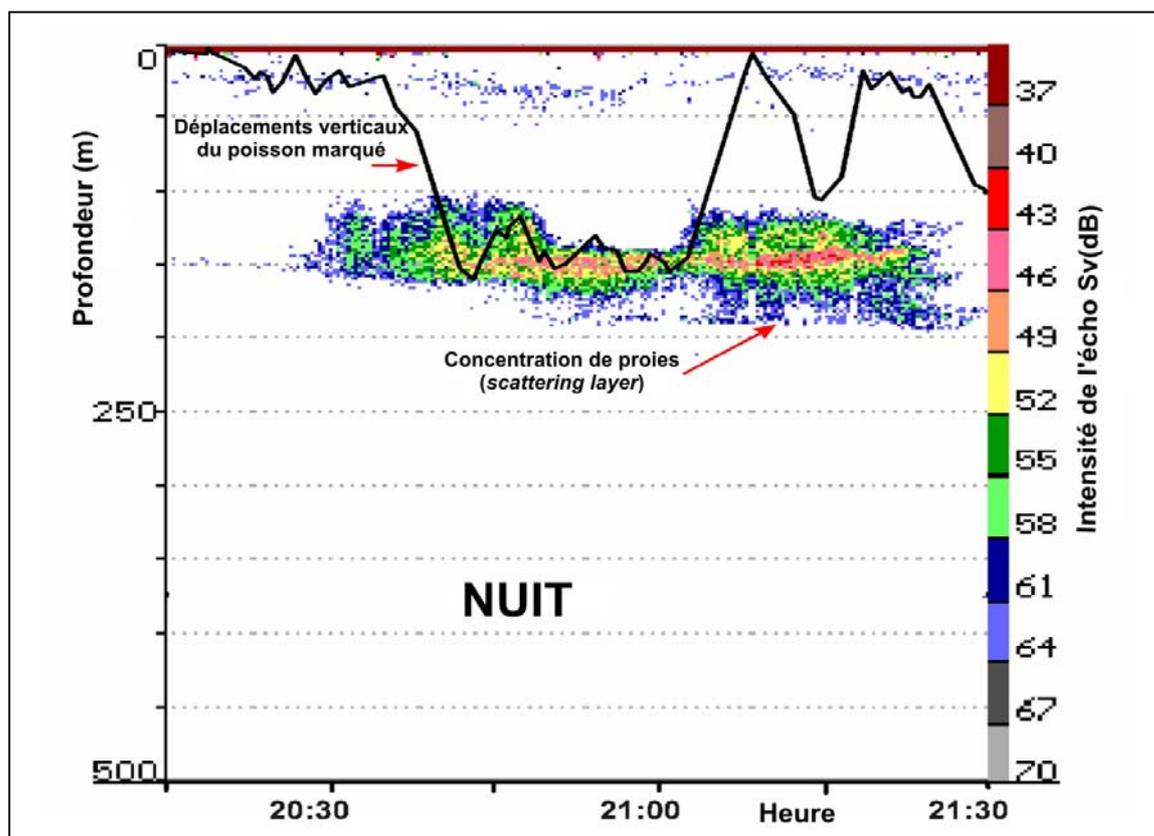
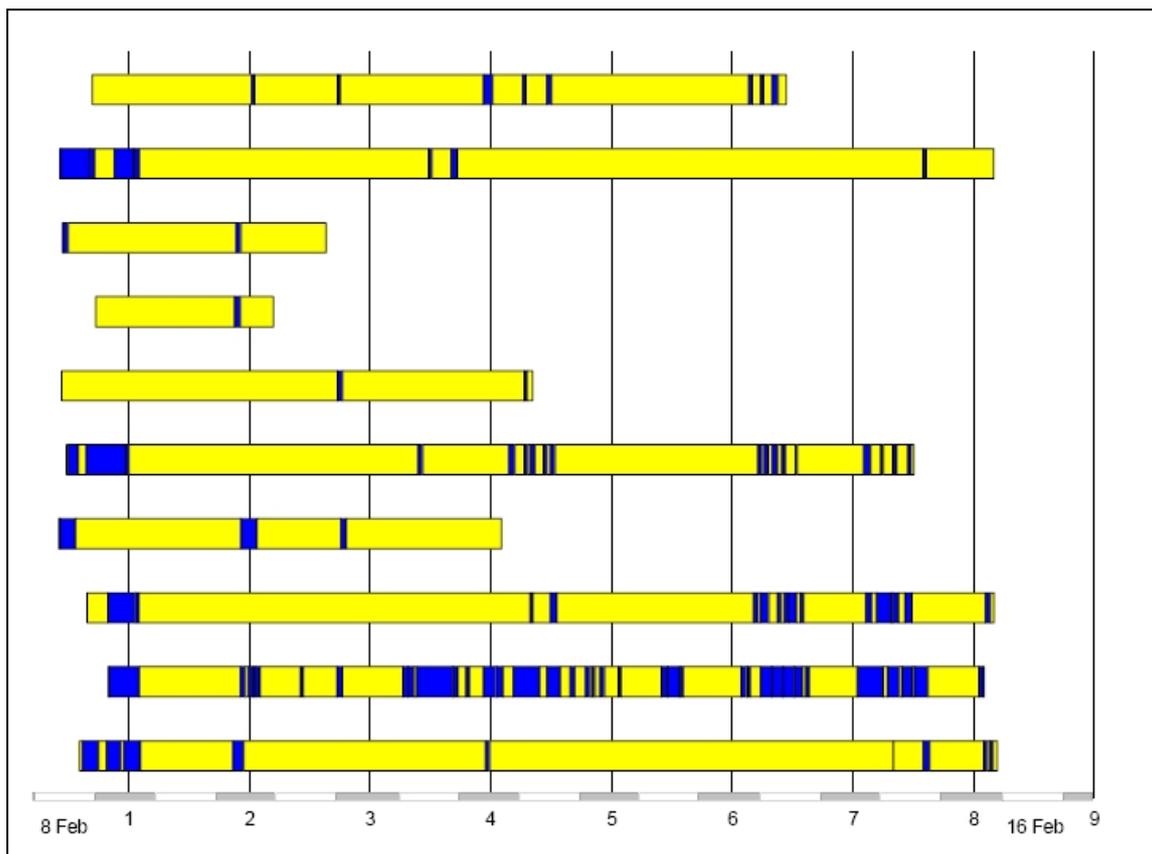


Fig. 45 : Migrations verticales d'un albacore en relation avec le positionnement bathymétrique de ses proies (campagnes ECOTAP, Josse, US004-IRD).

L'illustration ci-dessus montre clairement les mouvements verticaux d'un albacore ou « thon à nageoires jaunes » (*Thunnus albacares*) qui, de la surface, descend à 150 mètres pour s'alimenter dans un agrégat de poissons fourrage.

Les déplacements naturels autour d'un DCP ont été étudiés grâce à des marquages acoustiques.



**Fig. 46 : Comparaison des temps de présence (jaune) et d'absence (bleu) de 10 coryphènes marquées autour d'un DCP (Fadio 2005, IRD)**

L'utilisation de marques acoustiques permet d'étudier le comportement des poissons (Fadio, 2005). Ce graphique représente le comportement de 10 coryphènes autour d'un DCP, indiquant leurs moments de présence (jaune) et d'absence (bleu), permettant ainsi de savoir combien de temps les poissons restent à proximité du DCP, à quelle heure ils s'en éloignent etc... Ces études sont importantes pour comprendre les effets de l'attractivité des DCP et d'évaluer par exemple leurs conséquences, bénéfiques ou non, sur l'exploitation durable des espèces pélagiques hauturières.

### 3-3-2) Comportement induit par les activités humaines

Les travaux EICHOANT (Évaluation de l'impact du Comportement en Halieutique sur les Observations Acoustiques en milieu Naturel Tropical) menés dès 1987 par l'ORSTOM aux Antilles françaises et au Vénézuella avaient pour objectifs de comprendre et mesurer le comportement des poissons face à différents stimuli, puis d'en déduire (et éventuellement corriger) les biais induits par ces comportements dans les mesures par acoustique.

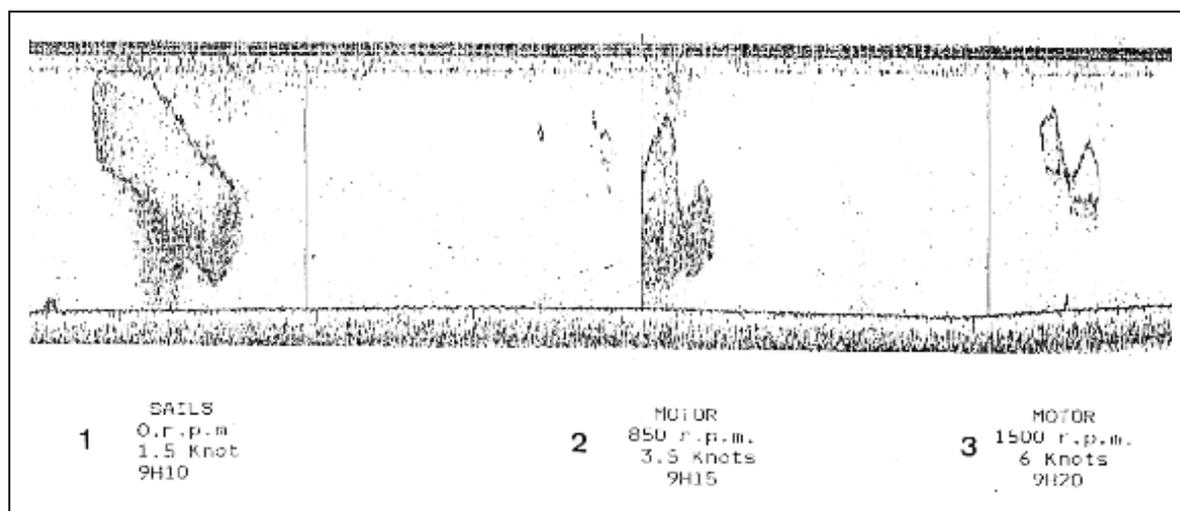


Fig. 47 : Exemple d'échogrammes d'un même banc de poisson insonifié successivement au sondeur vertical par un même bateau naviguant à la voile (1) puis au moteur (2 et 3) (d'après Fréon, Soria, Gerlotto, IRD, 1990)

L'effet du bruit du moteur sur le comportement du poisson est bien mis en évidence sur cet exemple. En 1 le banc n'a probablement pas (ou seulement peu) été effrayé par le bateau naviguant silencieusement sous voile et il occupe beaucoup de volume tandis que son sommet reste très près de la surface. Sur les échos suivants, on note que le bruit du moteur a fait plonger le sommet du banc et a provoqué une compaction du banc d'autant plus grande que le régime moteur était élevé et que le bateau arrivait vite. Ce phénomène également été mis en évidence dans les eaux tempérées, par Diner et par Misund dans les années 80.

Le comportement de fuite verticale décrit ci-dessus peut s'accompagner d'un comportement de fuite horizontale.

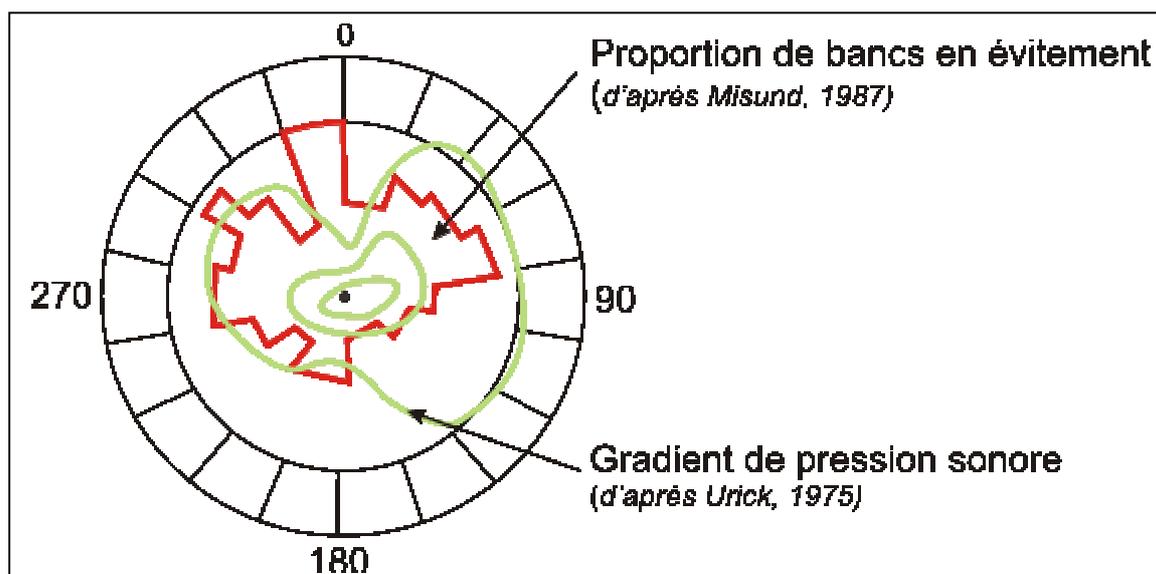


Fig. 48 : Relation entre bruit du navire et évitement des bancs (d'après Misund, 1987)



Fig. 50 : Exemple de l'effet de l'éclairage d'un bateau de recherche lors d'une prospection nocturne : lorsque les lumières sont allumées (A) la couche de poisson déserte le premier tiers de la colonne d'eau et s'étend pratiquement jusqu'au fond, tandis que lorsque les lumières sont éteintes (E) les poissons se situent plus près de la surface et sont absents de la moitié la plus profonde de la colonne d'eau.(d'après Lévénéz, Gerlotto, Petit, IRD, 1987).

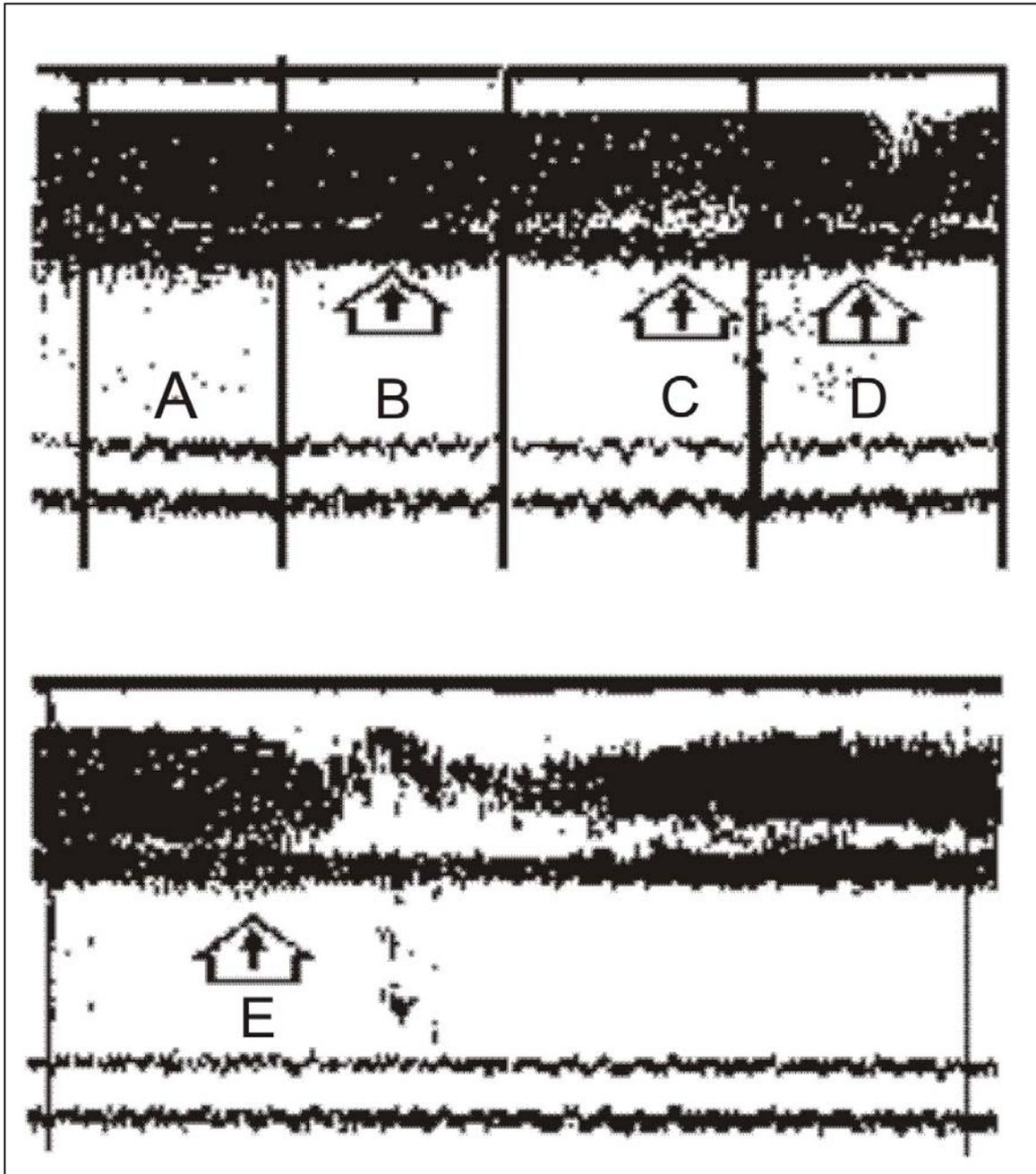


Fig. 51 : Effets combinés de l'éclairage et de la vitesse d'un bateau sur la distribution de poissons en Baie de Gorée, Sénégal. (Lévénéz *et al.*, 1990, IRD)

Cette expérience réalisée de nuit au Sénégal (Lévénéz *et al.* 1990) montre l'influence de la lumière d'un bateau sur le comportement des poissons. Un bateau assistance gérait l'équipement acoustique et avait déporté d'une trentaine de mètres un transducteur tout près

duquel passait un bateau de recherche. En **A**, est représentée une situation « naturelle » stable avec des échos de poissons situés entre le transducteur et environ 1 à 2 mètres du fond. Lorsque le bateau de recherche, toutes lumières éteintes, passe près du transducteur à vitesse lente **B** ou rapide **C**, il n'y a pas de changement significatif dans l'allure de l'échogramme, ce qui signifie que le poisson est peu dérangé. Au contraire, lorsque le bateau lumière allumée passe à 8 nœuds, on constate **D** que dans près de la moitié supérieure de la colonne d'eau les poissons ont disparu et lorsque le bateau passe à vitesse réduite (0,5 à 1 nœud) **E** une énorme réaction des poissons est perçue sur l'échogramme.

Ces mêmes auteurs ont par la suite démontré au Sénégal puis au Venezuela que la lumière d'un bateau de recherche en prospection faisait plonger les poissons ce qui biaisait les estimations de biomasses. La conséquence pratique est que depuis lors, au moins sur les côtes d'Afrique, les prospections nocturnes se font avec le minimum de lumières apparentes sur les bateaux de recherche.

On donc vu la les effets immédiats d'un éclairage sur les poissons qui sont effrayés par le brusque changement d'intensité lumineuse dans leur milieu.

Cela ne les empêche nullement lorsque l'éclairage est fixe de s'y habituer et même pour leur malheur de s'y concentrer, ce qui naturellement réjouit les pêcheurs au lamparo.

### 3-4) Approches écosystémiques

3-3-1) Les résultats des campagnes « ECOTAP » et de travaux qui s'en sont inspiré

De manière plus large, l'habitat et le comportement alimentaire des thons ont pu être décrits en Polynésie française au cours des campagnes ECOTAP grâce à l'emploi combiné de sondeur scientifique, de marques acoustiques et de pêches (palangres etchalutages).

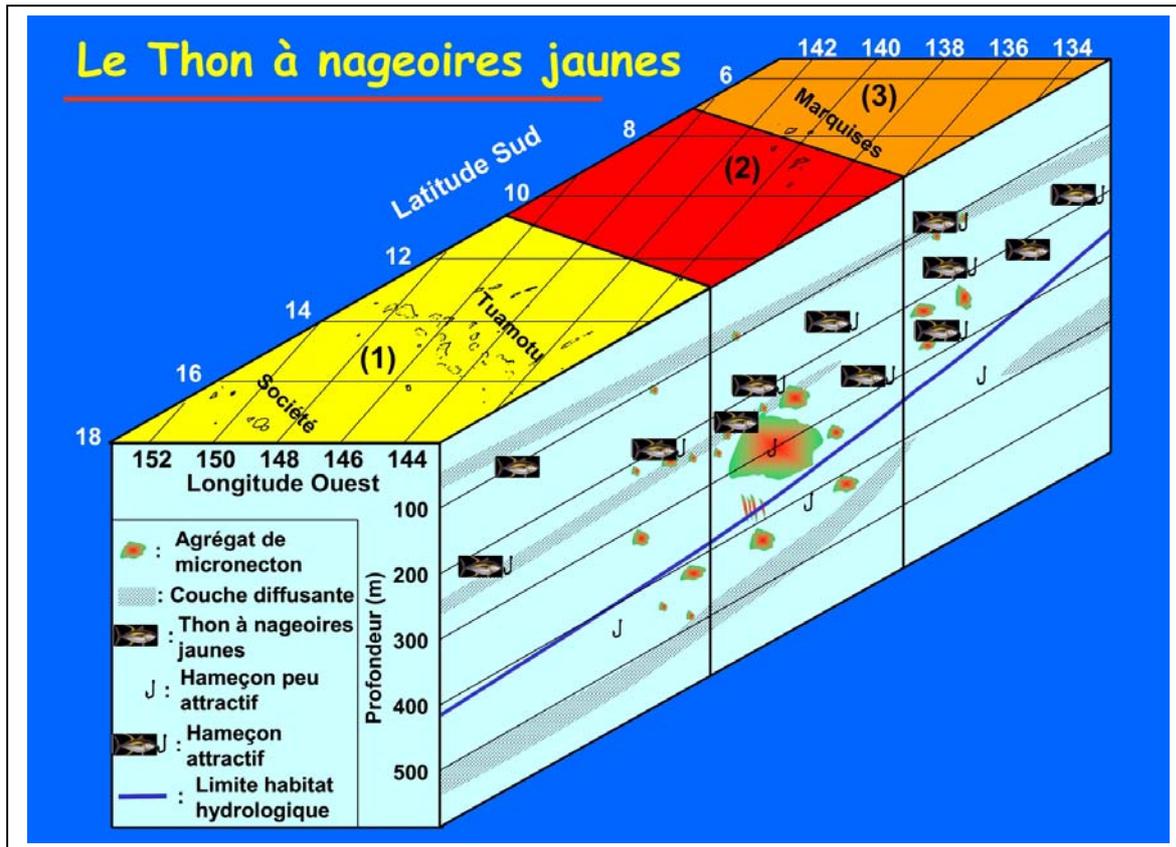


Fig. 52 : Schéma synthétique 3D (latitude, longitude, profondeur) de l'habitat des thons à nageoires jaunes (*Thunnus albacares*) en ZEE française de Polynésie, en relation avec la distribution des proies (IRD, campagnes ECOTAP, thèse A. Bertrand, 1999).

Cette illustration extraite de la thèse d'Arnaud Bertrand (1999) synthétise le comportement du thon à nageoire jaune dans son habitat polynésien tel qu'analysé à partir des données acoustiques de sondeurs et de marques associées aux données de captures à la palangre.

A. Bertrand y constate que la « corrélation entre ses rendements et la quantité globale de proies est plutôt positive quelle que soit l'échelle d'observation.

Le thon à nageoires jaunes est une espèce qui se nourrit principalement dans les premières centaines de mètres. De ce fait, dans la journée, ces thons restent dans les couches superficielles alors que la majorité du micronecton migre vers de plus grandes profondeurs. Même en cas de forte abondance globale en micronecton, la compétition entre l'appât et le micronecton est probablement assez faible aux profondeurs où les thons à nageoires jaunes se nourrissent. Cette hypothèse est discutable en zone 3 où une partie du micronecton est "bloquée" dans les strates superficielles par la présence d'eaux désoxygénées vers 250 m de profondeur. Cependant, en zone 3, les densités en proies ne doivent jamais atteindre des densités suffisantes pour entrer en compétition avec les appâts.

Le thon à nageoires jaunes est donc plus abondant dans les régions où les proies sont abondantes et accessibles et c'est dans ces mêmes zones que l'on peut le capturer le plus facilement ».

3-3-3) Les nouvelles voies ouvertes par l'acoustique multifréquentielle (texte et figures d'après A. Lebourges-Dhaussy, US004, IRD)

Les acousticiens se sont très vite aperçu que la TS d'un poisson ou d'une cible n'était pas une valeur absolue caractérisant cette cible ou ce poisson, mais que c'était une variable dépendant de la taille de la cible et de la fréquence acoustique utilisée.

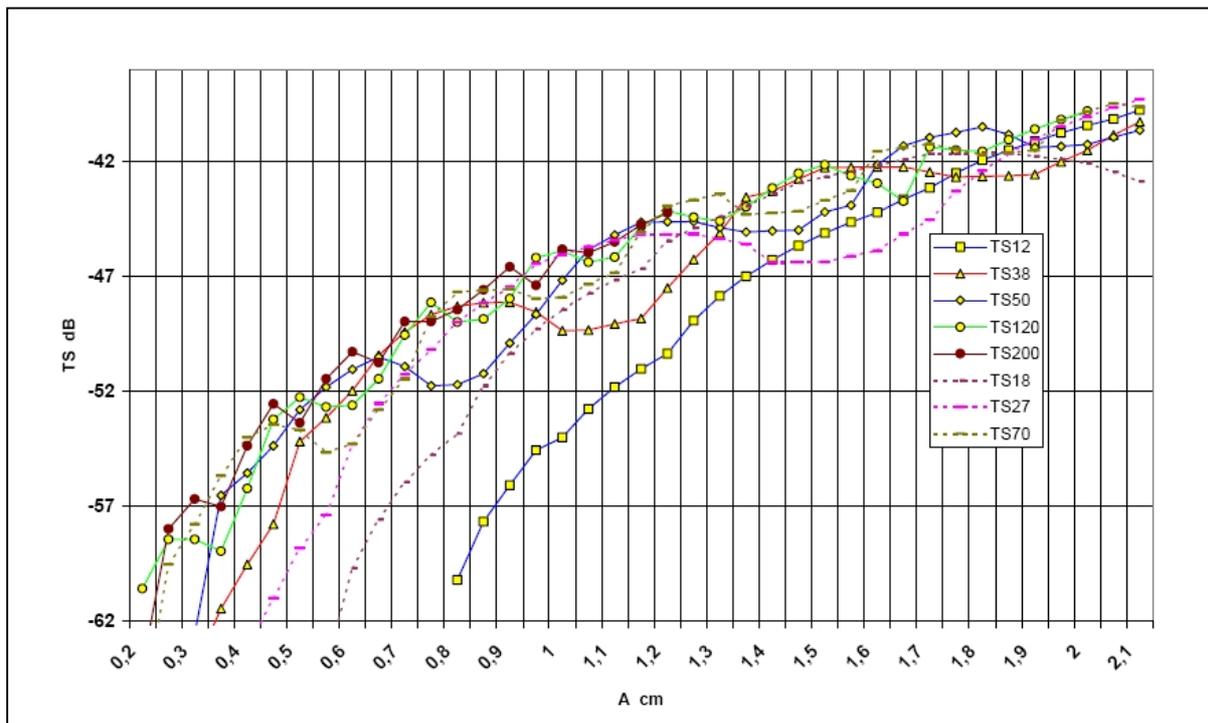


Fig. 53 : Exemple de variation de la TS d'une sphère en fonction de son diamètre et selon la fréquence utilisée (SIMFAMI, doc. Lebourges Dhaussy, US004-IRD)

Il est ici aisé de remarquer que pour des cibles de 0,8 cm de rayon par exemple, la TS diffère d'une dizaine de dB selon la fréquence acoustique utilisée.

Dans le domaine des organismes vivants, la même théorie s'applique et il est aisé de remarquer que les échogrammes simultanés enregistrés à différentes fréquences peuvent grandement différer les uns des autres.

Par exemple si on observe les échogrammes publiés par Korleliussen et Ona en 2000, il est évident au premier regard que les échos de population de copépodes sont plus faibles à 38 kHz qu'à 120 kHz et encore plus qu'à 200 kHz.

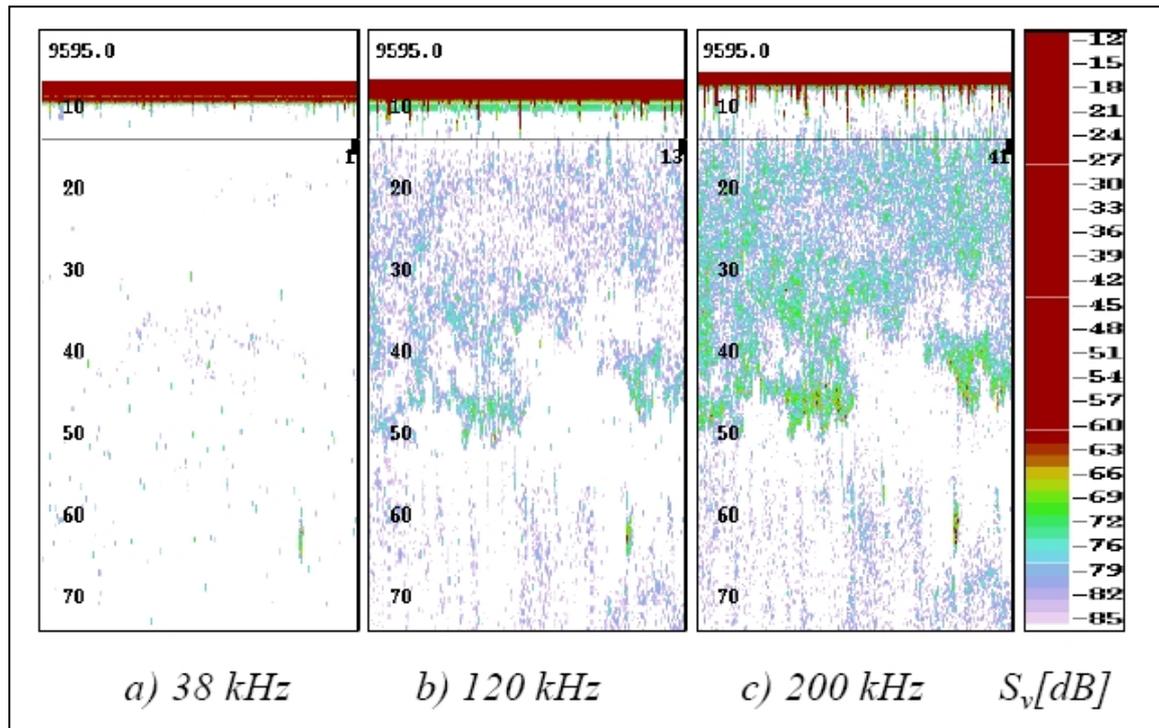
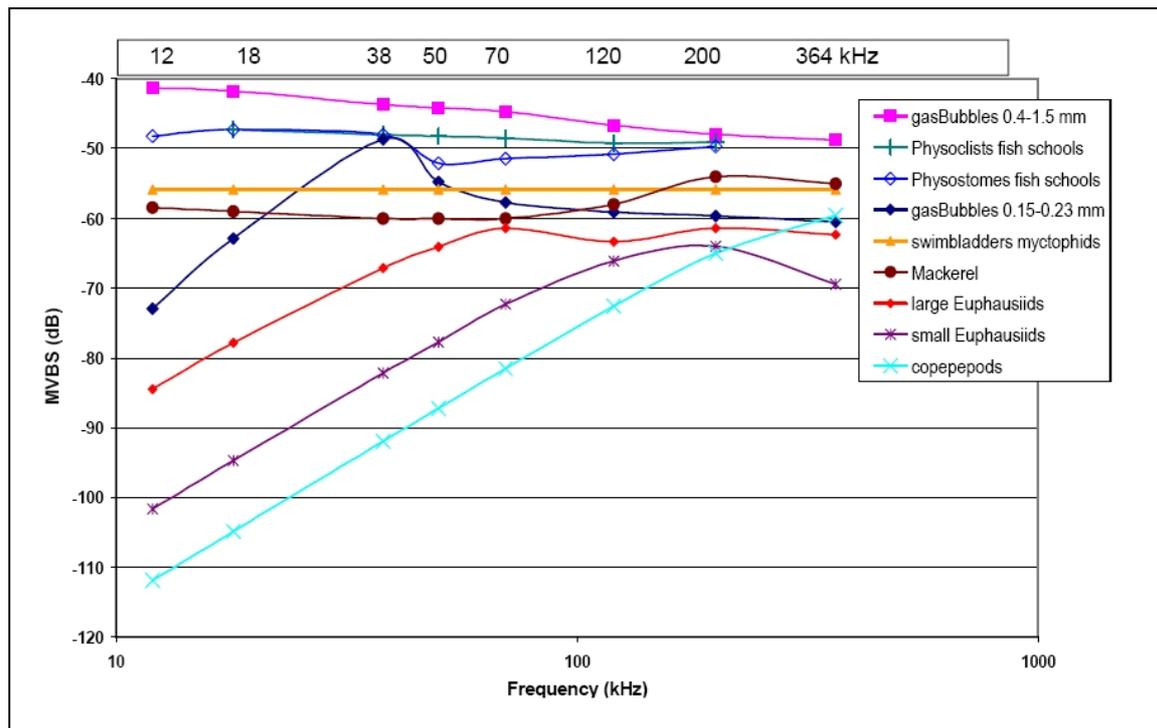


Fig. 54 : Exemples d'échos de populations de copépodes observés à 3 fréquences différentes (Korneliussen et Ona, 2000)

Il apparaît donc que plus on a de l'information provenant d'échos réverbérés à différentes fréquences, plus, on a une vue détaillée du milieu.

En appliquant ces théories à des mélanges d'espèces, on peut dans certain cas répartir l'énergie des échos en différentes composantes, en différents groupes de réflecteurs ayant pour particularité de présenter des réponses acoustiques différentes selon plusieurs fréquences. Une analyse multifréquentielle, combinant donc les caractéristiques de réponses fréquentielles des organismes, caractéristiques connues soit à partir de mesures soit à partir de modèles, d'attribuer l'énergie réfléchi totale à différents groupes de réflecteurs.



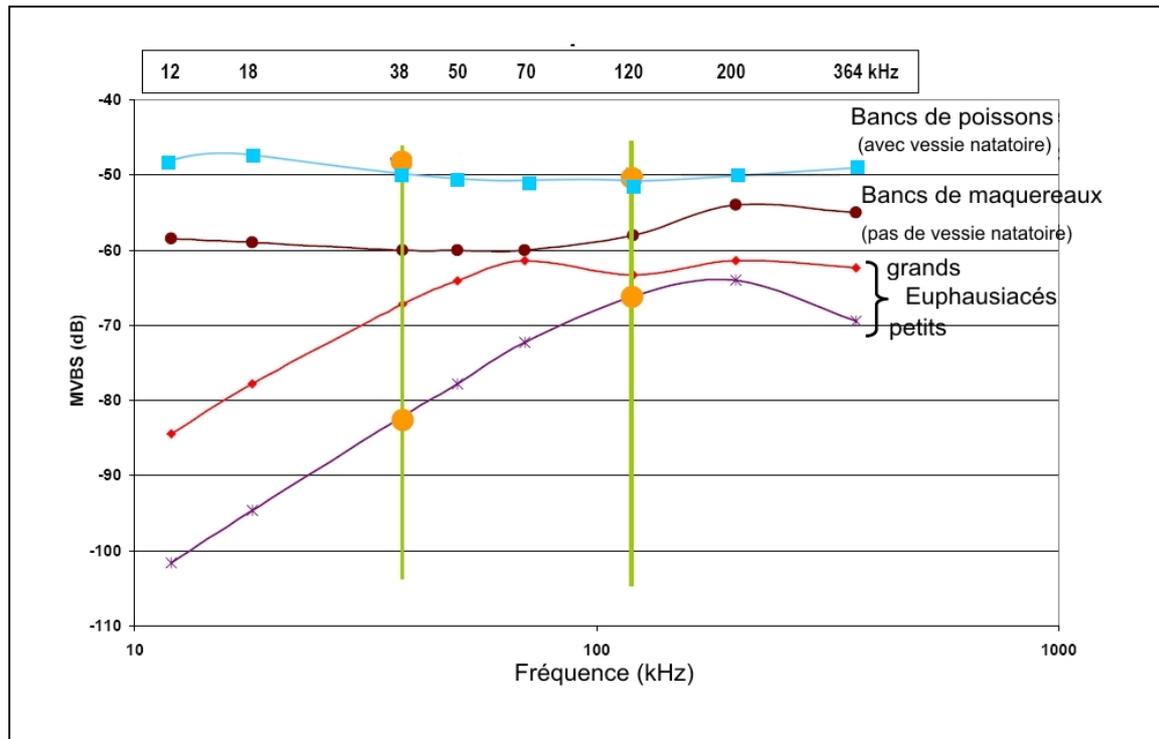
**Fig. 55 : Réverbération de volume en fonction de la fréquence pour différents groupes de réflecteurs établi soit d'après mesures pour les poissons ayant une vessie natatoire (physostome ou physoclistes), pour des poissons sans vessie natatoire (maquereau européen), soit d'après modélisation (bulles gazeuses, euphosiés, copépodes et vessies gazeuses de myctophidés. (travail issu du programme européen SIMFAMI, doc. Lebourges Dhaussy, US004-IRD).**

Ces courbes montrent bien la diversité des formes des réponses en fréquence ainsi que le potentiel d'informations qui se trouve dans le domaine fréquentiel. Il faut noter qu'elles correspondent à des populations contenant une densité d'animaux et une gamme de tailles données. Pour d'autres combinaisons densité/taille de ces mêmes groupes, les courbes seraient différentes.

Les analyses multifréquentielles de données acoustiques peuvent avoir deux types d'objectifs :

- A) une séparation globale entre détections de poissons et de plancton
- B) une classification des organismes, essentiellement planctoniques, car ceux sont eux qui contiennent le plus d'informations dans le domaine fréquentiel.

A) Séparation poisson – plancton :



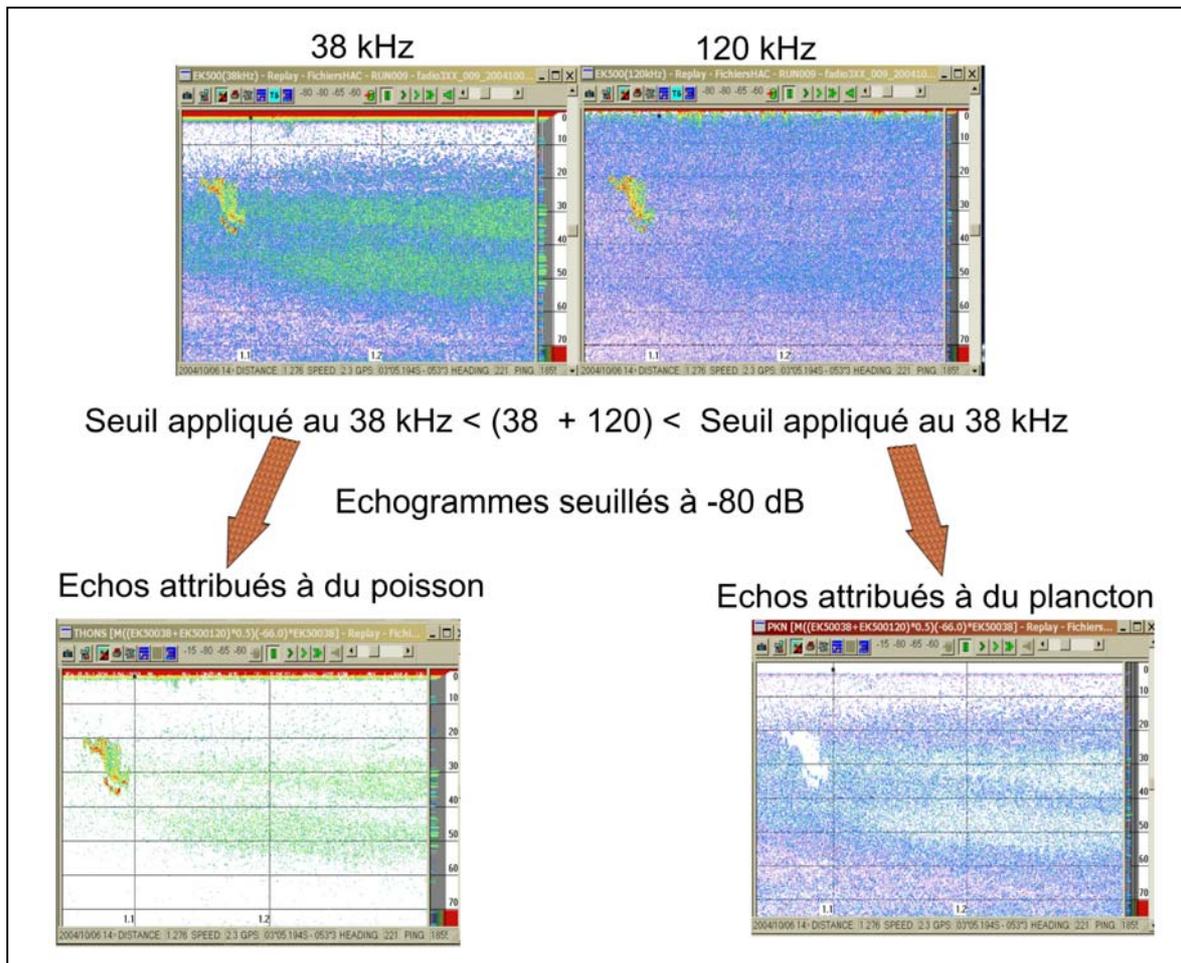
**Fig. 56 : Réponses acoustiques de groupes de poissons avec ou sans vessie natatoire et de populations « type euphausiacés » aux fréquences habituelles des sondeurs halieutiques (travail issu du programme européen SIMFAMI, doc. Lebourges Dhaussy, US004-IRD)**

En présence d'un mélange de poissons dispersés ou en bancs diffus et de couche planctonique, augmenter le seuil de traitement pour extraire les poissons de l'ensemble entraîne une sous-estimation de l'énergie réfléchi par les poissons.

Par contre une analyse simple permet de faire une séparation du poisson et du plancton, simplement en masquant les échos obtenus à une fréquence par une combinaison d'échos obtenus selon deux fréquences. Il suffit pour cela de générer un échogramme virtuel composé de la somme des Sv obtenus aux 2 fréquences de façon à accroître l'écart entre les organismes ayant une réponse proche et ceux ayant une réponse différente aux deux fréquences :

$$\text{Échogramme virtuel} = \text{Sv}(38 \text{ kHz}) + \text{Sv}(120 \text{ kHz})$$

Dans ce cas on appliquera sur l'échogramme de la fréquence de traitement choisie un « masque poisson » si l'échogramme virtuel est supérieur au seuil et un « masque plancton » si l'échogramme virtuel est inférieur au seuil.



**Fig. 57 : Exemple de résultat d'application des masques « poisson » et « plancton » à l'échogramme 38 kHz seuillé à -80 dB (doc. Lebourges Dhaussy, US004-IRD).**

## B) Classification du plancton

La méthode est plus complexe que celle de séparation poisson-plancton. Le principe reste l'exploitation simultanée des réponses acoustiques de divers organismes à un certain nombre de fréquences. Plus il y a de fréquences, plus l'information obtenue est riche. Sous réserve de l'hypothèse de linéarité des réponses, les mesures de Sv à M fréquences peuvent s'écrire :

$$Sv_1 = N_1 \cdot \sigma_{11}(\text{taille 1 ; fréq.1}) + N_2 \cdot \sigma_{12}(\text{taille 2 ; fréq.1}) + N_n \cdot \sigma_{1n}(\text{taille n ; fréq.1})$$

$$Sv_2 = N_1 \cdot \sigma_{21}(\text{taille 1 ; fréq.2}) + N_2 \cdot \sigma_{22}(\text{taille 2 ; fréq.2}) + N_n \cdot \sigma_{2n}(\text{taille n ; fréq.2})$$

...

...

$$Sv_m = N_1 \cdot \sigma_{m1}(\text{taille 1 ; fréq.m}) + N_2 \cdot \sigma_{m2}(\text{taille 2 ; fréq.m}) + N_n \cdot \sigma_{mn}(\text{taille n ; fréq.m})$$

les Sv étant les mesures des coefficients de rétrodiffusion de volume pour chaque fréquence, les  $\sigma(\text{taille};\text{fréq})$  étant les sections de rétrodiffusion individuelles des organismes qui dépendent du choix d'un modèle de réponse en fréquence des organismes. On pose en entrée un vecteur de tailles et la résolution se fait (via un algorithme d'inversion conçu par Greenlaw 77 et 79, Greenlaw et Johnson 83, Holliday et Pieper 80, Pieper et Halliday 84) pour les inconnues  $N_m$ , c'est-à-dire les abondances correspondant à chaque taille.

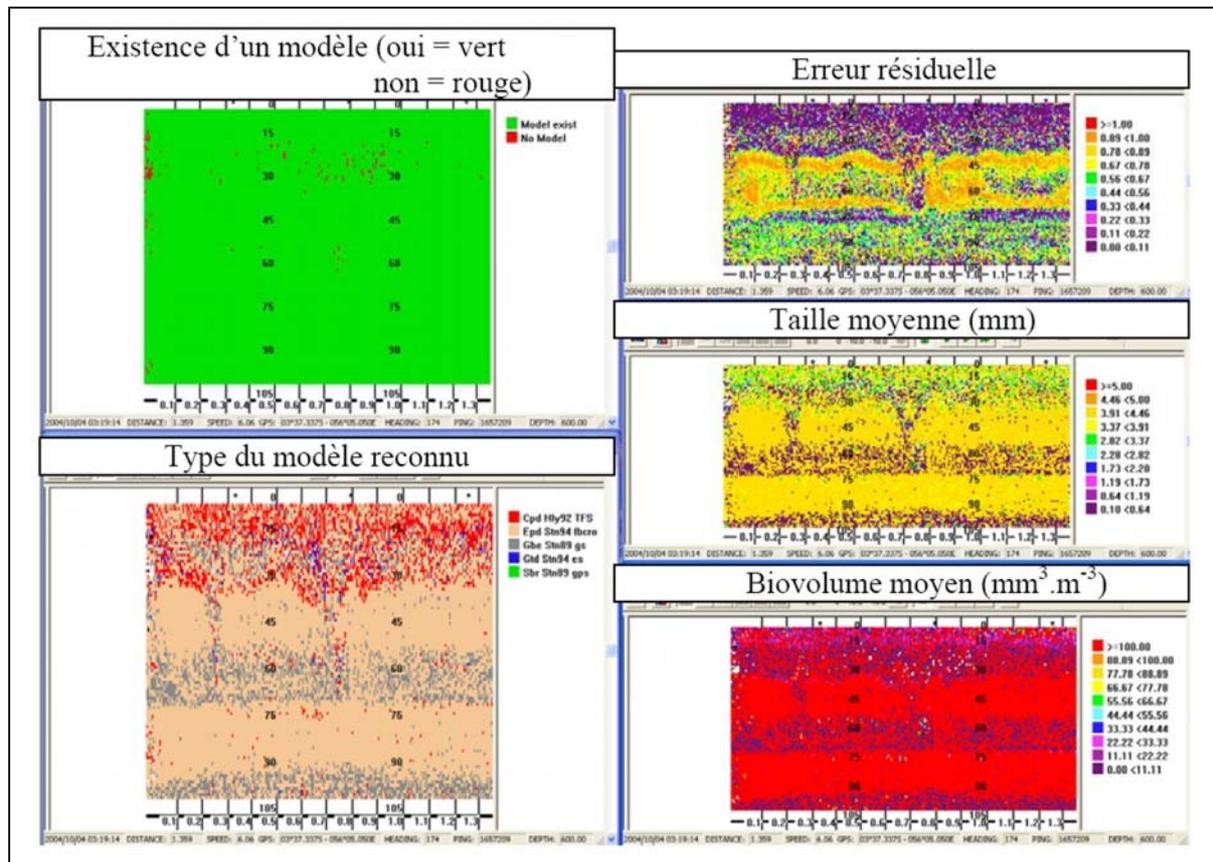


Fig. 58 : Exemple de résultat de classification de plancton à partir de données multifréquences TAPS d'Atlantique équatorial (données A. Lebourges Dhaussy, US004, IRD)

Les 5 échogrammes issus du traitement précisent s'il existe un modèle correspondant aux données, l'erreur résiduelle qui quantifie la précision de l'ajustement du modèle, la taille moyenne des organismes, la biovolume moyen et le type de modèle reconnu. Dans ce dernier échogramme, les modèles reconnus correspondent à des couleurs : copépode = rouge, euphausiacés = rose, bulle gazeuse = gris, gastropode = bleu, ellipsoïde gazeuse = vert.

## CONCLUSION

L'utilisation de l'acoustique continue son extraordinaire croissance dans le monde scientifique, mais aussi civil et militaire. C'est actuellement le seul moyen aisé d'explorer le monde sous-marin car faibles sont les contraintes de pénétration du son dans l'eau. Les avancées méthodologiques et technologiques rendent sondeurs et sonars de plus en plus performants, ouvrant ainsi de nouvelles voies applicatives pour la recherche, et c'est le cas des études multifréquentielles qui connaissent un développement croissant dans le monde scientifique.

L'acoustique halieutique est aussi de plus en plus utilisée dans le monde, plus spécialement pour évaluer les biomasses de poissons. Cette technologie basée sur l'intégration des échos offre de nombreux avantages dont une bonne couverture bathymétrique, une production rapide des résultats, une indépendance des données de la pêche commerciale, et de plus

c'est une méthode non-intrusive, ne détruisant pas les milieux biotiques ni abiotique et donc respectant l'environnement.

Les préoccupations de sauvegarde de l'environnement, de préservation des écosystèmes ayant un poids social croissant, l'acoustique halieutique a complété son éventail applicatif en s'intéressant aux études des écosystèmes puis aux nouvelles approches écosystémiques de gestions des pêcheries.

La nécessité d'une telle approche, qui prend en compte le maximum de paramètres ayant une influence sur les écosystèmes

- activités humaines : pression de pêche, autres activités humaines (pétrole, loisirs, militaire, pollutions...)
- environnement abiotique (substrat, physicochimie, évolutions climatique)
- environnement biotique (production primaire et secondaires, prédateurs de différents niveaux trophique que ce soient des invertébrés, des poissons, des oiseaux, des mammifères etc...)
- autres...

est maintenant largement intégrée dans les préoccupations scientifiques et très fortement souhaitée par les politiques et les usagers.

Les enjeux sont nombreux. Il s'agit d'améliorer la précision des estimations d'abondances d'espèces exploitées ou non, de mieux chiffrer les capacités des milieux à supporter des agressions et à se reconstituer. Il s'agit aussi de mettre en place des politiques d'aménagement du milieu. Il s'agit encore de mettre en place des politiques et des réglementations de gestions des ressources et des pêcheries sur du moyen ou long terme, par opposition aux pratiques actuelle d'attribution de quotas année après année qui ne laissent ni aux politiques ni aux entrepreneurs de vision dans la durée sur leurs activités. Ces enjeux qui chez nous prennent une dimension et un poids chaque jour plus importants, sont à l'évidence encore plus cruciaux dans les pays du sud.

Les enjeux sont donc nombreux et d'importance capitale ; nul doute que l'acoustique, et notamment l'acoustique halieutique, occupera un terrain croissant dans le futur. L'IRD y tiendra sa place.