

CHAPITRE 8

LES DONNÉES ACOUSTIQUES

Jean-Jacques Levenez¹
*Centre de recherches océanographiques de
Dakar - Thiaroye (CRODT)
C.P. 2241
Dakar, Sénégal*

8.1 INTRODUCTION

L'utilisation de l'acoustique comme moyen d'observation du milieu aquatique est relativement récente puisque ce n'est qu'après la collision du *Titanic* avec un iceberg en 1912 que furent déposés les premiers brevets d' «appareils de détection de grands objets sous l'eau». La Première Guerre mondiale (1914-1918) fit apparaître l'impérieux besoin de détecter les sous-marins, et un système de localisation acoustique fut développé et baptisé sous le nom de ASDIC (Allied Submarine Devices Investigation Committee). Un grand pas fut franchi par le physicien français P. Langevin qui utilisa comme source sonore une plaque de quartz placée entre deux lames d'acier: la haute intensité sonore produite par ce générateur de sons permit la transmission sur une distance de huit kilomètres et produisit la première détection d'un écho sous-marin. Bien que l'utilisation pratique du son pour détecter des objets fût opérationnelle avant 1918, il a fallu attendre la seconde Guerre mondiale pour que l'utilisation extensive du sonar (Sound Navigation and Ranging) soit employée dans le but de détecter les sous-marins.

Pendant l'entre-deux-guerres, les sonars tombèrent dans le domaine civil et connurent une exploitation commerciale très active, notamment dans l'industrie des pêches. Le pêcheur qui le premier utilisa un échomètre pour détecter les bancs de poissons fut probablement le capitaine anglais R. Balls et dès 1935 le norvégien O. Sund écrivit «Echo Sounding in Fisheries Research».

Avec le développement de l'électronique, les systèmes de sondeurs acoustiques sont devenus de plus en plus efficaces et il est maintenant possible de détecter des objets plus lointains et plus petits; les sondeurs «haute fréquence» permettent de détecter des animaux millimétriques tandis que les sons de basse fréquence sont perceptibles à plusieurs milliers de kilomètres.

8.2 NOTIONS ÉLÉMENTAIRES D'ACOUSTIQUE

8.2.1 Ondes sonores

Le son peut être défini comme le transfert d'énergie à travers un milieu compressible au moyen des vibrations des particules élémentaires du milieu. Le type le plus simple de son est produit par une surface vibrante qui se déplace régulièrement d'avant en arrière. Dans un fluide, le mouvement des particules

¹Rattaché à ORSTOM.

est parallèle à la direction de propagation du son, et comme le milieu est compressible, ce mouvement particulaire engendre des changements de pression que l'on peut détecter à l'aide d'un hydrophone.

Dans le cas des ondes sonores planes, cette pression p est liée à la vitesse des particules de fluide u par:

$$p = \rho c u \quad [8.1]$$

où ρ = densité de fluide
 c = célérité de propagation

Le nombre de cycles par unité de temps est appelé *fréquence sonore* et s'exprime en hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde.

L'inverse de la fréquence f est la période habituellement notée T :

$$T = 1/f \quad [8.2]$$

Pour les applications au domaine de la pêche, les fréquences utilisées s'échelonnent de 20 à 500 kHz. En milieu marin, les plus répandues sont 38, 70, et 120 kHz.

8.2.2 Intensité sonore

L'*intensité sonore* se définit comme la quantité moyenne d'énergie traversant une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation du son pendant une unité de temps. L'énergie contenue dans une onde sonore se répartit en énergie cinétique provoquée par la vitesse des particules et en énergie potentielle provoquée par la compression.

À un moment donné, l'intensité sonore I_i en un point du milieu est donnée par l'équation

$$I_i = p^2 / \rho c \quad [8.3]$$

où p = différence entre la pression ambiante et la pression instantanée
 ρ = densité du milieu
 c = célérité du son

8.2.3 Propagation du son

a) Célérité du son dans l'eau

La variable C , qui désigne la vitesse avec laquelle les perturbations se propagent à travers le milieu, est appelé célérité du son et constitue le plus important paramètre acoustique du milieu.

Si on néglige la diffusion et l'absorption du son, on peut montrer que la pression et la vélocité des particules à une distance L de la source sonore sont les mêmes qu'au niveau de la source mais n'apparaissent qu'avec un délai t tel que

$$t=L/C \quad [8.4]$$

Comme l'indique la figure 8.1, C varie avec la température et la salinité de l'eau (la pression intervenant moins fortement).

On trouve dans Clay et Medwin (1977) une expression simplifiée de C en fonction des différents paramètres déjà mentionnés:

$$C=1\,449,2+4,6T-0,055T^2+0,00029T^3+(1,34-0,0107)(S-35)+0,016Z \quad [8.5]$$

où C = célérité en m/s
 T = température en °C
 S = salinité ‰
 Z = profondeur en mètre

Dans la mer, C avoisine 1 500 m/s

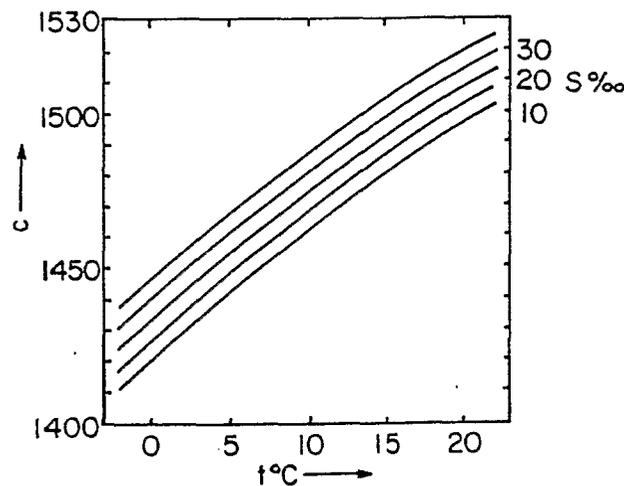


Figure 8.1 Variations de la célérité du son en fonction de la température et de la salinité (tiré de Forbes et Nakken, 1972).

b) Dispersion et absorption

On sait par expérience qu'un observateur placé près d'une source sonore entend un son plus intense qu'un autre observateur placé loin de cette source. Le fait s'explique par deux facteurs: la dispersion de l'énergie en s'éloignant de la source et l'absorption ou atténuation due à la perte d'énergie essentiellement attribuable à la friction.

Dispersion - Si une source génère des ondes sonores avec une puissance constante dans un milieu idéal, l'intensité décroît avec le carré de la distance en raison de la dispersion géométrique.

En effet, en se référant à la figure 8.2, on remarque que, quelle que soit la distance R de la source, on a:

$$P_R = I_R S_R \quad [8.6]$$

où P_R = puissance sonore
 I_R = intensité sonore
 S_R = surface de l'onde sonore à la distance R

et S_R est proportionnel à R^2 pour les sections de sphères engendrées par un angle solide.

En considérant que I_0 est l'intensité sonore à la distance de référence $R_0 = 1$ mètre et I_R = l'intensité propagée à une distance R quelconque de la source, on peut déduire de la relation précédente que:

$$I_R = I_0 / R^2 \quad [8.7]$$

L'intensité sonore décroît donc en fonction du carré de la distance R par rapport à la source.

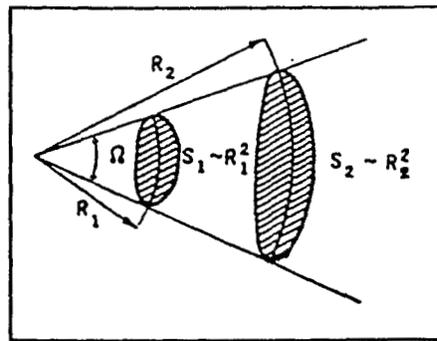


Figure 8.2 Relation intensité acoustique et distance R par rapport à la source sonore.

Absorption - Dans tout milieu physique réel comme la mer, la propagation ne se fait pas sans perte comme c'est le cas dans un milieu idéal; le son est atténué par la friction entre les particules, l'absorption d'énergie et la diffusion.

Cette atténuation de forme exponentielle est fonction de la distance R de la source.

Dans la pratique, pour ne pas s'encombrer de termes exponentiels, on utilise le taux logarithmique d'atténuation de la pression que l'on appelle coefficient d'atténuation α . Dans ces conditions, la perte d'énergie par absorption = αR et α est fortement dépendante de la fréquence utilisée et des propriétés acoustiques du milieu. Plus la fréquence est grande, plus la valeur de α est élevée, ainsi qu'on peut l'observer à la figure 8.3.

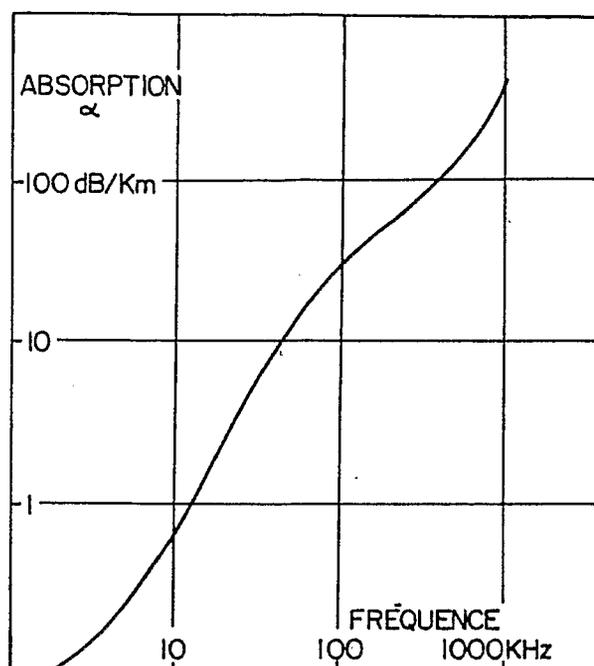


Figure 8.3 Valeur du coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence pour l'eau de mer.

8.2.4 Propriétés des transducteurs

a) Définition

On appelle *transducteur* l'appareil qui convertit une forme d'énergie en une autre. Pour transformer des signaux acoustiques en signaux électriques et vice-versa, on utilise des transducteurs électro-acoustiques. Ainsi, l'énergie électrique issue du sondeur est convertie en énergie acoustique par le transducteur (également appelé base du sondeur) et les échos sonores provenant de la réflexion du son sur un obstacle sont transformés en énergie électrique, interprétable par l'électronique du sondeur au niveau de ce même transducteur. Les principales caractéristiques d'un transducteur doivent être la linéarité et la réversibilité. Un transducteur est linéaire quand il reproduit un signal électrique de forme équivalente à l'onde acoustique qu'il reçoit et il est réversible quand il est capable de convertir de l'énergie électrique en énergie acoustique et inversement. Les transducteurs de haute précision utilisés avec de faibles énergies électriques et acoustiques sont appelés *hydrophones*. Depuis 1950, les transducteurs sont essentiellement constitués d'un élément de céramique placé entre deux fines électrodes. Si on applique un voltage entre ces électrodes, on fera modifier l'épaisseur du transducteur. Quand le transducteur est dans l'eau, ses expansions et contractions provoquent, dans le milieu, des compressions et des dépressions qui sont des ondes sonores.

b) Directivité des transducteurs

Les transducteurs utilisés en acoustique appliquée aux pêches sont directionnels, c'est-à-dire que l'intensité acoustique est maximale dans l'axe normal au milieu de la face du transducteur passant et que

cette intensité décroît quand l'angle à partir de cet axe augmente jusqu'à ce qu'on obtienne le premier 0 du diagramme de réponse (figure 8.4).

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 en outre de mieux séparer les échos de cibles rapprochées et de réduire les bruits parasites provenant d'autres directions.

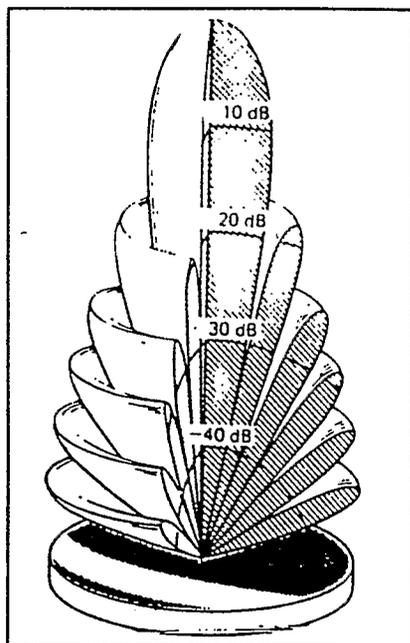


Figure 8.4
Exemple de représentation tridimensionnelle de diagramme de directivité (Eckart, 1968).

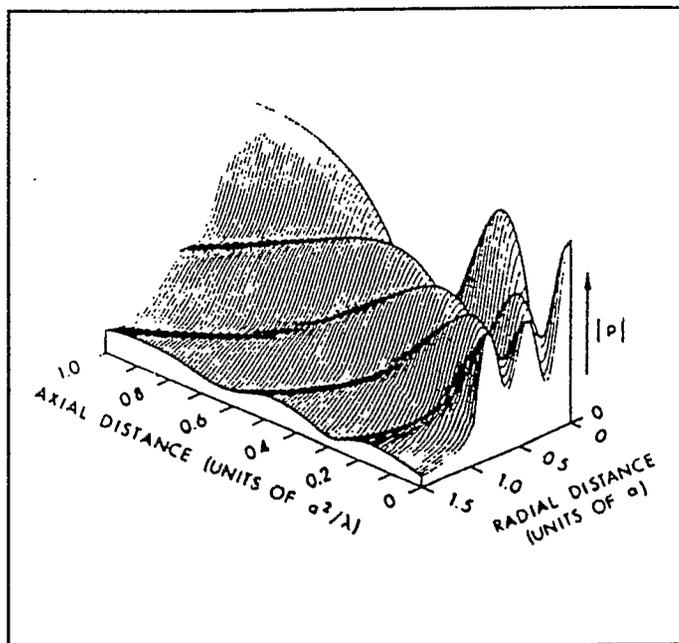


Figure 8.5
Exemple de représentation tridimensionnelle des variations de pression acoustique dans le champ proche (Lockwood et Willette, 1973).

Dans la zone proche du transducteur, des interférences (dont on peut voir un exemple à la Figure 8.5) limitent les possibilités de mesures acoustiques. Ces mesures doivent donc se faire au delà d'une distance minimale R que l'American National Standard Institute a fixée à:

$$R = A/\lambda \quad [8.8]$$

où A = surface active du transducteur en mètres carrés
 λ = longueur d'onde en mètre

La directivité des transducteurs implique que la force des échos d'une même cible dépendra de ses coordonnées angulaires (θ , φ) 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, dans les estimations

de biomasses par méthode acoustique, de corriger cet effet; à cette fin, un des trois paramètres suivant est utilisé:

- la fonction de directivité $b(\theta, \varphi)$, qui décrit dans un plan la figure 8.4 dont on calcule la moyenne;
- 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 faisceau de directivité équivalente ψ 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 (figure 8.6).

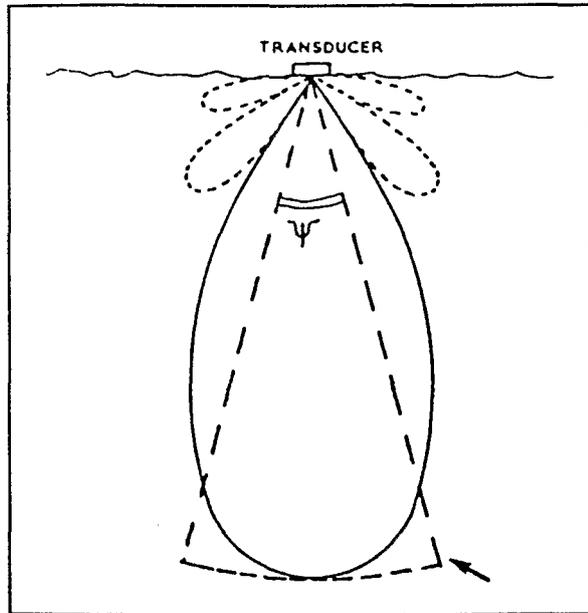


Figure 8.6 Angle équivalent à ψ

Calcul de ψ (Urick, 1975):

a) *Transducteurs circulaires:*

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

b) *Transducteurs rectangulaires:*

$$10 \log \psi = 10 \log \left(\frac{\lambda \lambda}{4\pi bc} \right) + 7,4 \text{ dB/Sr} \quad (b, c > \lambda)$$

où

λ = longueur d'onde en mètre
 a = rayon de la face active du transducteur
 b = longueur de la face active
 c = largeur de la face active

c) *Autres propriétés des transducteurs*

Le facteur de réponse en fréquence, l'efficacité, la sensibilité et l'impédance des transducteurs en sont d'autres paramètres caractéristiques importants, mais leur explication sort du cadre de ce manuel.

8.2.5 Équation du sonar actif

Cette équation est la base de l'utilisation des méthodes acoustiques. Elle comprend des termes, généralement exprimés en décibels, qui sont liés:

- aux paramètres de la propagation acoustique dans l'eau;
- aux caractéristiques du système sondeur-transducteur;
- aux propriétés acoustiques des poissons.

Une expression simplifiée de cette équation peut s'écrire:

$$EL = SL + G_1 + TS - 2TL + TVG + 2DI \quad [8.9]$$

- où
- EL = intensité du voltage en sortie sondeur
 - SL = niveau d'émission qui caractérise la pression sonore émise dans l'axe acoustique à la distance de référence 1 mètre
 - G_1 = gain (ou amplification) à la réception qui permet de rendre «utile» pour les instruments périphériques du sondeur le très faible signal électrique provenant du transducteur
 - TS = paramètre qui décrit la capacité d'une cible à réfléchir une onde acoustique vers sa direction d'origine
 - 2 TL = perte d'énergie, par dispersion et absorption, sur le trajet aller-retour de l'onde acoustique
 - TVG = gain interne au sondeur qui compense les pertes d'énergies par absorption et dispersion, quand ce gain est parfait (- 2TL + TVG) = 0
 - 2 DI = facteur de correction de la directivité de transducteur pour un trajet aller-retour de l'onde sonore.

8.2.6 Propriétés acoustiques des poissons

a) Index de réflexion acoustique ou «Target Strength»

Les recherches sur les propriétés acoustiques des poissons ont été entreprises dès le début des applications des techniques acoustiques aux estimations de biomasse des poissons.

Les expériences menées sur des poissons ayant une vessie natatoire ont montré qu'environ 85 p. 100 de l'énergie acoustique totale réfléchi par les poissons provenait de la vessie natatoire; les 15 p. 100 restants représentent la somme des énergies réfléchies par les autres parties du corps.

En ce qui concerne les estimations de biomasse, la principale propriété acoustique des poissons est son index de réflexion acoustique TS. Le TS est le facteur qui permet de convertir les densités relatives (somme des énergies acoustiques reçues au niveau du sondeur) en densités absolues exprimées en poids ou en nombre de poissons par unité de volume ou de surface.

Le TS est donc un facteur déterminant dans les estimations de biomasse et c'est malheureusement le facteur le plus difficile à mesurer ou à estimer car il dépend de plusieurs autres facteurs, dont les principaux sont:

L'espèce de poisson considérée - La présence ou l'absence de vessie natatoire, la proportion d'énergie réfléchi par la vessie natatoire, la forme générale du poisson et les allures morphologique et morphométrique de sa vessie natatoire sont des caractères spécifiques qui influent sur le TS des poissons.

La longueur du poisson pour une espèce donnée - Il existe une relation étroite entre le TS et la taille du poisson d'une espèce (ou d'un groupe d'espèces) donné; plus le poisson est grand, plus le TS est élevée. Le TS augmente avec environ le carré de la longueur, ce qui indique que le TS est liée à la surface insonifiée du poisson.

L'orientation du poisson dans le faisceau acoustique - Les poissons ont un diagramme de directivité similaire à celui des transducteurs; la quantité d'énergie qu'un poisson réfléchit vers le transducteur dépend de son orientation relative par rapport à ce dernier (figure 8.7).

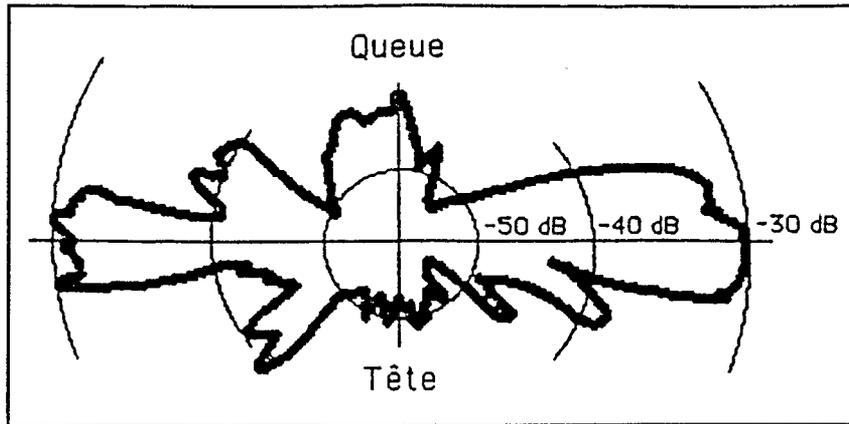


Figure 8.7 Graphique polaire typique de la variation de TS en fonction de l'angle d'insonification.

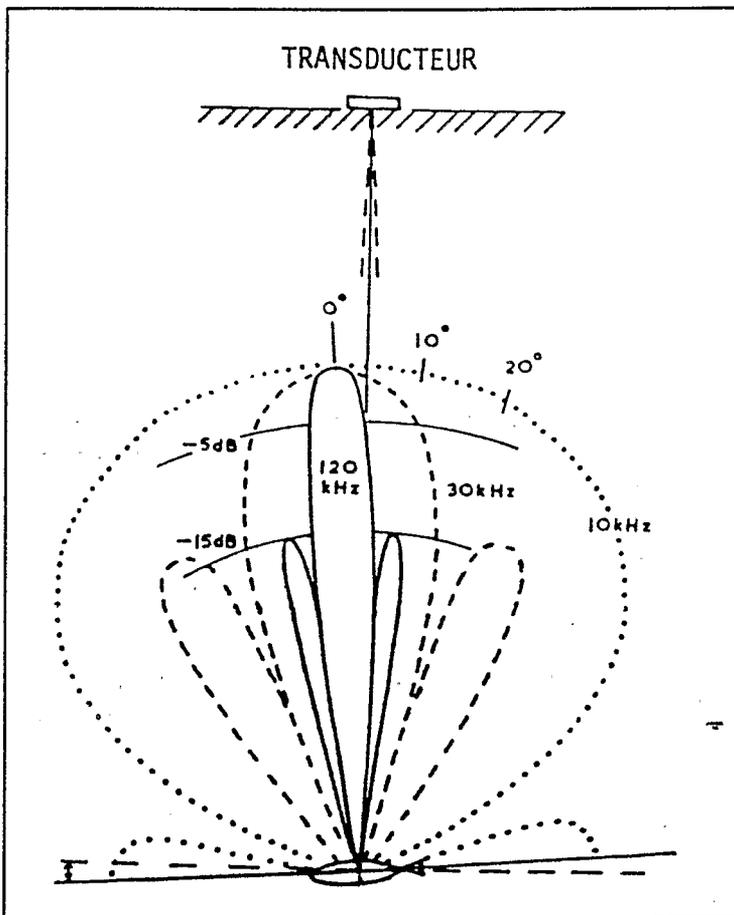


Figure 8.8 Relation entre la directivité de la réponse acoustique d'un poisson et la fréquence sonore.

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 réduite.

La fréquence influe sur la directivité de la réponse acoustique du poisson (figure 8.8). Plus la fréquence est basse, plus les lobes du diagramme de directivité du poisson sont larges et, par conséquent, moins le TS du poisson est dépendante de son inclinaison relative par rapport au transducteur.

Il faut aussi noter que pour une longueur d'onde donnée, plus le poisson est grand, plus les lobes de son diagramme de directivité seront étroits, donc plus ses changements d'orientation par rapport au transducteur entraîneront de grandes différences au niveau de son TS.

La fréquence acoustique - Le TS varie avec la fréquence; une équation d'usage répandu est celle de McCartney et Stubbs (1971):

$$TS = 24 \log L - 4,5 \log \lambda - 26,4 \quad [8.10]$$

où L = longueur du poisson en mètre
λ = longueur d'onde en mètre
TS en dB (décibels)

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. Valide quand $0,8 < 1 / L < 20$, l'équation indique qu'à 120 kHz le TS d'un poisson serait environ 2 dB supérieure à celle du même poisson insonifié à 38 kHz.

b) *Estimations et mesures des TS*

Utilisation des formules générales - Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune information sur le stock de poissons faisant l'objet d'une évaluation, le seul recours est d'utiliser une formule puisée dans la littérature. Nous avons vu précédemment celle de McCartney et Stubbs (1971).

On trouve plus récemment dans Foote (1986), une relation établie à partir de mesures, *in situ* sur du hareng, mesure également applicable aux stocks de sardinelles africains.

$$T_{Shareng} = 20 \log L - 71,2$$

où L = longueur moyenne exprimée en cm

Mesures directes de TS en milieu confiné - Le TS étant le paramètre essentiel à connaître pour estimer les biomasses par méthode acoustique, on peut considérer qu'à présent toutes les méthodes possibles pour mesurer des TS ont été essayées: poisson anesthésié, congelé, ligoté, vivant, mort, positionné dans des cages, enserré dans des cerclages métalliques, sous-tendu par des jeux compliqués de ficelles et poulies de renvoi, etc.

Parmi toutes les méthodes, citons celles qui sont encore largement utilisées et qui font appel à du poisson vivant placé dans une cage.

- *La méthode des grandes cages* décrite par Johanesson et Vilchez (1981) consiste à mettre dans une cage de volume connu un nombre croissant de poissons et pour voir directement en sortie d'intégrateur les valeurs intégrées correspondantes (figure 8.9).

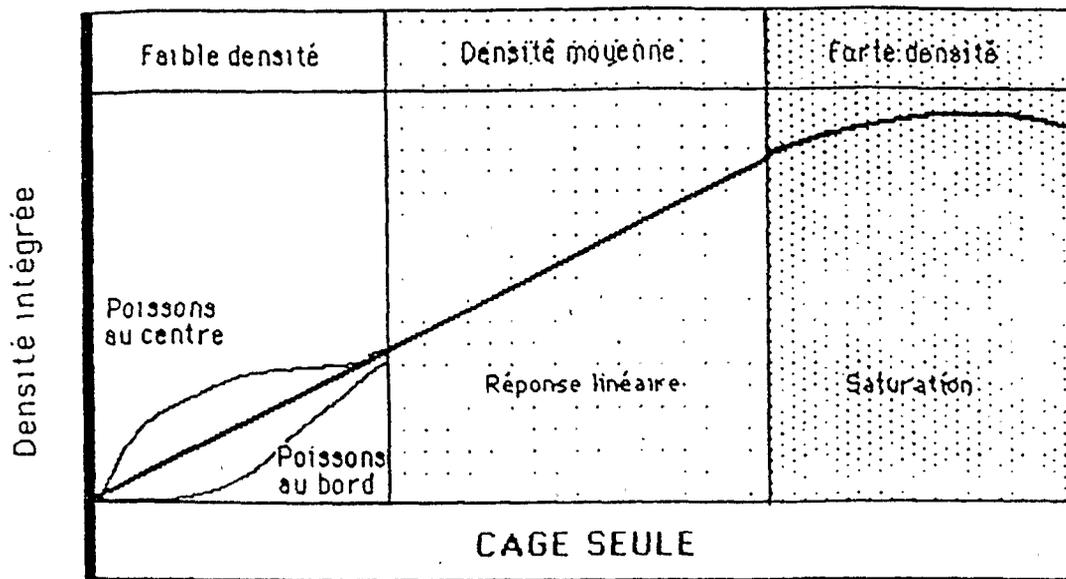


Figure 8.9 Exemple de résultats obtenus par la méthode de la grande cage.

Connaissant l'ensemble des paramètres acoustiques de l'équipement utilisé, on peut calculer le TS des poissons si l'on considère que l'écho total provenant des densités de poisson est égal à la somme arithmétique des échos individuels de chaque poisson.

Cette méthode exige que les poissons soient uniformément répartis dans la cage. La principale difficulté dans l'application d'une telle méthode est de souscrire à cette hypothèse. Elle a par ailleurs l'inconvénient de donner des mesures de poissons enfermés dans une cage, ce qui peut perturber leur comportement.

Sensible au seuil d'intégration, la méthode nécessite également une bonne connaissance de la fonction de directivité du transducteur.

Par contre, l'avantage essentiel de cette méthode est que l'on maîtrise parfaitement le milieu: on connaît parfaitement les espèces que l'on y met ainsi que leur taille, leur poids et leur nombre.

- Une variante à cette méthode est d'utiliser une *petite cage* que l'on place dans l'axe acoustique du transducteur. Un poisson y est enfermé, et son TS est mesuré directement d'après le niveau de l'écho que l'on peut lire sur un oscilloscope à la sortie du sondeur.

D'après l'équation du sonar, on a:

$$TS = EL - (SL + G_1) - G - TVG + 40 \log R + 2\alpha R \quad [8.11]$$

Cette méthode présente les mêmes inconvénients que la précédente, mais est moins sensible au seuil et élimine pratiquement les incertitudes sur la fonction de directivité dans la mesure où la cage est placée dans l'axe acoustique du transducteur. Elle est par contre très sensible à l'orientation et au degré d'activité du poisson, ces facteurs n'étant plus estompés par l'effet de moyenne que l'on a dans le système de la grande cage avec de nombreux poissons. Pour limiter l'effet de ces facteurs, on a

proposé de créer un courant d'eau dans l'environnement de la cage, courant qui force le poisson à nager régulièrement dans une direction donnée. La méthode de la cage nécessite par ailleurs que la cage soit acoustiquement transparente.

Ces méthodes en milieu confiné imposent d'avoir à chaque instant connaissance du comportement du poisson; une observation directe, par caméra vidéo sous-marine, est pratiquement indispensable.

Mesures de TS *in situ* - Ces techniques permettent de mesurer en temps réel le TS effectif des poissons telle que celle mesurée dans leur milieu au cours des campagnes d'écho-prospection. L'exposé des méthodes utilisées sort du cadre de ce manuel; mentionnons simplement qu'elles sont de deux types:

- *méthodes indirectes*, élaborées par Craig et Forbes (1969), considérant la répartition statistique des échos dans le faisceau acoustique du sondeur.
- *méthodes directes*, basées sur les techniques du dual-beam, de split-beam ou d'une combinaison des deux.

8.3 ÉQUIPEMENT

8.3.1 Sondeur et ses éléments

Le diagramme suivant nous montre les principaux éléments qui sont combinés dans un sondeur. Mis à part le transducteur et généralement les sorties, les différents éléments d'un sondeur sont montés dans un même module (figure 8.10).

Le «Trigger», ou déclencheur, fait démarrer un cycle d'émission-réception chaque fois qu'il est stimulé, soit de manière interne par l'horloge du sondeur, soit de manière externe par un autre appareil (l'échographe, par exemple).

Il fait se décharger des condensateurs (réservoir d'énergie) dans un émetteur qui donne au signal une durée t et une fréquence F généralement pilotée par quartz. Ce signal passe ensuite dans un amplificateur d'émission qui permet de régler la puissance du signal électrique qui sera envoyée sur le transducteur et transformé en signal acoustique.

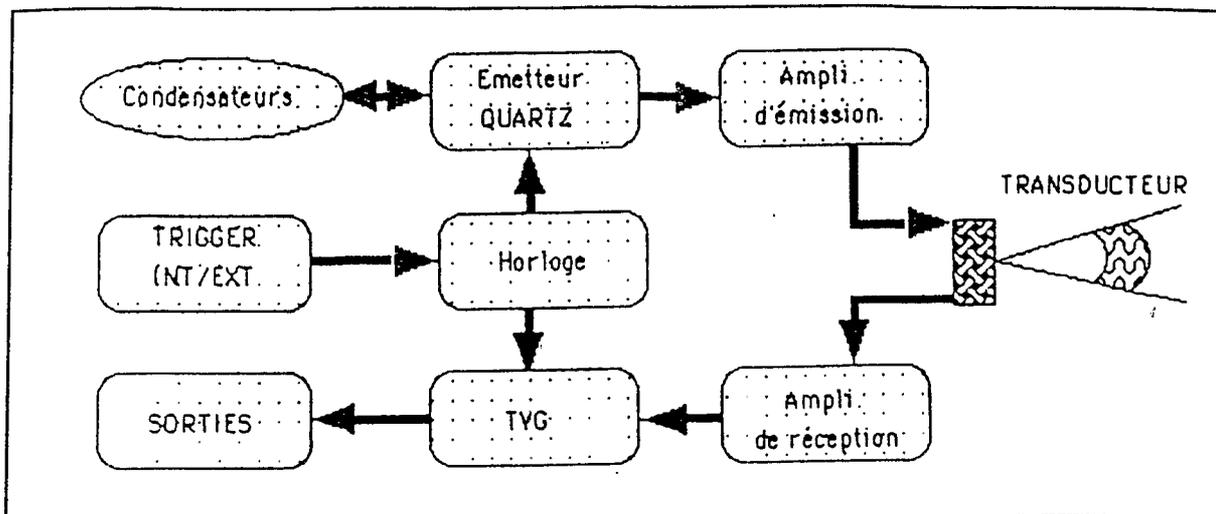


Figure 8.10 Organigramme des principaux éléments d'un sondeur.

À la réception, le signal acoustique est transformé en signal électrique par le transducteur, puis amplifié de manière fixe dans l'amplificateur de réception avant d'être à nouveau amplifié de manière variable dans l'amplificateur TVG qui aura commencé son action au moment de l'émission et qui sera contrôlé par l'horloge. Le signal sera généralement démodulé avant la sortie du sondeur pour et sera donc rendre approprié à son exploitation par les périphériques du sondeur.

L'exploitation scientifique des informations arrivant sur ces périphériques permet déjà d'obtenir une estimation de biomasse (par écho-comptage sur oscilloscope et échantillonnage par chalut) et d'étudier le comportement du poisson (observation des échogrammes ou des bandes de papier sondeur pour savoir si le poisson est dispersé ou en bancs, s'il est près du fond ou de la surface, s'il est présent ou absent dans une zone à une certaine période de l'année, etc.). Cette observation est également indispensable pour régler les seuils d'intégration, c'est-à-dire pour éliminer des échos qui seront intégrés, et qui ne correspondent pas à du poisson, que ce soient des bruits parasites, des petits échos de plancton ou d'autres traits indésirables.

8.3.2 Intégrateur

Les intégrateurs ont été commercialisés à la fin des années 1960. Le terme intégrateur est pris au sens mathématique, et désigne la mesure de l'aire engendrée par une courbe (ici une courbe de voltage) en fonction du temps. Le temps est proportionnel à la distance parcourue par le bateau de recherche et le voltage est proportionnel à la densité de poissons.

Les fonctions des intégrateurs, analogiques ou digitaux, sont similaires, les différences n'intervenant que dans la phase finale de traitement de l'information.

Tous les intégrateurs comprennent:

Un amplificateur de signal qui amplifie l'information sortie de l'écho-sondeur, ainsi qu'un réglage de seuil qui permet d'éliminer les informations indésirables provenant de bruits parasites, du plancton, etc., et dont la force des échos est inférieure à celle provenant des poissons de taille intéressante pour

les estimations de biomasse. C'est un paramètre extrêmement délicat à fixer, car un seuil trop élevé fait sous-estimer la biomasse et un seuil trop faible la fait surestimer. Ce seuil agit également sur le volume effectivement pris en compte par le faisceau acoustique du transducteur. Il est de plus pratiquement impossible de retrouver l'information originale après qu'elle ait été filtrée par un seuil, empêchant toute correction a posteriori en cas d'erreur dans la fixation du seuil.

- Un dispositif de fixation d'intervalles de profondeur d'intégration. Ces intervalles sont plus ou moins nombreux selon l'appareil utilisé. Plus ils sont nombreux, plus il est aisé d'extrapoler entre tranches dans le cas où l'une d'elle est entachée d'erreur provenant de parasites, d'intégration de fond, de saturation, etc.
- Un dispositif de transformation des voltages sortis du sondeur en voltages au carré moyen. En effet, les voltages sont proportionnels à la pression acoustique arrivant à la face active du transducteur, mais la densité de poissons est proportionnelle à l'intensité acoustique du signal, intensité elle-même proportionnelle au carré de la pression acoustique. Les densités sont donc proportionnelles au carré des voltages.

8.4 CALIBRATIONS

8.4.1 Calibration du sondeur

Cet aspect, trop technique pour une introduction, ne sera pas exposé dans ce manuel.

8.4.2 Calibration de l'intégrateur

a) Calibration électrique

Cette calibration consiste à alimenter successivement l'entrée de l'intégrateur par des signaux électriques constants dont on échelonne la valeur en fonction de la dynamique à l'entrée de l'intégrateur et on vérifie également que, lorsque les constantes A et B sont conservées égales à 1, les sorties de l'intégrateur sont bien, dans chaque tranche de profondeur, sorties qui sont proportionnelles au carré du voltage fourni à l'entrée.

Nota: Les calculs des constantes A et B faisant largement appel à la calibration des paramètres sondeur-transducteur ne seront pas exposés dans le présent chapitre.

b) Calibration avec du poisson vivant

Cette calibration sert à transformer la sortie de l'intégrateur en estimation de biomasse absolue.

Utilisation d'une senne tournante - Le bateau recherche un banc de poissons et, au moyen du sondeur et de l'intégrateur, en estime la densité moyenne ainsi que les dimensions (longueur, largeur, hauteur).

Si on suppose que le banc est circulaire, un seul passage en son milieu suffit. Si le banc présente une forme irrégulière (figure 8.11), le bateau doit plusieurs fois faire demi-tour pour passer selon différents

axes au dessus de son centre afin d'estimer les dimensions horizontale et verticale, l'objectif étant d'estimer le volume du banc. Grâce à ce type d'observation, il est possible d'estimer la taille du banc et sa densité apparente moyenne par écho-intégration.

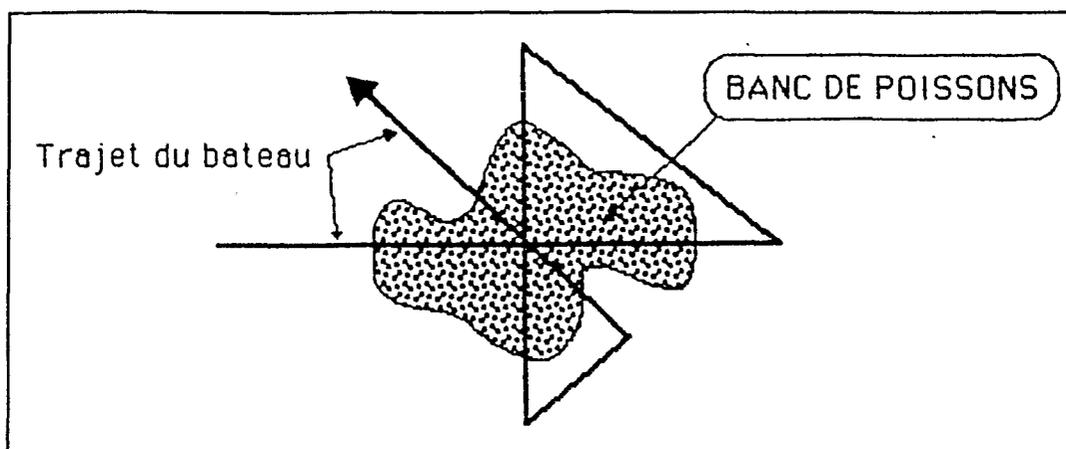


Figure 8.11 Exemple de parcours visant à estimer la taille d'un banc de poissons de forme irrégulière.

Il suffit ensuite au bateau de capturer l'ensemble du banc au moyen d'une senne tournante et d'en estimer la densité réelle, que l'on comparera à la densité estimée par écho-intégration de manière à calculer un coefficient d'extrapolation pour les données provenant de l'intégrateur.

La limite de cette méthode réside essentiellement dans le fait qu'au cours de ses passages, le bateau peut provoquer une dispersion du banc; le coup de senne doit donc se faire le plus rapidement possible après l'étude acoustique.

Utilisation d'un chalut - Quand le bateau rencontre des poissons pélagiques dispersés en une couche, on mesure par intégrateur la densité à l'intérieur de cette couche. On chalute après l'intégration ou simultanément à celle-ci à travers cette couche et on estime la densité réelle de la couche à partir des captures.

Cette méthode a plusieurs limites:

- le chalut a une efficacité propre, et une partie difficilement estimable du poisson peut y échapper;
- l'efficacité est généralement plus faible de jour et de nuit lorsqu'il y a bioluminescence; les poissons peuvent alors voir le filet et y échapper plus facilement;
- un autre problème survient s'il y a contamination dans les prises au cours de la mise à l'eau ou du relevage du filet: des poissons n'appartenant pas à la couche faisant l'objet de l'étude acoustique peuvent être capturés au cours de ces phases de manœuvre de l'engin de pêche;
- une autre difficulté est liée à l'estimation du volume réel échantillonné par le chalut et il se pose parfois le problème de stabilisation de chalut à la profondeur désirée.

Si les problèmes susmentionnés sont évités, on estime la densité réelle de la couche à partir des captures dans le chalut et on compare ces captures à la densité obtenue par intégration, le rapport des deux fournit un coefficient d'extrapolation pour les données de l'intégrateur.

Cette technique est également applicable au chalut de fond, mais il intervient des difficultés supplémentaires, liées à la zone aveugle du faisceau acoustique près du fond (figure 8.12) et à l'intégration potentielle du fond.

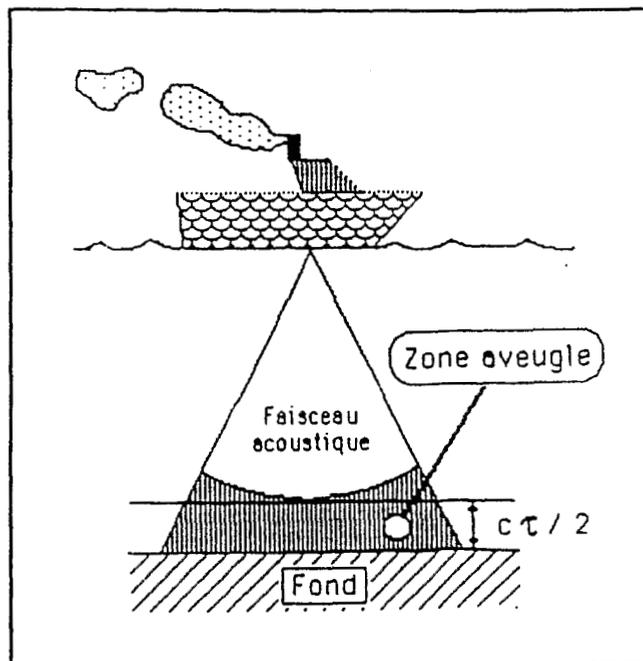


Figure 8.12 Représentation de la zone aveugle d'un faisceau acoustique.

Comparaison écho-intégration - écho-comptage - La technique consiste à estimer dans des couches dispersées la densité de poissons par écho-comptage et à la comparer aux estimations de densité obtenues par écho-intégration.

Cette technique nécessite:

- un bon alignement des profondeurs, c'est-à-dire qu'il faut compter et intégrer dans les mêmes intervalles de profondeur;
- l'utilisation d'un même seuil pour l'écho-intégration et l'écho-comptage, sinon une technique prendra en compte des échos que l'autre n'a pas et la calibration sera erronée.

Calibration en cage ou en bassin - Cette technique largement répandue consiste à mettre dans un milieu confiné différentes quantités connues de poisson, ce qui permet à tout instant de connaître la densité de poissons que l'on intègre.

Une telle technique nécessite un contrôle permanent du comportement du poisson et de sa répartition, demande un temps important d'acclimatation des animaux à un nouveau milieu, et impose des enclos «acoustiquement transparents». Les résultats obtenus par cette méthode sont présentés à la figure 8.9.

8.5 PLANIFICATION ET CHOIX DU PARCOURS DES CAMPAGNES ACOUSTIQUES

8.5.1 Généralités

Avant de lancer une campagne de prospection, il convient d'en déterminer les principales caractéristiques.

Le premier point est de déterminer l'objectif de la campagne: évaluation de biomasse relative ou absolue, estimation des recrutements, cartographie de la répartition générale ou spécifique des stocks, études comportementales des populations (migration, associations interspécifiques ou intraspécifiques, etc.).

Le deuxième point consiste à sélectionner le type de population faisant l'objet de la campagne afin de déterminer les moyens adaptés (pour des bancs de surface, surveillance aérienne; pour des bancs de surface et de subsurface, campagne sonar; pour des bancs submergés et des poissons dispersés, pélagiques ou démersaux, campagne écho-intégration).

Il faut ensuite définir la zone d'extension de la couverture (horizontale et verticale).

On doit aussi définir une stratégie d'échantillonnage qui permettra, dans la durée impartie de la campagne de prospection, d'optimiser la grille de parcours en fonction des objectifs fixés.

Il faut également définir le type de données que l'on veut collecter en fonction des résultats souhaités. Pour une campagne acoustique, les principaux paramètres à collecter sont:

- par le sondeur: répartition horizontale et verticale des populations et type d'agrégation (banc de poissons, poissons dispersés, etc.);
- par l'intégrateur: densité moyenne de ces populations sur des portions de parcours prédéterminées et estimation de la biomasse totale dans la zone prospectée;
- Par le sonar: nombre et taille des bancs, information qui, combinée à celle provenant des données du sondeur et de l'intégrateur, peut donner une estimation de la biomasse des poissons concentrés en bancs;
- par les opérations de pêche: répartition précise de la biomasse et caractéristiques biologiques des espèces;
- par mesures physico-chimiques: corrélation des paramètres hydro-climatiques avec la taille et la distribution spatiale des stocks.

Il faut enfin définir les dates optimales des campagnes de prospection en fonction des connaissances sur la biologie et le comportement des stocks, et en définir la périodicité.

8.5.2 Aspects opérationnels et statistiques

a) Aspects opérationnels

Les aspects opérationnels doivent tenir compte des capacités de navigation du bateau (autonomie, tirant d'eau, capacités de manœuvre, etc.), et de ses instruments d'aide à la navigation. De manière générale, ils doivent prendre en compte tout ce qui concerne la sécurité du navire. Ils doivent également tenir

compte du temps-bateau disponible, de sa vitesse et de la surface à couvrir, ce qui détermine l'espacement des radiales.

Les schémas de parcours pour les campagnes acoustiques sont de deux types majeurs, tel qu'illustré à la figure 8.13. On a: les parcours en zigzag; les parcours en radiales parallèles.

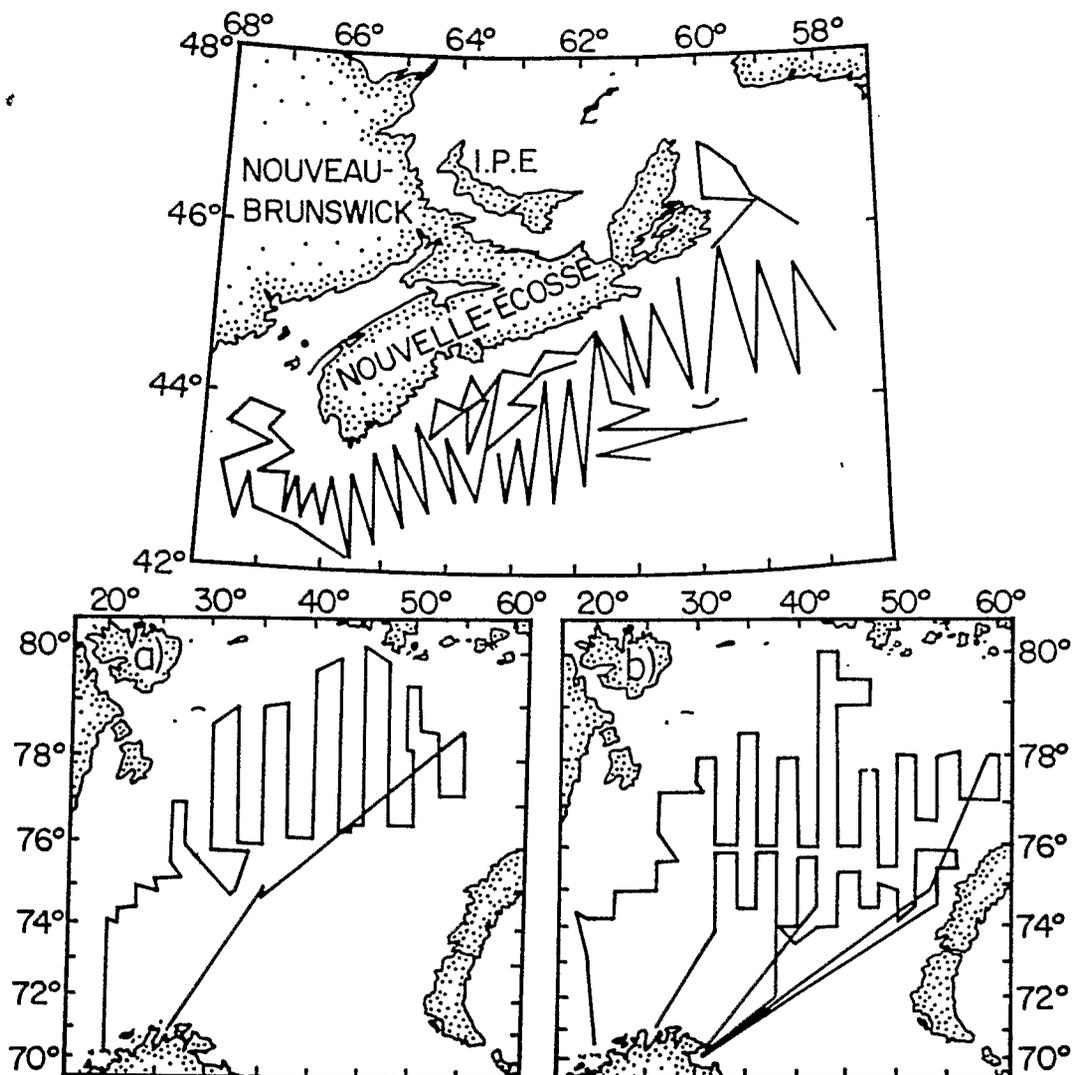


Figure 8.13 Exemples de parcours en zigzag et en radiales parallèles.

Ces variantes de type de parcours doivent tenir compte de la forme de la zone à étudier et des connaissances préliminaires sur les distributions et le comportement des concentrations de poissons au moment des campagnes ainsi que des aspects statistiques du traitement des données.

Dans le cas du Sénégal, deux types de parcours ont été choisis. Sur la côte nord, un parcours en zigzag dont les «zig» sont constitués de radiales parallèles aux degrés de latitude et espacées de cinq milles nautiques et les «zag» constitués d'interradiales qui, de par la configuration particulière du plateau continental de la côte nord du Sénégal, forment des radiales d'une part, perpendiculaire aux isobathes et

d'autre part, parallèles entre elles espacées de cinq milles nautiques. Ce choix permet d'obtenir deux estimations séparées de biomasse présente sur la côte nord selon que l'on traite les données relatives aux «zig» ou aux «zag», sans toutefois perdre trop du temps des campagnes par augmentation de la distance parcourue étant donnée l'étroitesse du plateau continental entre Dakar et Saint-Louis (figure 8.14).

Par contre, sur la côte sud où le plateau continental est large (plus de 40 milles nautiques devant la Casamance), un parcours en radiales parallèles aux degrés de latitude et espacées de cinq milles nautiques (figure 8.15) est retenu.

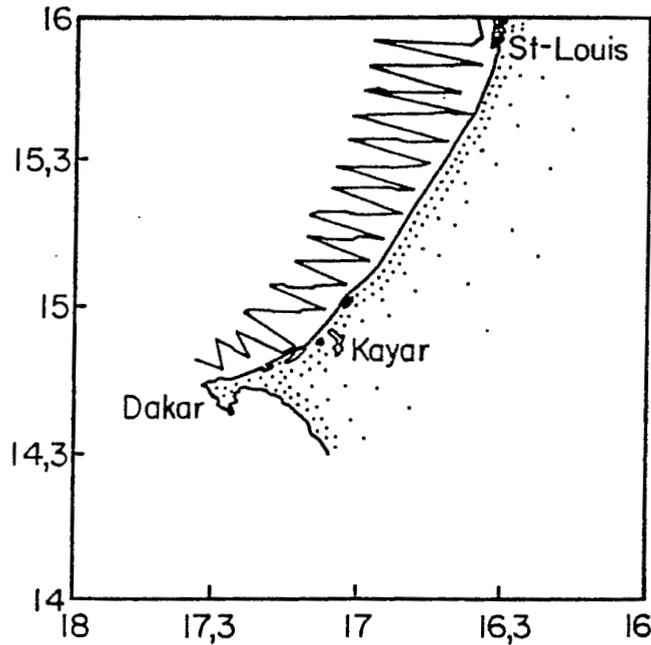


Figure 8.14 Exemple de parcours en zigzag utilisé pour la côte nord du Sénégal.

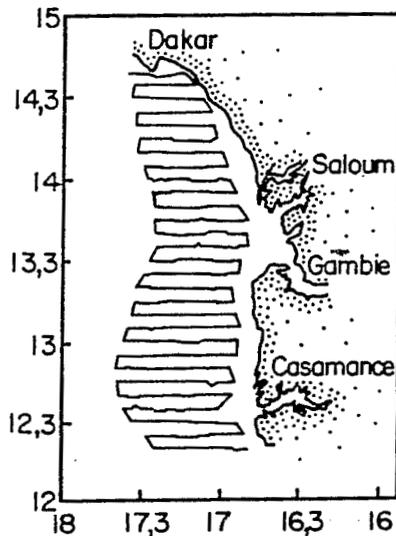


Figure 8.15 Exemple de parcours en parallèles utilisé pour la côte sud du Sénégal.

b) Aspects statistiques

Les radiales parallèles permettent de donner à chaque information le même poids statistique, contrairement aux zigzags dont les distances entre observations sont d'autant plus autocorrélées qu'elles sont proches des angles de direction du parcours.

L'espacement de cinq milles nautiques entre les radiales est déduit d'une analyse géostatistique effectuée près de Dakar par Gohin (communication personnelle). Dans d'autres zones, ce même type d'expérience devrait permettre de définir le meilleur compromis statistique et opérationnel concernant l'espacement des radiales.

Notons aussi qu'en l'absence de toutes les informations sur la répartition du stock à étudier, il est recommandé de faire une prospection préliminaire à l'aide d'une grille lâche couvrant toute la zone, puis de pondérer l'effort d'échantillonnage en fonction de cette information préliminaire. Les statistiques classiques donnent des estimations d'écart à la moyenne généralement bien plus importantes que celles que l'on peut constater au cours de doubles ou multiples couvertures d'une même zone, ce qui laisse logiquement supposer que, logiquement, les statistiques classiques sont inadaptées (du moins partiellement) aux traitements des données acoustiques. Les «effets de pépites» demanderaient de faire appel à un développement particulier des sciences statistiques: *la géostatistique*.

Il faut noter que les erreurs systématiques associées aux mesures acoustiques et les erreurs aléatoires liées à la répartition des poissons et au schéma d'échantillonnage peuvent souvent être détectées et corrigées par un examen logique et général des procédés de mesure et d'estimation. Ceci souligne la grande importance que revêtent, d'une part, la formation théorique des acousticiens et, d'autre part, leur degré d'expérience du terrain et du traitement des données des campagnes, afin qu'ils atteignent le niveau désiré de professionnalisme dans ce domaine.

8.6 SOURCES D'ERREURS DANS LES ESTIMATIONS

Trois principaux types d'erreur causent la majorité des problèmes: les erreurs liées à un mauvais fonctionnement des appareils, celles liées aux bruits parasites, et celles liées à l'échantillonnage acoustique.

8.6.1 Erreurs liées au mauvais fonctionnement des appareils

a) Mauvais fonctionnement de l'impulsion de fond

Lorsqu'un intégrateur suit automatiquement le fond, il génère ou plus souvent il reçoit du sondeur un signal lui indiquant la position du fond; ce signal est généré lorsqu'un écho particulièrement fort apparaît. Il arrive que l'écho du fond ne soit pas suffisamment important pour générer ce signal: l'intégrateur, en l'absence du signal qui lui indique la fin de la tranche d'eau à intégrer, intègre l'écho du fond comme celui de poissons, provoquant ainsi une surestimation de la biomasse si l'erreur n'est pas détectée.

b) Génération d'une impulsion de fond par les bancs très denses

Ce type d'erreur intervient du fait que les appareils ne peuvent faire de distinction entre le fond et un banc dense de poissons, mais peuvent seulement comparer le niveau des échos. Si un banc de poissons renvoie un écho aussi fort que celui du fond, cet écho sera interprété comme s'il provenait du fond et l'intégration sera bloquée jusqu'à l'émission suivante. Dans ce cas, une forte sous-estimation de la biomasse se produit.

c) Dérive des instruments

Ce problème est inhérent aux circuits que l'on trouve dans les intégrateurs analogiques. Il n'existe pas dans les intégrateurs digitaux.

d) Atténuation de l'énergie sonore par les bulles d'air

Lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises, des bulles d'air sont générées par le vent et les vagues sous la surface, bulles qui atténuent l'énergie sonore transmise et reçue par les transducteurs. Cette atténuation peut être très importante (figure 8.16) et difficile à corriger. Remorquer le transducteur sous la couche de surface contenant les bulles semble être la seule solution dans ce cas.

8.6.2 Erreurs liées aux bruits parasites

Les bruits parasites sont généralement une cause d'addition d'énergie indésirée à l'énergie acoustique réfléchiée par les poissons que l'on veut étudier.

Ces parasites proviennent du bruit du bateau, de celui de la mer, de diverses sources électriques, de couches de plancton, d'autres particules ou organismes marins, etc.

Ces bruits sont filtrés par la bande passante du sondeur et éliminés en partie par le seuil fixé par l'opérateur.

8.6.3 Erreurs liées à l'échantillonnage acoustique

a) Couche de surface

En écho-sondage habituel, la face active du transducteur est orientée vers le bas. Le transducteur étant nécessairement immergé pour fonctionner, le volume compris entre la surface de la mer et le transducteur n'est pas échantillonné.

b) Couche du fond

La zone globale non échantillonnée près du fond à chaque impulsion est représentée à la figure 8.12.

L'inaccessibilité à la couche de surface et à la zone proche du fond provoque une sous-estimation dans les évaluations de biomasse.

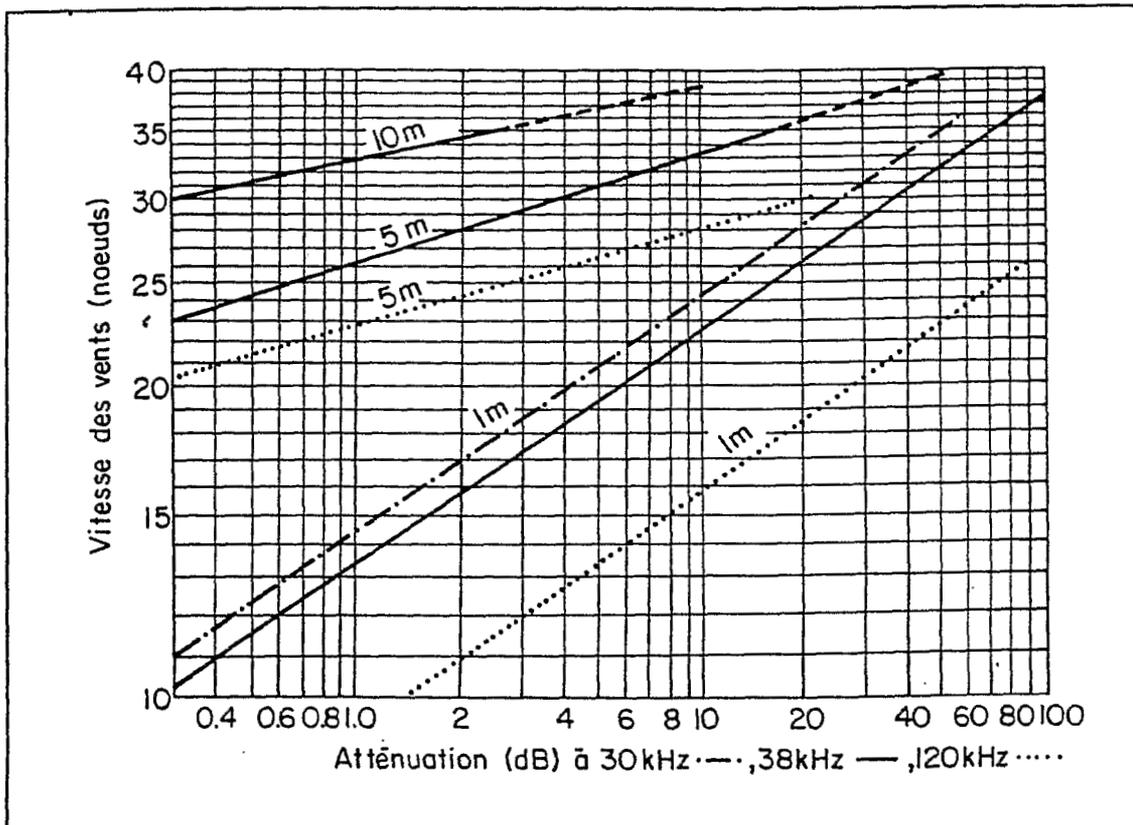


Figure 8.16 Atténuation de l'énergie sonore par les bulles d'air.

c) Petits fonds

Pour des raisons de sécurité, les bateaux de recherche n'ont pas accès à la frange située très près de la côte des plateaux continentaux, dans les fonds inférieurs à 10 mètres (raisons de sécurité). Si les poissons du stock à étudier se déplacent à l'intérieur de cette zone, ils seront inaccessibles aux moyens d'échantillonnage et les estimations de biomasse totale de la population seront erronées; dans ce cas, la correction peut se faire soit en extrapolant les densités de la zone côtière non échantillonnée à partir de celles mesurés dans les zones les moins profondes, soit en estimant la densité de cette population côtière à partir d'un très petit bateau de recherche.

Ce problème est toujours délicat à résoudre.

d) Comportement du poisson

Le principal problème lié au comportement du poisson est son évitement à l'approche du bateau, principalement sous l'action du bruit et de la lumière. En règle générale, le poisson plonge et s'écarte du bateau.

Les estimations sont alors sous-évaluées car ce double phénomène d'évitement entraîne une diminution réelle de la densité sous le bateau et une diminution apparente, dans la mesure où l'inclinaison du poisson a pour effet de diminuer son TS.

e) Autres erreurs

Horizontalité de la face active du transducteur - Plus le bateau bouge et plus le faisceau acoustique est étroit, plus les erreurs d'estimation deviennent importantes. L'utilisation d'une base remorquée élimine en grande partie le problème.

Effet de masquage - Ce problème survient lorsque la densité de poissons dans un banc est si importante que les poissons du dessus font acoustiquement de l'ombre aux poissons situés en dessous.

Effet d'interaction - Cet effet intervient également dans les bancs. Un poisson insonifié renvoie un écho dans toutes les directions (figure 8.7) et peut être lui même considéré à ce moment comme une source sonore qui insonifie ses voisins. Les poissons du banc auront donc un écho global individuel proportionnel à l'intensité sonore émise par le transducteur, intensité additionnée de l'intensité sonore émise par leurs voisins. On considère généralement que cet effet compense l'effet de masquage.

Effet de résonance - De petits organismes ou des organismes comprenant de petites bulles de gaz peuvent produire un phénomène de résonance à la fréquence utilisée, ayant pour effet d'augmenter considérablement leur TS apparent.

8.6.4 Conclusion

Pour un opérateur expérimenté, les sources d'erreur tendent à faire sous-estimer les biomasses. C'est pourquoi, dans les rapport de campagnes de prospection acoustique, les résultats sont généralement présentés sous forme d'*estimations minimales* des biomasses présentes dans la zone prospectée au moment de la campagne.

8.7 TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

Le volume des données recueillies pendant une campagne d'écho-prospection est tout simplement impressionnant: pour une campagne couvrant l'ensemble du plateau continental sénégalais entre les fonds de 10 et 200 mètres, le bateau de recherches parcourt environ 1 500 milles nautiques au cours de 58 radiales. Les paramètres de l'intégrateur (35), sont enregistrés au début de chaque radiale, et à la fin de chaque séquence d'un mille nautique, on note:

- les densités moyennes correspondant à 16 tranches de profondeur;
- la position du navire, latitude et longitude;
- l'heure du dernier passage du satellite de radio-navigation permettant le calcul de la route réelle du bateau;
- la température de sub-surface;
- l'heure;
- la profondeur.

Pour une telle campagne, la quantité d'informations à traiter avoisine donc 34 000 données brutes. La première phase du traitement consiste à corriger ces données.

8.7.1 Correction des données brutes

Cette correction, qui constitue la phase la plus délicate et la plus longue du traitement des données, consiste à déceler et à remplacer par extrapolation les valeurs qui ont été altérées par des informations indésirables.

Ces corrections ne se font pas selon des critères de choix simples, mais impliquent un processus décisionnel humain complexe demandant au scientifique une grande expérience de l'interprétation des données acoustiques; de ses choix dépendra, de manière plus ou moins importante selon la qualité des données brutes, la valeur d'estimation finale de la biomasse présente dans la zone considérée.

8.7.2 Traitement des données corrigées

a) Calcul des densités

L'utilisation, maintenant généralisée, de l'informatique permet un traitement très rapide des données corrigées.

Ce traitement consiste à calculer, pour chacune des séquences (correspondant généralement à un mille nautique) d'une radiale, la densité moyenne qu'on y a détecté et à l'exprimer sous une unité aisément compréhensible, telle que la tonne par mille nautique carré.

b) Calcul des biomasses par extrapolation simple

Méthode algébrique - Dans le cas de radiales parallèles entre elles, on peut considérer que la densité moyenne observée sur une séquence d'une radiale représente la densité de part et d'autre de cette radiale (figure 8.17).

La biomasse dans la zone d'extrapolation sera simplement calculée en multipliant de la densité moyenne observée sur la séquence par la surface de la zone d'extrapolation. Si, par exemple, la taille de la séquence est de 1 mille nautique, l'espacement entre radiales de 5 milles nautiques et la densité moyenne observée de 6,86 tonnes/mille nautique carré, on aura: biomasse de la zone d'extrapolation = $6,86 \times 5 = 34,3$ tonnes.

La biomasse totale de la zone prospectée sera égale à la somme des biomasses calculées dans chacune des zones d'extrapolation.

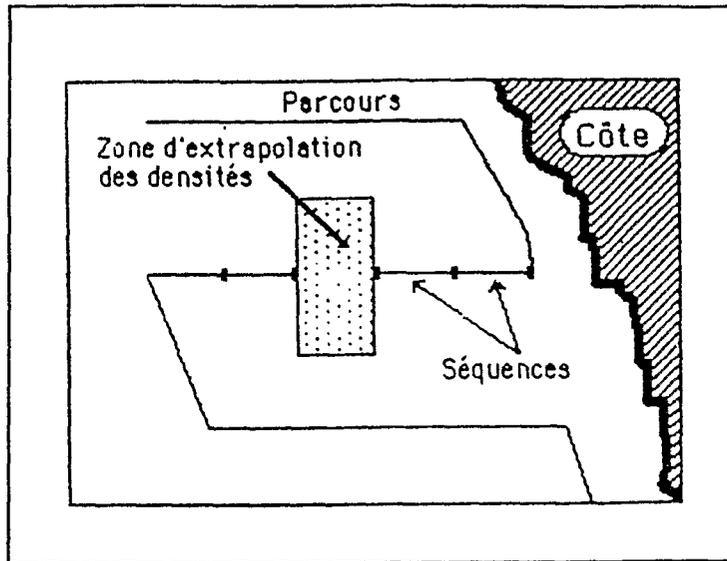


Figure 8.17 Représentation d'une zone d'extrapolation de densité.

Méthode géométrique - Cette méthode, contrairement à la précédente, ne prend en compte que les séquences où la densité est différente de zéro. Si on a N observations de densités différentes de zéro, la densité moyenne sera:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum D_i$$

et la biomasse totale sera calculée par:

$$B = \bar{D} \int dA = \bar{D} A$$

A étant la surface de la région prospectée, mesurée par méthode planimétrique, dans laquelle la densité est non nulle.

L'utilisation de cette méthode procure, par rapport à la précédente, une diminution de l'intervalle de confiance liée à l'estimation de la biomasse moyenne.

c) Calcul des biomasse pour post-stratification des données

Une stratification *a priori* de l'effort d'échantillonnage acoustique est difficile à mettre en oeuvre dans la mesure où la distribution des concentrations de poissons n'est pas précisément connue au début des campagnes. En conséquence, une post-stratification est souvent appliquée dans le but d'augmenter la précision des estimations de biomasse. En effet, s'il est possible de diviser les observations en strates homogènes, le niveau de précision des estimations dans chaque strate sera augmenté. Cependant, cette méthode est statistiquement contestée.

Dans les calculs d'intervalle de confiance, il est nécessaire de contrôler le type de distribution des densités avant ou après stratification, l'hypothèse de normalité n'étant pratiquement jamais vérifiée. Les types de distribution les plus fréquemment rencontrés se rapprochent des lois binomiales négatives ou log-normales.

Il faut aussi se méfier du fait que les observations sont très souvent autocorrélées, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'indépendance des échantillons sous-jacente à l'emploi des statistiques. Les modèles géostatistiques sembleraient mieux adaptés au traitement des données statistiques, mais leur utilisation nécessite encore des moyens de calcul lourds encore peu utilisés, mais qui devraient se développer.

d) Comparaison des données «jour-nuit»

Dans la majorité des campagnes de prospection acoustique, on observe des différences significatives entre les estimations de densité observées le jour et celles observées la nuit. Elles sont difficiles à interpréter, car en fait l'information relevée le jour n'est pas exactement de même nature que celle relevée la nuit: en effet, les migrations nyctémérales du poisson, verticales ou horizontales, ne le rendent accessible à l'échantillonnage acoustique que pendant une partie de la journée.

Il est donc recommandé, quand la disponibilité du bateau le permet, d'effectuer une double couverture (de jour et de nuit) de la zone à prospecter.

e) Représentation graphique des résultats

Le choix du type de graphique dépend de l'information que l'on veut mettre en évidence. La cartographie des densités ou des biomasses est le type le plus fréquent de représentation des résultats d'une campagne de prospection (figure 8.18).

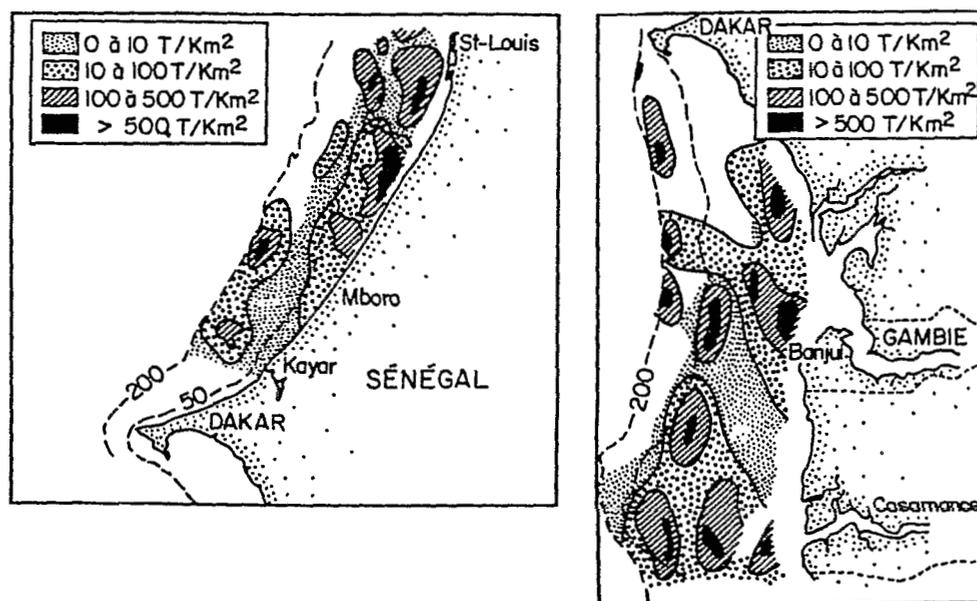


Figure 8.18 Exemple de représentation graphique de la répartition de biomasse.

8.8 CONCLUSION

Les techniques acoustiques sont actuellement d'une grande importance pour le développement des pêcheries et leur exploitation rationnelle. Malgré les multiples problèmes encore mal résolus qu'elles posent, en particulier en zone tropicale, ces méthodes permettent d'obtenir rapidement des estimations fiables de la distribution et de l'importance des biomasses exploitables. Leurs résultats sont d'un intérêt considérable, surtout lorsque des pêches de contrôle sont effectuées simultanément.

Les utilisations des résultats seront de quatre types:

- *mise en évidence d'une biomasse* peu ou pas encore exploitée: ce résultat permet d'établir un programme de développement de la pêche correspondant à la biomasse et à son potentiel estimé;
- *études du comportement des poissons*: mouvements nyctéméraux, établissement des agrégations en bancs et des dispersions, densités à l'intérieur des bancs, fuite à l'approche d'un bateau ou concentration sous des objets flottants, etc.;
- *suites des migrations* et distribution spatio-temporelle des stocks dans les diverses ZEE (zones économiques exclusives); ces renseignements sont d'une importance capitale, tant politiquement, pour le partage des ressources entre pays voisins, que scientifiquement, sur le plan biologique.
- *ajustement des modèles*: les techniques acoustiques peuvent permettre d'obtenir des estimations de populations sous-jacentes qui sont indépendantes des pêcheries. Ces données peuvent permettre de calibrer les ASP (analyses séquentielles des populations) (voir Chapitre 19). Les biomasses évaluées par acoustique doivent cependant être estimées avec des erreurs inférieures aux fluctuations de biomasse que l'on veut mesurer.

8.9 RÉFÉRENCES

- Anonyme, 1983. *Training manual*, BIOSONICS.
- Bazigos, G.P., 1981. A manual on acoustic surveys. Sampling methods for acoustics surveys. *FAO-CECAF/ECAF Series*, 80/17: 137 p.
- Bodholt, H., R. Brede et R.L. Nielsen, 1979. *Calibration of acoustic instrument*. Training course. Simrad-Horten, 17-21 septembre 1979, (miméo).
- Burczynski, J., 1982. Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass. *FAO Fish. Tech. Pap.* 191 (Rev. 1): 89 p.
- Clay, C. et H. Medwin, 1977. *Acoustical oceanography: principles and application*. John Wiley & Sons, New York, 544 p.
- Craig, R.E. et S.T. Forbes, 1969. A sonar for fish counting. *Fisk dir. Skr. (Havunders)* 15: 210-219.
- Eckart, C. (éd.), 1968. *Principles and applications of underwater sound*. Department of the Navy, Government Printing Office, Washington D.C. (USA), NAVMAT P-9674: 143 p.
- Foote, 1986. Digital representation of split-beam transducer beam patterns. *Int. Counc. Explor. Sea, ICES-CM-* 1986/8: 2 (miméo).

- Forbes, S.T. et O. Nakken, 1972. Manuel des méthodes de prospection et d'évaluation des ressources halieutiques. Deuxième partie. Emploi d'instruments acoustiques pour détecter le poisson et en estimer l'abondance. *Manuel FAO Sci. Halieut.* 5, FAO-FIRM/M5: 147 p.
- Johannesson, K.A. et R.B. Midson, 1983. Fisheries acoustics. A practical manual for aquatic biomass estimation. *FAO Fish. Tech. Paper* 240: 249 p.
- Johannesson, K. et R. Vilchez, 1981. Application and Some Results on Echo-Integration Methods in Monitoring Peruvian Anchovy Resources. In: J.B. Suomala (éd.), *Meeting on hydroacoustical methods for the estimation of marine fish populations, 25-29 June 1979. II: contributed papers, discussion, and comments.* FAO/NORAD Acoust. Cent., Lima, Peru: 765-816.
- Lockwood, J.C. et J.G. Willette, 1973. High speed method for computing the exact solution for the pressure variations in the rear field of a baffled piston. *J. Acoust. Soc. Am.* 53: 735-741.
- McCartney, B.A. et A.R. Stubbs, 1971. Measurements of the acoustic target strengths of fish in dorsal aspect including swimbladder resonance. *J. Sound Vib.* 15(3): 397-420.
- Tucker, D.G. et B.K. Gazey, 1966. *Applied underwater acoustics.* Pergamon Press, Oxford: 244 p.
- Urick, R., 1975. *Principles of underwater sound.* Second edition 1975. McGraw-Hill, New York: XIII + 384 p.



Centre international d'exploitation des océans
International Centre for Ocean Development

Canada

Méthodes d'évaluation des stocks halieutiques

(Volume I)

J.-C. Brêthes
et R. N. O'Boyle

(Éditeurs)

B 37 886. 1

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES
STOCKS HALIEUTIQUES
(Volume I)

Édité par

Jean-Claude Brêthes¹

*Centre international d'exploitation des océans
5670, Chemin Spring Garden, 9^{ème} Étage
Halifax, Nouvelle-Écosse
Canada B3J 1H6*

et

Robert N. O'Boyle

*Division des poissons de mer
Ministère des Pêches et des Océans du Canada
Institut océanographique de Bedford
C.P. 1006
Dartmouth, Nouvelle-Écosse
Canada B2Y 4A2*

Avec la collaboration de

**Maryama Barry-Gérard, Michael Chadwick, Ghislain Chouinard,
Lynn Cleary, Philippe Cury, Abdelouahed Idelhaj, Mustapha Kébé,
Francis Laloë, Jean-Jacques Lévénéz, Ian Mcquinn,
Jose Pereiro, Djiby Thiam.**

¹ - Adresse actuelle: Université du Québec à Rimouski, 300, Allée des Ursulines, Rimouski, Québec, Canada G5L 3A1.