Caractérisation expérimentale et modélisation physique des fluctuations temporelles du canal acoustique sous-marin

Experimental characterization and physical modelling of time fluctuations of the underwater acoustic channel

Xavier Cristol, Jean-Michel Passerieux & Jean Dassé

Thales Underwater Systems 525, route des Dolines, BP 157, 06903 Sophia Antipolis Cedex, France

xavier.cristol@fr.thalesgroup.com - jean-michel.passerieux@fr.thalesgroup.com - jean.dasse@fr.thalesgroup.com

Résumé

Le canal acoustique marin est décrit à partir de données expérimentales recueillies en Méditerranée et en Mer du Nord (plateau continental). On s'intéresse plus particulièrement aux fluctuations de la réponse impulsionnelle du canal et aux limitations qui en résultent en termes de capacité. Dans une seconde partie, un modèle numérique (NARCISSUS-2009) est présenté, permettant de prévoir ces fluctuations.

Mots-clés : canal acoustique sous-marin ; fading ; canal WSSUS ; capacité ; modélisation.
underwater acoustic channel ; fading ; WSSUS channel ; capacity ; modelling.

1. Introduction

En tant que canal de transmission de données, le canal acoustique « petit fond » (plateau continental ou talus) - constitue un canal complexe. La principale difficulté tient à ce que, du fait de la réfraction des trajets acoustiques par les variations de la célérité du son avec l'immersion, il n'y a généralement pas de trajet direct lorsque l'émetteur et le récepteur sont séparés de plus que quelques kilomètres, et le signal n'est reçu qu'après des réflexions multiples sur la surface ou le fond, c'est à dire des interfaces rugueuses et fluctuantes.

D'autres caractéristiques importantes du canal sous marin dans ce contexte sont

- la faible vitesse de propagation (1500 m/s), avec pour corollaire un Doppler important (Doppler relatif de l'ordre de 10^{-2} contre célérité10^{-5} pour le canal Hertzien),
- le caractère large bande des signaux transmis (rapport bande/fréquence porteuse supérieur à 20%).
- la faible bande de fréquences disponible, typiquement quelques kHz (portées de quelques dizaines de km), ou quelques dizaines de kHz.

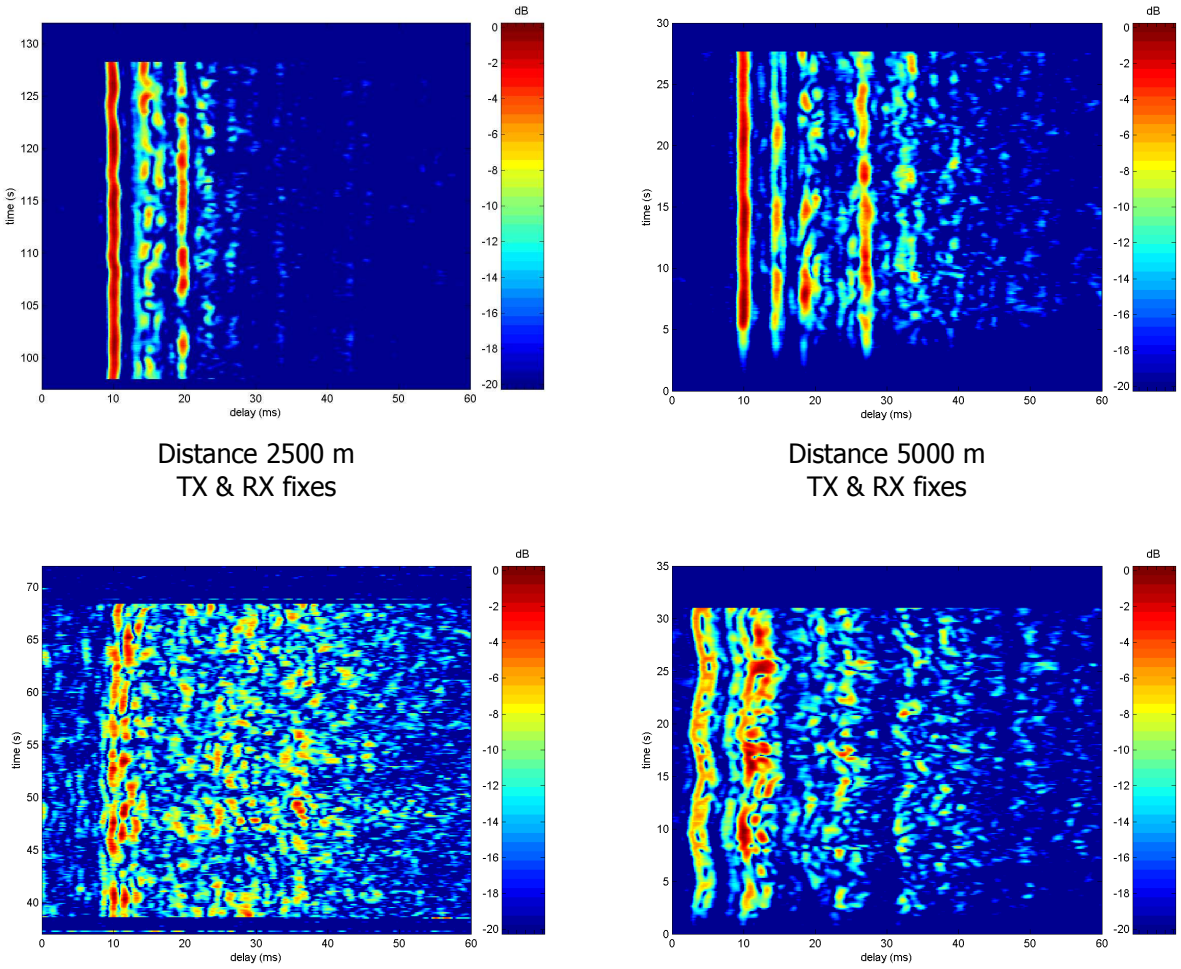
Une connaissance précise des propriétés du canal acoustique est donc indispensable en communications acoustiques sous-marines (beaucoup plus que pour les applications sonar), ceci aussi bien pour la sélection des modulations et le développement des modems correspondant (coté récepteur), que pour les prédictions de portée et de débit dans les conditions d'utilisation des modems.

La suite du papier est organisée en deux parties indépendantes :

- Quelques exemples de réponses du canal acoustiques dans des conditions « petits fonds » typiques (zone littorale en Méditerrannée) sont présentés dans la première partie. On conclue

cette partie, par une évaluation au moyen de quelques tracés de la capacité ergodique d'un canal WSSUS, dans ce cas l'importance des fluctuations du canal sur la capacité du canal acoustique.

- La deuxième partie est consacrée à un modèle numérique appelé NARCISSUS-2009), permettant de prévoir, à partir de données physiques d'environnement (profondeur, profil de célérité du son, état de la mer, caractéristiques du fond), ces fluctuations de la réponse du canal, dues à la rugosité et à l'agitation de la surface de la mer, aux irrégularités du fond combinées au mouvement de la source et du récepteur et à la présence de populations superficielles de micro-bulles d'air.



Distance 2500 m
TX & RX fixes

Distance 5000 m
TX & RX fixes

Distance 9000 m
TX & RX fixes

Distance 5000 m
TX en rapprochement à 4 m/s

Figure 1 : Tracés de la réponse du canal acoustique

2. Caractérisation du canal acoustique en transmission

Résultats expérimentaux bruts

Les exemples de résultats expérimentaux de mesures de la réponse du canal acoustique présentés ici ont été obtenus dans les conditions ci-dessous :

- Méditerranée Occidentale, zone côtière, en Automne,
- hauteur d'eau de l'ordre de 60 à 100 m (bord du talus), état de mer 4 et fond de nature variable (sable de granulosité et porosité variées, rochers).
- émetteur (TX) et récepteur (RX) immergés entre 10 et 40 m (selon la passe) et mis en œuvre à partir de deux petits bâtiments de surface (~10 m) nominalement fixes (en pratique dérive inférieure à 0.5 nœuds) ou en rapprochement à 8 nœuds,
- signal émis : séquence de 30 secondes correspondant à la répétition en boucle toutes les 125 ms d'une séquence pseudo-aléatoire (d'auto-corrélation proche d'un Dirac), de durée 48 ms, modulée de manière à occuper la bande 4-6 kHz.

A la réception la réponse du canal est estimée à la cadence de 125 ms en calculant la corrélation du signal reçu (après démodulation complexe autour de la fréquence porteuse. A noter que dans tous les cas le Doppler moyen a été compensé avant le calcul de cette corrélation de manière à se ramener au cas où TX et RX sont fixes.

On observe sur ces tracés (Figure 1) que cette réponse est formée de deux composantes : une composante spéculaire, formée de plusieurs trajets (ici de 4 à 6), plus ou moins nets et de niveaux fluctuants (d'autant plus que le retard est important, ce qui peut s'expliquer par le nombre de réflexions plus important) et une composante diffuse (aléatoire) dont la durée croît avec la distance. A noter par ailleurs que, au moins pour les passes fixes, la réponse (spéculaire et diffuse) est d'autant plus longue que distance est grande. On peux aussi remarquer un changement qualitatif de la réponse entre 5000 et 9000 m.

Le dernier tracé (Figure 1), correspondant à un émetteur en mouvement (à 8 nœuds), illustre un cas de fluctuations quasi-déterministes, et fait bien apparaître l'influence de la houle : les fluctuations de la réponse sont clairement périodiques, d'allure presque sinusoïdales et de période de l'ordre de 7 à 8 secondes, c'est à dire celle de la houle.

Description statistique du canal & Capacité du canal

En première approximation, sur des durées courtes (typiquement sur quelques dizaines de secondes comme ici), le canal de transmission acoustique sous-marine « petit fond » peut être considéré comme stationnaire dans un sens statistique (au second ordre). Si on met à part les phénomènes déterministes comme les fluctuations à la fréquences de la houle, les fluctuations des différents trajets semblent à peu près décorrélées, ce qui fait qu'il est tentant d'appliquer au canal acoustique le modèle WSSUS (Wide Sense Stationnarry Uncorrelated Scattered, [1], [8]).

Soit en désignant par h(t, τ) la réponse du canal, considérée maintenant comme un processus aléatoire :

$$\begin{cases} E\ \{h(t,\tau)\} = \overline{h}(\tau) \\ E\ \left\{\left[h(t_1,\tau_1) - \overline{h}(\tau_1)\right]\cdot\left[h(t_2,\tau_2) - \overline{h}(\tau_2)\right]^*\right\} = C_H(t_1 - t_2, \tau_1 - \tau_2) \end{cases}$$

Plutôt que la fonction de corrélation du canal $C_H(t, \tau)$, il est préférable de considérer la fonction de diffusion du canal $S_H(\nu, \tau)$, définie comme la transformée de Fourier de $C_H(t, \tau)$, par rapport au temps . Soit :

$$S_H(\nu,\tau) = \int C_H(t,\tau)\cdot e^{-2j\pi\nu t}\,dt$$

D'une manière générale, pour un canal WSSUS, cette fonction de diffusion contient l'essentiel de l'information concernant le canal, en particulier ses étalements temporels TS et Doppler DS (qui en toute rigueur dépend du trajet considéré), ainsi que le facteur d'étalement TSx DS.

On sait par exemple [2] que, pour un canal WSSUS, la capacité ergodique s'exprime de manière assez simple en fonction de la fonction de diffusion :

$$C \leq \underset{\leq\alpha\leq 1}{Sup} \left\{ \log(1+\alpha \cdot snr) - \frac{\alpha}{\beta} \iint \log(1+\beta \cdot snr \cdot S_H(\nu,\tau)) \cdot d\nu\, d\tau \right\}$$

où *snr* est le rapport signal/bruit (par symbole) et β le facteur crête (rapport de la puissance crête sur la puissance efficace de l'émetteur, $\beta \geq 1$ et égal à 1 pour les modulations PSK).

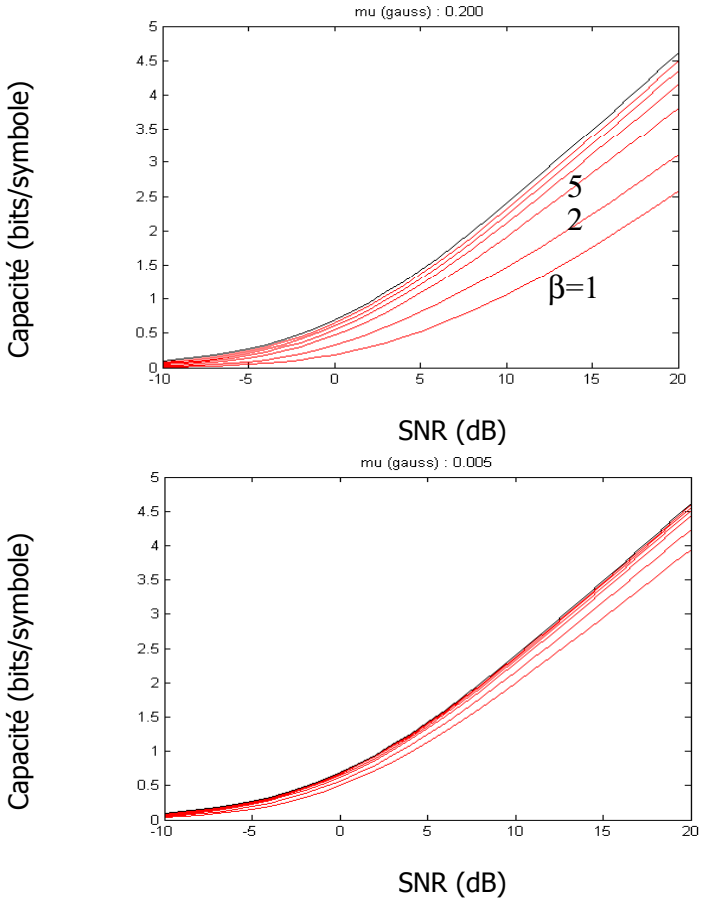
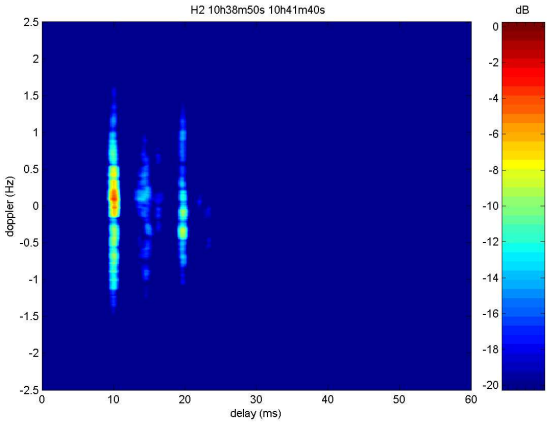


Figure 2 : Capacité ergodique d'un canal WSSUS

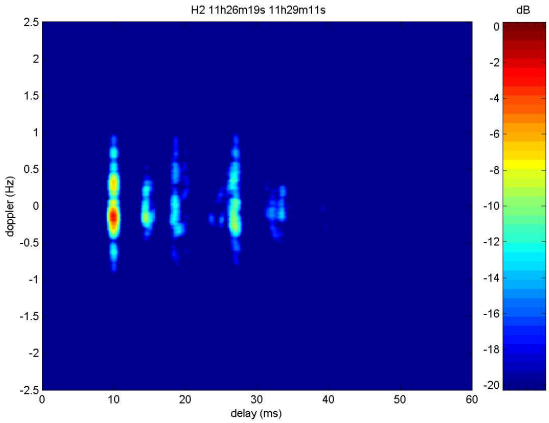
Les deux tracés ci-dessus correspondent à l'application de l'équation ci-dessus dans le cas simple d'un trajet unique de fonction de diffusion gaussienne et pour deux durées de stationnarité du canal : 10 en haut et 60 en bas (en nombre de symboles). Sur chaque tracé de la Figure 2, les différentes courbes correspondent à différentes valeurs du facteur crête β (de 1 à 50). La courbe en noir correspond au débit d'un canal AWGN.

Allure des fonctions de diffusions

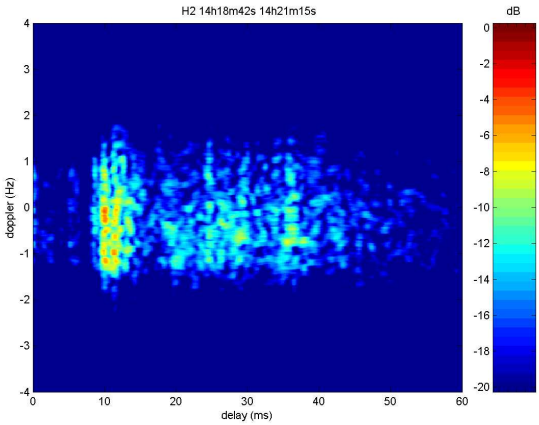
Les fonctions de diffusion dans les quatre configurations déjà considérées sont tracées ci-dessous.



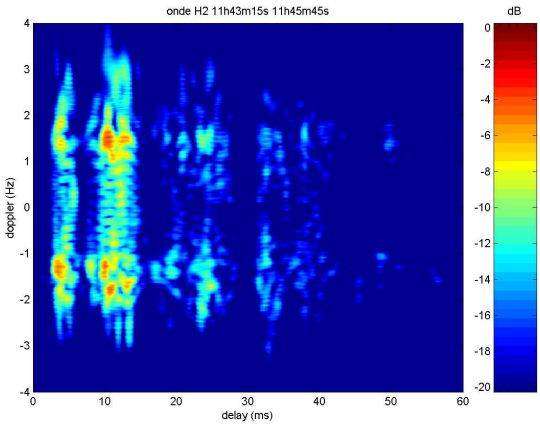
Distance 2500 m / TX & RX fixes



Distance 5000 m / TX & RX fixes



Distance 9000 m / TX & RX fixes



Distance 5000 m / TX en rapprochement à 4 m/s

Figure 3 : Fonction de diffusion relevée

On constate un accroissement de facteur d'étalement comme indiqué dans le tableau ci-dessous (à noter qu'ici les étalement TS et DS on été mesurés sur les figures ; une définition plus rigoureuse serait préférable). A noter aussi que l'ordre de grandeur du facteur d'étalement TS.DS est important, jusqu'à 10^{-2}, et supérieur aux valeurs habituelles pour d'autres canaux (Proakis [8]).

Distance	2500 m	5000 m	9000 m
TS (ms)	15	30	35
DS 5Hz)	1.5	1	3
TS * DS	$2\ 10^{-3}$	$3\ 10^{-3}$	10^{-2}

Figure 4 : Valeurs expérimentales de l'étalement du canal

Un analyse quantitative plus précise reste à faire ; pour conclure sur les tracés de la capacité du canal, autant dans les deux premiers cas (2500 et 5000 m) la capacité est vraisemblablement proche de ce qu'on observe sur le tracé en bas de la figure 2 (canal stationnaire sur 60 symboles), autant dans le troisième cas on est certainement dans des conditions plus proches du tracé du haut de la figure 2 (canal stationnaire sur 10 symboles).

3. Modélisation théorique et implémentation numérique

Nous donnons une brève description des hypothèses physiques et des techniques numériques impliquées dans le modèle *NARCISSUS-2009*, dans sa forme opérationnelle actuelle. Ce code repose sur diverses "boîtes" mutuellement reliées ou enchâssées les unes dans les autres :

→ "Toolbox" de propagation géométrique**:** après transmission à partir de la source, et entre les épisodes d'interaction avec la surface ou le fond de la mer, la densité spectrale et directionnelle moyenne de puissance acoustique rayonnée (ou « luminance ») se conserve le long de trajectoires dont la projection sur l'espace physique 3D s'identifie aux rayons acoustiques et qui peuvent être numériquement évaluées ; plus exactement, elle s'atténue exponentiellement si l'on prend en compte l'absorption volumique (viscosité, relaxation chimique, effet des bulles d'air superficielles d'après le modèle de Hall [9]). Des routines élémentaires de calcul de rayons acoustiques sont appelées, calculant les angles, retards, etc. d'arcs de rayons.

→ Scattering aux frontières : la puissance acoustique rencontrant une surface aléatoire est redistribuée selon deux composantes :

- Une partie cohérente, se comportant de façon spéculaire, c'est-à-dire comme si l'interface était plan, sauf pour un taux d'atténuation prenant la forme d'un simple coefficient de réflexion;
- une partie aléatoire diffusée, redistribuée par scattering, selon une directivité spatialement et selon un étalement fréquentiel (pour la surface agitée, ou pour le fond en cas de mouvement de la source)

La relation entre la luminance incidente et la luminance diffuse prend la forme d'une intégrale, où intervient un « noyau de diffusion » ou « indice de réverbération généralisé » qui rend compte de cette directivité et de cet étalement fréquentiel. Ce noyau de diffusion se construit à partir de la relation linéaire entre les moments d'ordre 2 du champ acoustique incident et du champ acoustique réfléchi ; un modèle pour le coefficient de réflexion et le noyau de diffusion peut être construit à partir des statitiques de la surface ou du fond, à l'aide de l'approximation aujourd'hui classique dite « de faible pente » (voir e.g.. McDaniel [4], ou Voronovitch [3], Ch.6, pp.191-194 sous le nom d'approche "de Meecham-Lysanov"). L'indice de diffusion prend finalement la forme d'une intégrale de l'exponentielle de l'intercorrélation spatiale 2D et temporelle de la hauteur des rugosités aléatoires, qui constitue ainsi une entrée du modèle. Le spectre expérimental choisi pour la hauteur de vague est le modèle empirique JONSWAP (Hasselmann *et al.* [5]), complété par un spectre directionnel emprunté à Donelan *et al.* [6]. Les irrégularités du fond à l'ordre de la microtopographie (période horizontale inférieure à 1-2 km, oscillations verticales d'amplitude inférieure à 1-2 m) sont supposées présenter une fonction d'intercorrélation spatiale 2D de forme Gaussienne.

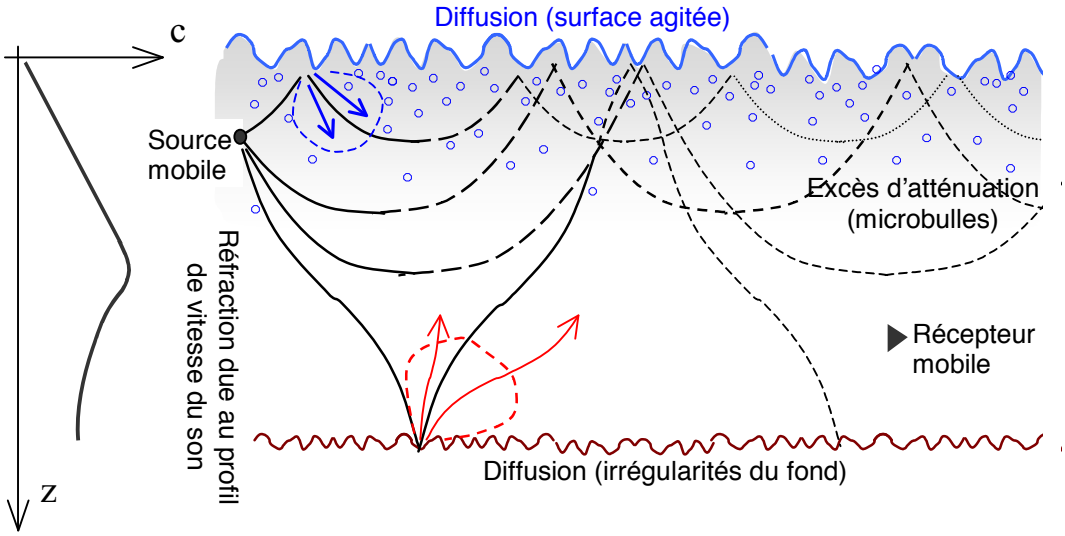


Figure 6 – Mécanismes physiques de fluctuations du chenal acoustique sous-marin

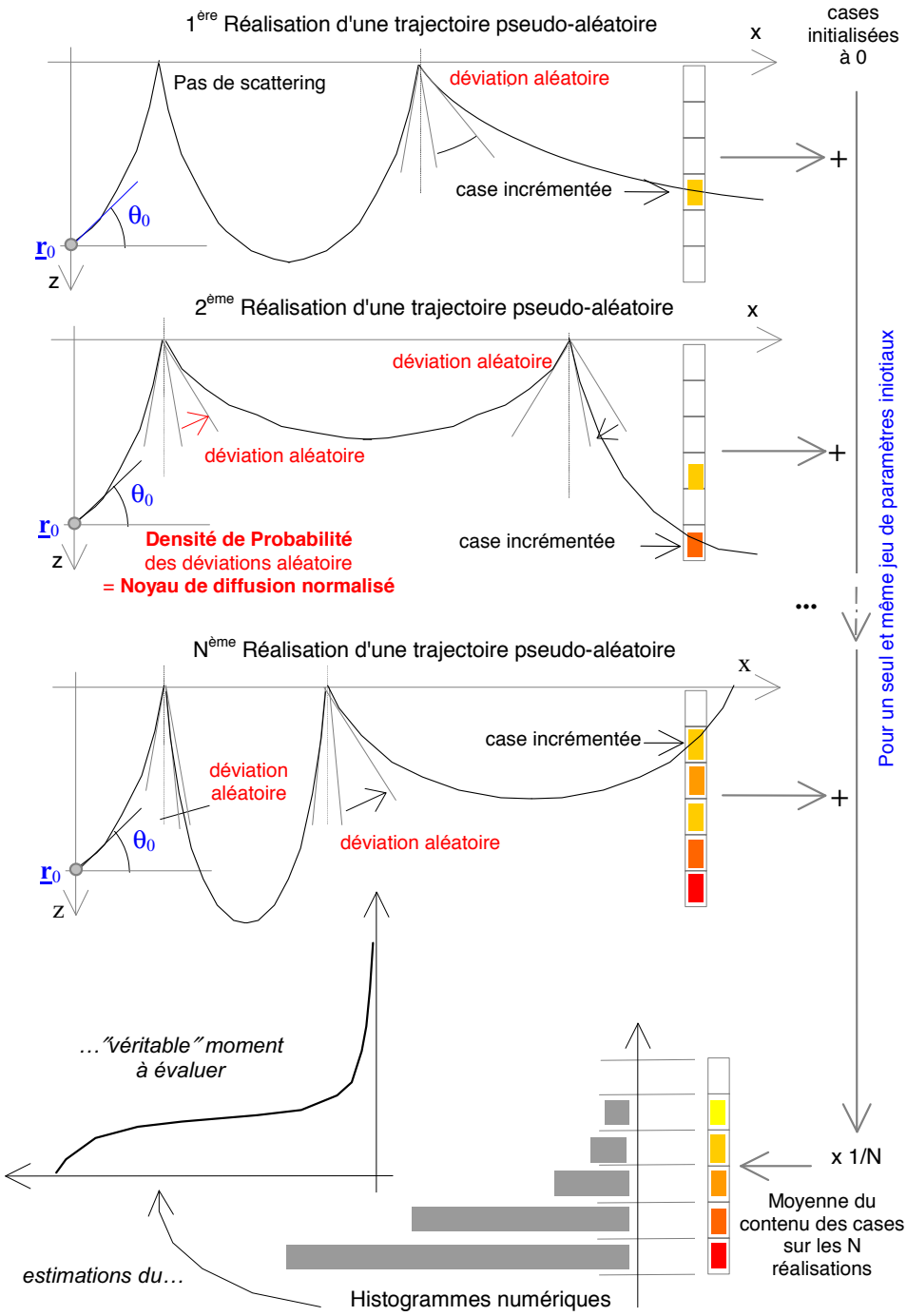


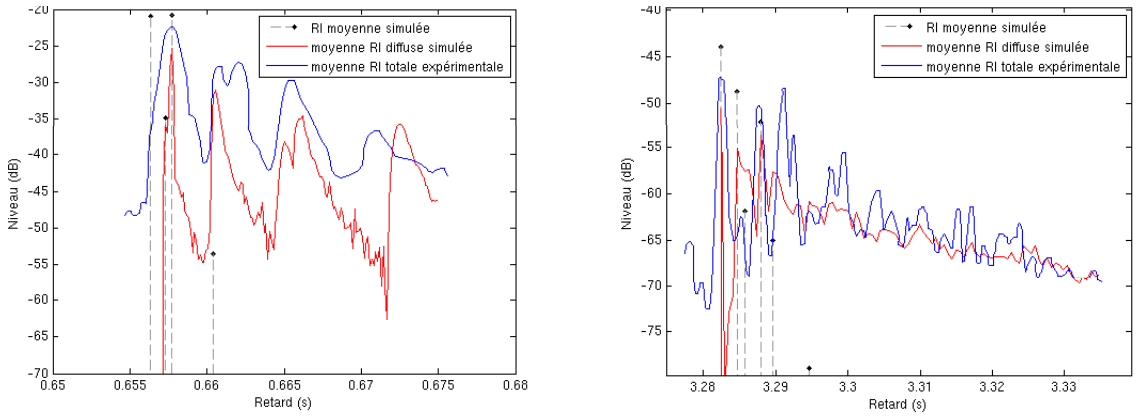
Figure 7 - Principes de la méthode de calcul des moments statistiques de la RI, combinant loi de conservation le long de trajectoires et scattering par technique de Monte-Carlo
(par cette méthode, on évalue la somme du moment recherché sur des 'cases' dans un espace fictif, mais surtout pas des réalisations individuelles de la RI ! L'espace considéré n'est pas l'espace 2D, mais un espace fictif xyz, direction θ,φ, retard, fréquence)

Une technique de Monte-Carlo, schématisée sur la Figure 7, est utilisée pour représenter la relation intégrale entre luminance incidente et luminance réfléchie : la luminance se conserve, ou s'atténue exponentiellement, le long de trajectoires de l'espace position-direction-temps-fréquence, trajectoires qui connaissent des déviations aléatoires à chaque rencontre avec la surface ou le fond ; la densité de probabilité de ces déviations n'est autre que le noyau de diffusion normalisé. Nous évaluons la contribution de chaque trajectoire à la somme de la luminance sur des cases de dimension finie de cet espace position-direction-temps-fréquence. Wilson & Tappert ([7]) ont appliqué une telle procédure, historiquement introduite dans le domaine de la modélisation des flux de particules, à un problème voisin du notre : le scattering du son par des variations aléatoires de l'indice de réverbération associées à des ondes internes océaniques.

A partir des moments statistiques évalués par méthode de Monte-Carlo, des réalisations typiques de la Réponse Impulsionnelle peuvent être tirées, moyennant quelques hypothèses statistiques supplémentaires :

- la RI, comme fonction du temps de retard et du temps d'émission, est la somme de la partie spéculaire moyenne et d'une partie aléatoire suppose normale; ce dernier point peut être justifié en considérant qu'à retard fixé, cette partie aléatoire est la somme des contributions d'un grand nombre de facettes indépendantes de la surface et du fond. Nous avons par ailleurs directement vérifié cette hypothèse sur histogrammes expérimentaux dans des configurations où source et récepteur étaient immobiles (voir Cristol [10] and [11]).
- Nous avons supposé vraie l'approximation de "uncorrelated scattering" approximation (see *e.g.* p.706, in Proakis [10]), qui pose que la RI, comme fonction du temps de retard, se décorrèle quasi-instantanément (fonction d'intercorrélation en Dirac).

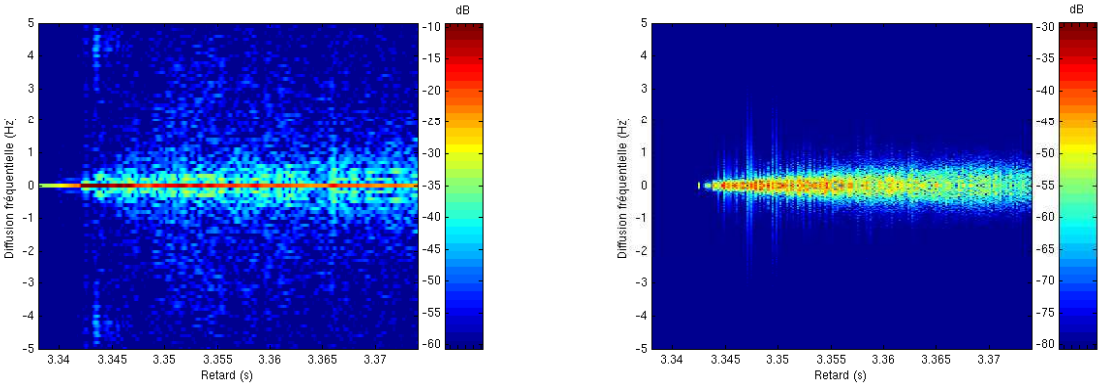
La validation d'un modèle de la complexité de *NARCISSUS* doit être effectuée globalement, contre des données expérimentales, pour deux raisons : d'abord, parce que le problème complet combine de multiples éléments, descriptions empiriques et sous-modèles, chacun d'entre eux méritant d'être soumis à validation ; ensuite, parce que nous ne connaissons pas de modèle numérique comparable qui pourrait servir de référence. Nous avons rapporté dans divers papiers antérieurs quelques comparaisons satisfaisantes des sorties du modèle avec des données expérimentales ([10], [11], [12]), dans le cadre des projets Européens MAST PROSIM et SWAN, à partir de données recueillies sur des plateaux continentaux ; nous donnons ci-dessous quelques autres exemples de comparaisons portant sur la variance de la RI comme fonction du temps de retard et sur l'étalement Doppler de la RI en fonction du temps de retard.



distance 1.km 5.km

Figure 8 - Variance de la Réponse Impulsionnelle observée et simulée

Méditerranée - profondeur fond 75 m profondeur source 25 m - profondeur récepteur 25 m



RI observée RI simulée

Figure 9 - Fonction de diffusion fréquentielle de la RI

Mer du Nord - profondeur fond 20 m - Distance source-récepteur 5km

References

[1] P.A. Bello, *"Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channel"*, IEEE Trans. Commun. System., volCS-11, pp.360-393, Dec. 1963

[2] G. Durisi, U. Schulster, H. Bolcskei and S. Shamai, "*Non Coherent Underspread Fading Channels"*, Submitted IEEE Trans on Information Theory, April 2008 (accessible sur http://arxiv.org/abs/0705.1682)

[3] A.G.Voronovitch *WAVE SCATTERING FROM ROUGH SURFACES* Springer Verlag, Berlin-Heidelberg (1991)

[4] S. McDaniel**,** *"A small-slope theory of rough surface scattering", in* J.Acoust.Soc.Am.**95(4)**, pp.1858-1864 (1994)

[5] K.Hasselmann, D.B.Ross, P.Müller & W.Sell *"A Parametric Wave Prediction Model",in* Journal of Physical Oceanography **6**, pp.200-228 (1976)

[6] M.A.Donelan, J.Hamilton & W.H.Hui *"Directional Spectra of Wind-Generated Waves", in* Phil. Trans. R. Soc. Lond**. A 315**, pp.509-562 (1985)

[7] H.L.Wilson & F.D.Tappert *"Acoustic propagation in random oceans using the radiation transport equation"*, in J.Acoust.Soc.Am.**95(4)**, pp.256-274 (1979)

[8] J.Proakis *DIGITAL COMMUNICATIONS (2nd Edition)* McGraw Hill, Singapore (1989)

[9] M.V.Hall *"A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40 kHz"*, in J.Acoust.Soc.Am. **86(3)**, pp.1103-1117 (1989)

[10] X.Cristol "*Multiple Bottom and Surface Scattering in Shallow Waters : Theoretical and Experimental Results*", Proceedings of IMDEX ASIA 99 "Maritime Security in the Asia Pacific Region" (Singapore), 1999

[11] X.Cristol "*Distortions of acoustic narrow-band signals after scattering from the rough moving sea-surface: experimental model-validation*", Proceedings of the Fifth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2000 (Lyon, France), 2000

[12] X.Cristol "*NARCISSUS-2005: A Global Model of Fading Channel for Application to Acoustic Communication in Marine Environment*", Proceedings of Oceans-05, Brest, France (2005)