

La propagation océanique en eau peu profonde : modèles et expérimentations

Frédéric Sturm

Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique
(UMR CNRS 5509)
École centrale de Lyon
36, avenue Guy de Collongue
69134 Ecully CEDEX
Tél. : 04 72 18 60 02
E-mail : frederic.sturm@ec-lyon.fr

Jean-Pierre Sessarego, Didier Ferrand

CNRS
Laboratoire de mécanique et d'acoustique
(UPR CNRS 7051)
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20
Tél. : 04 91 16 41 89
E-mail : sessarego@lma.cnrs-mrs.fr
E-mail : ferrand@lma.cnrs-mrs.fr

Cet article présente les avancées effectuées tout récemment au niveau du développement de modèles permettant de prédire la propagation du son dans le milieu marin, en essayant de prendre en compte toute la complexité de celui-ci. L'approche développée ici, qui consiste à coupler très fortement des modèles théoriques et des expérimentations en cuve, est une approche très prometteuse qui permet de « tester » rapidement des codes nouveaux dans des conditions optimales puisque tous les paramètres de l'expérimentation peuvent être mesurés et contrôlés pendant toute la durée des essais.

Pourquoi est-il nécessaire de s'intéresser encore aujourd'hui à la propagation en eau peu profonde ?

Essentiellement parce que les zones littorales peu profondes voient se développer depuis quelques années une intense activité humaine tournée autour de l'exploitation et de la gestion des ressources océaniques (pêche, construction et génie côtier, forage, dragage, communication, pose de câbles et de pipelines, etc). Ce contexte a conduit à s'intéresser de plus en plus aux problèmes particuliers liés à la propagation par petits fonds marins. Pour fixer les idées et s'entendre sur cette dénomination, on désignera par « petits fonds » la zone correspondant au plateau continental où la profondeur d'eau peut atteindre une centaine de mètres, et qui peut s'étendre dans certains cas, sur des distances de plusieurs dizaines, voire de plusieurs centaines de kilomètres de la côte. Les spécialistes d'Acoustique Sous-marine (ASM) savent bien que la propagation sonore en milieu marin est un des thèmes qui a été fortement développé au cours des 50 dernières années, plus spécialement pour ce qui est de la propagation par grands fonds, où les principales recherches ont été conduites, la plupart du temps, dans le cadre très strict des applications militaires. De nombreux modèles ont été développés, permettant la prise en compte dans les algorithmes, d'environnements océaniques de plus en plus complexes. Depuis quelques années, l'amélioration

des algorithmes de calcul, due en partie aux performances des calculateurs modernes, a permis de développer des schémas numériques particulièrement performants. C'est ainsi que de nombreux codes de propagation ont été mis en œuvre, aussi bien pour les applications grands fonds et grandes distances, que pour les conditions particulières liées à la propagation par petits fonds. La plupart de ces modèles considèrent cependant que la propagation s'effectue dans une géométrie bidimensionnelle (2D), ce qui revient à ne considérer que des problèmes axisymétriques, mais allège énormément les algorithmes de calcul. Afin de prendre en compte les variations du milieu dans toutes les directions, des codes Nx2D ont d'abord été développés. On calcule le champ acoustique dans plusieurs directions à partir de la source (tout en restant dans des plans verticaux), et en supposant que dans une direction donnée, l'onde acoustique ne peut sortir du plan vertical considéré. Ceci permet de fournir, en première approximation, une solution acceptable, tout en restant dans des temps de calcul raisonnables.

Cependant, dans certaines conditions, en particulier lors de la propagation par petits fonds où l'on observe une interaction forte des ondes acoustiques avec la surface et le fond, des effets 3D importants peuvent se manifester et donner lieu à des phénomènes acoustiques que les modèles Nx2D ne peuvent pas prédir. De tels effets 3D ont été mis en évidence tant expérimentalement (mesures en cuve et/ou en mer) que

par le biais de nombreuses simulations numériques (voir la référence [1] pour un état de l'art assez complet sur le sujet). Tout récemment, la présence d'effets 3D a été observée lors d'essais en mer à proximité de la côte, effets précisément dus à la présence d'un fond pentu [2]. Prendre en compte ces effets nécessite de reformuler les codes de propagation dans des versions 3D, ce qui augmente considérablement les temps de calcul, même avec l'emploi de machines parallèles. Ceci s'aggrave encore si on passe au domaine temporel car, dans ce cas, il faut recalculer le champ acoustique pour toutes les fréquences contenues dans le signal d'émission. On entrevoit ici toute la complexité de la mise en œuvre de ces codes et les raisons pour lesquelles leur utilisation est encore assez rare dans la communauté ASM.

Pour clarifier la pertinence ou non, de mettre en œuvre des modèles 3D, une campagne de mesures dans la cuve océanique du LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique), qui permet de simuler des fonds marins complexes, a été décidée, et les résultats ont pu être confrontés au code de calcul tridimensionnel 3DWAPE [3] développé au LMFA (Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique).

Un exemple d'expérimentation en laboratoire pour tester des modèles numériques

Le protocole expérimental

Une première expérimentation pour « calibrer » la cuve océanique a été réalisée début 2005. Cette cuve rectangulaire d'une longueur de 20 m, d'une largeur de 3 m, et d'une profondeur de 1 m, est constituée d'une lame d'eau douce dont on peut faire varier la hauteur de façon très précise à $\pm 0,2$ mm. Cette lame d'eau repose sur une épaisse couche de sable fin qui simule un fond océanique de profondeur semi-infinie. Le fond sableux est parfaitement lissé avec un râteau dédié à cette opération, afin de disposer d'une interface plane et homogène (sans aspérités). On notera ici que la taille moyenne des grains de sable (de l'ordre de 250 μm) étant négligeable devant les longueurs d'ondes utilisées, on peut négliger alors les aspects de diffraction et de réverbération acoustique par des interfaces rugueuses. De plus, toutes les caractéristiques du sable utilisé sont parfaitement connues. Ceci est l'un des avantages des expérimentations en cuve où l'on peut mesurer *in situ* tous les paramètres physiques qui influent directement sur la réponse du système. C'est ainsi que l'on a pu mesurer la granulométrie du sable, sa porosité, sa tortuosité, et sa perméabilité. Tous ces paramètres géotechniques sont donnés dans le tableau 1.

Tortuosité	Porosité	Perméabilité [m^2]	Vitesse des ondes P [m/s]	Densité [g/cm^3]	Atténuation à 100 kHz [dB/m]
1, 31	0, 365	$1, 65 \times 10^{-11}$	1 670	1, 999	60

Tabl. 1 : Paramètres géoacoustiques et géotechniques du sédiment

En plus de ces paramètres, la densité ainsi que la vitesse de propagation des ondes de compression et leur atténuation, ont été mesurées dans le sédiment. La densité a été mesurée dans un sédiment saturé d'eau et non tassé. On a trouvé la valeur de $1,999 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$). La vitesse du sable

a été mesurée à des fréquences voisines des fréquences utilisées pour l'expérimentation. La valeur trouvée à 100 kHz est de 1670 m/s ($\pm 5 \text{ m/s}$). Cette valeur dépend entre autre de la température ambiante, qui est mesurée en permanence dans la cuve. Elle dépend aussi fortement de l'état de consolidation du sédiment. Pour les essais effectués dans ce programme de recherche, nous avons été amenés à ratisser le fond à de nombreuses reprises et avons donc modifié l'état de consolidation de celui-ci. Il reste ainsi une incertitude sur la valeur de la vitesse du son dans le sable ainsi qu'une incertitude sur le profil de vitesse avec la profondeur. Enfin, il est à noter que tous les paramètres géotechniques et géoacoustiques mesurés pour notre sédiment et reportés dans le tableau 1, sont cohérents avec les valeurs trouvées par d'autres auteurs sur des types de sables très voisins [4], [5], [6].

La Figure 1 donne le schéma du dispositif expérimental utilisé. Un émetteur et un récepteur, montés sur des chariots indépendants, sont positionnés dans la couche d'eau par l'intermédiaire de moteurs à courant continu, qui permettent

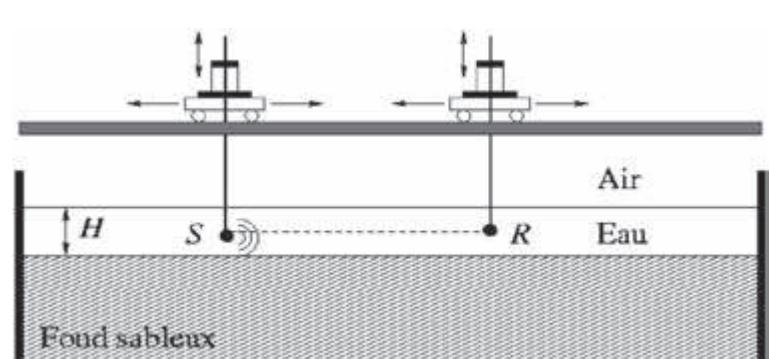


Fig. 1 : Dispositif expérimental

d'obtenir des déplacements avec une précision de l'ordre du dixième de mm. Des hydrophones servant d'émetteur ou de récepteur, de tailles réduites, ont été fabriqués au LMA à partir de petits éléments piézoélectriques de forme cylindrique (diamètre interne : 4 mm, diamètre externe : 6 mm, longueur : 6 mm). Ils permettent d'émettre ou de recevoir à des fréquences autour de 100 kHz. En réception, on utilise parfois une sonde de Wood développée également au laboratoire pour des mesures en bande étroite. Les fréquences choisies correspondent à des longueurs d'ondes de l'ordre du cm et conduisent, avec des hauteurs d'eau de quelques centimètres, à la présence de peu de modes propagatifs (entre 3 et 6 modes suivant les essais effectués).

Les signaux reçus sur l'hydrophone de réception sont numérisés immédiatement dès la sortie de l'hydrophone, à l'aide d'une carte numérique d'acquisition qui se trouve embarquée sur le chariot mobile (cf. Fig. 2). Les signaux numérisés sont ensuite envoyés sur un calculateur « à terre » au moyen d'une liaison ethernet. La liaison permet également de transmettre les ordres de déplacement des chariots. On peut donc ainsi se déplacer dans la cuve à un endroit spécifié

à l'avance, et mesurer à cet endroit précis le signal acoustique reçu, envoyer les informations sur le calculateur « à terre », puis se déplacer vers un nouveau point de mesure lorsque le transfert de données est terminé. Pour des questions pratiques, la partie utile de la cuve a été limitée à une distance de 5 à 6 m, bien que la cuve ait été conçue à l'origine pour que l'on puisse travailler sur des distances beaucoup plus grandes. Dans un souci de diminuer les réflexions parasites sur les parois (surtout lorsqu'on travaille en régime continu), on a dû disposer des absorbeurs acoustiques sur les bords de la cuve. Ces absorbeurs sont des matériaux dits « pc ». Aux fréquences utilisées, on a pu vérifier qu'ils avaient un comportement tout à fait satisfaisant.



Fig. 2: Vue d'ensemble de la cuve océanique

Rappelons enfin que le principe d'une telle expérimentation à échelle réduite consiste à admettre que le rapport d'une dimension caractéristique (ici la hauteur d'eau) par la longueur d'onde est conservé lors du changement d'échelles, autrement dit on a la relation suivante :

$$\frac{H}{L} = \frac{h}{\lambda}$$

où h et λ (respectivement H et Λ) désignent l'épaisseur de la colonne d'eau et la longueur d'onde acoustique avant (resp. après) le passage à l'échelle réduite. Dans ces conditions, le modèle expérimental élaboré (émission en mode continu à des fréquences voisines de 100 kHz et pour des colonnes d'eau d'une épaisseur de 5 cm) simule, avec un facteur d'échelle de 1 000 par exemple, une propagation en mer à des fréquences de 100 Hz sur des fonds de 50 m, la distance d'étude pouvant s'étendre alors sur 6 km.

La « calibration » de la cuve océanique

Dans les nombreux essais effectués en laboratoire, nous avons utilisé, soit des signaux monochromatiques (fréquence : 114 kHz) pour mettre en évidence les figures d'interférences des modes de propagation, soit des signaux de type large bande pour étudier plutôt l'aspect temporel. On a tout d'abord testé la propagation avec des signaux monochromatiques, l'objectif étant de calibrer la cuve et de retrouver pour le cas d'un fond plat et d'une couche d'eau isocélique, les résultats classiques donnés par les codes de propagation les plus connus. Ces comparaisons entre les modèles (alimentés par des données mesurées dans la cuve : vitesse du son dans l'eau, vitesse du son dans le sédiment et densité du sable, hauteur d'eau, immersion des capteurs) et l'expérience, ont permis de « calibrer » la cuve. La Fig. 3 donne le résultat d'une comparaison entre mesures expérimentales et données simulées. Ces dernières ont été obtenues avec deux codes de calcul distincts, 3DWAPE [3] et RAMS [7]. Sur cette figure,

où l'on a tracé les courbes de perte en fonction de la distance émetteur-récepteur, on observe un bon accord entre les résultats d'expérience et les différents codes de propagation [8]. Le code RAMS qui prend en compte une faible vitesse de cisaillement dans le sable semble mieux rendre compte des phénomènes observés. Il est extrêmement difficile de mesurer dans la cuve une vitesse de cisaillement du sédiment, mais on peut en effet admettre qu'en raison du tassement et du compactage du sable au cours du temps, une vitesse de cisaillement de l'ordre de la centaine de m/s soit tout à fait raisonnable.

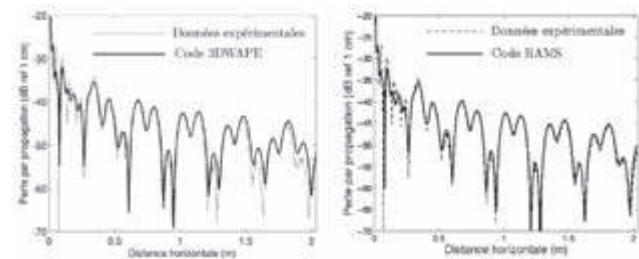


Fig. 3: Comparaison entre des données expérimentales et des simulations numériques obtenues au moyen des codes 3DWAPE [3] et RAMS [7]

Ainsi, moyennant la prise en compte d'une faible vitesse de cisaillement dans le sédiment, on a pu obtenir une très bonne concordance entre l'expérience et le modèle RAMS. Le code 3DWAPE ne permettant pas actuellement de prendre en compte une vitesse de cisaillement dans le fond, donne des résultats légèrement moins bons, mais largement acceptables.

Il est à noter que les codes 3DWAPE et RAMS ayant été conçus pour des applications à échelle réelle (c'est-à-dire pour des distances de propagation de l'ordre du km et des fréquences de l'ordre de quelques dizaines d'Hz), il a fallu procéder à une conversion d'échelles pour les tracés et opérer une translation des courbes pour ajuster les niveaux de perte.

Le passage à des situations 3D plus proches des situations réelles

Après la phase de calibration de la cuve, nous sommes passés à l'exploitation de celle-ci dans des configurations plus réalistes que les configurations à fond plat, ces dernières pouvant être décrites par un simple modèle 2D de Pekeris. Pour tester les modèles de propagation 3D, on a donc modifié la bathymétrie de la cuve et une pente d'angle constant ($\alpha = 4.5^\circ$) a été réalisée sur toute la longueur grâce à l'utilisation du râteau précédent, muni d'une lame spécialement conçue pour réaliser un fond incliné. Cette pente simule en milieu réel la transition entre la côte et le plateau continental. Elle est identique à celle de l'expérimentation en mer décrite dans [2]. L'objectif était de reproduire à échelle réduite la propagation au-dessus d'un fond incliné, en utilisant indifféremment un signal monochromatique ou large bande. Dans ces conditions, compte tenu de l'angle de la pente, des fréquences utilisées, de la hauteur d'eau et de la position de la source par rapport au fond incliné, l'utilisation en amont d'un code de calcul tridimensionnel (en l'occurrence du code 3DWAPE) a permis de prévoir que des phénomènes 3D pourraient être observables dans la zone utile des six premiers mètres de la cuve.

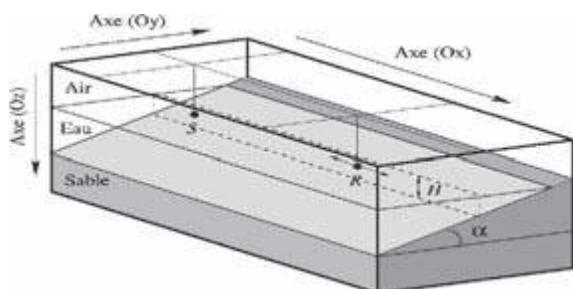


Fig. 4: Dispositif expérimental utilisé pour mettre en évidence la présence d'effets typiquement tridimensionnels. Dans le plan vertical contenant la source sonore S et le récepteur R, l'interface séparant la colonne d'eau du fond sableux est horizontale, malgré la présence d'une pente d'angle $\alpha = 4,5^\circ$ dans la direction transverse.

Nous avons utilisé une source sonore, S, harmonique en temps (mode continu) émettant à une fréquence de 114 kHz. Au niveau de la source, la hauteur d'eau, H , est de 34,5 mm ($\pm 0,5$ mm). Il est à noter que la profondeur du canal de transmission est très sensible à l'évaporation de l'eau qui peut atteindre l'ordre du mm par jour. Il faut donc, soit mesurer cette profondeur en début d'expérience, soit estimer l'évaporation par rapport à l'instant où l'on a fait la mesure et tenir compte de ce paramètre pour donner la profondeur du canal. Dans le dispositif expérimental, source et récepteur peuvent être déplacés suivant les trois axes (Ox), (Oy) et (Oz) (voir la Fig. 4). Nous avons positionné la source et le récepteur à la même immersion (10 mm) et déplacé le récepteur entre 0 et 5 m (avec un incrément de 1 cm) dans l'axe (Ox) pour effectuer les mesures de perte par propagation. Des absorbeurs acoustiques ont été répartis de nouveau sur les bords de la cuve pour diminuer les réflexions parasites sur les parois latérales. Toutefois, contrairement au cas du fond plat, seule une des deux parois latérales a dû être équipée d'absorbeurs, du fait de la présence d'une « plage » à proximité de l'autre paroi. Les mesures expérimentales de perte en transmission en fonction de la distance émetteur-récepteur, sont représentées sur la Fig. 5.

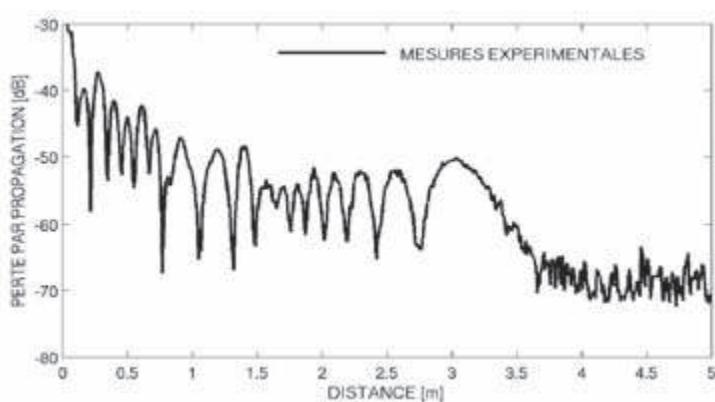


Fig. 5: Courbe de perte par propagation dans l'axe (Ox) obtenue expérimentalement. Source et récepteur sont positionnés à la même immersion (10 mm)

L'observation de la courbe obtenue permet de constater qu'il existe un système complexe d'interférences entre modes,

et surtout qu'au-delà d'une distance de 3,5 m, il n'y a plus d'énergie transmise au récepteur, ce qui est une manifestation claire de la présence d'effets 3D.

Des simulations numériques avec le code de calcul 3DWAPE ont été effectuées en considérant avec un facteur d'échelles de 1000, les mêmes conditions que pour l'expérience, c'est-à-dire que l'on considère une source émettant à une fréquence de 114 Hz et un domaine constitué d'une couche d'eau homogène (de densité 1 g/cm³, de célérité 1 499,58 m/s et d'épaisseur $H = 34,5$ m au niveau de la source et du récepteur) et d'une couche sédimentaire semi-infinie en immersion, homogène (de densité 1,99 g/cm³ et de célérité 1 740 m/s) et atténuante (avec un coefficient d'atténuation égal à 0,5 dB par longueur d'onde). De telles valeurs conduisent à l'existence de 3 modes propagatifs dans le guide d'onde correspondant à l'épaisseur $H = 34,5$ m. Les immersions de la source et du récepteur utilisées dans le code sont, au facteur d'échelles considéré près, identiques à celles données par l'expérience.

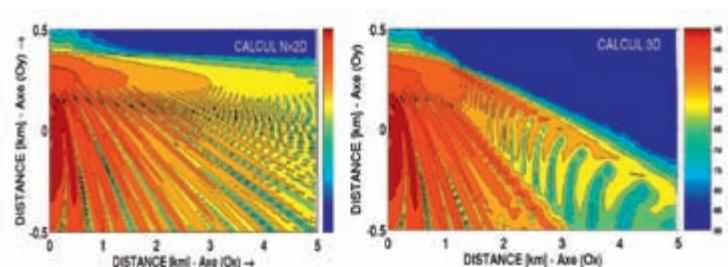


Fig. 6: Champs de perte par propagation (coupe horizontale à une immersion de 10 m) correspondant à un simple calcul Nx2D (à gauche) et à un calcul 3D (à droite).

Nous représentons sur la Fig. 6, les coupes horizontales (immersion: 10 m) des champs de perte par propagation correspondant à un calcul Nx2D et à un calcul 3D. Nous pouvons observer sur la solution 3D une déviation relativement importante de l'énergie en travers de la pente (c'est-à-dire dans l'axe (Ox) de la cuve) et loin de la source. Une telle déviation des ondes acoustiques résulte des multiples interactions (au cours de la propagation) des ondes acoustiques avec le fond incliné. De toute évidence, la solution Nx2D ne fait pas apparaître une telle déviation. Comme nous l'avons déjà mentionné, un calcul Nx2D consiste en une simple répétition d'un calcul bidimensionnel pour plusieurs plans verticaux adjacents (et centrés sur la source). Il permet ainsi la reconstruction d'un champ acoustique en trois dimensions, donnant par là même, l'illusion qu'un authentique (et plus complexe) calcul 3D a été effectué. En revanche, il ne prend nullement en compte les termes de couplage suivant la direction horizontale transverse à chacun des plans verticaux considérés.

Par conséquent, un calcul Nx2D ne peut permettre à une onde acoustique de sortir d'un plan vertical pour se propager dans un plan vertical adjacent, processus à l'origine du phénomène de déviation horizontale des ondes acoustiques. La déviation observée loin de la source dans l'axe (Ox) est ainsi typiquement un effet 3D.

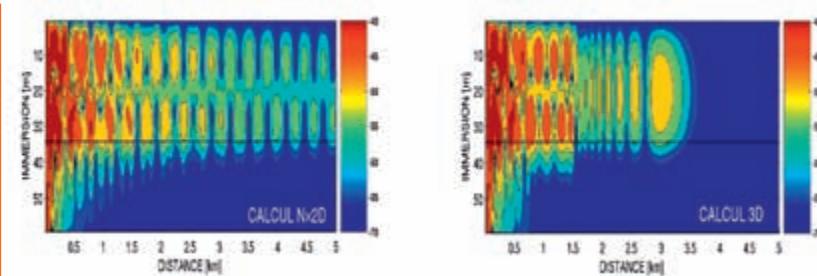


Fig. 7: Champs de perte par propagation (coupe verticale dans l'axe (Ox)) correspondant à un simple calcul 2D (à gauche) et à un calcul 3D (à droite)

La Fig. 7 présente des coupes verticales correspondant à l'axe (Ox) des champs de perte par propagation obtenus par des calculs 2D et 3D. Insistons sur le fait que ces coupes verticales sont effectuées dans l'axe (Ox) pour lequel l'interface eau/sédiment est horizontale. Un simple calcul 2D prédit ainsi naturellement la conservation des différents modes propagatifs le long de cet axe. Rappelons que par analogie rayon/mode, chaque mode propagatif peut s'interpréter comme la superposition d'une onde plane montante et d'une onde plane descendante, de même amplitude, toutes deux caractérisées par le même angle de propagation par rapport à l'horizontale. Pour l'expérimentation en cours, cet angle a une valeur de 8,97° pour le mode 1, de 18,63° pour le mode 2, et de 29,05° pour le mode 3. Il est à noter que l'angle de rasance associé au mode 3 est très proche de l'angle de rasance critique (ici 30,47°). Bien que propagatif, le troisième mode est donc plus rapidement atténué au cours de sa propagation que les deux autres modes propagatifs.

pour les modes 1 et 2. Dans l'axe (Ox), cette zone d'ombre apparaît à une distance de 0,7 m pour le mode 3, de 1,5 m pour le mode 2, et enfin à une distance de 3,5 m pour le mode 1. De plus, nous pouvons clairement observer pour le mode 1, l'apparition d'un phénomène d'interférence à une distance proche de 1,5 m. Ces franges d'interférence sont directement liées au phénomène d'interférence du mode 1 avec lui-même. Ce phénomène n'est pas propre au mode 1. Nous pouvons aussi l'observer pour le mode 2 entre

1 m et 1,5 m. Il est en revanche difficilement observable pour le mode 3. Cette analyse modale nous permet à présent de mieux comprendre les phénomènes d'interférences de la Fig. 7 (solution 3D). Le calcul 3D prédit la présence des trois modes propagatifs jusqu'à une distance voisine de 0,7 m, distance à partir de laquelle l'énergie associée au mode 3 est déviée horizontalement. Il prédit ensuite un schéma d'interférence lié aux deux modes propagatifs restants (mode 1 et mode 2) pour des distances comprises entre 0,7 m et 1,5 m. Le calcul 3D prédit enfin la présence d'un seul mode propagatif pour des distances comprises entre 1,5 m et 3,5 m (les franges d'interférence étant directement liées au phénomène d'interférence du mode 1 avec lui-même), suivie d'une zone d'ombre. Tous ces phénomènes prédis par simulation numérique, peuvent être parfaitement observés sur la courbe expérimentale de la Fig. 5. Un calcul 2D (ou Nx2D) prédit à tort une insonification du guide d'onde pour des distances variant de 0 à 5 m dans l'axe (Ox). Des calculs 2D ou

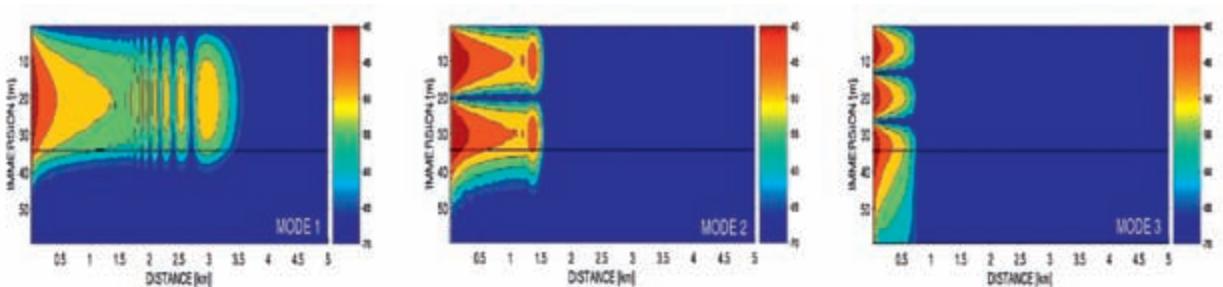


Fig. 8: Champs de perte par propagation (coupes verticales dans l'axe (Ox)) correspondant à trois calculs 3D différents obtenus en n'excitant, à la source, qu'un seul des trois modes propagatifs

La solution 3D diffère d'une manière non négligeable de la solution 2D. En particulier, on pourra noter qu'au-delà de 3,5 m, il n'y a plus aucune énergie transmise, ce que l'on avait déjà constaté expérimentalement (voir la Fig. 5 p.57). Pour bien comprendre les phénomènes acoustiques présents, nous avons propagé chacun des trois modes propagatifs indépendamment les uns des autres. Les résultats, représentés sur la Fig. 8 (ils correspondent tous à des calculs 3D), permettent clairement d'identifier et de localiser les phénomènes de déviation horizontale pour chacun des trois modes propagatifs. Nous observons en effet la création de zones d'ombre pour chaque mode. Ces dernières sont plus ou moins marquées et dépendent fortement de l'angle (par rapport à l'horizontale) du mode initial considéré. Cet effet 3D est en effet plus important pour le mode 3 que

Nx2D ne permettent ni de décrire les effets observés avec un fond légèrement en pente, ni de calculer de façon correcte, les niveaux reçus sur un récepteur ; ceci confirme la nécessité de recourir à des modèles 3D dès que la configuration de la cuve n'obéit plus au modèle géométrique simple de Pekeris.

Conclusion

Cet article a permis de présenter quelques développements récents en matière de codes de propagation 3D et tout l'intérêt qu'il peut y avoir à travailler sur des expériences contrôlées, qui permettent de vérifier pas à pas, la validité des résultats obtenus. L'objectif n'est pas de « valider » un code quel qu'il soit, mais bien de vérifier que les hypothèses faites dans le

calcul sont correctes et que tous les paramètres pertinents du problème ont bien été pris en compte. Ceci permet des comparaisons expérimentations/modèles, qui permettent à leur tour de faire progresser à la fois l'expérimentation (par la mise en place de techniques de mesures de plus en plus performantes) et les modèles numériques (par la prise en compte par exemple, de certains paramètres qui avaient été négligés en première approximation).

Dans l'étude qui a été présentée ici, on a considéré uniquement des signaux monochromatiques, mais le cas des signaux impulsionnels a été également testé, pour observer l'évolution des phénomènes au cours du temps. Dans ce cas particulier, si l'expérimentation en cuve peut s'effectuer dans des temps raisonnables (de l'ordre de quelques heures) pour obtenir des représentations temporelles du champ acoustique, les codes numériques temporels, demandent quant à eux, des durées de plusieurs jours, voire plusieurs semaines, pour obtenir des résultats qui puissent être comparés [9]. Dans ces conditions, l'expérimentation en cuve, qui permet de tester rapidement des configurations géométriques différentes, devient l'outil privilégié des techniques numériques, pour analyser des géométries de plus en plus complexes, et qui se rapprochent de plus en plus de situations réelles.

Précisons enfin que ces modèles 3D, testés en cuve pour des applications petits fonds, ont un domaine d'application beaucoup plus vaste, et qu'ils peuvent être utilisés pour des propagations océaniques à grandes distances, pour calculer de façon précise les niveaux acoustiques reçus après des milliers de kilomètres de propagation. De telles applications recouvrent aussi bien les grandes expérimentations à échelle mondiale, pour étudier les effets du réchauffement de la planète que la mise en place d'observatoires et de stations acoustiques d'écoute, pour contrôler l'application du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE). Le CEA,

en charge de la surveillance internationale de l'application de ce traité, est confronté également à ces problèmes de propagation 3D, et implante ces nouveaux codes sur des calculateurs à architecture massivement parallèle [10].

Références bibliographiques

- [1] A. Tolstoy, 3-D propagation issues and models, *J. Comput. Acoust.* 4 (3), 43-271 (1996).
- [2] Y. Jiang, N. R. Chapman, H. A. DeFerrari, Geoacoustic inversion of broadband data by matched beam processing, *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (6), 3707-3716 (2006).
- [3] F. Sturm, Numerical simulations with 3DWAPE considering shallow water range-dependent environments, *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (5), 2334-2335 (2001).
- [4] L. D. Hampton, Acoustic properties of sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* 42 (4), 882-890 (1967).
- [5] K. L. Williams, D. R. Jackson, E. I. Thorsos, D. Tang, S. G. Schock, Comparison of sound speed and attenuation measured in a sandy sediment to predictions based on the Biot theory of porous media, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 27 (3), 413-428 (2002).
- [6] R. D Stoll, Acoustic waves in saturated sediments, In Physics of sound in Marine sediments, L. Hampton, Ed. (New-York Plenum Press), pp. 19-40 (1974).
- [7] M. D. Collins, Higher order Padé approximations for accurate and stable elastic parabolic equations with application to interface wave propagation, *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (3), 1050-1057 (1991).
- [8] F. Sturm, J-P. Sessarego, D. Ferrand, Comparison of parabolic equation based codes with tank experiments for shallow water environments, Proceedings of the 8th European Conference in Underwater Acoustics (Carvoeiro 12-15 Juin 2006, Portugal), Vol. 1, pp. 427-432.
- [9] F. Sturm, Numerical study of broadband sound pulse propagation in three-dimensional oceanic waveguides, *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (3), 1058-1079 (2005).
- [10] K. Castor, F. Sturm, P. F. Piserchia, Analysis of 3-D acoustical effects in a realistic environment, Proceedings, International Conference « Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results » (Heraklion, Crète, Grèce, 28th June — 1st July 2005).