

ÉTUDE ACOUSTIQUE DU BRUIT DE MER

par Xavier Demoulin (1)

RÉSUMÉ

Le bruit dû au déferlement des vagues peut être identifié par des techniques acoustiques passives, qui permettent notamment de déterminer les quantités d'air qui sont injectées par les déferlements et remonter ainsi à leur caractérisation. Ces informations sont utiles à la communauté des scientifiques qui travaillent sur les échanges Océan - Atmosphère. Cet article présente quelques résultats expérimentaux obtenus en zones littorales qui ont pour but de mieux comprendre le lien entre les déferlements et le bruit ambiant.

ABSTRACT

Wave breaking contributes significantly to ambient noise. Passive monitoring of the latter makes possible to identify the amount of air due to wave breaking and invert it for characteristics of the sea surface. This information can be exploited by scientists working on exchanges between the ocean and the atmosphere. This paper present some experimental results aiming to better understand the relationship between wave breaking and the ambient noise in littoral areas.

(1) M.A.R.E.E. SAS - 6 rue Alphonse Rio - 56100 Lorient

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	5-3
2.	MESURES RÉALISÉES	5-3
2.1	Description des mesures	5-3
	2.1.1 Mesures par caisson immergé (Juin 2007 - Douarnenez)	5-3
	2.1.2 Mesures par bouée de surface (Sept. 2008 - Lorient)	5-4
2.2	Quelques résultats	5-4
	2.2.1 Inversion du vent.....	5-4
	2.2.2 Déferlements.....	5-4
3.	INTERPRÉTATION	5-6
3.1	Eléments d'océanographie.....	5-6
	3.1.1 Nuage de bulles et population de bulles.....	5-6
	3.1.2 Tailles des déferlements	5-7
	3.1.3 Couverture d'écume et densité de déferlements	5-7
3.2	Eléments d'acoustiques	5-7
	3.2.1 Oscillation simple	5-7
	3.2.2 Oscillation collective	5-8
3.3	Simulations.....	5-9
4.	MESURES COMPLÉMENTAIRES	5-10
4.1	Mesures complémentaires réalisées	5-10
4.2	Résultats préliminaires de mesures aériennes	5-10
5.	CONCLUSION	5-11
BIBLIOGRAPHIE		5-11
REMERCIEMENTS		5-12

1. INTRODUCTION

La forme de la surface de la mer et son agitation sont des paramètres intéressants les acousticiens par exemple pour évaluer des pertes de réflexions des ondes sonars à la surface ou encore, plus récemment, pour retrouver les paramètres géoacoustiques des fonds par le bruit généré par la surface de la mer [14]. Néanmoins, l'intérêt du bruit de mer ne se limite pas à l'acoustique sous-marine. Ainsi, en océanographie physique, la mesure du bruit de mer peut apporter des informations intéressantes sur le déferlement. En effet, des techniques acoustiques passives sont envisageables pour déterminer les quantités d'air qui sont injectées par les déferlements et remonter ainsi à leur caractérisation. Ces informations sont utiles à la communauté des scientifiques qui travaillent sur les échanges Océan - Atmosphère [1].

Le spectre du bruit de mer (appelé aussi bruit du vent) est dominant entre 100 Hz et 10 kHz. Il obéit à la fameuse règle des cinq de Wenz :

- doubler la fréquence (en kHz) diminue le niveau de bruit de 5 dB,
- doubler le vent (en nœuds) augmente le niveau de bruit de 5 dB (figure 1).

Cela s'exprime par : $NL(f, U) = 51 - 5 \log_2(f) + 5 \log_2(U/5)$.

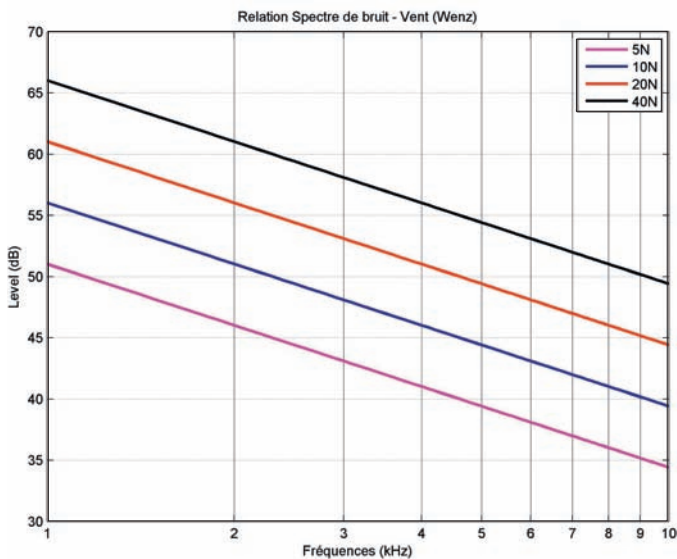


Figure 1 : Niveaux de bruit ambiant obtenu par le modèle de Wenz en suivant la règle des cinq à 5, 10, 20 et 40 nœuds.

En fait, le bruit du vent est réputé provenir de l'agrégation d'évènements (les déferlements), chacun de ces évènements constituant une source sonore produite par la création et l'entraînement de bulles d'air [3]. Pour l'acousticien, le problème posé (inverser les quantités d'air injectées sous forme de bulles) est plutôt simple *a priori*. Pourtant, à y regarder de plus près, le mécanisme expliquant cela est complexe et on voit alors que notre connaissance intime de ce qu'il se passe est plus modeste.

Cet article présente les analyses de mesures réalisées entre 2007 et 2009 visant à étudier la relation entre le bruit de mer et le déferlement. Au travers de ces analyses, on est amené à :

- revisiter la loi de Wenz [2], loi empirique reliant le spectre du bruit de mer à la vitesse du vent,
- étudier plus en détail les liens existant entre le bruit de mer et les caractéristiques des déferlements.

La première partie présente quelques mesures réalisées en mer. La deuxième partie présente quelques résultats obtenus à partir de ces mesures. La troisième partie fournit des informations nécessaires à l'interprétation de ces résultats. La quatrième partie se focalise sur les résultats préliminaires de mesures acoustiques aériennes qui ont été faites en complément des mesures sous-marines.

2. MESURES RÉALISÉES

Plusieurs séries de mesures de bruit de mer ont été réalisées entre 2007 et 2009. L'essentiel des résultats présentés se base sur deux jeux de données :

- un jeu de données de 24 h acquis en juin 2007 en baie de Douarnenez à l'aide d'un caisson immergé équipé de deux hydrophones,
- un jeu de données d'une douzaine d'heures acquis en septembre 2008 au large de Lorient à l'aide d'une bouée de surface équipée de plusieurs capteurs, notamment des hydrophones et un microphone.

2.1 Description des mesures

2.1.1 Mesures par caisson immergé (Juin 2007 - Douarnenez)

Une mesure de bruit de mer exploitable est contraignante. La chaîne audio doit autoriser des mesures de niveaux faibles ce qui nécessite des hydrophones sensibles et une amplification du signal. La dynamique pouvant être très élevée, il est nécessaire de disposer de 24 bits. A cela s'ajoute l'extension spectrale du bruit de mer qui nécessite d'échantillonner à plus de 32 kHz ce qui entraîne des volumes de données élevés. Le support de mesure ne doit pas être bruyant (pas de bateau et de préférence pas de lien avec la surface agitée) et il ne doit pas y avoir de pollution sonore. Enfin, son autonomie doit être de plus de 24 heures, ce qui nécessite une faible consommation électrique.

Le prototype utilisé pour ces mesures a été construit en fonction de ces contraintes (figure 2).

Il a été choisi d'enregistrer des séquences de 70 secondes toutes les 10 minutes, ceci sur une durée de 24 heures environ. Deux hydrophones (sensibilité de -171 dB/V) séparés de 5 m ont été utilisés. Les signaux étaient échantillonnés à 44,1 kHz sur 24 bits. La hauteur d'eau était de 20 m environ.

Un premier jeu de données a ainsi été constitué dans des conditions de vents variées. Sa qualité est très bonne (peu de pollutions par des bruits propres ou par des événements extérieurs). Il n'y a par contre pas eu de mesures complémentaires (météorologiques ou océanographiques).

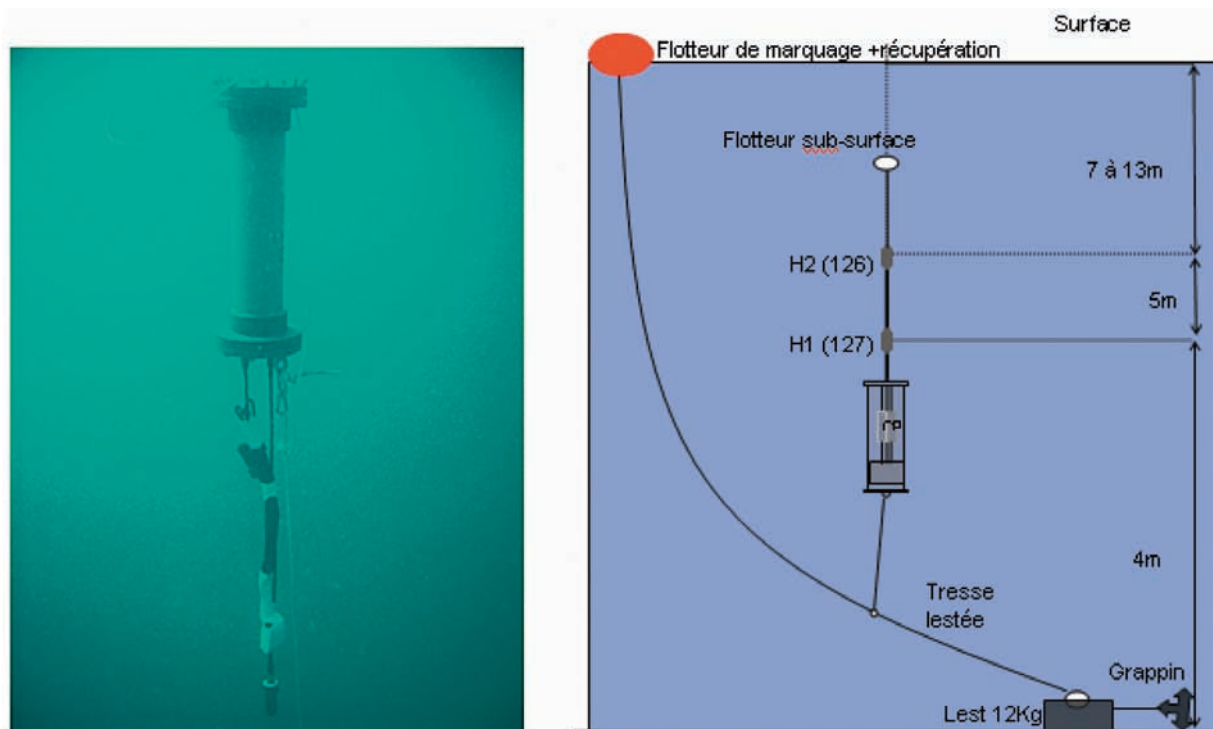


Figure 2 : A gauche, photo du dispositif d'enregistrement acoustique en opération (dans notre cas, les hydrophones étaient orientés vers le haut). A droite, dessin du mouillage ayant servi pour les mesures acoustiques lors des mesures de Douarnenez.

2.1.2 Mesures par bouée de surface (Sept. 2008 - Lorient)

Il est vite apparu nécessaire de compléter nos acquisitions acoustiques par d'autres mesures issues de capteurs optiques, océanographiques (mesures de vagues) ou météorologiques (vent).

Nous avons donc entrepris de développer une bouée de surface dont la quille permet de recevoir des capteurs acoustiques et optiques pour les acquisitions sous-marines et dont le mât permet de recevoir des capteurs acoustiques et optiques pour les acquisitions aériennes (figure 3).

En fait, il y a eu de nombreuses évolutions du prototype présenté ainsi que plusieurs prises de mesures entre juillet 2008 et décembre 2009. Parmi elles, une acquisition d'une dizaine d'heures combinant mesures acoustiques passives aériennes, sous-marines, prises de vues et célérimètre a été réalisée en septembre 2008. Il a été choisi d'enregistrer des séquences de 10 minutes toutes les 30 minutes, sur une durée de 10 heures. La hauteur d'eau était de 20 m.

Un second jeu de données a ainsi été constitué dans des conditions de vent de 15 nœuds environ. Sa qualité est plutôt médiocre (pollutions par les signaux du célérimètre ou par du trafic) mais un premier jeu de données d'acoustique aérienne a ainsi pu être établi.

2.2 Quelques résultats

Les résultats présentés concernent le jeu de données de

2007. Les résultats préliminaires incluant l'acoustique aérienne sont présentés au § 4.2.

2.2.1 Inversion du vent

Une première appréciation des données est faite en réalisant une analyse temps - fréquences pour chaque séquence. On les regroupe ensuite pour suivre grossièrement l'évolution du contenu spectral de tout le jeu de données sur les 24 heures. On stocke alors l'intensité moyenne contenue dans la " bande météo " (incluse dans la bande 500 Hz à 10 kHz). On peut alors aisément suivre les grandes tendances de l'évolution météorologique sur le site au cours des enregistrements.

Une fois les séquences polluées par le trafic ou la pluie supprimées, nous avons pu constater la conformité de nos spectres avec des spectres de Wenz. Nous avons donc utilisé la loi de Wenz pour réaliser une inversion de la force du vent pour chaque séquence par minimisation aux moindres carrés entre cette expression et nos données (entre 1 kHz et 6 kHz, figure 4).

2.2.2 Déferlements

Il est apparu intéressant d'analyser plus en détail les variations du signal au cours du temps au sein d'une séquence. Une première constatation est que les déferlements sont audibles à l'oreille. Leur présence régulière apparaît clairement à l'aide d'une analyse temps - fréquences, (figure 5).

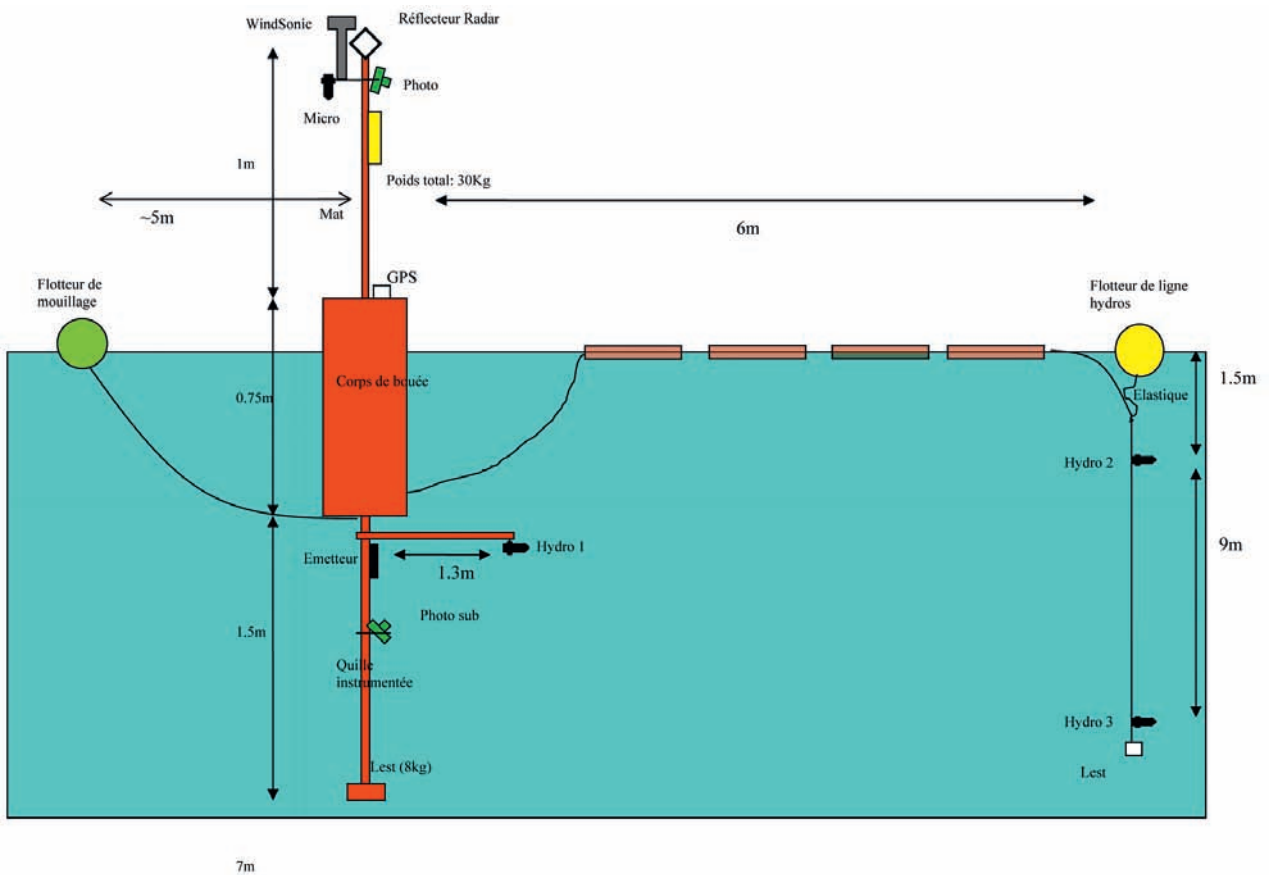


Figure 3 : Schéma du prototype réalisé. Il est dédié à l'étude des déferlements. Il permet des acquisitions à l'aide d'hydrophones et de microphones. Parallèlement, un dispositif de mesure de vitesse du son a été installé dans la quille. Des prises de vues depuis le mât ou depuis la quille sont possibles.

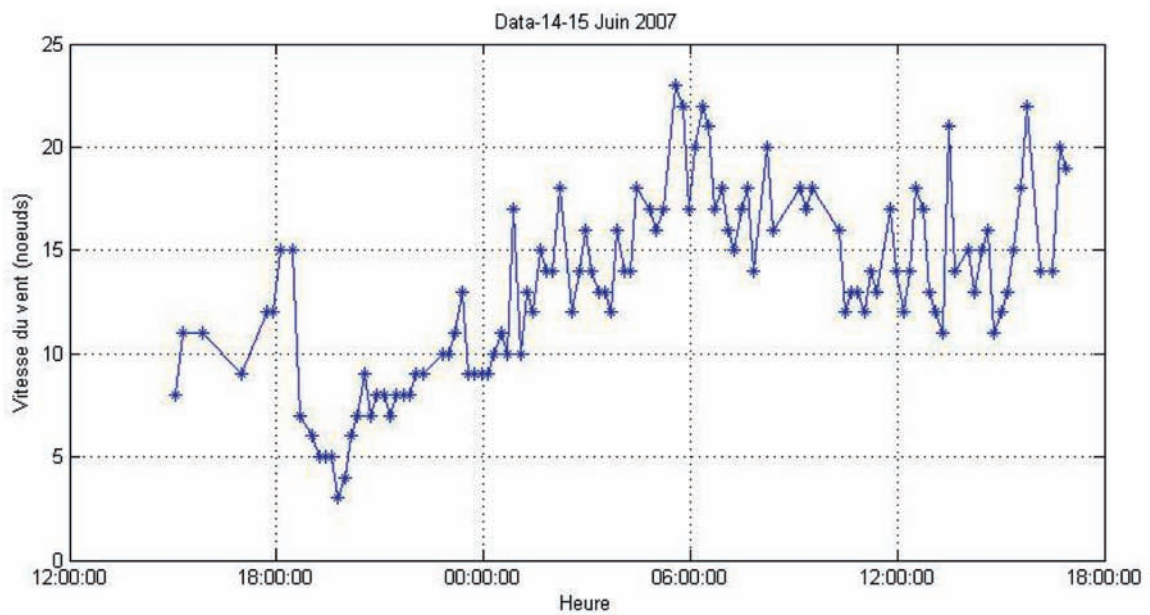


Figure 4 : Vitesse du vent (en nœuds) en fonction de l'heure (une seule vitesse par séquence).

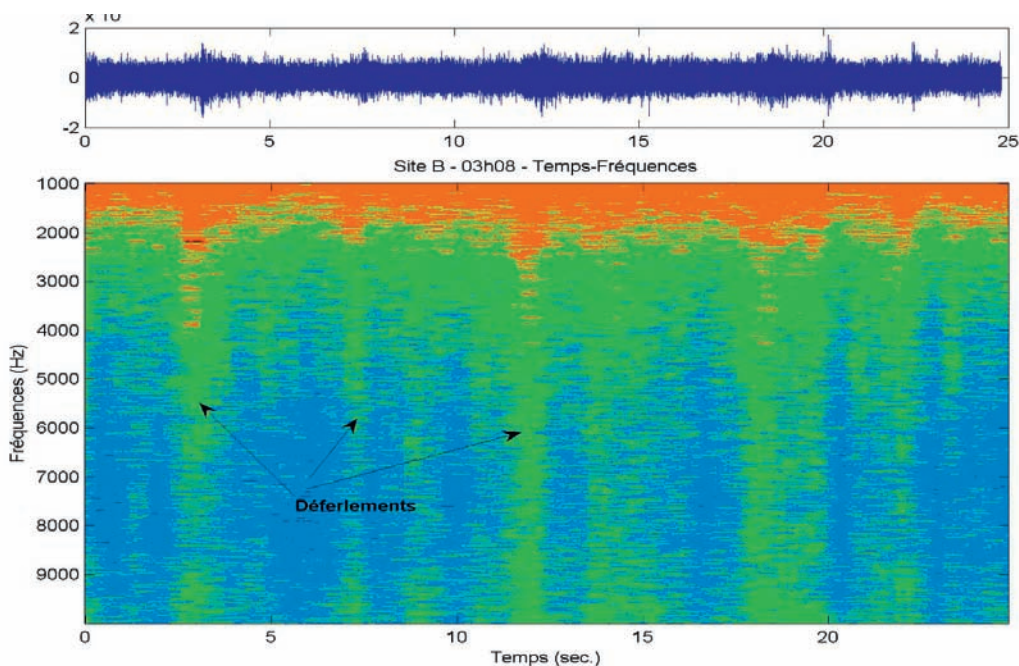


Figure 5 : Identification des déferlements sur 25 secondes d'une séquence donnée.

Les déferlements marquent efficacement le signal dans la gamme de fréquence allant de 500 Hz à 10 kHz. En considérant des durées (des déferlements) de l'ordre de la seconde, une moyenne de la DSP⁽¹⁾ sur 0,5 seconde typiquement permet d'obtenir un signal en fonction du temps, appelé signal de référence, qui fait bien ressortir ces déferlements [12]. On peut considérer que nos signaux de référence se présentent sous la forme d'un bruit de fond (dénommé background) parcouru de pics (dénommé signal des pics) qui sont des déferlements d'une "certaine échelle" (figure 6).

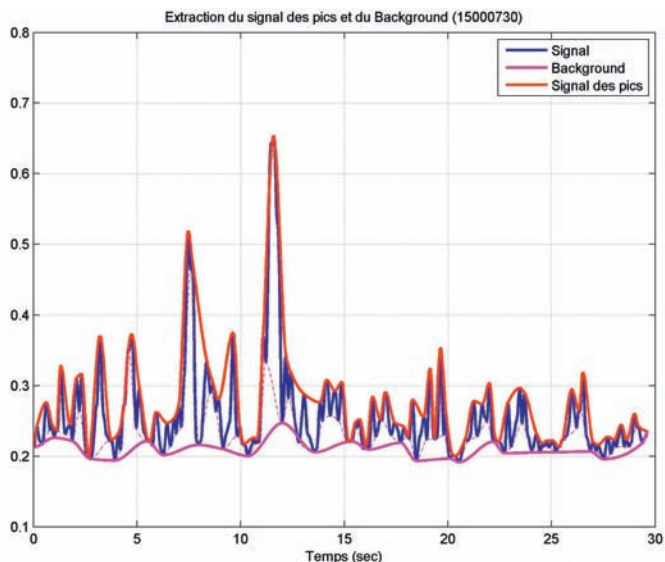


Figure 6 : Background (en magenta), signal des pics (en rouge) et signal de référence (en bleu).

En reprenant le même type de calcul avec un paramétrage différent dans le but de faire ressortir les variations rapides du signal, on constate qu'il y a une pluralité d'échelles de

(1) Densité Spectrale de Puissance

pics. On peut par exemple appliquer les techniques de décomposition du signal en modes empiriques (transformée de Hilbert Huang, [13]).

Les variations lentes sont constituées de pics de forte énergie (des déferlements). Ils ont des durées typiques de 1 s, une périodicité de 2,5 s environ (entre 0,33 Hz et 0,5 Hz). Le spectre d'un déferlement a déjà la forme d'un spectre de Wenz. La fréquence dominante des variations rapides (micro - déferlements ?) se situe vers 20 Hz (fréquence des capillaires).

3. INTERPRÉTATION

3.1 Éléments d'océanographie

Disposant d'informations acoustiques sur les déferlements dont on suspecte qu'elles sont en rapport avec des excitations de bulles, il est utile de rappeler quelques ordres de grandeur connus caractérisant les déferlements et les nuages de bulles associés. On s'intéresse plus précisément ici :

- aux populations de bulles dans les nuages de bulles (*bubble plume*) des déferlements au cours de leur cycle de vie et à la fraction d'air (*void ratio*, β)
- aux quantités de moutons (*whitecaps*), à leurs tailles et à leurs durées de vie.

3.1.1 Nuage de bulles et population de bulles

Certaines références [4] décrivent utilement le cycle de vie d'un nuage de bulles selon 3 phases :

- La phase α est la situation initiale du nuage à sa formation. Les ordres de grandeurs sont : durée 1 s, *void* β (ratio de volume d'air sur le volume d'eau) de $5 \cdot 10^{-2}$, extension spatiale de $0,5 \text{ m}^2$.

- La phase β est la phase de transformation du nuage au cours de son entraînement. Les ordres de grandeurs sont : durée 3 - 4 s, $void \beta$ de $5 \cdot 10^{-4}$, extension spatiale de quelques m^2 se rétrécissant avec la profondeur.
- La phase γ , en spéculant un peu, est la phase de retour à l'équilibre et d'intégration au nuage "permanent". Les ordres de grandeurs sont : durée >100 s, $void \beta$ de $5 \cdot 10^{-7}$, extension spatiale de quelques centaines de m^2 se rétrécissant avec la profondeur. Il n'est plus visible de la surface.

Ce nuage vient alimenter la couche bulleuse permanente (*background bubble layer*) qui est la résultante des déferlements. Elle est permanente et le $void \beta$ est typiquement de l'ordre de $5 \cdot 10^{-9}$ (figure 7).

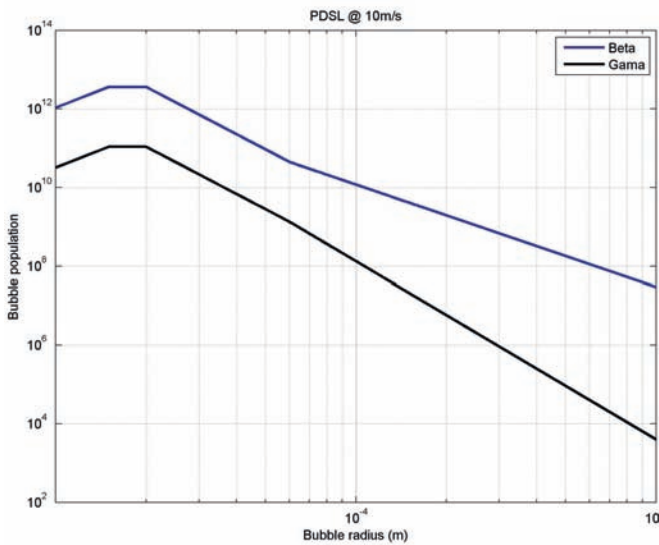


Figure 7 : Densité de population de bulles pour la couche bulleuse en m^{-4} pour un vent de 10 ms^{-1} .

3.1.2 Tailles des déferlements

On ne peut exprimer les tailles des déferlements que par ce que l'on en voit, c'est-à-dire soit par les surfaces d'écume (*sea-foam*), soit par les extensions spatiales du nuage de bulles (*void fraction*). Les éléments présentés sont largement empruntés aux travaux en référence [5] réalisés sur des déferlements glissants (*spilling breakers*). On distingue une période de croissance linéaire (phase α) et une décroissance exponentielle (phase β et γ). La durée de montée est $T_m = 5c/g \sim 0,8 \cdot T_e$, T_e période de la vague qui la porte.

On trouve typiquement des durées (de phase active) de 1 à 3 secondes et des extensions spatiales de 0,5 à 10 m^2 (figure 8).

3.1.3 Couverture d'écume et densité de déferlements

Les taux de couverture d'écume s'expriment en pourcentage de la surface totale. Ils ont été déterminés expérimentalement par photographie ([6], figure 9).

A partir du pourcentage de couverture et des tailles de déferlements, il est possible d'établir des relations établissant la distance inter-événements D_{ie} en fonction du vent [7].

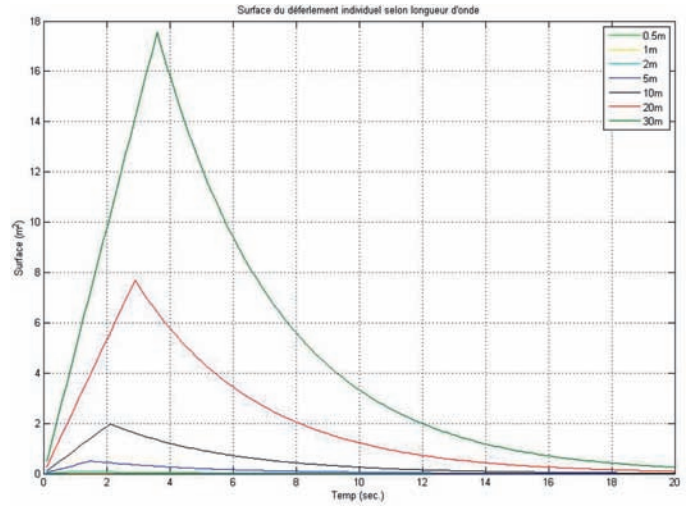


Figure 8 : Estimation de la surface occupée par l'écume d'un déferlement au cours de son cycle de vie en fonction de la longueur d'onde de la vague qui le porte.

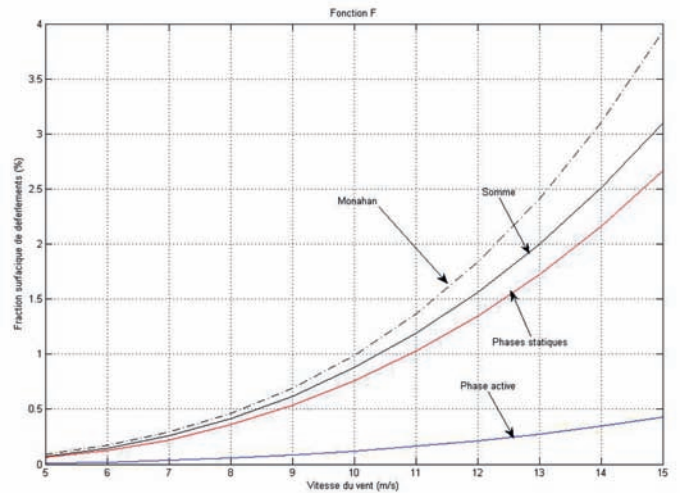


Figure 9 : Pourcentage surfacique de déferlements en fonction du vent calculé (en bleu, phase α et en rouge phases β et γ). En pointillés, comparaison avec la formule empirique simplifiée de Monahan.

Sous l'hypothèse de symétrie cylindrique et en simplifiant, cela permet d'établir D_e , la densité d'événements en nombre m^{-2} .

$$D_e = \frac{4}{\pi \cdot (237)^2} \cdot u_{10}^{2.14}$$

Ce type d'expression est très utile pour l'analyse des signaux acoustiques.

3.2 Éléments d'acoustiques

Il est important de rappeler les liens entre l'acoustique des bulles et les intensités sonores qui sont mesurées.

3.2.1 Oscillation simple

On rappelle [8] que sous certaines hypothèses une bulle d'air dans l'eau oscille avec une amplitude $d_a = \epsilon_0$ autour de sa position d'équilibre à sa fréquence de résonance selon

l'équation :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial t^2} + 2\lambda \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + w_0^2 \varepsilon_0 = 0 ,$$

avec $w_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{3\gamma P}{\rho}\right)^{1/2}$ pulsation de résonance de Minnaert et :

P, pression de l'air au niveau de la bulle ($\sim 10^5$ Pa)

γ , ratio de chaleurs spécifiques (1,4)

ρ , densité de l'eau (10^3 Kg m^{-3})

$\lambda = R_m/2m = w_0 \delta/2$

En "analogie ressort", m est bien associé à la masse, δ au frottement dont on comprend bien qu'il est au moins associé à la viscosité de l'eau et le coefficient de rigidité à la chaleur spécifique qui exprime le lien entre pression et volume.

En définissant l'excitation ε comme $\delta a/a_0$, on montre alors que :

$$P(R,t) = \alpha \cdot \varepsilon \cdot L \cdot \sin(w_0 t) \cdot \exp^{-\delta w_0 t/2} ,$$

$$\text{avec : } \alpha = \left(\frac{3\gamma P}{\rho}\right)^{3/2} \cdot \frac{\rho}{c} \cdot \frac{1}{R} \cdot \cos\theta .$$

Dans le domaine des fréquences, on a après transformée de Fourier :

$$P(w) = TF(P(r,t)) = \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot L \cdot w_0}{\left[(w_0^2 \cdot (1 + \frac{\delta^2}{4}) - w^2)^2 + \delta^2 w^2 \right]^{1/2}} .$$

L'amplitude de la pression rayonnée dépend avant tout de l'excitation ε (et de L en dipolaire, figure 10).

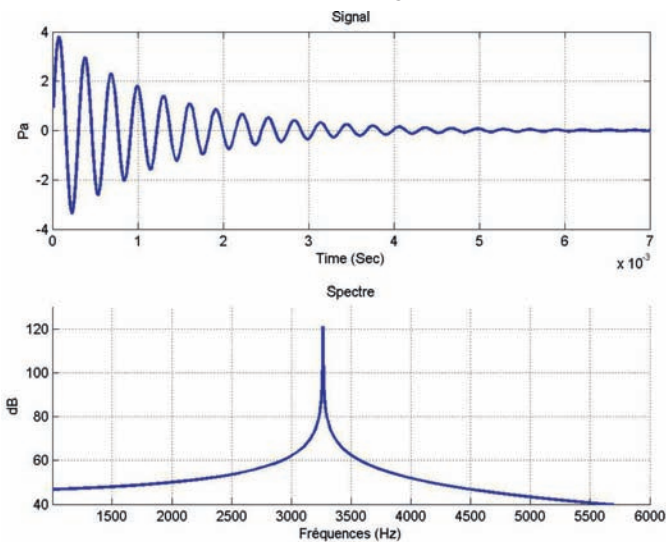


Figure 10 : En haut, pression rayonnée à 1 m par une bulle de rayon 1 mm placée à 10 cm sous la surface avec $\varepsilon=510^{-2}$. En bas, spectre correspondant.

En première approximation, on peut donc considérer qu'une bulle oscillante de rayon a_0 est un Dirac en fréquence. On peut alors faire le lien entre le spectre de bruit d'un nuage de bulles et une population de bulles. La difficulté majeure vient de l'excitation qui n'est pas connue. En simplifiant, deux bulles de rayon r_0 et d'excitation 1ε génèrent la même intensité qu'une seule bulle de même taille d'excitation 2ε .

3.2.2 Oscillation collective

Un déferlement est caractérisé par une distribution de taille de bulles qui varie typiquement de 50 μm à 1 mm pour de l'eau salée. Dans ce cas, les fréquences de Minnaert vont de 3 à 70 kHz. Or, le spectre observé associé au vent (*i.e.* au déferlement) couvre une gamme de fréquences bien plus faible. Depuis 1985 environ, de nombreux articles [9] ont fait apparaître que le nuage de bulles pouvait être responsable d'oscillations couplées entre les bulles aptes à expliquer cette dérive vers les basses fréquences. On établit une relation entre les bulles oscillantes par un coefficient de couplage. On comprend que cela conduit à un ensemble d'équations du second degré qu'on peut assembler sous un formalisme matriciel. Le problème revient alors à rechercher les solutions qui annulent le déterminant : c'est un problème de modes propres appelé le modèle du nuage de bulles (*bubble mixture model*).

Dans le cas d'un nuage de longueur L, les modes propres de pulsation du nuage lui-même s'expriment selon :

$\omega_k = k \cdot c_m / 2L$, ordre du mode ($k=1,2,\dots$) avec c_m , vitesse du son dans la couche de mixture.

Dans le cas particulier d'une distribution de bulles de tailles égales, $\beta \sim (a^3/L^3) \cdot N$, on arrive à :

$$\frac{w_k}{w_0} \cong \frac{k}{\beta^{1/6} \cdot N^{1/3}} .$$

Ce résultat est le plus explicite car il rend compte de la dérive vers les basses fréquences.

Si $N = 1\ 000$, la fréquence est divisée par 10.

En résumé, le nuage de bulles est modélisé comme une hémisphère oscillante à des fréquences qui dépendent du nombre de bulles d'une taille donnée et donc de la distribution de leur taille. En considérant le *void ratio* β d'une hémisphère de rayon r_a , on montre que le nuage de bulles a son mode fondamental d'oscillation f_0 selon :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{3\gamma P}{\rho \beta}} \text{ (figure 11).}$$

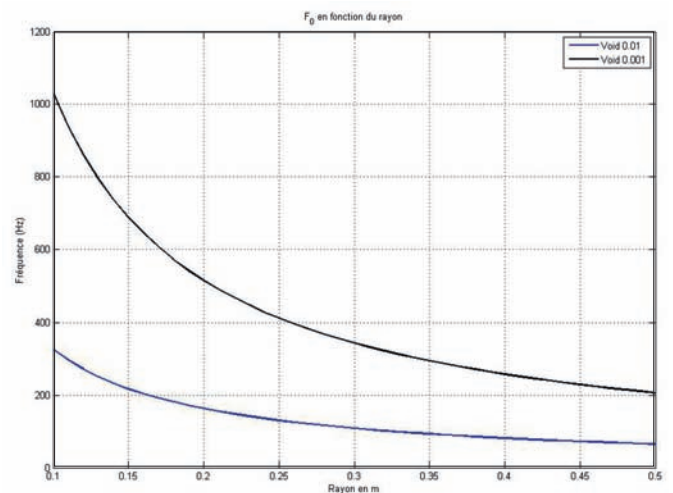


Figure 11 : Fréquence fondamentale d'oscillation d'un nuage de bulle (oscillations collectives) en fonction du rayon de l'hémisphère pour deux valeurs de β (10^{-2} et 10^{-3}).

Là aussi, on peut alors faire le lien entre le spectre de bruit d'un nuage de bulles et une population de bulles.

Il est passablement dérangeant de constater que des modèles d'oscillations individuelles et d'oscillations collectives aient pu coexister pour expliquer l'allure spectrale du bruit du vent. Faute de mise en évidence expérimentale et d'autres informations plus récentes sur le sujet, on en restera là.

3.3 Simulations

La construction du problème direct reliant des populations de bulles à l'intensité totale acoustique reçue sur un hydrophone à la profondeur Z_h se base sur une modélisation des sources d'une part et sur une modélisation de la propagation d'autre part. L'étape intermédiaire qu'on se propose ici de faire est de simuler simplement l'intensité du signal en fonction du temps. En faisant quelques hypothèses (contribution des seuls trajets directs, sommation incohérente des déferlements distants), on peut alors estimer la fonction intensité totale comme étant la somme des intensités des déferlements distants avec les éléments suivants :

- on considère une durée d'observation T_{tot} ;

- on considère la fonction de distribution des évènements D_e dont on déduit le nombre d'évènements N_e dans un rayon $5 \cdot Z_h$;
- on les répartit aléatoirement dans le disque de même rayon et aléatoirement dans le temps entre 0 et T_{tot} ;
- on prend alors une fonction durée des déferlements, ici choisi comme une loi de Rayleigh en fonction du vent W ;
- de même, on prend une fonction intensité du même type (conforme à ce qui a été observé) ;
- on considère une fonction intensité = $f(t)$ pour un déferlement individuel en forme de fenêtre de Blackman (sans grande importance à ce stade).

On peut alors sommer toutes ces contributions et obtenir le signal $I_{tot} = f(\text{temps})$.

Ces simulations sont encore bien incomplètes. Elles permettent toutefois déjà de jouer sur différents paramètres pour évaluer leur effet numériquement. On constate qu'on retrouve des signaux temporels en "signal des pics" mais qu'il n'y a pas de "background" (figure 12).

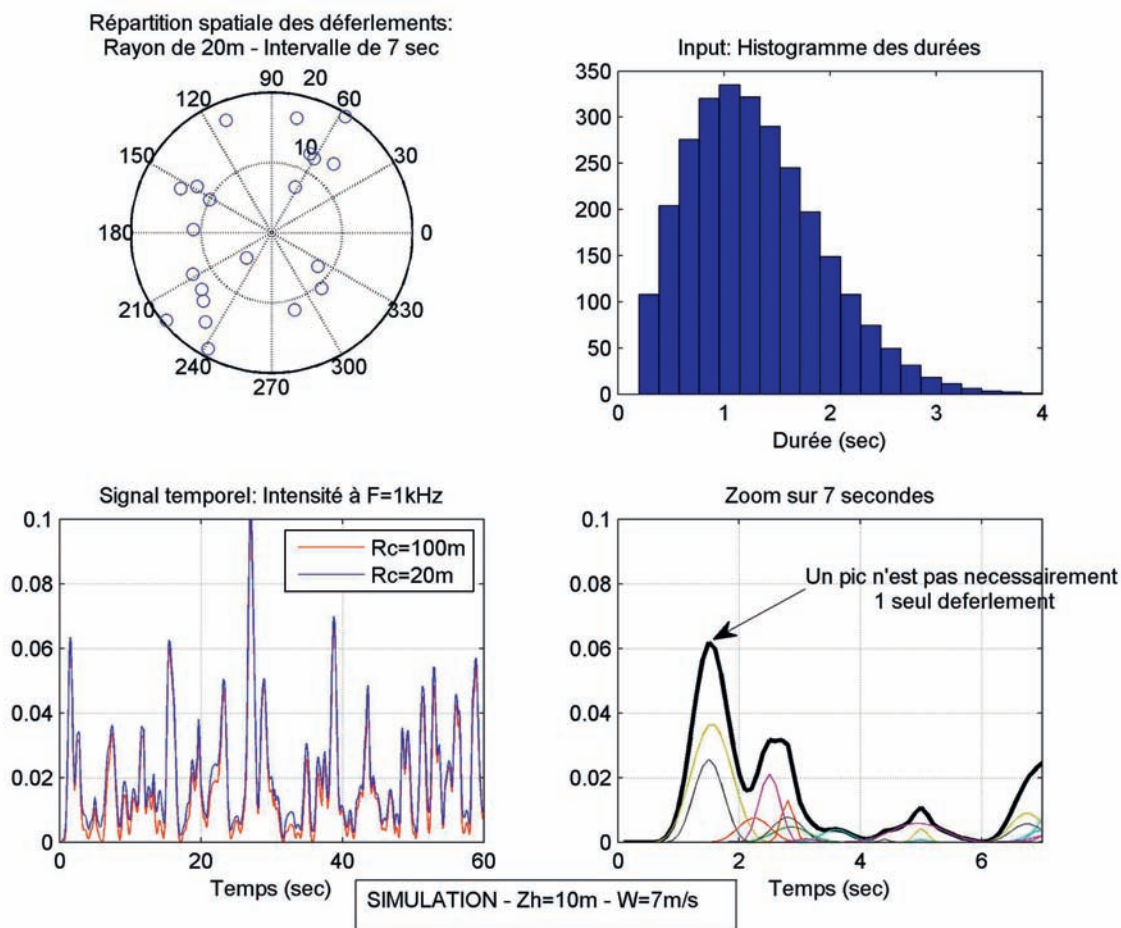


Figure 12 : Résultats de simulations simplifiées. En haut à gauche, positions des déferlements autour de l'hydrophone dans un rayon de 20 m et pour 7 secondes de signal ; on a une vingtaine d'évènements. En haut à droite, histogramme des durées de déferlements (donnée d'entrée). En bas à gauche, signal temporel résultant (en rouge, toutes contributions confondues ; en bleu, contributions dans un rayon de 2 m seulement). Ce type de résultat est très proche de ce qu'on obtient sur les données réelles. En bas à droite, zoom sur le premier double pic qui montre qu'un pic est une sommation de plusieurs contributions distinctes.

4. MESURES COMPLÉMENTAIRES

4.1 Mesures complémentaires réalisées

Devant les difficultés d'interprétation révélées par l'analyse des données acoustiques sous-marines, il est vite apparu opportun d'ajouter d'autres capteurs au prototype de mesure. Nous avons par conséquent ajouté un microphone, des appareils photographiques (aérien ou sous-marin), un anémomètre, un compas, un capteur de pression (mesure du spectre omnidirectionnel de vagues). De façon plus ponctuelle, un capteur d'oxygène dissous et un célérimètre ont été testés. Nous nous focalisons ici sur le potentiel de l'acoustique aérienne passive au travers des premiers résultats obtenus.

4.2 Résultats préliminaires de mesures aériennes

On rappelle brièvement les objectifs de l'enregistrement des déferlements à l'aide d'un microphone. L'atténuation du son avec la distance étant de l'ordre de 50 fois plus élevée dans l'air que dans l'eau, les capteurs enregistrent des phénomènes locaux et ne sont pas pollués par des événements lointains (comme cela arrive trop souvent avec des hydrophones). Comme le mécanisme de génération du son aérien n'est *a priori* pas le même que dans l'eau, les signaux aériens de déferlements pourraient s'avérer complémentaires des signaux sous-marins.

Le microphone utilisé était un ATM33a (Audio-Technica) alimenté par une pile interne 1,5V. Il était monté sur le mât d'antenne, protégé par une bonnette anti-vent soignée (Rycote) et monté sur une rotule anti-vibration (Beyer Dynamic). Les acquisitions ont été faites simultanément aux acquisitions sous-marines (16 bits - 44 kHz).

Les niveaux absolus des signaux hydrophoniques sont calculés comme suit :

- correction du voltage des séquences temporelles par le gain carte,
- correction de la réponse en fréquence de l'hydrophone,
- correction de la réponse en fréquence de la bonnette anti-vent,
- rapport au niveau de référence dans l'air de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

On procède ensuite d'une façon similaire à ce qui a été fait pour les hydrophones.

L'identification et l'évaluation qualitative des déferlements se fait de la même façon. Les signaux temporels présentent des caractéristiques assez proches de celles des signaux sous-marins (figure 13).

En revanche, nous avons noté dans nos signaux aériens de déferlements deux phases distinctes, nettement perceptibles à l'oreille (figure 14).

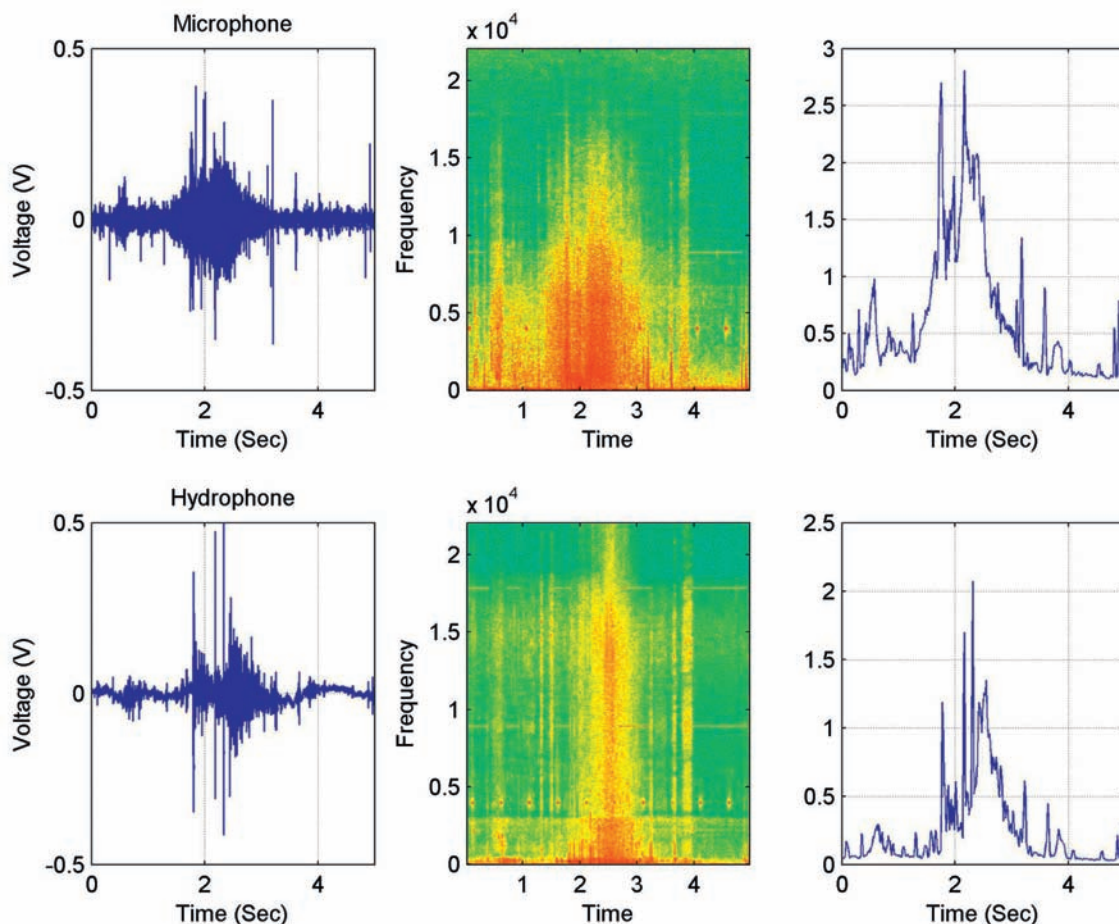


Figure 13 : Identification et caractérisation d'un même déferlement enregistré par un microphone (en haut) et par un hydrophone (en bas). De gauche à droite : signal brut temporel, spectrogramme et signal temporel de l'intensité moyenne entre 0,1 et 8 kHz.

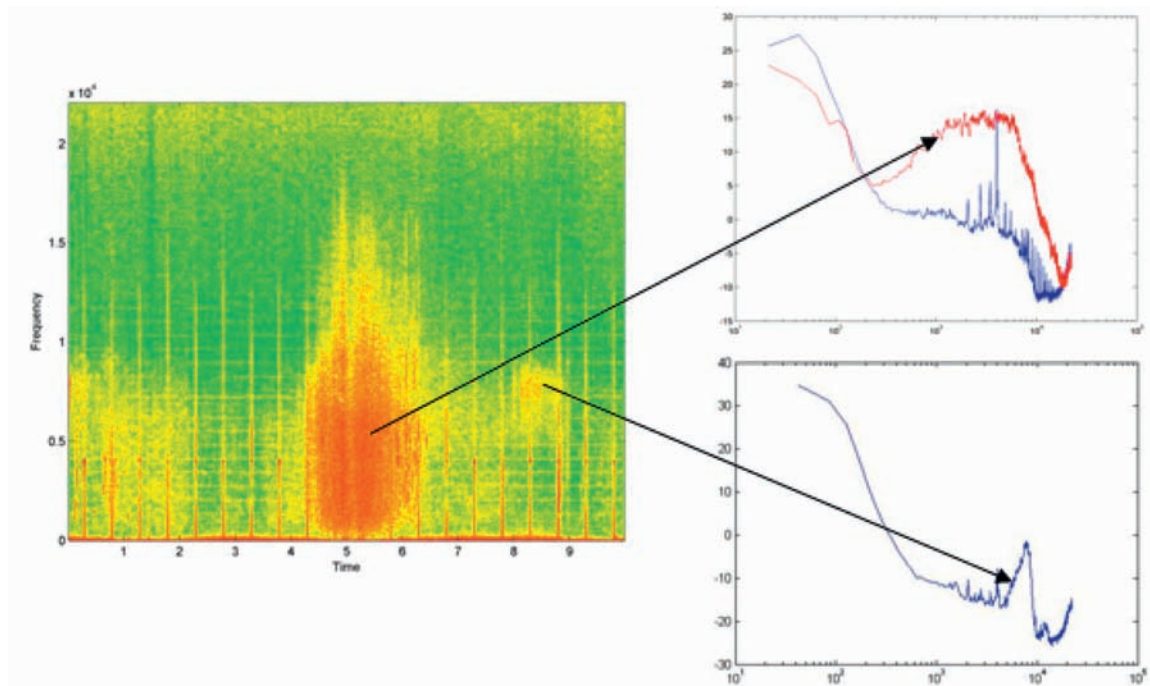


Figure 14 : Spectrogramme d'un déferlement acquis en aérien. En haut à droite, spectre de la première phase du déferlement (en rouge). En bas à droite, spectre de la seconde phase du déferlement.

Nous avons appelé cette seconde partie "dégazage" puisque nous pensons qu'elle est en rapport avec l'éclatement des bulles entraînées. Nous proposons deux candidats possibles pour décrire ce bruit : le *burst* [10] (basé sur un modèle de résonateur de Helmholtz) ou bien l'avalanche de *pops* [11]. Le *burst* correspond à l'éclatement à la surface d'une bulle d'air lorsqu'elle est remontée à la surface. Le *pops* correspond à l'éclatement (rupture de la membrane) d'une bulle de mousse (*foam*) dans l'air. Quoiqu'il en soit, il apparaît des informations complémentaires et prometteuses. Toutefois, des efforts importants restent à faire pour comprendre et exploiter ces signaux.

5. CONCLUSION

Les éléments présentés constituent un survol de résultats accumulés sur le bruit de mer entre 2007 et 2009. Ils montrent une réelle richesse des mesures acoustiques passives comme moyen d'étude des déferlements. Le potentiel de ces mesures pour réaliser des inversions sur les paramètres des déferlements est réel. Leur pleine exploitation reste cependant difficile et nous ne sommes pas encore parvenus à recueillir un jeu de données de référence.

Le succès de futures inversions est cependant conditionné par une bonne compréhension des mécanismes mis en jeu. Par exemple, il n'est pas certain que toutes les sources soient identifiées ; il est en effet étonnant que le spectre de bruit suive déjà la loi de Wenz par vent très faible (lorsqu'il n'y a pas de déferlement).

Les mécanismes physiques participant au bruit de mer sont assurément très complexes. Il est cependant possible que quelques observations simples issues de mesures à la mer apportent un précieux complément d'informations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MELVILLE and R.J. RAPP: "Momentum flux in breaking waves", *Nature* (317, 514-516, 1985).
- [2] G. WENZ: "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources". *J.Acoust.Soc.Am.* (34, 1936-1956, 1962).
- [3] H. MEDWIN and M.M. BEAK: "Bubble sources of the Knudsen sea noise spectra". *J.Acoust.Soc.Am.* (86(3) 1124-1130, 1989).
- [4] E.C. MONAHAN and M. LU: "Acoustically relevant bubble assemblages and their dependence on meteorological parameters". *IEEE J.Oceanic Eng.* (vol.15, Nro4, pp. 340-349, 1990).
- [5] N.REUL and B.CHAPRON: "A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications". *J.Geophys.Res.* (108(C10), 3321, 2003).
- [6] V.G. BONDUR and E.A. SHARKOV: "Statistical properties of whitecaps on a rough sea". *Oceanology* (22, 274-279, 1982).
- [7] J. WU: "Individual characteristics of whitecaps and volumetric description of bubbles". *IEEE J.Oceanic Eng.* (vol.17, Nro1, pp. 150-158, 1992).
- [8] T.G. LEIGHTON: "The acoustic bubble". *Academic Press*, 2004.
- [9] A. PROSPERETTI: "Bubble-related ambient noise in the ocean". *J.Acoust.Soc.Am.* (84(3) 1042-1054, 1988).

[10] D.E. SPIEL: "Acoustical measurements of air bubbles bursting at a water surface: bursting bubbles as Helmholtz resonators". *JGR*. (vol.97 (C7), pp11443-11452, 1992).

[11] N. VANDEWALLE et al., "Avalanches of popping bubbles in collapsing foams". *Phys.Rev.Let.* (vol.86(1), pp 179-182, 2001).

[12] L. DING and D.M. FARMER: "Observations of breaking surface wave statistics". *J.of Phys. Oceano.* (vol.24, pp. 1368-1387, 1994).

[13] N.E. HUANG and S.S.P. SHEN: "Hilbert-Huang transform and its applications". *World Scientific Publishing* (2005).

[14] C.R. HARRISON and D.G. SIMON: "Geoacoustic inversion of ambient noise: a simple method". *J Acoust Soc Am.* (Oct. 112(4): 1377-89, 2002).

REMERCIEMENTS

Les travaux sur l'acoustique sous-marine passive ont été commandés par le CERSAT²/Ifremer. Les travaux sur l'acoustique aérienne ont été commandés par l'ENSTB³ dans le cadre du projet MODENA⁴. L'auteur remercie B. Chapron et N. Reul (Ifremer) ainsi que R. Garelli (ENSTB) d'avoir permis ces travaux.

² Centre ERS d'Archivage et de Traitement

³ Ecole Nationale Supérieure de Télécommunication de Bretagne

⁴ Modélisation de l'Observation à Distance de l'ENvironnement mAritime