

Geneviève Jourdain

Sa carrière et son œuvre

J.L.LACOUME*, B. FAURE* ET J.Y. JOURDAIN

Avec la participation de

MARYLIN ARNDT**, JEAN-MARC BROSSIER*, MATHIEU DESNOES***, PATRICK GOUNON*
 JOEL.LIENARD*, GERARD.LOUBET*, DIDIER MAUARY****, BENOIT MISCOPEIN**, LAURENT ROS*

∞ GIPSA Lab ** France-Télécom R1D Meylan, ***LETI**** SC Electronique

Geneviève Jourdain, comment décrire simplement et complètement sa carrière et son œuvre si riches, si larges et si diverses ?

Chercheur de renom, elle a bâti une œuvre considérable et diverse.

Enseignante de talent et de conviction, elle a formé plusieurs générations d'ingénieurs.

Femme de communication et d'action, elle a marqué de son empreinte la communauté de recherche en lui apportant sa connaissance du terrain et sa vision prospective de l'évolution de la recherche et de l'enseignement.

Guide sûr et bienveillant, elle a été un maître au sens classique. Elle a formé de nombreux élèves, stagiaires, thésards, qu'elle a pris sous son aile et qui lui ont été chers. Elle les a guidés, conseillés, leur a ouvert des portes. Ils sont venus enrichir la famille, selon la belle image du Professeur Blanc-Lapierre, du GRETSI, contribuant ainsi à la vie de l'École française de traitement du signal.

1. Geneviève Jourdain-Chercheur de renom

L'œuvre de Geneviève Jourdain est solidement ancrée sur les trois solides piliers qui sous-tendent toute sa recherche :

- ∞ la modélisation inspirée par la physique et l'ingénierie,
- ∞ la vérification et l'approfondissement fondés sur des simulations numériques et expérimentales,
- ∞ l'expérimentation dans le milieu marin qui fut la source de son inspiration et le champ de développement de son œuvre de chercheur.

Pionnière du traitement du signal, Geneviève Jourdain a développé son œuvre à l'échelle nationale et internationale. Elle a introduit de nouveaux modèles, des méthodologies de mesure et de caractérisation. Elle les a validés expérimentalement dans le cadre de campagnes de mesures de grande envergure débouchant sur les applications.

Chartrousaïne, Geneviève Jourdain a éclairé d'un jour nouveau les réalités de l'expérimentation par la lumière de la raison guidée par la foi issue de son enracinement dans la terre de chartreuse.

1.1. Geneviève Jourdain et la naissance du traitement du signal (1966-1976)

Cette période est marquée par la soutenance de sa thèse de Docteur Ingénieur en 1970 et de sa thèse de Doctorat ès Sciences en 1976 et les publications associées.

Dans les années 60 le traitement du signal n'était pas encore une discipline Universitaire reconnue. Geneviève Jourdain a apporté sa part à l'œuvre des bâtisseurs du traitement du signal, aux côtés de Georges Bonnet et de Pierre-Yves Arqués au CEPHAG, en relation avec H. Mermoz, de la DCN et des centres de recherche industriels Alcatel avec Hubert Debard et de Thomson-CSF avec Pierre Tournois, dans la ligne de l'élan donné par André Blanc-Lapierre et Bernard Picinbono et sous la houlette de Louis Néel à Grenoble.

Sa thèse de Docteur Ingénieur est consacrée à la *conception de signaux* originaux, les codes aléatoires, permettant d'optimiser les mesures de temps et de fréquence. La grande originalité de ce travail est l'utilisation de signaux aléatoires. *Ceci est un retournement*, les signaux aléatoires, le bruit, passent du statut de parasite à celui de signaux utiles et efficaces. Dans ce travail, elle introduit la notion de fonction d'ambiguïté des signaux aléatoires.

Ce travail de thèse trouve son équilibre en associant la conception de nouveaux signaux, à partir d'une analyse théorique, à leur réalisation par le générateur de codes aléatoires [1,2]. Il trouve son inspiration et sa finalité dans les applications en acoustique sous-marine.



Figure 1
Générateur de codes aléatoires et fonction d'ambiguïté des codes [1,2]

Dans sa thèse de Doctorat ès Sciences et dans les publications associées Geneviève Jourdain contribue à la création d'une nouvelle modélisation prenant en compte les non-stationnarités du milieu marin qui s'avèrera très fructueuse dans la description des systèmes et plus particulièrement dans la description systématique de la propagation en acoustique sous-marine. Les apports théoriques de cette nouvelle modélisation sont en prise directe avec la réalité dans la description et la caractérisation des milieux réverbérants que l'on rencontre, en particulier en ASM dans le *canal marin*, mais aussi en RADAR (le fouillis).

Dans ces études Geneviève s'inscrit dans la ligne de recherche « *vaste et de longue haleine* » en acoustique sous-marine annoncée par A. Blanc-Lapierre dans son discours introductif au premier colloque GRETSI en 1967.

« *Un des dangers de la situation actuelle réside dans la tentation pour les théoriciens de trop se cantonner, pour des raisons de commodité de calcul, dans des modèles de bruit de type bruits nobles possédant les caractéristiques 1 (stationnarité), 2 (gaussiannité) 3 (blancheur) ou, tout au moins dans des modèles obtenus par de simples perturbations de ces derniers... On risque de s'enfermer ainsi dans un cadre trop éloigné de la réalité. Il est absolument nécessaire d'injecter dans nos modèles, et dans nos méthodes de traitement de l'information, les données qui découleront d'une meilleure connaissance du milieu.... Il s'agit d'un effort de recherche vaste et de longue haleine...* »

Dans cette œuvre, de pionnier Geneviève posait les bases de son activité de recherche : *le canal marin et la conception de signaux*.

Les trois chapitres de la thèse de Doctorat ès sciences de Geneviève Jourdain sont par leurs titres une nouvelle illustration de l'équilibre de ses recherches :

Chapitre 1 : Modèles théoriques : Filtres aléatoires à paramètres variables et modèle réverbérant.

Chapitre 2 : Simulation de milieux aléatoires non –homogènes.

Chapitre 3 : Applications de la modélisation des milieux de transmission variables.

Elle y met en œuvre les recommandations formulées par A. Blanc-Lapierre. On lit dans l'introduction « *On en arrive donc à abandonner le modèle cher aux théoriciens de stationnarité totale d'un phénomène physique* »

Geneviève Jourdain élargit le cadre des modélisations réductrices classiques de manière à englober les phénomènes réels rencontrés dans le milieu marin. Elle étend la modélisation de la non-stationnarité et de l'incertitude (aléas) introduite par les filtres aléatoires à paramètres variables (FAPV) au modèle de milieu réverbérant. Elle établit des tests d'hypothèse simples, fondés sur l'élargissement fréquentiel, permettant de valider ces modélisations. Elle situe le nouveau modèle de milieu réverbérant qu'elle a développé dans le cadre général des modélisations existantes. Elle étend la notion de fonction d'ambiguïté, bien adaptée aux FAPV, en introduisant la fonction d'ambiguïté en compression qui est l'outil adapté aux milieux réverbérants.

Dans cette thèse, Geneviève Jourdain introduit la *description interne*, issue de la physique du milieu, et la *description externe*, tournée vers l'utilisation de la propagation dans le milieu pour la transmission d'informations. Elle montre la dualité et la complémentarité de ces deux approches. Dualité de l'approche interne, tournée vers la connaissance du milieu et de l'approche externe vers son utilisation. Complémentarité des deux approches dont l'harmonie assure la vraisemblance. L'approche externe développée par Geneviève Jourdain débouche sur les deux points d'ancrage de son travail de recherche : *le canal marin* et sa description par le modèle réverbérant, la *conception de signaux et des systèmes* adaptés à ce milieu de propagation.

Sur ces bases solides, Geneviève Jourdain va développer une intense activité de recherche concrétisée par de nombreuses publications et inscrite dans son action de pédagogue et de guide par les nombreuses thèses dont elles constituent le fondement.

La modélisation, et tous les fruits qu'elle a engendrés ne sont qu'une facette de l'activité de Geneviève Jourdain. Ce travail de fond a été validé par des simulations en laboratoire et des expérimentations en milieu marin. Pour les milieux aléatoires non homogènes Geneviève Jourdain propose deux simulations électroniques d'un FAPV et d'un milieu réverbérant [3] et une expérimentation plus proche de la réalité : la simulation en cuve d'un milieu réverbérant. Ces études ont impulsé, au sein du CEPHAG, le développement de technologies de simulation [4] et de traitement de pointe pour la représentation de milieux de propagation et la mise en oeuvre de techniques d'estimation. Ces dispositifs originaux ont été ensuite utilisés dans des expérimentations en mer.

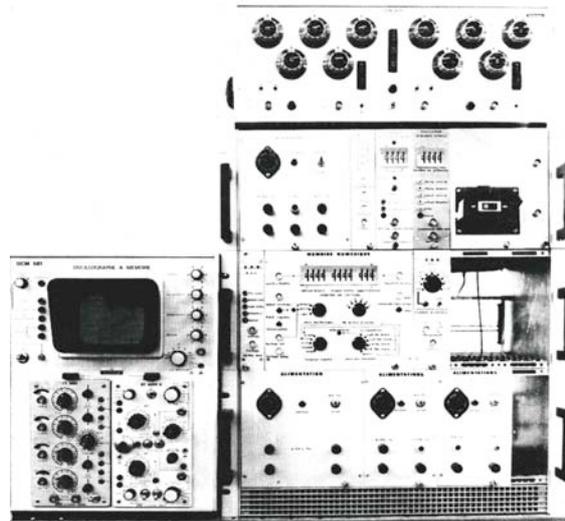


Figure 2
Systèmes électroniques de simulation du milieu marin développés au CEPHAG
Simulateur d'échos diffus [4]

Le modèle de milieu réverbérant établi par Geneviève Jourdain est un des premiers modèles réalistes permettant de décrire le phénomène physique de la réverbération. La réverbération pose des problèmes difficiles aux systèmes de détection en acoustique sous-marine car, comme le prévoyait dès 1967 A.Blanc-Lapierre, il ne vérifie pas les hypothèses classiques. Ce bruit n'est ni blanc, ni stationnaire ni indépendant du signal. Il représente donc un véritable défi relevé par Geneviève Jourdain qui propose plusieurs approches du récepteur optimal en présence de réverbération. Ce défi est resté pour elle un objectif permanent. En s'appuyant sur les

progrès de la modélisation parcimonieuse réalisés, en particulier par les modèles autorégressifs et sur la partition de l'espace des signaux en deux sous espace signal et bruits, elle a proposé dans les années 2000 de nouvelles structures de détecteurs en présence de réverbération.

La réflexion qui a conduit aux modèles, aux signaux et aux systèmes de traitement va se concrétiser dans les applications en acoustique sous marine.

1.2. L'acoustique sous-marine et les campagnes de mesure en mer

1.2.1. L'acoustique sous marine (ASM)

En 1970 la recherche dans le domaine ASM se focalisait sur deux thèmes : les matériaux piézo-électriques (réalisation de transducteurs et de senseurs en continuation des travaux pionniers de Paul Langevin) et la résolution des équations de la physique régissant la propagation dans l'eau de mer. La physique conduisait à l'équation du sonar et au tracé de rayons acoustiques.

L'équation du sonar fait le bilan énergétique prenant en compte les pertes par divergence, l'absorption en fonction de la fréquence, les caractéristiques des antennes et le bruit, elle permet de prédire le rapport signal à bruit donnant les performances de détection et d'estimation sous des hypothèses simplificatrices.

Le tracé des rayons acoustiques dans le canal marin fait apparaître des trajets multiples. Ces trajets multiples sont issus de la variation de la vitesse des ondes en fonction de la profondeur et des réflexions sur le fond et la surface. La figure 3, qui donne un tracé de rayons pour un profil de vitesse, illustre ce phénomène de trajets multiples.

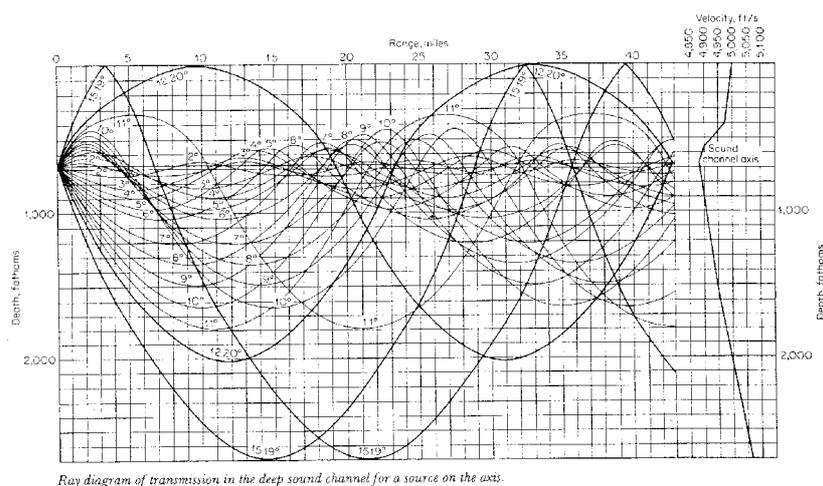
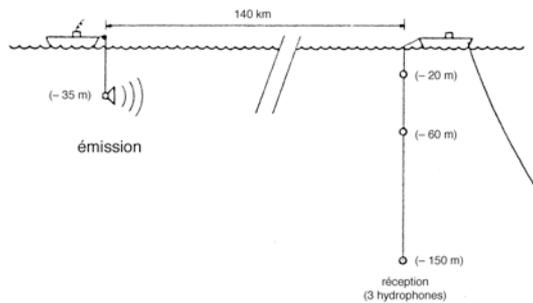


Figure 3

Tracé de rayons pour une bathymétrie donnée

La présence de trajets multiples stables avait été établie expérimentalement. Dans les expérimentations, présentées figure 4, un émetteur tracté était immergé à 35 mètres. Le signal était reçu à 140 Km sur trois récepteurs immergés à 20, 60 et 150 mètres. Les signaux émis, des séquences binaires pseudo aléatoires, permettaient de réaliser, par filtrage adapté en réception, une compression de temps.

La figure 4 montre la sortie du filtre adapté appliquée à une série d'émissions s'étalant sur 25 minutes. Dans cette situation, le canal de transmission fait apparaître trois trajets présentant des retards différents.

Dispositif expérimental

Mise en évidence des trajets et mesures des temps de propagation par filtrage adapté.

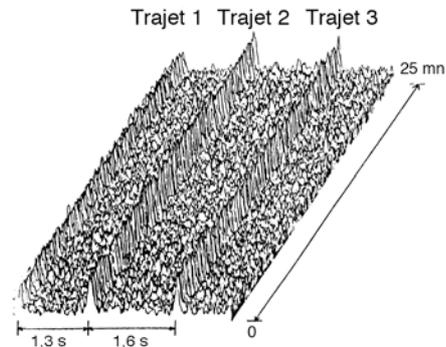


Figure 4

Mesure de retards en ASM

Le traitement du signal trouvait dans l'ASM des applications particulièrement intéressantes que ce soit en sonar ou en prospection pétrolière. Les fréquences utilisées permettaient les traitements numériques. Les réseaux de capteurs ouvraient la voie au traitement spatial. Pour bien poser les problèmes d'estimation, de détection, de prédiction ou de prise de décision il fallait adapter les modèles de signaux et de bruit à la complexité du milieu marin. Dans cette perspective, Geneviève Jourdain, dans la ligne de sa thèse, menait ses recherches de caractérisation des signaux et des systèmes.

1.2.2. Le polygone AFAR (Azores Fixed Acoustique Range)

Dans les années 1970 plusieurs pays de l'OTAN dont la France mirent en place des installations fixes d'émission et de réception près de la petite île de Santa Maria dans l'archipel des Açores. Le but de cette coopération était d'utiliser des émetteurs et récepteurs fixes pour s'affranchir des mouvements des navires océanographiques et de disposer d'un polygone de mesure des paramètres du milieu. Trois tours métalliques, de la taille de la statue de la liberté, avaient été immergées à 300, 575 et 775 mètres de profondeur et ancrées par la marine nationale sur des pitons rocheux distants de près de 60 Km. Sur chaque tour étaient fixées trois antennes fonctionnant dans trois bandes de fréquence : 500 Hz-1000 Hz, 1000 Hz-2000 Hz et 2000 Hz-3000 Hz. Toutes les antennes étaient réceptrices, les trois antennes de la tour Echo, immergées à 575 mètres, pouvaient aussi émettre.

Pour Geneviève Jourdain et les équipes du CEPHAG *ce fut une opportunité très importante, d'appliquer les stratégies de caractérisation de milieu en cours de mise au point. Pourquoi ne pas tenter d'émettre des signaux ayant une bonne fonction d'ambiguïté puisqu'il devenait possible d'émettre en large bande à partir d'un pilote des signaux synthétisés reproductibles ?* Aux fréquences du polygone AFAR l'approximation d'une propagation par rayons, la célérité dans l'eau jouant le rôle de l'indice de réfraction en optique, est valable et des comparaisons avec l'astronomie peuvent être faites : la source apparaîtrait-elle en réception comme un halo ou comme un point brillant qui se déplace ? Qu'en serait-il en fréquence ? On se doute que la réponse pouvait être différente suivant les distances et les échelles de temps considérées.

1.2.3. Les expérimentations

1.2.3.1. AFAR 74, 75, 76

Les premières expérimentations sur le polygone AFAR dans le but de caractériser la propagation acoustique entre deux points eurent lieu en novembre 1974, décembre 1975 et juillet 1976 avec le concours, pour la réception à distance variable, de l'avisos escorteur Amiral Charner, puis des sous-marins Morse et Marsouin les années suivantes. Il est intéressant d'utiliser un sous-marin car son bruit propre est plus faible que celui d'un bâtiment de surface et les mouvements de plate-forme en plongée sont bien moindres. Avec un sous-marin, on caractérise le milieu et non l'effet du roulis et du tangage et les mesures sont moins polluées par le bruit. Différentes configurations de fréquences et de distances de propagation ont été testées. Par la suite cette exploration en distance et en fréquence a été poursuivie de manière à explorer les différents régimes de propagation

Dans ces expérimentations, deux classes de signaux ont été émises

- ∞ des séquences binaires de longueur maximale (SBLM) de PSK à retournement de phase (0 et π) dont le produit BT allait de 128 à 512 (jamais de tels signaux n'avaient été utilisés en mer)
- ∞ des fréquences pures sous la forme de peignes de raies synchrones plus ou moins longs qui ont permis d'accéder à la réponse en fréquence du milieu d'analyser finement l'évolution des phases à la réception et d'évaluer des élargissements fréquentiels. Ces modulations, émises dans plusieurs bandes simultanément ont également été exploitées comme des séquences de communication dans des systèmes à diversité de fréquence.

Les synthétiseurs ont été réalisés au CEPHAG [5]. Pour les signaux PSK, le code qui peut être quelconque est enregistré dans une mémoire à tore de 32 Kbits utilisée pour moduler par inversion de signe une porteuse aux passages par zéro. Le synthétiseur de peignes de raies synchrones résulte d'une invention brevetée de J.P. Henrioux [6, 7]. Il donne un signal qui est la somme (jusqu'à 256) de composantes sinusoidales de même amplitude. Pour les expérimentations aux Açores nous ne disposions pas de calculateur embarqué. Le contrôle se faisait à l'aide d'analyseurs de spectre l'enregistrement magnétique sur bande 1 pouce, 14 pistes. Les pilotes servant à l'asservissement du magnétophone et à l'échantillonnage des signaux étaient enregistrés sur les pistes voisines des signaux utiles.

D'autres expérimentations de caractérisation utilisant les mêmes méthodes ont été menées sur d'autres sites en recevant les signaux sur des antennes soit verticales (TBF 82) soit horizontales (IFP 84) apportant une dimension spatiale aux modèles. Pour tester la propagation à grandes distances, des émetteurs à plus basse fréquence furent utilisés en Atlantique jusqu'à 3000 Km avec réception sur des « flûtes pétrolières¹ ».

Des expérimentations de même nature, pour des transmissions verticales ou obliques, ont été exploitées pour évaluer des techniques de communication. Les travaux de Geneviève Jourdain ont aussi été exploités pour caractériser en retard et doppler les échos de cibles étendues en sonar actif.

1.2.3.2. TBF 80, 81, 82

(entre Madère et les Açores dans la zone où les eaux méditerranéennes se mélangent aux eaux atlantiques)

La propagation se faisait entre :

- ∞ Un bateau émetteur, le « HMS St Margarets » utilisant deux sources basse fréquence tractées : l'une de 40 à 70 Hz pour 190 dB à 1 mètre/ref mPa et l'autre de 120 Hz +/- 5Hz et 165 dB.
- ∞ Un bateau en réception, le « d'Entrecasteaux » avec un ancrage grand fond, une ligne de 4 hydrophones éloignée de 300 mètres et une flûte verticale de 19 hydrophones plus rapprochés.

Trois éléments nouveaux importants apparaissent dans cette expérimentation :

- ∞ de nouvelles sources linéaires basses fréquences (< 100 Hz),
- ∞ la réception sur une antenne verticale
- ∞ et un système numérique de contrôle et d'aide à la décision qui sera utilisé par la suite durant plusieurs années.

¹ Réseau de capteurs reliés par une structure souple traînée dans la mer par un navire utilisé à l'origine en prospection pétrolière sous marine.

Ce système de contrôle est formé

- ∞ d'un calculateur temps réel programmé multi-tâches avec un disque dur de 10 Moctets, avec un bus IEEE,
- ∞ d'un analyseur de spectre connecté et piloté, interfacé avec un ensemble de traitement basé sur des modules séries, réalisés au CEPHAG.

Ce système mémorise les paramètres expérimentaux, lance les programmes de contrôle sur l'analyseur et l'ensemble de modules série et enregistre les résultats dans le « cahier de mesure ». Il relit, à la demande, le cahier de mesure et fournit les bilans énergétiques pour les instants demandés. Il permet en d'évaluer en temps réel le déroulement des opérations et de détecter instantanément les pannes ce qui est important quand au regard des moyens mis en jeu dans ces campagnes de mesure.



Figure 5
Mise à l'eau d'un émetteur basse fréquence utilisé dans les campagnes TBF-IFP

1.2.3.3. IFP 84

La nouveauté de cette campagne était l'utilisation d'une flûte pétrolière tractée horizontalement pour étudier la propagation à très longue distance. Les sources utilisées étaient les mêmes que pour TBF 82. L'antenne est en deux tronçons de 48 traces, sa longueur utile est de 2400 mètres. Le principe de l'expérimentation est simple : le bateau émetteur et le bateau récepteur partent le 18 mars à 15 heures du même point ($31^{\circ} 54,7' N$; $20^{\circ} 30,9' O$), ils font des routes à 45° , le bateau émetteur allant à une vitesse telle qu'il reste toujours par le travers du bateau récepteur. À bord on forme une voie par le travers en sommant tout ou parties des traces ce qui fait bénéficier d'un gain de traitement de 15 dB au maximum. La précision requise pour la vitesse est telle qu'à 100 Km l'émetteur doit rester à ± 1 Km du travers en supposant que la flûte n'est pas

déportée par des courants. Dans ces conditions on comprend l'intérêt d'une chaîne d'analyse en temps réel à bord. Le 30 mars à 7 heures, les émissions sont arrêtées, les deux bateaux sont à 2000 Km l'un de l'autre. Le bateau récepteur continue de recevoir les signaux pendant un peu plus de 20 minutes...

1.2.4. L'impact de ces expérimentations

Réalisées pour mettre en pratique les représentations du milieu marin en termes de systèmes et de filtres développées par Geneviève Jourdain, ces campagnes d'expérimentations ont alimenté de nouvelles analyses théoriques

- ∞ en détection,
- ∞ en mesure de temps d'arrivée, exploitées en tomographie océanique,
- ∞ en mesure des phases, exploitées en communication,
- ∞ et en description des déformations d'une surface d'onde en TBF.

L'impact des mesures en très basse fréquence a été très grand, les militaires ont évalué le danger que représentait l'utilisation des flûtes pour la détection des sous-marins nucléaires. Il faut sur ce point saluer la clairvoyance de l'IGA François Lefaudeux qui, conscient de ce danger, a favorisé avec constance ce champ de recherche. Parallèlement la technologie des flûtes a fait des progrès très rapides et elles sont maintenant à la base de tout système sonar que ce soit de sous-marin, de bâtiment de surface, voire de drone.

Ces expérimentations ont alimenté des réflexions sur la possibilité de transmettre de l'information dans le milieu marin. Un nouvel axe de recherche est né au CEPHAG dès 1976 en exploitant les données du polygone AFAR pour évaluer les communications sous-marines. Les questions se sont posées : peut-on augmenter le débit en regroupant les trajets multiples, le filtrage inverse est-il exploitable dans les conditions de rapport S/B rencontrées ? Comment composer avec la variabilité du milieu ? Geneviève Jourdain a animé une équipe sur ce thème et a commencé à diriger les premiers thésards d'une longue lignée dans ce domaine des télécommunications.

1.3. La mesure de retard source de nouvelles voies de recherche

Les études et les expérimentations auxquelles Geneviève Jourdain avait participé comme inspiratrice par ses résultats antérieurs sur la conception de signaux et la modélisation du canal marin ont ouvert plusieurs voies de recherche dans :

- ∞ la modélisation du signal propagé dans la mer
- ∞ la mesure des retards proches et la super résolution
- ∞ la tomographie acoustique océanique
- ∞ les communications en acoustique sous-marine

Enfin, lors de la révolution des systèmes de communication apportée par le développement de la téléphonie mobile, ayant acquis une expertise de pointe dans les communications en présence de trajets multiples, Geneviève Jourdain a ouvert une nouvelle voie de recherche sur les communications numériques.

1.3.1. La modélisation du signal propagé dans la mer : une histoire de phase

Le signal émis dans la mer, est formé d'une porteuse modulée :

$$s(t) = c(t) \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (F1)$$

- ∞ $c(t)$ est la modulation et ν_0 la fréquence porteuse.

Après propagation dans un canal à p trajets le signal reçu est :

$$r(t) = \sum_{k=1}^p \alpha_k c(t - \tau_k) \cos[2\pi\nu_0(t - \tau_k) + \varphi_k] + B(t) \quad (F2)$$

L'amplitude complexe de ce signal est

$$A(t) = \sum_{k=1}^p \alpha_k e^{j\Phi_k} c(t - \tau_k) + B_c(t) \quad (F3)$$

avec :

$$\Phi_k = -2\pi\nu_0\tau_k + \varphi_k$$

Le modèle du signal après propagation est caractérisé par trois familles de paramètres

- ∞ les retards τ_k ,
- ∞ l'atténuation d'amplitude de chaque trajet α_k ,
- ∞ le déphasage apporté par chacun des trajets.

et par les propriétés du bruit analytique.

Pour définir complètement le modèle on doit affecter à chacune des familles de paramètres des propriétés permettant de représenter la propagation.

Les retards sont les paramètres à mesurer. En l'absence d'informations supplémentaires on les considérera comme des variables déterministes inconnues.

L'atténuation sera considérée soit comme une variable déterministe inconnue soit comme une variable aléatoire.

La phase $\Phi_k = -2\pi\nu\tau_k + \varphi_k$ est la somme de 2 termes. Le premier terme est le déphasage de la porteuse induit par le retard. En première approximation, la célérité des ondes acoustiques dans la mer est constante. Dans un tel milieu, non-dispersif, le second terme est théoriquement nul. L'expérience a montré qu'il n'en était pas ainsi et que ce terme était généralement non nul. La raison physique de cette non-nullité de φ_k a été longtemps recherchée. Plusieurs pistes ont été envisagées :

- ∞ réflexions sur la surface
- ∞ passage de l'onde acoustique par un foyer ou une caustique.
- ∞ effet de l'absorption rendant le milieu dispersif.

Aucune explication ne s'est véritablement imposée et il a été convenu de retenir ce déphasage supplémentaire dont l'existence est imposée par l'expérience.

La modélisation de la phase a été également un sujet de discussion. Deux écoles s'affrontaient. D'un côté, les tenants de la grande variabilité de la phase qui proposaient de considérer la phase comme «la plus aléatoire possible» et donc de la représenter par une variable aléatoire équipartie entre 0 et 2π . D'un autre, les partisans d'une phase inconnue mais déterminée qui proposaient de la considérer comme une variable déterministe inconnue.

Dans les mesures de retards, ces deux modélisations conduisent à deux systèmes différents. Une phase aléatoire équipartie conduit à utiliser l'enveloppe de la sortie du filtre adapté pour réaliser la détection et la mesure de retard. Une phase déterministe inconnue conduit à estimer conjointement la phase et le filtre adapté. Ces deux hypothèses ont été utilisées dans les dispositifs de traitement proposés par Geneviève Jourdain.

1.3.2. Mesure de retards proches : la super résolution

La notion de retards proches est relative au signal utilisé pour faire la mesure. Un signal, il s'agit ici de la modulation, de bande passante B a, en temps, un pouvoir de résolution de Rayleigh de l'ordre de $\Delta t_R = \frac{1}{B}$. Lorsque 2 trajets induisent des retards dont l'écart est plus petit que Δt_R ils ne peuvent être séparés. La sortie du filtre adapté fait apparaître un seul maximum.

Pour préciser plaçons nous dans les conditions de mesure de la tomographie acoustique sous-marine que nous présenterons plus loin. Dans cette application, la fréquence porteuse est de l'ordre de 400 Hz et la bande de la modulation de l'ordre de 100 Hz. Dans ces conditions, deux trajets dont les retards sont distants de moins de 10 ms ne peuvent être séparés. On montre, par tracé de rayons avec des modèles de vitesse réalistes, que ce type d'écart se rencontre assez fréquemment.

Pour identifier un canal marin il est nécessaire de réaliser des mesures de retards proches. Cette mesure ne peut se faire avec le traitement classique : il faut mettre au point des méthodes de super résolution en temps. Dans [11] deux méthodes de super résolution sont proposées : une méthode en temps et une méthode en fréquence.

1.3.2.1. Super résolution en temps

La méthode en temps s'inspire des méthodes de super résolution développées en traitement d'antenne : le goniomètre [8] et MUSIC [9].

À partir du modèle de signal donné en (F3) :

$$A(t) = \sum \alpha_k e^{j\varphi_k} c(t - \tau_k) + B_c(t)$$

observé sur une série de retards $t_0, t_1 \dots t_{N-1}$, le nombre des instants considérés, N , est supposé supérieur au nombre de trajets p . On construit les vecteurs colonnes

$$A = \begin{pmatrix} A(t_0) \\ A(t_1) \\ \dots \\ A(t_{N-1}) \end{pmatrix} \quad C_i(\bar{\tau}) = \begin{pmatrix} c(t_i - \tau_1) \\ c(t_i - \tau_2) \\ \dots \\ c(t_i - \tau_p) \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} \alpha_1 e^{j\varphi_1} \\ \alpha_2 e^{j\varphi_2} \\ \dots \\ \alpha_p e^{j\varphi_p} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} B(t_0) \\ B(t_1) \\ \dots \\ B(t_{N-1}) \end{pmatrix}$$

et la matrice $p \times N$:

$$C = (C_0, C_1, \dots, C_{N-1}).$$

Appliqué au vecteur A , le modèle du signal reçu s'écrit

$$A = C.H + B.$$

Dans cette représentation, le modèle du signal reçu est semblable au modèle des signaux reçus sur un réseau de capteurs. Dans le modèle appliqué à un réseau de capteurs, la matrice C est formée des vecteurs sources, la matrice H est la matrice regroupant amplitudes des sources. La matrice B décrit le bruit.

En traitement d'antenne et donc par suite de l'analogie entre les deux situations, dans la détermination des retards, la matrice de covariance du vecteur des mesures permet de déterminer le sous-espace bruit et d'en déduire une méthode de super résolution pour la détermination de la direction des sources [8, 9]. Cette méthode de traitement peut être étendue, comme cela a été fait dans [10, 11], à la mesure de retards proches par super résolution en temps.

La matrice de covariance du vecteur des observations A est

$$R = E[C.C] = C.D.C + \Gamma_B$$

Γ_B est la matrice de covariance du bruit : $\Gamma_B = \sigma_B^2 I$: le bruit est blanc.

La matrice $D = E[H.H]$ est la matrice de covariance des amplitudes et des phases des différents trajets. Cette matrice dépend de la modélisation adoptée pour les amplitudes et les phases des trajets. L'analogie avec le traitement d'antenne est établie si on suppose que les amplitudes et les phases des différents trajets sont des variables aléatoires indépendantes. Dans cette hypothèse, la matrice D est diagonale et l'on se retrouve dans la situation du traitement d'antenne où l'on suppose que les sources sont des variables aléatoires indépendantes.

On voit à ce stade de la présentation toute l'importance de la modélisation. La validité des hypothèses sera vérifiée lors de l'application du traitement à des données réelles. Sans données réelles, toutes les propositions de traitement sont équivalentes. Les données réelles distinguent les méthodes conformes à la réalité expérimentale...

La méthode de super résolution en temps se termine par la diagonalisation de la matrice R . Le nombre de valeurs propres « dominantes » indique le nombre de trajets. Les retards de ces trajets sont donnés, comme dans le goniomètre ou MUSIC par les maxima de la fonction du vecteur des retards $\bar{\tau}$:

$$f(\bar{\tau}) = \frac{C^+(\bar{\tau})C(\bar{\tau})}{\sum |C(\bar{\tau})V_k|^2}$$

où,

∞ $C(\bar{\tau})$ est le vecteur C en fonction du vecteur des retards.

∞ $C^+(\bar{\tau})C(\bar{\tau})$ est le carré de la norme du vecteur $C(\bar{\tau})$

∞ et $\sum_{k=m}^p |C^+(\bar{\tau})V_k|^2$ est le carré de la projection du vecteur $C(\bar{\tau})$ sur le sous-espace bruit.

La méthode de super résolution en temps que nous venons de présenter s'applique lorsque les amplitudes et les phases des trajets sont des variables aléatoires indépendantes. La méthode alternative que nous allons présenter est applicable lorsque les amplitudes et les phases des trajets sont des variables déterministes.

1.3.2.2. Super résolution en fréquence [11]

Dans cette méthode de super résolution, on applique le filtre adapté au signal reçu (F3)

$$A(t) = \sum \alpha_k e^{j\varphi_k} c(t - \tau_k) + B_c(t)$$

La sortie du filtre adapté

$$\Gamma_{Ac}(t) = \int A(\theta)c(t - \theta)d\theta = \sum_{k=1}^p \alpha_k e^{j\varphi_k} \Gamma_c(t - \tau_k) + \beta(t)$$

est l'intercorrélation du signal reçu et du signal émis. Par transformation de Fourier on obtient l'interspectre du signal reçu et du signal émis :

$$S_{Ac}(\nu) = \sum \alpha_k e^{j\varphi_k} S_c(\nu) e^{-2j\pi\nu\tau_k} + B_1(\nu)$$

En divisant par le spectre du signal émis, on réalise un blanchiment de l'entrée :

$$S_{Blanchi}(\nu) = \frac{S_{Ac}(\nu)}{S_c(\nu)} = \sum \alpha_k e^{j\varphi_k} e^{-2j\pi\nu\tau_k} + B_2(\nu)$$

En commutant le temps et la fréquence l'interspectre blanchi $S_{Blanchi}(\nu)$ est une somme de « fréquences pures », d'amplitudes complexes $\alpha_k e^{j\varphi_k}$. Les méthodes de super résolution développées en analyse spectrale permettent de déterminer les fréquences qui sont ici les retards τ_k et les amplitudes complexes $\alpha_k e^{j\varphi_k}$.

Dans cette méthode, les amplitudes et les phases des trajets sont considérés comme des variables déterministes inconnues et leurs valeurs sont estimées.

1.4. La tomographie acoustique océanique (TAO)

La tomographie Acoustiques des Océans est apparue aux Etats-Unis au début des années 80 [13, 14]. Elle a été développée en France sous l'égide de l'IFREMER et de la DGA. Méthode de mesure des champs de température internes de l'océan à des échelles moyennes ou grandes, elle a contribué à répondre aux questions fondamentales concernant le réchauffement de l'hydrosphère. Les défis à relever par cette nouvelle méthode d'observation de l'intérieur des océans concernent plusieurs disciplines de recherche :

- ∞ la modélisation océanique et des phénomènes ayant un impact sur la propagation des ondes en basse et moyenne fréquence,
- ∞ la modélisation acoustique de la propagation dans le guide d'ondes sous-marin,
- ∞ le traitement des signaux et l'implémentation d'algorithmes de traitement dans des instruments océanographiques dédiés.

La tomographie acoustique océanique repose sur l'utilisation des ondes acoustiques se propageant sur plusieurs centaines de kilomètres dans la mer. Cette méthode d'observation des océans a été inspirée par le développement des techniques de détection acoustique sous marines. Les ondes acoustiques propagées dans le milieu marin portent des informations sur le milieu marin et peuvent donc être utilisées pour le « tomographe ».

L'émergence de ce nouveau concept d'observation des océans a également bénéficié de l'expérience acquise en prospection sismique. Dans ce domaine, on utilise des ondes élastiques propagées dans le sous-sol pour déterminer la profondeur des couches du sous-sol et contribuer ainsi à l'établissement de coupes géologiques renseignant sur la probabilité de présence d'hydrocarbures.

L'objectif observationnel de la TAO est la détermination, selon la position, des paramètres physiques : température, salinité... déterminant l'état de la mer. La célérité des ondes acoustiques est fonction de ces paramètres physiques. L'objectif est donc de déterminer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la position sur des bassins marins de quelques centaines de kilomètres d'étendue (méso échelle). Connaissant les relations reliant les paramètres physiques à la célérité, on peut déduire ces paramètres de la mesure de la célérité. Les systèmes d'observations mis en place sont formés d'un réseau d'émetteurs et de récepteurs (ou d'émetteurs-récepteurs) immergés, maintenus par des bouées, répartis à la périphérie de la zone à étudier (figure 6). L'émission est constituée de signaux à fort pouvoir de résolution en temps émis à intervalle régulier. Ce système de tomographie permet d'insonifier le milieu marin selon un ensemble de plans couvrant au mieux toutes les directions de l'espace. Dans cette technique de sondage, l'existence des trajets multiples est un facteur très positif car ils permettent de sonder l'océan à différentes profondeurs.

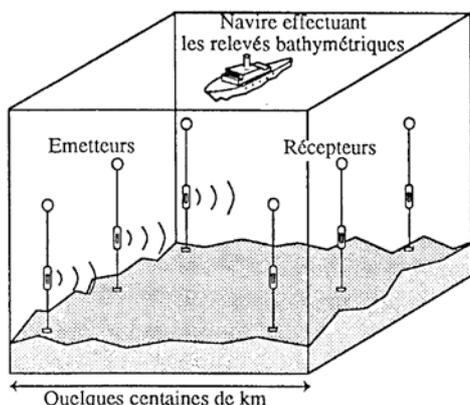


Figure 6

Disposition des émetteurs récepteurs

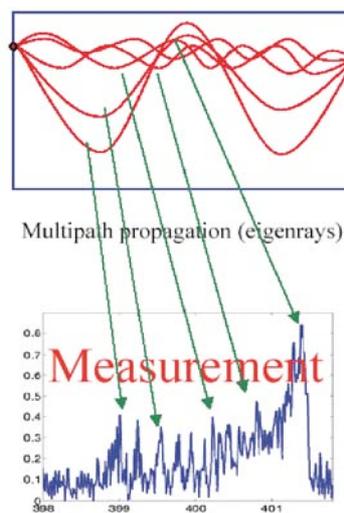


Figure 7

Tracé de rayons et mesure de retards

La mesure permettant d'atteindre la célérité est la mesure des temps de trajets sur les différents rayons acoustiques suivis par les signaux acoustiques (figure 7). Pour suivre l'évolution des célérités on utilise des émissions répétées régulièrement (toutes les 30 minutes par exemple) afin de suivre l'évolution des retards sur les différents trajets.

Le CEPHAG, et en particulier l'équipe ASM animée par Geneviève Jourdain, avait développé une activité dans le domaine de la mesure de retards en ASM avant que la TOA soit introduite en France. Cette expertise a permis à Geneviève Jourdain de s'impliquer dans les programmes de recherche de TAO.

Les campagnes expérimentales internationales auxquelles le CEPHAG a contribué directement se sont déroulées de 1987 à 1997 (expériences TOMOTEST, BORD-EST, GASTOM et THETIS) et se sont conclues par un programme méthodologique à l'échelle européenne (OCTOPUS). L'équipe de Geneviève Jourdain était membre du consortium et responsable de la thématique « traitement du signal ».

Les défis à relever, à la hauteur des enjeux, étaient nombreux :

- ∞ observer le comportement global de l'océan et suivre l'évolution de sa température,
- ∞ préciser l'impact des phénomènes observés sur les signaux mesurés,
- ∞ mettre au point des algorithmes de traitement suffisamment précis et rapides d'exécution.

Dans cette thématique aux frontières ouvertes sur des spécialités que l'on rencontre dans divers départements du CNRS, Geneviève Jourdain a réalisé des travaux, opérationnels et fondamentaux. Les premiers ont conduit à des échanges fructueux avec les océanographes et à des réalisations pratiques. Les seconds ont mis en évidence des particularités spécifiques à la physique des mers et Océans Européens.

On peut citer, pour les travaux amonts, centrés sur l'innovation :

- ∞ la mise au point de signaux et d'instruments innovants pour la tomographie : signaux PSK orthogonaux, antenne synthétique et antenne multicapteurs lacunaires.
- ∞ l'installation d'un dispositif d'écoute à distance des signaux de tomographie issus des expériences méditerranéennes à partir du CEPHAG à Grenoble,
- ∞ les méthodes de traitement du signal basées sur un modèle physique de la propagation et l'utilisation des signaux naturels dans le cadre de la tomographie passive [16].

Et pour les recherches plus fondamentales :

- ∞ la mise au point et l'utilisation des méthodes hautes résolutions paramétriques (décrites en 1-3) et Bayésiennes pour la mesure fine et le suivi des temps de retards des ondes acoustiques,
- ∞ l'introduction des méthodes spatiales et Bayésiennes pour réduire, voire éliminer les interférences entre trajets multiples,
- ∞ l'étude des effets Doppler, la mise au point d'algorithmes spécifiques à ces variations de fréquence et leur utilisation originale dans un nouveau concept d'instrumentation testé en mer.

Présentons un exemple de méthodologie nouvelle spécialement adapté à la tomographie : le suivi de retards proches [12].

Après propagation dans la mer le signal émis (signal analytique) $s(t)$ est convolué par la réponse impulsionnelle du canal $h(t)$. Un bruit additif se superpose au signal propagé pour donner le signal

$$y(t) = (h * s) + b(t)$$

La mesure des retards peut se faire en estimant la réponse impulsionnelle du canal dans le domaine du temps, ou son gain complexe dans le domaine des fréquences, par les méthodes classiques d'identification des systèmes linéaires et stationnaires.

Dans [12] on tire partie des connaissances apportées par la physique de la propagation en utilisant la représentation parcimonieuse de la réponse impulsionnelle $h(t)$ issue du modèle des trajets multiples

$$h(t) = \sum_{i=1}^p a_i s(t - \tau_i) + b(t)$$

cette représentation de la réponse impulsionnelle contient p retards d'amplitude complexe $a_i = \alpha_i e^{j\varphi_i}$ induisant un retard τ_i .

Avec ce modèle de réponse impulsionnelle les retards et l'amplitude des trajets peuvent être estimés selon la méthode classique de corrélation. Pour les retards proches, on peut utiliser des méthodes de super résolution en temps présentées en 1-3-2. En TAO ou en ASM, on réalise des émissions successives. Entre deux émissions, il est logique de considérer que les paramètres (amplitude, retard) de la propagation ont peu évolué. Une technique Bayésienne d'estimation fondée sur un critère associant l'attache aux données et le lissage des variations des paramètres entre les émissions successives est présentée dans [12]. Cette méthode adaptée au suivi de l'évolution des données est illustrée sur une simulation et validée sur des données réelles : TOMOTEST en TAO et Saint Jean Cap Ferrat en ASM est donnée dans [12]. La qualité des résultats et leur fidélité aux connaissances physiques du milieu qu'apportent des évaluations des retards par tracés de rayons montrent la puissance de cette méthode de séparation et de suivi de retards proches, présentée figure 8.

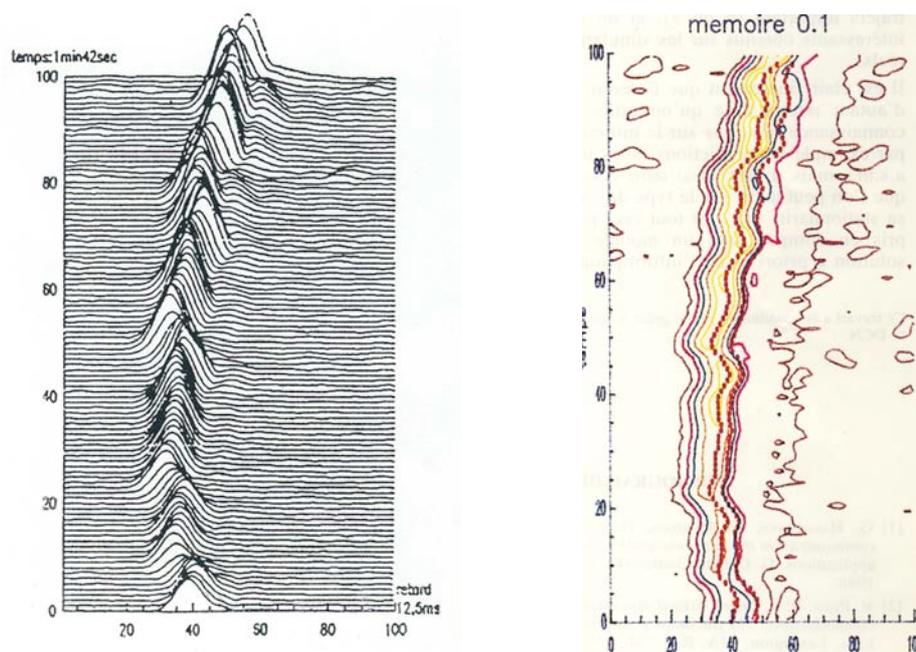


Figure 8

Suivi de retards proches. Mesure des retards par corrélation et par la méthode de super résolution et de suivi des retards de [12]

Sur le panneau de droite, les traits pointillés rouges « suivent » les deux trajets distants de 0,7 millisecondes. L'existence et l'écart de temps de ces deux trajets sont confirmés par tracé de rayons.

Le programme de recherche développé par Geneviève Jourdain en TAO est exemplaire dans sa volonté de prendre en compte les problèmes concrets d'une communauté de chercheurs s'étendant bien au-delà du traitement du signal (avec les difficultés de communication inhérentes à une étude pluridisciplinaire) et de prendre du recul pour inventer des nouveaux paradigmes de mesures et de traitements. On doit rendre hommage à Geneviève Jourdain pour sa ténacité et sa persévérance dans l'animation de cette thématique au sein du CEPHAG/LIS. Les résultats obtenus furent à la hauteur de son engagement :

- ∞ des stratégies nouvelles ont été adoptées par les océanographes et des données de meilleure qualité ont été ainsi obtenues,
- ∞ des outils de traitement du signal spécifiques, intégrés dans une plateforme d'analyse globale ont été développés dans le cadre du projet européen OCTOPUS et mis à la disposition de la communauté (océanographes, acousticiens et traiteurs de signaux),
- ∞ plusieurs dizaines d'articles dans les revues internationales témoignent de cet engagement dans une discipline qui est toujours d'actualité et qui a des retombées industrielles pour l'ensemble des technologies liées à l'acoustique sous-marine.

1.5. Les communications ASM

Les difficultés rencontrées en communication acoustique sous-marine sont de natures diverses. D'une part, les ondes sonores se propagent par de multiples trajets, ce qui génère de l'interférence entre les symboles (IES). D'autre part, la forte non-stationnarité du milieu, spécialement à grande distance, entraîne des fluctuations du niveau reçu et de la forme de la réponse impulsionnelle du canal qui peuvent dégrader fortement la qualité de la communication. À cela s'ajoute la perturbation engendrée par le bruit ambiant, d'origine naturelle ou extérieure (trafic maritime). Pour réduire l'impact de ces perturbations, l'émetteur doit protéger l'information à transmettre et la représenter de manière à faciliter son traitement en réception. Le récepteur, quant à lui, doit assurer une bonne robustesse vis-à-vis de l'ensemble des perturbations. L'optimalité étant hors de portée, la conception du système résulte de compromis entre performance et complexité.

Entre 1985 et 2000, Geneviève Jourdain a abordé l'ensemble de ces problèmes en partant d'hypothèses simplificatrices sur le canal de transmission associées à des traitements peu coûteux (canal constant à deux trajets avec traitement linéaire) pour finalement arriver à des systèmes de traitement sophistiqués exploitant des

hypothèses très réalistes quant à la nature des canaux (traitements spatio-temporels adaptatifs, association de traitement par filtrage à des algorithmes optimaux pour réaliser des compromis acceptables entre performance et complexité, égalisation aveugle). Quel qu'ait pu être le degré de réalisme des hypothèses utilisées, Geneviève Jourdain a toujours validé ses algorithmes sur des signaux réels issus d'expériences en mer.

Dès le début des années 80, Geneviève Jourdain s'intéresse aux communications acoustiques sous marines pour lesquelles le signal capté en réception résulte d'une superposition de signaux reçus par plusieurs trajets de propagation. Des solutions de type *filtrage linéaire* (ou à retour de décision) optimales *au sens de l'erreur quadratique moyenne* sont étudiées de manière complète dans le cas de deux trajets de propagation et sous *hypothèse de stationnarité* du canal et des signaux. À la même période, *le même problème est abordé en proposant des solutions à base de codes orthogonaux*. Ces approches, devenues classiques depuis leur adoption par des normes de radiocommunications numériques étaient manifestement d'avant-garde.

Après ces travaux consacrés à des canaux dont la réponse reste constante au cours du traitement, Geneviève Jourdain a étendu le domaine de validité des traitements proposés pour y inclure les *situations évolutives*. Des résultats théoriques sur le comportement des *algorithmes adaptatifs* en régime non-stationnaire sont obtenus, ceux-ci révèlent toute l'importance du lien entre la connaissance du milieu de propagation (longueur de la réponse impulsionnelle, degré de non-stationnarité, ...) et les performances des algorithmes de poursuite. Ils conduisent à *l'optimisation du facteur d'oubli* des algorithmes. Une procédure d'optimisation automatique du facteur d'oubli est exploitée. Cette approche s'avère efficace dans des situations pratiques réalistes pour une transmission en acoustique sous marine.

Les mesures effectuées lors de plusieurs campagnes en mer ont permis de mieux connaître la manière dont la réponse du canal fluctue au cours du temps et plus particulièrement le rôle du Doppler (terme de phase qui affecte globalement le signal reçu) ainsi que la perturbation due aux termes de phase sur chacun des trajets de propagation (Dopplers différentiels). Pour tenir compte de la *présence de deux échelles* de temps nettement distinctes entre l'évolution de la phase liée au *Doppler*, ou à un mauvais ajustement entre les oscillateurs utilisés en émission et en réception et celle du canal lui-même, une solution adaptative estimant conjointement la phase globale et les coefficients de l'égaliseur est alors proposée et validée sur des signaux réels (transmissions acoustiques sous-marines horizontales ou verticales). Les *algorithmes à pas automatiquement optimisés* sont généralisés à ces problèmes de récupération de porteuse et *d'estimation conjointe*.

Après avoir étudié ces approches de type filtrage en contexte stationnaire puis non stationnaire, Geneviève Jourdain s'est ensuite intéressée à des *méthodes hybrides* entre le filtrage qui conduit à des solutions de faible complexité mais dont les performances sont limitées dans certaines situations difficiles telles qu'il en apparaît souvent dans les systèmes de transmissions sous-marines et des solutions réputées optimales (algorithme de Viterbi) dont la complexité exponentiellement croissante avec la longueur de la réponse impulsionnelle du canal empêche la mise en œuvre. Puis, à partir de données expérimentales issues d'une communication acoustique sous-marine horizontale, la technique d'égalisation est comparée avec celle qui consiste à estimer une séquence complète au sens du maximum de vraisemblance (Viterbi). Cette étape a conduit à étudier une *nouvelle structure de récepteur cohérent* qui associe une égalisation partielle avec un détecteur de Viterbi, et pour laquelle deux méthodes adaptatives sont proposées pour en estimer les paramètres. Cette méthode est validée sur les mêmes données réelles.

Les études consacrées aux transmissions à grande distance (100 Km) menées dans le cadre du projet de recherche européen MAST II intitulé LORACOM (Long Range Acoustic Communications) ont exploité les résultats des études précédentes (égalisation, codage, adaptatif) en y ajoutant des *traitements spatiaux*. Les résultats obtenus sur des données réelles ont mis en évidence l'amélioration conséquente apportée par la combinaison des traitements spatiaux et temporels.

À la fin des années 1990, Geneviève Jourdain a engagé un travail consacré à l'égalisation aveugle à l'ordre deux lorsque le récepteur est multicapteur. Cette étude a conduit au développement d'un algorithme d'égalisation aveugle de faible complexité insensible à la surestimation de l'ordre du canal. Cet algorithme a été testé sur des signaux synthétiques et des données réelles issues d'une campagne d'acoustique sous-marine.

L'expertise acquise dans le domaine des communications dans des canaux à trajets multiples a conduit Geneviève Jourdain à aborder les communications radio mobiles.

1.6. Une nouvelle frontière : Les communications numériques.

Les problèmes traités en communications numériques ont beaucoup de points communs avec les problèmes de communication acoustique sous-marine. Dans les deux cas, il faut lutter contre les dégradations potentielles (interférence, évanouissements, ...) amenées par un canal de transmission sélectif en fréquence (et sélectif en temps en cas de mouvement). Même si les ordres de grandeur (longueurs d'ondes, Doppler, débits

d'information, ...) sont très différents, on retrouve les modèles de canaux que Geneviève Jourdain avait modélisés dans sa thèse de Doctorat ès Sciences et dont elle avait acquis une connaissance experte en acoustique sous marine.

L'orientation vers les télécommunications, à partir des années 1997/1998, de Geneviève Jourdain s'appuyait sur les constatations suivantes :

- ∞ l'essor des communications radio mobiles, avec l'arrivée de la norme du système de 3^e génération de téléphonie, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) après celle du GSM, induisant la possibilité d'études intéressantes sur le plan théorique.
- ∞ Le développement de liens avec les centres d'études et développement du Pôle Grenoblois (France Télécom R&D Meylan, le CEA/Leti, St-Microélectronics, ...) qui étaient pleinement engagés dans cette aventure.

Le rapprochement entre université et centre d'études s'est fait sous l'impulsion voulue par le rapport Lombard et la création du Réseau National de Recherche en Télécommunications. Pour impulser l'effort de recherche dans ce nouveau domaine émergent et très porteur, Geneviève Jourdain, alors responsable du DEA Signal Image Parole (SIP) a affiché avec force cette nouvelle orientation en étendant la dénomination du DEA aux télécommunications dans SIPT.

1.6.1. Historique de l'arrivée de l'UMTS et au-delà

En 1997, la norme UMTS est publiée et va être déployée. Elle concentre toutes les attentions en télécommunication. Le GSM a apporté la preuve que les télécommunications numériques mobiles fonctionnent, et c'est un grand succès Européen. Les Américains sont arrivés ensuite en force avec une nouvelle méthode pour partager les canaux des utilisateurs (Qualcomm, Viterbi), en utilisant des codes. C'est le CDMA « Coded Division Multiple Access ». L'Europe et les Etats-Unis se sont affrontés sur le terrain de la normalisation UMTS, avec des techniques de multiplexage temporel et des techniques de multiplexage par codes. Le résultat a été un mélange des genres : la proposition de la norme TD-CDMA (ou TDD) soutenue par l'Europe, a été finalement supplantée par la norme WCDMA (ou FDD). Simultanément les Chinois ont proposé une autre option, le TD-SCDMA, variation du TD-CDMA, pour leur pays. En parallèle, les techniques de codage numérique avec correction des erreurs se sont développées : Viterbi, puis Glavieux-Beyrou avec la découverte des turbo-codes remarquable réalisation, d'origine française, reconnue internationalement. D'autres techniques de multiplexage ont été proposées et utilisées dans le domaine fréquentiel : c'est l'arrivée de l'OFDM, d'abord dans le domaine de la diffusion.

1.6.2. Développement des relations avec les différents partenaires Grenoblois

1.6.2.1. France-Telecom R&D Meylan

La collaboration entre le LIS et le CNET Meylan a débuté en 1997, sous l'impulsion de Geneviève Jourdain et de Marylin Arndt par la mise en place d'encadrement de thèses et par la participation au projet RNRT AUBE. À l'occasion du démarrage du projet AUBE le CNET, devenu France Télécom, avait passé une convention avec le LIS pour l'étude des performances théoriques d'un terminal mobile intégrant plusieurs capteurs.

1.6.2.2. LETI (Laboratoire d'Electronique et de Technologies de l'Information du CEA)

Les relations entre le LETI et le LIS existaient déjà sur les thèmes de magnétométrie. Lors de la création d'une activité transmission au LETI, Geneviève Jourdain a été sollicitée pour faire partie d'une équipe d'évaluation et de conseil des activités réseaux radio mobile et réseaux sans fils. Elle a participé aux recherches en co-encadrant des thèses réalisées au LETI.

1.6.3. Les projets et les réalisations

Le LIS sous la responsabilité de Geneviève Jourdain a participé à un projet précompétitif RNRT AUBE (UMTS) intitulé « *Nouvelles Architectures Umts en vue de l'intégration sur silicium des fonctions Bande de base du tErminAl* », en relation avec Thales communications, FranceTelecom R&D Issy-les-Moulineaux et Meylan, Eurecom, Kurtosis. L'objectif de ce projet était la construction d'une chaîne de simulation de référence, ainsi que la proposition de nouvelles solutions algorithmiques et architecturales pour les fonctions de synchronisation (acquisition - poursuite) et de démodulation (récepteur rake, égaliseur, ...) d'un téléphone mobile UMTS..

La participation du LIS s'est plus spécialement axée sur l'identification de la cellule, et sur les questions d'acquisition de code associées qui font intervenir des paramètres (seuil de détection, paramètres de logique) dont l'optimisation est délicate. En reformulant le problème par une approche statistique, Geneviève Jourdain et son équipe ont obtenu la *solution Bayésienne optimale*. L'algorithme proposé présentait, par rapport aux

concurrents, une plus grande simplicité de mise en œuvre (aucun seuil ou paramètre de logique à régler), et un temps d'acquisition amélioré.

Des résultats ont également été obtenus sur :

- ∞ La capacité des systèmes multi-antennes (MIMO) [15],
- ∞ Les performances d'égaliseurs linéaires pour les systèmes Multi-Utilisateurs,
- ∞ Les algorithmes et les architectures de réception basés sur la paramétrisation du canal de transmission : égaliseurs UMTS, récepteurs OFDM rapides.

L'activité de recherche de Geneviève Jourdain que nous venons de parcourir a accompagné et enrichi sa vocation d'enseignement, son engagement dans l'animation de la communauté de recherche et d'enseignement et sa mission de formation par la recherche.

2. Geneviève Jourdain et l'enseignement

Comme pour la recherche Geneviève Jourdain a fait partie du noyau des universitaires qui ont initié l'enseignement du signal.

Elle a formé de nombreuses générations d'étudiants au traitement du signal dans le cadre de l'ENSIEG, de l'ENSPG du DEA TS, TSA et SIPT. Elle y a enseigné les bases du traitement du signal et les développements plus spécialisés : théories de la détection, de l'estimation et de l'information. Comme elle l'avait fait dans son activité de recherche en associant théorie, simulation et expérience, elle a exercé sa mission d'enseignante dans les trois modalités d'enseignement que sont les cours, les travaux dirigés et les travaux pratiques. Cette implication complète permet d'acquérir une meilleure connaissance des étudiants, d'établir avec eux des relations plus fortes et d'apprécier, au cours des travaux dirigés et des travaux pratiques, le degré d'assimilation des notions nouvelles enseignées dans les cours et de profiter de cette information de sortie (TD, TP) pour mieux adapter l'entrée (Cours) à l'auditoire spécifique que constitue chaque promotion.

Par son action dans la formation permanente en analyse spectrale puis en communications numériques elle a contribué à la diffusion des méthodes et techniques de traitement du signal dans le milieu industriel.

Elle a initié de nouvelles filières d'enseignement.

Dans ses enseignements, Geneviève Jourdain a toujours su capter l'attention de ses élèves et les attirer vers notre discipline. Elle leur communiquait sa passion de la connaissance. Son enseignement était nourri, et avec quelle richesse, par son intense activité de recherche qui communiquait à ses cours une actualité toujours renouvelée.

Oui elle a su aimer notre discipline et la faire aimer. Mais comment ne pourrions-nous pas aimer, avec elle, une discipline que nous avons eu le plaisir de construire et qui nous donné le plaisir de découvrir de nouvelles frontières ? Oui tout était nouveau et tout était à découvrir et à faire partager. Avec A. Blanc-Lapierre, nous pouvons redire

.... Il s'agit d'un effort de recherche (et j'ajoute d'enseignement) vaste et de longue haleine....

Vaste et de longue haleine, mais si plein de la joie de la découverte et de son partage dans l'édification et l'enseignement d'une nouvelle discipline : *Le traitement du signal.*

3. Geneviève Jourdain et l'animation de la recherche et de l'enseignement.

Geneviève Jourdain a développé des relations de manière extrêmement active. Elle a fortement marqué de son empreinte la communauté française de recherche et d'enseignement du traitement du signal. Son rayonnement s'est étendu à l'échelle internationale.

Au laboratoire :

- ∞ Responsable du thème "canal marin" de la convention DCN,
- ∞ Directrice du CEPHAG.

À l'INPG

- ∞ Créatrice et responsable de filières d'enseignement,
- ∞ Responsable du DEA, puis Master, SIPT.

Au plan national elle a participé à :

- ∞ La commission 8 du CNRS,
- ∞ La commission 61 du CNU,
- ∞ Diverses commissions de la DGA.

Dans ces commissions, elle a affirmé sa vocation de pionnière du traitement du signal en soutenant le développement de notre discipline et en participant à son rayonnement. Alain Costes ancien Président de la Commission 8 du CNRS évoquait, dans ses souvenirs de la Présidence de cette commission « *les deux égéries du traitement du signal* » associant, dans cet hommage à leurs talents d'inspiratrices et à leur force de conviction, Geneviève Jourdain et une autre déesse que nous vous laissons le soin de découvrir.

Membre des conseils du GRETSI elle a animé de sa présence tous les congrès de notre association. Par ses publications et celles de ses élèves, elle a affirmé la vitalité de l'Ecole française de traitement du signal. Elle a enrichi notre mémoire collective en rassemblant dans un CD, réalisé pour le trentième anniversaire au GRETSI 1997, les actes du GRETSI de 1967 à 1995. Elle a participé à l'ouverture de notre association sur le monde de l'enseignement en prenant en charge les relations avec le club EEA. Elle a été le moteur de la création du site GRETSI,

Elle a noué des relations de travail avec de nombreuses Institutions citons l'ENSTB pour les communications, l'ENSIETA pour l'acoustique sous-marine et la tomographie acoustique océanique, l'IFREMER pour la tomographie acoustique océanique...

Ses relations de recherche et développement avec le milieu industriel étaient nombreuses : nous les avons évoquées au fil de la présentation de son activité de recherche.

Au plan des relations internationales, elle a participé comme conférencière invitée à de nombreux congrès scientifiques de premier plan. Elle a été un membre actif de programmes de recherche internationaux : rappelons les campagnes de mesure ASM des Açores dans le cadre de l'OTAN, les programmes de communication ASM de l'Union Européenne, les projets de TAO...

La reconnaissance de son rôle dans la Société a été marquée par sa nomination au grade de Chevalier de l'Ordre National du Mérite.



Figure 9
Remise de la croix de Chevalier de l'Ordre National du Mérite à Geneviève Jourdain par
Georges Lespinard

4. Geneviève Jourdain guide et soutien.

La compétence, la rigueur intellectuelle, l'enthousiasme de Geneviève Jourdain, ont fait d'elle un guide pour tous ceux qui ont eu la chance de la côtoyer.

À ses élèves, elle a donné une solide formation ouverte sur le mode.

À ses thésards, elle a appris la rigueur et le sens du travail bien fait. Elle leur a donné le goût de la recherche. Elle les a suivis avec attention.

À ses collègues, elle a porté une attention constante. Elle était un repère par sa rigueur son intégrité morale. Elle les poussait en avant par son imagination créatrice. Son implication dans les réalisations leur a ouvert la porte de belles innovations.

Elle a marqué de sa forte personnalité les commissions d'orientation qui faisaient appel à son sens de l'innovation, son sens de la justice et son goût de l'effort.

Son brio de conférencière s'est illustré dans de nombreuses réunions scientifiques. Retrouvons la lors de sa conférence pour la célébration du trentième anniversaire du GRETSI.



Figure 10
Conférence de Geneviève Jourdain au GRETSI 1997

Bibliographie²

- [1] G. Jourdain, *Génération de codes aléatoires*, Rapport CEPHAG 11/69
- [2] G. Jourdain, D. Grange, *Notice « Générateur de codes aléatoires »* Rapport CEPHAG 7/70
- [3] D. Matthieu et A. Silvent, *Générateur d'échos élémentaires (simulateur d'échos diffus)* Rapport CEPHAG 19/73
- [4] G. Revol, *Mémoire numérique. Application à l'élaboration de l'écho diffus à partir d'un synthétiseur d'échos élémentaires* Rapport CEPHAG 20/73
- [5] J. Liénard, D. Matthieu, *Modules à transmission numérique série*, Rapport CEPHAG 21/78.
- [6] D. Baudois - *Etude d'une méthode de synthèse d'une fonction approchant une sinusoïde de fréquence donnée à partir d'une sinusoïde de fréquence voisine, étude spectrale.* Rapport CEPHAG n° 37/74.
- [7] J. P. Henrioux - *Etude d'une méthode de synthèse d'une fonction approchant une sinusoïde de fréquence donnée à partir d'une sinusoïde de fréquence voisine, étude et procédé de mise en œuvre.* Rapport CEPHAG n° 38/74.
- [8] G. Bienvenu and L. Koop, *Optimality of high-resolution array processing using the eigensystem approach*, IEEE Trans. ASSP, Vol 31, n° 5, pp: 1235-1248, Oct. 1983.
- [9] R.O. Schmidt, *Multiple emitter location and signal parameter estimation*, IEEE Trans. AP, vol 34, n° 3, pp: 276-280, March 1986.
- [10] A.M. Bruckstein, T.J. Shan and T. Kailath *The resolution of overlapping echoes* IEEE Trans. Acoust.Speech and Signal Processing Vol ASSP-33, n° 6, pp 1357-1367, Dec 1985.
- [11] MA Pallas et G. Jourdain *Active high resolution time delay estimation for large BT signals*, IEEE Trans. ASSP, Vol. 39, n° 4, pp : 781-788, april 1991.
- [12] V. Nimier et G. Jourdain, *Estimation active d'un canal de propagation à trajets multiples par une méthode Bayésienne*, Traitement du Signal, Vol. 10, n° 3, pp : 201-213, 1994.
- [13] W. Munk and C. Wunch, *Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring*, *Deep-sea research*, Vol 26A, 1979.
- [14] W. Munk, P. Worcester and C. Wunch *Ocean acoustic tomography*, Cambridge monographs on mechanics, Cambridge University Press, 1995.
- [15] M.A. Khalighi, K. Raoof, and G. Jourdain, *Capacity of wireless communication systems employing antenna arrays, a tutorial study*, Journal of wireless personal communications, vol. 23, n°3, pp 321-352, Dec. 2002.
- [16] D. Gaucher, C. Gervaise and G. Jourdain *Contribution to passive ocean tomography, Part 1 : performances prediction*, JASM, Brest, Octobre 2004.

² Dans cette bibliographie, nous nous sommes limités aux publications nécessaires à cette conférence.