

# Les capteurs d'imagerie en robotique sous-marine : tendances actuelles et futures

## Imaging sensors in underwater robotics : present and future trends

par Michel LEGRIS<sup>1</sup>, Katia LEBART<sup>2</sup>, Franck FOHANNO<sup>3</sup>, Benoit ZERR<sup>4</sup>

<sup>1</sup> E<sup>3</sup>I<sup>2</sup> ENSIETA, 2 rue François Verny, 29806 Brest cedex 9, France, michel.legris@ensieta.fr

<sup>2</sup> Oceans Systems Laboratory, Heriot-Watt University, Riccarton, Edimburgh EH14 4AS, Scotland, UK, lebart@cee.hw.ac.uk

<sup>3</sup> Thales Underwater Systems, Route de Sainte Anne du Portzic, 29601 Brest cedex, France, franck.fohanno@fr.thalesgroup.com

<sup>4</sup> DCE/GESMA, BP 42, 29240 Brest Naval, France, zerr@gesma.fr

### *résumé et mots clés*

Les deux principaux instruments utilisés comme capteurs de perception en robotique sous-marine sont le sonar et la vidéo. Dans une première partie, nous présentons les principes utilisés en imagerie acoustique. Si certaines techniques sont classiques, d'autres, telles que l'antenne synthétique, l'interférométrie et l'antenne paramétrique sont encore du domaine de la recherche appliquée. Dans une seconde partie, les applications de l'imagerie acoustique sont évoquées. Elles sont essentiellement axées sur la caractérisation des fonds sous-marins et sur l'aide que l'image peut apporter à la navigation du robot. Enfin, la troisième partie évoque les technologies et les traitements vidéo. Ce capteur s'avère très complémentaire du sonar grâce à sa haute résolution et à la facilité d'interprétation des images.

**Robotique, sous-marin, sonar, vidéo, traitement d'image, interférométrie, antenne synthétique, sonar paramétrique**

### *abstract and key words*

The two main visual sensors in underwater robotics are sonar and video. In a first part, we present the fundamentals of acoustic imagery. If some technics are well known, others, like synthetic aperture antenna, interferometry and parametric array are still research topics. In a second part, acoustic image processing techniques are presented. They are mainly applied to sea bottom characterization and robot navigation. The third part addresses video technology and processing. This sensor is complementary to sonar, due to its high resolution and the ease of interpretation of the images.

**Robotic, underwater, sonar, video, image processing, interferometry, synthetic aperture sonar, parametric sonar**

## 1. introduction

Les progrès en intelligence artificielle et l'arrivée d'ordinateurs de plus en plus puissants pour un prix et une consommation toujours plus faibles, ont permis une réelle naissance des robots autonomes.

L'une des applications les plus évidentes de la robotique est l'exploration du milieu sous-marin, à la fois à cause de son accessibilité difficile pour l'homme et son grand intérêt scientifique et économique.

Par rapport à ses contreparties terrestres et aériennes, la robotique sous-marine possède une spécificité importante qui est l'hostilité du milieu. Celle-ci se traduit à la fois par les contraintes mécaniques supportées par les engins près de la surface et surtout la pression hydrostatique dans les grandes profondeurs, et par l'opacité du milieu marin, qui induit un effet direct sur la conception des systèmes d'imagerie.

Les ondes électromagnétiques, dont la lumière, se propagent difficilement interdisant les communications radios et la vision optique en champ lointain. En revanche, les ondes acoustiques y subissent une faible atténuation, entraînant leur utilisation généralisée.

L'objectif de cet article est de présenter un panorama des capteurs « de vision » utilisables à bord des engins robotiques sous-marins autonomes (appelé AUV pour Autonomous Underwater Vehicle). Nous verrons que leur emploi est double, car ils sont utilisés à la fois pour accomplir la mission de l'AUV (par exemple, levé bathymétrique ou recherche d'objets), et pour aider la navigation (suivi d'amers, évitement d'obstacles, ...).

Il nous a semblé intéressant de présenter conjointement les deux principales familles (acoustique et optique) pour montrer à la fois leur complémentarité mais aussi la similarité des traitements effectués.

La première partie intitulée « capteurs acoustiques » rappelle les principes généraux utilisés en imagerie acoustique. L'expression la plus simple en est le sondeur monofaisceau qui permet de comprendre le principe général. Ensuite, les systèmes plus complexes sont introduits, y compris des systèmes qui sont encore principalement du domaine de la recherche appliquée tels que le sonar interférométrique ou le sonar paramétrique. Nous détaillerons plus particulièrement le sonar à ouverture synthétique qui apparaît comme une technologie d'imagerie très prometteuse dans le cadre des AUV.

Nous écarterons de manière volontaire les systèmes grands fonds et basses fréquences qui ne sont pas adaptables à bord d'un véhicule sous-marin de taille moyenne. De même, nous ne parlerons pas des autres systèmes acoustiques (localisation, loch Doppler) qui sont indispensables dans le cadre de la robotique mobile, mais qui ne sont pas des capteurs d'imagerie.

Dans la seconde partie, dédiée aux traitements de données acoustiques, nous présentons les algorithmes actuellement déve-

loppés pour extraire l'information pertinente des images sonars. Certains de ces algorithmes peuvent être implémentés dans le véhicule lui-même pour permettre d'influer sur le cours de la mission, d'autres sont plutôt dédiés à la représentation des données dans le cadre du dépouillement en fin de mission.

Enfin dans la troisième partie, intitulée « la vidéo comme capteur sous-marin », les systèmes vidéos et les traitements associés sont introduits. Grâce à leur haute résolution et la facilité d'interprétation des données, ces systèmes sont indispensables et très complémentaires des outils acoustiques. Cependant, la recherche dans ce domaine reste relativement récente, car le volume de données fournies et leur faible qualité sont restés pendant très longtemps un obstacle aux traitements automatiques. Nous verrons aussi que les principaux algorithmes développés ont leur pendant en acoustique : recalage d'images, suivi d'amers, mosaïque, ...

## 2. capteurs acoustiques

L'acoustique sous marine est un moyen privilégié de sondage de l'environnement sous-marin. Les premières expériences sous-marines quantitatives remontent au début du 19<sup>ème</sup> siècle avec la détermination de la vitesse de propagation du son dans l'eau [Bur91].

Les premiers systèmes actifs acoustiques pour la détection à distance d'objets datent de l'orée de la première guerre mondiale [Uri83], les hydrophones piézoélectriques sont apparus pendant la même période.

Parmi les applications civiles, citons l'apparition des premiers sondeurs monofaisceaux avec des applications en hydrographie et en halieutique entre les deux guerres [Fle82], le sonar latéral, concept très utilisé en imagerie sous marine, à la fin des années 50 et le sondeur multifaisceaux dans les années 70.

Ces 20 dernières années, les progrès de l'électronique numérique ont permis de démocratiser les traitements d'antenne avancés et amené des nouvelles techniques dont le principe était connu de longue date mais dont la réalisation butait sur des difficultés technologiques. A ce titre, nous pouvons mentionner la focalisation dynamique, l'interférométrie, les caméras acoustiques, ...

Si nous présentons essentiellement les applications de l'acoustique en imagerie sous-marine, ce n'est pas, et de loin, son seul emploi. La richesse des applications de l'acoustique sous-marine provient du fait qu'il s'agit du seul phénomène physique qui permette la transmission d'une grande quantité d'informations à longue distance dans l'eau.

Parmi les applications hors de la visualisation, sans prétendre à l'exhaustivité, citons :

- mesure de la bathymétrie ;
- détermination de la vitesse d'un mobile relative au fluide et par rapport au fond ;

- localisation d'un mobile par rapport à une référence (fixe ou non) ;
- information sur la structure des sols (sondeur de sédiments et sismique marine) ;
- communication de données ;
- mesure de la bathycélérité, ...

Nous devons tenir compte de ces autres systèmes, au moment de l'intégration. En effet, sur un véhicule sous-marin, à chaque nouvelle installation d'un appareil acoustique, il est indispensable de veiller à l'absence d'interférences avec le matériel déjà installé. Ces interférences peuvent être acoustiques (harmonique d'un système parasitant un autre) ou électromagnétique (émission d'un système avec une forte puissance pendant la réception d'un autre instrument).

## 2.1. sonars monofaisceaux

Le système le plus simple que l'on puisse trouver est l'échosondeur monofaisceau. Grâce à sa rusticité et sa faible consommation, il est très fortement utilisé sur tous les engins notamment ceux de faible taille.

Ce sonar possède un seul transducteur fonctionnant alternativement en émission et en réception. Le principe, commun à la majorité des sonars, est d'émettre une onde acoustique de faible durée à un instant connu, et d'enregistrer les échos reçus au cours du temps. L'amplitude (relative) de l'écho donne une indication sommaire des caractéristiques de l'objet rencontré, et la durée entre l'émission et la réception permet de remonter à sa distance, connaissant la vitesse de propagation du son dans l'eau.

$$r = \frac{c_0 \delta T}{2} \quad (1)$$

La vitesse  $c_0$  du son dans l'eau est d'environ  $1500 \text{ ms}^{-1}$ . Cependant, elle dépend de la pression, de la salinité et de la température. Plusieurs formules (d'origine empirique) donnant la célérité en fonction de ces trois paramètres sont actuellement utilisées. Nous ne mentionnerons que l'une des plus couramment employées, celle de Chen et Millero [WZ95].

Dans la conception ou le choix d'un sonar, plusieurs paramètres influent sur les performances du système et sont à adapter en fonction de l'utilisation souhaitée.

### Amplitude

Pour un matériel donné, l'amplitude reçue provenant d'un écho en eau libre est estimée par l'équation du sonar [Uri83] :

$$SN = SL - 2TL + TS - (NL - DI - PG) \quad (2)$$

avec :

$SN$  : « Signal to Noise », le rapport Signal sur Bruit de la cible en dB ;

$SL$  : « Source Level », la puissance acoustique émise (intégrant la directivité de l'antenne d'émission) en dB ;

$TL$  : « Transmission Losses », les pertes de transmission en dB (facteur 2 à cause de l'aller retour) ;

$TS$  : « Target Strength », l'index de réflexion de la cible en dB ;

$NL$  : « Noise Level », niveau de bruit (acoustique de l'environnement et électronique du système de réception) ;

$PG$  : « Processing Gain », le gain de traitement en dB ;

$DI$  : « Directivity Index », gain d'antenne en réception en dB.

Le niveau d'émission  $SL$  dépend essentiellement de la directivité de l'antenne d'émission, de sa surface et de la valeur de la pression sur le transducteur. En terme de puissance émise, l'intensité sonore est limitée en basse fréquence, par l'apparition de la cavitation. Cependant, la pression d'apparition de la cavitation croît rapidement avec la fréquence [Uri83]. Ainsi, en haute fréquence, les niveaux sont surtout limités par les contraintes mécaniques et thermiques à l'intérieur du transducteur.

Les pertes de transmission  $TL$  sont dues à deux effets :

- la dispersion géométrique des ondes en  $20 \log r$  (dispersion sphérique). En basse fréquence et faible profondeur, l'onde acoustique devient canalisée par le milieu et la dispersion devient cylindrique avec une atténuation moindre en  $10 \log r$ .
- l'absorption des ondes acoustiques (en  $\alpha r$ ). Le coefficient d'absorption  $\alpha$  est exprimé en dB/m et augmente approximativement avec le carré de la fréquence.

Le coefficient d'absorption dépend aussi mais dans une moindre mesure de la température, de la pression et de la salinité. Son expression semi-empirique la plus utilisée est celle de François-Garrison [FG2a] [FG2b].

Cette grandeur va conditionner fortement la portée d'utilisation. Par exemple, à 1 kHz, l'amortissement n'est que de 0,07 dB/km, alors qu'à 100 kHz, il est de 30 dB/km permettant d'envisager des sonars ayant une portée supérieure à 100 m et qu'à 1 MHz, il est de 500 dB/km (0,5 dB/m) et ne permet plus d'envisager des portées supérieures à 50 m.

L'index de cible (TS) dépend essentiellement de la forme de l'objet, de son impédance, de sa rugosité, mais aussi de l'angle d'incidence de l'onde par rapport à la cible, et bien évidemment de la fréquence de l'onde acoustique.

Dans le cas de cibles étendues (comme le fond de la mer ou les bancs de poissons), nous définissons de même un index surfacique et un index volumique. Il faut alors tenir compte de la surface et du volume insonifié dans le calcul.

Le niveau de bruit correspond à 3 sources différentes :

- le bruit électronique du capteur ;
- la réverbération de volume de l'eau de mer (cette réverbération dépend de la distance et du volume insonifié) ;
- le bruit ambiant.

Le bruit ambiant (associé à l'ensemble des sources acoustiques de la mer) est lui aussi fortement dépendant de la fréquence utilisée. Très fort dans les basses fréquences, il décroît rapidement (entre -5 et -10 dB/octave) jusqu'à 100 kHz.

Ce niveau est dû essentiellement aux variations de pressions pariétales sur les capteurs en très basse fréquence, au bruit de trafic entre 10 Hz et le kiloHertz, au bruit du vent et des vagues du kiloHertz à la centaine de kiloHertz. Ces sources sont bien entendues très dépendantes du lieu et de la date. Aux fréquences supérieures, le bruit thermique de la mer (mouvement des molécules) est prédominant. Contrairement aux effets précédents, celui-ci croît de 6 dB/octave. Le modèle généralement utilisé est celui de Wenz [Wen62].

Comme ces sources sont en général omnidirectionnelles et incohérentes, leurs niveaux relatifs sont atténués par le gain d'antenne et le gain de traitement.

Le gain d'antenne (ou gain de directivité) correspond à la fraction de l'angle solide vue par l'antenne. En particulier, une antenne sera d'autant plus directive qu'elle est de grande taille.

En plus, du gain d'antenne, le niveau reçu peut être amélioré par le gain de traitement. En règle générale, le signal émis est une simple sinusoïde à la fréquence porteuse modulée par une fenêtre de durée  $\tau$ . La largeur de bande obtenue est alors  $B = \frac{1}{\tau}$ .

Cependant, par la méthode de compression d'impulsion, il est possible de dissocier la durée  $\tau$  de l'émission et la largeur de bande. Pour ce faire, on émet en général un chirp (portion de sinusoïde modulée linéairement en fréquence) et on effectue un filtrage adapté à la réception. Par cette méthode relativement simple, on peut augmenter le rapport signal à bruit d'un rapport  $10 \log(B\tau)$ .

La longueur du code d'émission est en général limitée par le souci de ne pas mélanger l'émission avec la réception (compte tenu des ordres de grandeur des énergies mises en jeu). Il est donc difficile d'avoir une durée d'émission supérieure au temps aller/retour du son dans la colonne d'eau.

### Résolution et ouverture

Pour un sondeur monofaisceau, nous distinguons deux types de grandeurs :

- la résolution en distance,
- l'ouverture du faisceau.

Deux cibles seront discriminées en distance par la différence de date d'arrivée. La résolution dans cette direction dépend donc de la largeur de bande du signal émis.

Pour une célérité  $c_0$  et une largeur de bande  $B$ , la résolution (largeur du pic de corrélation à -3dB) est :

$$\delta r \approx \frac{c_0}{2B} \quad (3)$$

Cette résolution est limitée essentiellement par la technologie des hydrophones et le volume de données à traiter.

Dans le plan parallèle à l'antenne, la discrimination de deux cibles se fait par l'ouverture du faisceau. Celle-ci dépend essentiellement de la taille du transducteur d'émission/réception et de la fréquence du signal émis.

Dans l'hypothèse des petits angles d'ouverture, pour un hydrophone ou une antenne rectangulaire de longueur  $L$  et une fréquence associée à la longueur d'onde  $\lambda$ , l'ouverture  $\theta_h$  dans le plan correspondant à -3 dB est (en radians) :

$$\theta_h \approx 0.88 \frac{\lambda}{L} \quad (4)$$

Dans le cas d'un hydrophone circulaire, la formule 4 est légèrement modifiée (avec  $D$  le diamètre de l'hydrophone) :

$$\theta_h \approx 1.03 \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

Les domaines d'applications sont  $D \gg \lambda$ , et pour une distance  $r$  telle que  $r > L^2/\lambda$  (conditions de champ lointain). Les formules précédentes s'appliquent en émission ou en réception. Dans le cas d'émission et réception cumulées sur le même hydrophone le faisceau devient plus étroit.

Ces équations 4 et 5 montrent que pour une taille d'hydrophone donnée, l'ouverture sera d'autant meilleure que la fréquence est haute. Par contre, comme cette dernière limite la portée, nous aurons donc toujours un compromis entre la taille de l'antenne et la résolution angulaire.

Enfin, les facteurs limitant la résolution perpendiculairement et parallèlement à l'hydrophone ne sont pas de même nature. A cause de cela, il est très courant d'avoir des ordres de grandeurs très différents pour ces deux quantités.

### CTFM (Continuous Transmission Frequency Modulated)

Il existe aussi une autre méthode de modulation de l'émission mais qui n'est plus utilisée que rarement de nos jours sur les échosondeurs : le CTFM. Dans ce cas, l'émission est toujours un chirp mais émis en continu pendant tout le temps associé à la propagation du signal. A la réception, on fait battre le signal d'émission et le signal de réception. Les fréquences de battements obtenues dépendent linéairement de la distance des obstacles.

Si par exemple, on émet un signal continu pendant une durée  $\tau$  de manière linéaire entre les fréquences  $f_1$  et  $f_2$ , un obstacle à la distance  $r$ , provoquera un signal retardé de  $r/2c_0$  et donc un décalage fréquentiel entre l'émission et la réception de  $\frac{(f_2 - f_1)r}{2c_0\tau}$ .

L'utilisation de ce type de technique permet facilement d'avoir une sortie audio. Par contre, le système est limité par plusieurs problèmes [Log01] :

- l'émission continue limite la sensibilité de l'instrumentation ;
- un compromis apparait entre la portée, la résolution et le secteur angulaire balayé.

### Applications

Le sonar monofaisceau est à l'origine de très nombreuses applications. Le mode le plus utilisé est le sondeur placé verticalement vers le bas, sous le véhicule. Par la durée entre l'émission et le premier écho, il permet de connaître la distance du fond. Nous avons figure 1, l'exemple de l'écho reçu par un sondeur monofaisceau (dans notre cas, le sondeur est placé sur un poisson portant un sonar latéral).

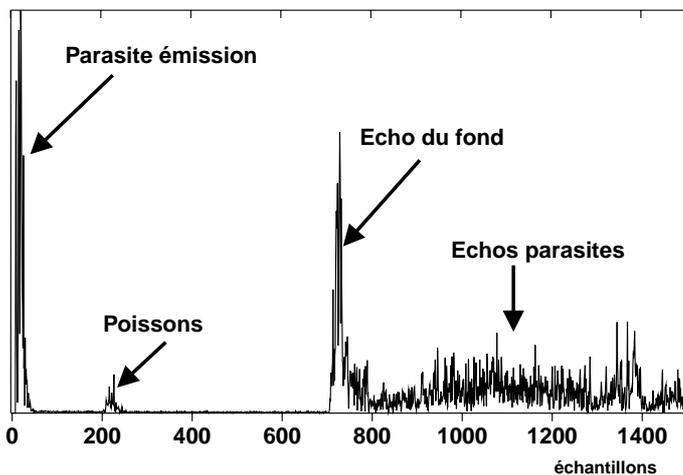


Figure 1. – Trace temporelle d'un signal de sondeur.

- Nous pouvons distinguer sur la trace sonore, plusieurs étapes :
- un écho fort au tout début qui correspond à l'émission du sonar et aux parasites associés tels que le « ringing » des transducteurs ;
  - un signal faible avec pas ou peu d'échos. Cette période correspond au moment où l'onde sonore se propage dans l'eau. Quelques échos isolés peuvent être repérés pendant cette période, il s'agit alors d'obstacles entre deux eaux. Dans la figure 1, un banc de poissons est l'origine de l'écho présent vers le 200<sup>ième</sup> échantillon ;
  - un écho fort qui correspond au fond de la mer. L'amplitude de cet écho est élevée car nous sommes dans le domaine spéculaire du fond. L'amplitude et la forme de l'écho dépendent de la géométrie du capteur, mais aussi de la nature du fond ;
  - un niveau diffus dû (dans notre cas particulier) à la réverbération de fond provenant d'autres émissions acoustiques qui parasitent les lobes secondaires (problème de compatibilité acoustique).

Les échos sont répétés au fur et à mesure de l'avance du véhicule, permettant de tracer une première image (figure 2), correspondant à l'évolution au cours du temps de la distance du fond.

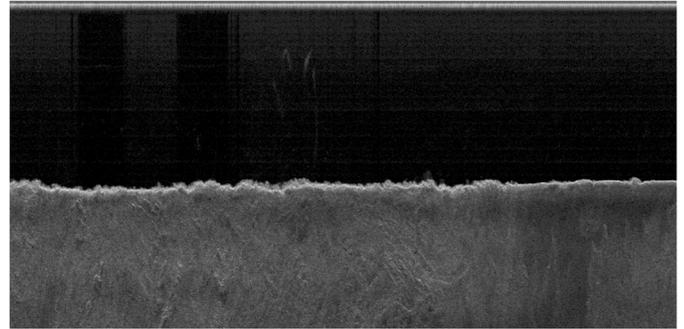


Figure 2. – Evolution au cours du temps de l'image sondeur.

Réglé avec une forte amplification, il peut directement être utilisé pour la détection de bancs de poissons. Par la mesure de l'index de réverbération de volume, il est possible d'évaluer le nombre et éventuellement l'espèce [Mac90], [MC98].

Une famille de sondeur travaillant sur le même principe et aussi très utilisé (bien que plus rarement en robotique sous-marine), est le sondeur de sédiment. Dans ce cas, il est aussi placé verticalement sous le véhicule, mais par contre il utilise des basses fréquences (de l'ordre de quelques kiloHertz). Le signal est alors suffisamment pénétrant pour visualiser la structure sédimentaire du fond sur des distances pouvant atteindre quelques centaines de mètres. Il est à remarquer sur ces systèmes l'utilisation généralisée du « chirp » et donc des techniques de compression d'impulsion. Par contre, les puissances requises pour émettre en basse fréquence, et les dimensions nécessaires pour garder une résolution acceptable font que les systèmes performants restent assez encombrants.

Placé horizontalement devant le véhicule, le sondeur peut aussi servir en détection d'obstacles. Il faut alors s'assurer que le volume insonifié est suffisant pour repérer tout objet dans la trajectoire du véhicule.

Comme le but principal du sondeur est de détecter la distance d'un objet assez important (ici le fond), ils sont très souvent fournis avec une interface simple qui correspond à un détecteur de crête. L'information communiquée est simplement la distance correspondant au premier écho significatif.

## 2.2. systèmes d'imagerie

Les systèmes présentés dans le paragraphe précédent fournissent un signal monodimensionnel, qui permet d'obtenir une bonne discrimination des obstacles ou des objets en distance.

Si nous souhaitons avoir une image multidimensionnelle de l'environnement, c'est-à-dire connaître la position des échos ou encore leur forme, il est souhaitable de pouvoir séparer les signaux en fonction de leurs directions d'arrivée.

Quatre approches, présentées ci-dessous, permettent d'arriver à ce résultat.

### 2.2.1. réseau d'échosondeurs

La simplicité des échosondeurs et leur faible coût, permet d'en gréer plusieurs pointés dans des directions différentes. Si ils sont suffisamment directifs (haute fréquence et/ou grande taille d'hydrophones), leurs informations seront complémentaires.

Cette méthode possède quelques inconvénients :

- les émissions doivent être synchronisées, ou alors les capteurs doivent émettre et recevoir séquentiellement pour pouvoir s'affranchir des problèmes de couplages entre hydrophones ;
- les électroniques d'émission et de réception sont inutilement dupliquées ;
- il n'y a pas de synergie entre les capteurs, pour profiter par exemple de la surface de transducteurs augmentée pour accroître la puissance de l'émission ou la directivité des faisceaux.

Cependant, tant que le nombre de directions reste faible, cette méthode est très compétitive.

### 2.2.2. sonar à dépointage mécanique

Le sondeur monofaisceau peut aussi être monté sur une platine orientable électriquement. Il est ainsi possible d'utiliser un seul capteur acoustique à ouverture étroite et d'émettre régulièrement pendant que le capteur tourne sur lui-même. En traçant les échos reçus en fonction de l'orientation angulaire du capteur, il est possible de créer une image du fond tout autour du sonar.

Outre l'existence de parties mécaniques dans le système, le principal inconvénient est le temps nécessaire pour constituer une image : en effet, chaque secteur ne peut être fait que séquentiellement, et avant de commencer une nouvelle trace radiale, il est nécessaire d'attendre la fin de la précédente.

Le temps de balayage d'un secteur va dépendre donc de la portée souhaitée et de la résolution du sonar. Pour une résolution angulaire  $d\theta_h$ , un secteur  $\theta_h$  couvert, et une portée  $R$ , le temps minimum pour constituer une image est de

$$T = \frac{2\theta R}{c_0 \delta\theta_h} \quad (6)$$

Ce type de sonar est aussi très répandu en détection d'obstacles notamment sur les petits AUV. Le concept permet effectivement de couvrir un grand secteur angulaire à un coût très bas (un seul sondeur) et un encombrement très faible.

Si la plupart des sonars mécaniques sont mobiles selon un axe, des systèmes orientables sur deux axes ont été conçus. Un concept intéressant a été développé dans le cadre du projet Européen ASIMOV [CCJ+99], mais n'a pas donné lieu à industrialisation. Il s'agit d'un sonar mécanique deux axes possédant un transducteur découpé en secteurs. En combinant les secteurs à l'émission et à la réception, un lobe ouvert ou fermé verticale-

ment et horizontalement peut être formé de manière indépendante. Cette technique permet d'élaborer une stratégie d'évitement d'obstacle avec un système assez léger et ce, de manière très souple.

### 2.2.3. sonar latéral

Nous avons vu (figure 2) qu'avec un sonar monofaisceau, en exploitant le mouvement du véhicule perpendiculaire à la direction pointé par le sonar, on peut former très facilement une image du fond.

La généralisation de ce principe a permis la création du concept de sonar latéral. Dans ce cas, on utilise deux capteurs, montés de part et d'autre, sur les côtés du véhicule (figure 3) et qui possèdent une ouverture étroite dans le sens horizontal (en gisement) et une ouverture large dans le sens vertical (en site).

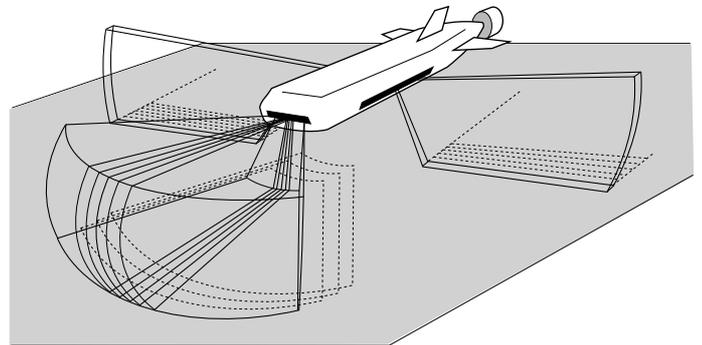


Figure 3. – Schéma de principe des sonars latéral et frontal multifaisceaux.

L'ouverture en site permet à chaque émission, d'insonifier une grande largeur du fond. Les détails des échos sur cette bande de terrain sont alors résolus temporellement par les différences dans les dates d'arrivée.

Le système le plus simple possède un transducteur unique de grande largeur et faible hauteur. Les ouvertures sont alors approximativement celles indiquées par la formule 4 en fonction des deux dimensions de l'antenne.

Cependant, généralement, dans les distances évoquées nous ne pouvons plus considérer que les réflecteurs se trouvent en champ lointain. En effet, compte tenu des tailles des capteurs, la courbure du front d'onde est en général non négligeable. La frontière entre la zone de Fraunhofer (champ lointain) et la zone de Fresnel (approximation parabolique des fronts d'ondes) se situe approximativement à une distance :

$$R = \frac{L^2}{\lambda} \quad (7)$$

Les sonars latéraux les plus sophistiqués du marché tiennent compte du champ proche. Pour cela, à la place d'un transducteur unique, un réseau d'hydrophones est monté et une formation de voies est effectuée à la réception pour permettre de compenser de la courbure des rayons (focalisation). La correction à apporter dépend de la distance des échos, il est donc nécessaire de modifier les paramètres au fur et à mesure que la distance de focalisation augmente. Ce traitement n'est guère possible que depuis l'apparition des traitements numériques.

Un second intérêt d'utiliser une antenne à la place d'un simple hydrophone, est d'adapter la taille utile de l'antenne à la distance pour obtenir une résolution indépendante à la distance. La concaténation des différentes voies permet alors d'obtenir des images relativement homogènes.

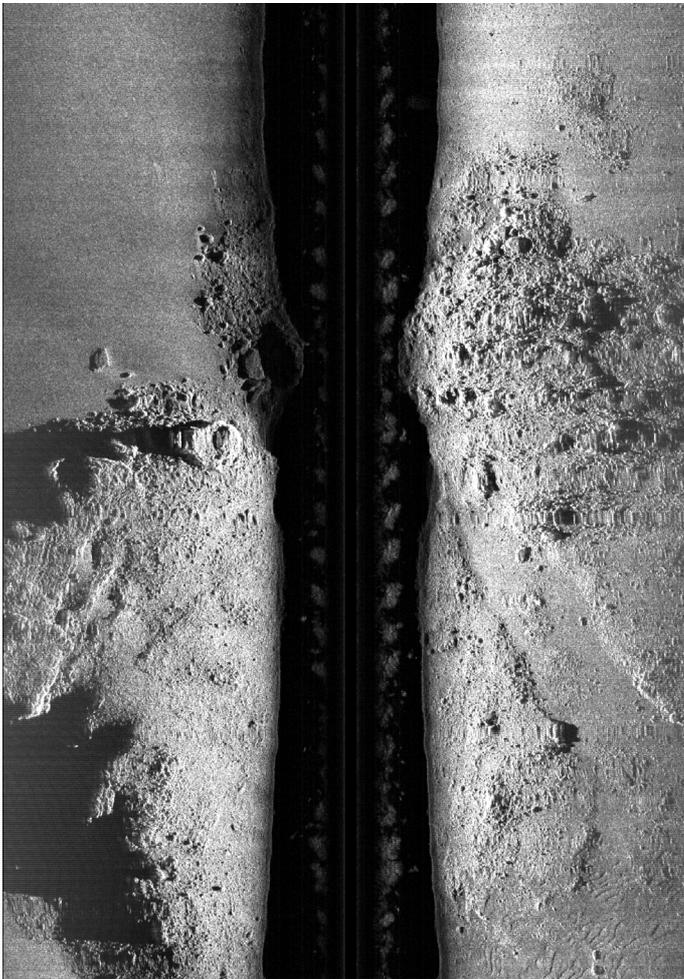


Figure 4. – Exemple d'image sonar latéral.

De la même façon que les sonars mécaniques demandent un temps minimum pour former une image, il existe une contrainte de vitesse maximale pour assurer une couverture du fond sans trou : pour une portée  $R$  et une résolution longitudinale  $\delta r$ , la vitesse maximale est de

$$V_{max} = \frac{c_0 \delta r}{2R} \quad (8)$$

Pour augmenter cette vitesse maximale, il est possible au prix d'une antenne plus longue, de former plusieurs voies parallèles. Cependant les sonars commerciaux possédant cette fonctionnalité restent rares et de coût élevé.

#### 2.2.4 sonar multifaisceaux

Toutes les technologies présentées jusqu'à présent ne forment qu'une image par accumulation de réponses temporelles acquises au fur et à mesure du déplacement du sonar ou du porteur. A partir du moment où nous pouvons disposer d'une antenne capteur composée de plusieurs hydrophones, il est possible de calculer en parallèle plusieurs formations de voies correspondant à des directions différentes.

Si le nombre de voies est important, à chaque émission nous obtenons une image complète de la zone.

L'avantage de l'antenne par rapport au réseau d'échosondeurs évoqués précédemment est évident : chaque hydrophone va contribuer à toutes les voies et non être dédié à une direction. Ainsi pour une même surface de capteurs (et donc un encombrement similaire), le système sera plus résolu et plus sensible. Une antenne de  $N$  hydrophones aura un gain de résolution d'un facteur  $N$  et une sensibilité améliorée en  $10 \log N$ .

#### Sonar frontal

Une première application de ce type de sonar est l'utilisation sur le véhicule en mode frontal. Dans ce cas, le système est orienté devant le véhicule légèrement vers le bas et on insonifie avec un faisceau large en site (pour illuminer le fond sur une grande distance) et large en azimut (pour éclairer sur un grand secteur angulaire) (figure 3).

A la réception, les voies sont formées en azimut et permettent d'avoir une image du fond.

Quand l'objectif est d'éclairer le volume d'eau (détection d'obstacles entre deux eaux) et non le fond, il peut être préférable d'installer le système pour former des voies devant le véhicule dans le plan vertical. Dans ce cas, les objets entre deux eaux se trouvent dans des secteurs angulaires différents du fond et de la surface de la mer.

#### Sondeur multifaisceaux

Une seconde application très courante est le sondeur multifaisceaux. Dans le cas d'un sondeur monofaisceau, à chaque émission, on possède un point de sonde qui correspond à la distance du fond sous le mobile. Dans le cas du sondeur multifaisceaux, à chaque tir, on obtient les sondes en plusieurs points sous le navire. Pour ce faire, on utilise une antenne de réception dont la grande largeur sera perpendiculaire à l'avance et on formera des

voies dans ce plan permettant d'obtenir à chaque tir plusieurs points de sonde. Cependant, contrairement au sonar frontal, les faisceaux doivent être fins dans les deux directions pour que les sondes soient les plus ponctuelles possible.

Pour ce faire, on utilise le concept de l'antenne en T. L'antenne d'émission est une antenne linéaire placée dans l'axe du navire (c'est-à-dire perpendiculairement à l'antenne de réception) : à chaque tir, elle illuminera un faisceau large perpendiculairement et étroit dans le sens d'avance.

Pour chaque voie, en émission réception, le signal reçu est la composition du lobe d'émission et du lobe de réception. Il sera donc étroit à la fois dans le sens d'avance et le sens perpendiculaire.

Ce système se généralise de plus en plus en hydrographie car il reste le moyen le plus précis pour relever la bathymétrie d'une zone, tout en ayant un taux de couverture conséquent. L'encombrement des matériels petits fonds (jusqu'à environ 300m de distance) leur permettent d'être utilisés dans un AUV. De plus, la configuration des faisceaux permet aussi une représentation du fond dans une géométrie proche de celle du sonar latéral. L'utilisation de ce mode évite l'installation d'un sonar complémentaire pour l'imagerie.

Même si les applications sonar frontal et sondeurs sont très différentes, il est important de noter que ces systèmes ne diffèrent que par le système d'émission et le traitement. Enfin, si ce sont des systèmes onéreux de par leur complexité (les systèmes commerciaux ont couramment plus d'une centaine de voies), ils sont extrêmement performants et souples d'utilisation. En particulier, le sondeur frontal semble irremplaçable pour la fonction évitement d'obstacle.

### Lentilles acoustiques

La formation de voies électronique est en règle générale complexe et donc coûteuse en temps de calcul et en puissance électrique.

Pour les petits sonars en haute fréquence, il est possible de faire une formation de voies totalement analogique en utilisant une lentille acoustique.

Par l'utilisation d'un matériau transparent acoustiquement et d'indice différent de celui de l'eau de mer, on peut construire une lentille qui focalise les ondes acoustiques directement sur une matrice de transducteurs.

Cette méthode, très élégante, est peu développée car elle comporte quelques inconvénients :

- les lentilles ne sont optimales que pour une célérité donnée de l'eau de mer. Dès que celle-ci varie, le système ne focalise plus parfaitement. De même, les sonars hautes fréquences travaillant au mieux en zone de Fresnel, les images ont une faible profondeur de champ. Des systèmes de focalisation réglable peuvent en partie compenser ces problèmes [BMT01]. De plus, malgré les progrès de l'optique dans la conception des lentilles épaisses, les lentilles acoustiques restent très encombrantes.

## 2.3. concepts « avancés » de sonar

Grâce essentiellement aux progrès de l'électronique numérique, de nouveaux systèmes sonars apparaissent. Certains des concepts présentés sont déjà dans le domaine industriel (caméra acoustique, interférométrie), d'autres ne sont aujourd'hui encore qu'au stade de prototype.

### 2.3.1. caméra acoustique

Nous avons vu d'abord des sonars très simples (sondeurs mono-faisceaux) qui donnent une information monodimensionnelle (écho en fonction du temps dans une direction). Ensuite, nous avons abordé des systèmes qui, à chaque ping, donnent des images bidimensionnelles.

L'évolution naturelle de ce concept, est le sonar tridimensionnel qui permet d'obtenir à chaque émission une image volumique de l'espace.

Conceptuellement, le principe pour obtenir des données tridimensionnelles est simple :

- soit on utilise une antenne en T avec l'émission focalisée en site, et la réception focalisée en gisement. A chaque ping successif, on dépointe l'émission (soit mécaniquement, soit électroniquement) pour balayer le volume ;
- soit on utilise une antenne planaire et non plus linéaire et on forme des voies dans les deux axes en réception.

La première solution est plus économique, mais elle donne une image qui ne sera complète qu'au bout de plusieurs pings.

La seconde solution permet d'obtenir une image de volume à chaque ping. Par contre, elle est beaucoup plus coûteuse à la fois en nombre de transducteurs et en calcul de données. Elle sera aussi réservée aux systèmes hautes fréquences à cause de l'encombrement imposé par une antenne planaire.

Si on suppose un système qui nécessite  $N$  capteurs dans le cas d'une antenne linéaire. Une antenne planaire de même ouverture et même résolution nécessite idéalement  $N^2$  capteurs. Le volume de calcul et le débit nécessaire évoluent dans les mêmes proportions.

Cependant, dans le cas d'une antenne complète, grâce au nombre élevé de capteurs, le gain d'antenne est très important (en  $20 \log N$ ). Il est alors possible de dégrader volontairement cette valeur, simplement en n'installant pas tous les capteurs sur l'antenne.

Si on suppose une antenne lacunaire (tous les emplacements d'hydrophones ne sont pas remplis), la résolution reste liée aux dimensions extrémales de celle-ci. Par contre les niveaux des lobes secondaires vont remonter.

Si la répartition est régulière, nous aurons des lobes secondaires de même hauteur que le lobe principal (on les appelle alors lobes images). Toute la difficulté est alors de trouver les emplace-

ments les plus « aléatoires » possibles pour éviter au maximum la remontée des lobes secondaires et ce, quelque soit la fréquence.

Les systèmes existants peuvent accepter jusqu'à une lacunarité de 90%, et donc nécessiter 10 fois moins de capteurs que nécessaire [KS00].

Compte tenu de sa complexité, l'utilisation de ce type de sonar est réservé au cas où la troisième dimension est indispensable à la mission et reste très peu répandu. Les deux principales applications sont le sonar frontal d'AUV pour l'évitement d'obstacle et la caméra acoustique pour plongeur.

### 2.3.2. sonar interférométrique

Les relevés bathymétriques se font essentiellement à partir de sondeurs multifaisceaux. Ces systèmes procurent une très bonne précision de mesure des hauteurs du fond, par contre, comme ils sont en général liés à un navire de surface, ils possèdent une mauvaise résolution dans le plan horizontal. Cette résolution est d'autant plus mauvaise que la zone cartographiée est profonde.

Par petits fonds, la résolution est augmentée, mais par contre la couverture devient très faible nécessitant pour le navire de nombreuses passes.

Depuis quelques années, un nouveau type de sonar commence à apparaître : le sonar latéral interférométrique.

Le principe de ce sonar est d'utiliser au moins deux antennes latérales superposées et d'exploiter le déphasage des signaux reçus sur les deux capteurs pour en déduire leur direction d'arrivée [Den89].

Si nous supposons deux antennes superposées avec un écartement  $d$ . Le signal  $s_2(t)$  à l'instant reçu sur la seconde antenne accusera par rapport au signal  $s_1(t)$  de la première antenne, un retard équivalent à la différence de marche.

$$\delta t = \frac{d \cos(\theta_v - \psi)}{c_0} \quad (9)$$

$\theta_v$  est l'angle d'incidence de l'onde sonore par rapport à la verticale et  $\psi$  est l'inclinaison du plan formé par les deux antennes.

Ce retard peut être mesuré en faisant interférer les deux signaux entre eux :

$$s_1(t)s_2^*(t) = s^2(t)e^{j\frac{2\pi d \cos(\theta_v - \psi)}{\lambda}} \quad (10)$$

En représentant la phase  $\Delta\phi$  du signal obtenu, en fonction du temps et de l'avance du véhicule porte sonar, nous obtenons un interférogramme (figure 5) et avec l'amplitude d'une des deux antennes, nous obtenons l'image sonar (figure 6).

A partir de l'interférogramme et en connaissant l'immersion du sonar  $h_0$ , nous pouvons remonter à la hauteur du fond en chaque point de l'image.

$$h = h_0 + r \sin(\psi + \arccos \frac{\lambda}{2\pi d} [\Delta\phi + 2k\pi]) \quad (11)$$

avec  $k$  entier.

Figure 7, nous avons fusionné l'image et la bathymétrie et obtenue une représentation tridimensionnelle du fond.

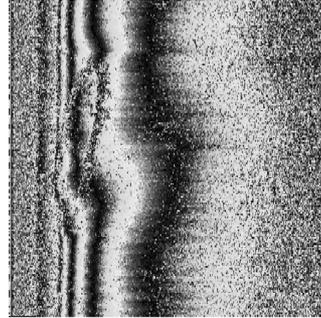


Figure 5. – Interférogramme.



Figure 6. – Image latérale associée.

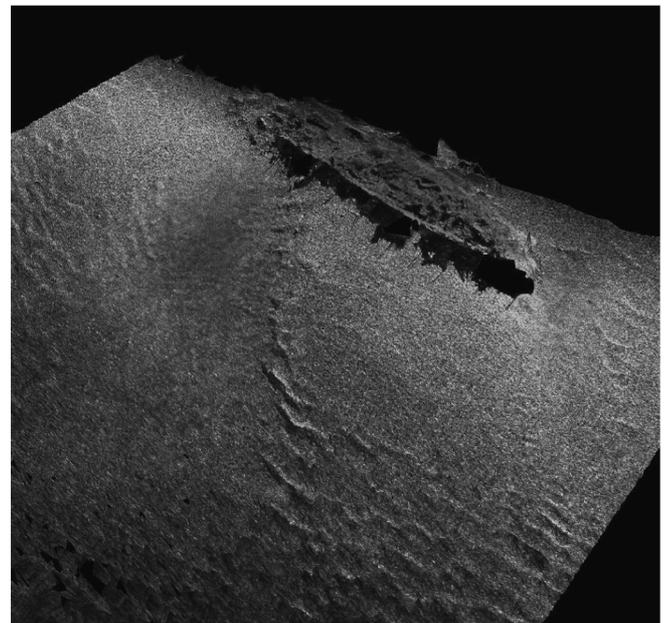


Figure 7. – Reconstruction 3D de l'image.

Pratiquement, l'interférométrie présente un certain nombre de difficultés.

Tout d'abord, les interférogrammes obtenus sont en général fortement bruités (figure 5). Ce bruit possède plusieurs origines [Lur98] :

- le speckle (interférences constructives et destructives au sein de la même cellule de résolution) provoque des extinctions de l'image et une phase très bruitée ;
- la perte de cohérence entre les deux images (liée elle aussi aux interférences). Cette décohérence sera d'autant plus forte que les deux antennes sont écartées ;

- les trajets multiples et les échos parasites de surface qui font qu'en un même instant des signaux peuvent provenir de plusieurs directions (non séparables avec seulement deux capteurs) ;
- la différence d'empreinte entre les deux antennes. A un même instant, les deux antennes ne reçoivent pas des échos issus rigoureusement du même point, d'où une perte supplémentaire de cohérence (à la différence des autres, cette source d'erreur est compensable) ;
- le bruit acoustique ou électrique affectant le capteur.

Le bruit de phase est fortement non gaussien. Divers algorithmes existent pour filtrer ce bruit. Malheureusement en général, cette réduction de bruit se fait au prix d'une perte de résolution en distance.

Ensuite, si l'écartement entre deux antennes est supérieur à la demi-longueur d'onde (ce qui est généralement le cas), on obtient une ambiguïté de phase, et plusieurs directions d'arrivée peuvent correspondre à la même phase observée.

Plusieurs algorithmes ont été développés pour lever les ambiguïtés.

La première méthode est de partir d'une position où la profondeur est connue (par exemple la verticale sous le poisson donnée par un échosondeur) et de dérouler la phase en tout point en détectant tous les sauts de  $2\pi$ , soit sur chaque trace temporelle, soit mieux, sur l'interférogramme bidimensionnel [GRM<sup>+</sup>97], [GZW88]. L'inconvénient majeur de cette méthode est que certaines parties de l'image peuvent être complètement isolées dans une zone de phase incohérente, ne permettant pas de les relier à des points de profondeurs connues (les zones d'ombre ou les pentes fortes provoquent une décohérence du signal).

Une deuxième approche est de faire une intercorrélacion entre les signaux des deux antennes sur une fenêtre glissante. Si la bande passante est suffisamment large et la fenêtre de calcul assez étendue, la position du pic de corrélation peut permettre de lever l'ambiguïté de phase. Malheureusement, cet algorithme ne peut fonctionner que si l'ensemble des points utilisés dans la fenêtre proviennent de la même direction d'arrivée. En particulier, cet algorithme peut s'avérer inopérant pour estimer l'altitude d'objets de taille restreinte.

La troisième approche, plus coûteuse mais néanmoins intéressante par sa précision est la méthode du vernier [Den89]. On utilise une troisième antenne latérale pour lever l'ambiguïté. En effet, si à partir des trois antennes on crée les interférences sur deux couples, et si l'écartement entre les trois antennes est bien choisi, on obtient deux ensembles de solutions dont seule une valeur sera commune. L'efficacité de cette méthode dépend pour beaucoup des écartements choisis [SS00].

Par rapport aux échosondeurs, l'interférométrie possède des qualités complémentaires : la résolution horizontale est celle du sonar latéral (et donc en général meilleure que celle de l'échosondeur), le système reste léger, moins coûteux qu'un multifais-

ceaux et peut être installé à bord d'un poisson et donc au plus près du fond.

La surface balayée pendant une passe est beaucoup plus large que celle d'un échosondeur, mais compte tenu des contraintes de vitesse déjà évoquées, le taux de couverture n'est pas forcément beaucoup plus important. De plus la précision verticale est en générale très inférieure à celle d'un échosondeur. D'une part parce que la phase est très bruitée, d'autre part parce que les mouvements du poisson sont moins bien contrôlés que ceux d'un navire. Enfin, de part leur géométrie, les sonars latéraux (et donc les sonars interférométriques) sont incapables de bien mesurer les caractéristiques du fond à la verticale du système (contrairement aux sondeurs multifaisceaux). Ce handicap nécessite un entrelacement des passes sonars pour couvrir correctement une zone.

Il est aussi à remarquer que les échosondeurs utilisent la méthode interférométrique pour déterminer l'angle d'arrivée des faisceaux rasants (les faisceaux d'incidence élevée sont eux détectés par le maximum d'amplitude).

### 2.3.3. sonar à antenne synthétique

#### Principes généraux

La synthèse d'ouverture consiste en l'intégration cohérente des signaux de voies d'une antenne réelle sur  $N$  récurrences successives constituant l'antenne synthétique. Le signal complexe  $b_s(t_s, \theta_s)$  de la voie de l'antenne synthétique pointée dans la direction  $\theta_s$  à la distance  $r$  s'écrit alors :

$$b_s(t_s, \theta_s) = \sum_{n=1}^N b_{p,n}(t - t_n, \theta_n) e^{-j2\pi f_0 t_n} \quad (12)$$

où  $f_0$  est la fréquence centrale d'émission du sonar,  $b_{p,n}(t, \theta)$  est le signal de voie à la récurrence  $n$  de l'antenne physique pointée dans la direction  $\theta$ , définie relativement à l'axe de l'antenne physique et focalisée à la distance  $r$ . Le retard  $t_n$  et la direction de pointage  $\theta_n$ , qui définissent la voie physique à la récurrence  $n$  dépendent des coordonnées du point de focalisation ( $r, \theta_s$ ) de la voie de l'antenne synthétique, référencé par rapport à un axe fixe, et des positions du centre de phase de l'émission et de la réception à la récurrence  $n$ .

La résolution de l'antenne synthétique est identique à celle d'une antenne classique équivalente de longueur  $L_{ACE}$  égale à  $2(N - 1)VT_r + L_r$  [BLCH93], où  $V$  est la vitesse moyenne de déplacement selon l'axe parallèle à l'antenne,  $T_r$  est la période de récurrence et  $L_r$  est la longueur de l'antenne physique. Alors, la résolution  $\delta_s$  de l'antenne synthétique égale  $R\lambda/L_{ACE}$ . Pour que cette résolution soit effectivement atteinte, il faut d'une part que le déplacement longitudinal entre deux récurrences  $VT_r$  n'excède pas la demi-longueur de l'antenne physique pour que l'antenne synthétique soit correctement échantillonnée, et d'autre part que les retards  $t_n$  et gisements  $\theta_n$  des voies de l'an-

tenne physique soient suffisamment précis. Cette dernière condition est d'autant plus sévère que le nombre de récurrences  $N$  à intégrer est élevé. En pratique la précision requise n'est pas accessible aux capteurs de mesures de mouvement [BP95].

Le gain de résolution  $g$  du traitement d'antenne synthétique est défini comme étant le rapport des longueurs de l'antenne classique équivalente et l'antenne physique  $L_{ACE}/L_r$ , ou encore le rapport des résolutions  $\delta_r/\delta_s$ , soit

$$g \approx N \frac{2VT_r}{L_r} \quad (13)$$

lorsque  $N$  est grand, ou encore lorsque  $VT_r$  est proche de sa limite supérieure. Dans ce dernier cas, le gain  $g$  est proche de  $N$ .

### Calibration de l'antenne synthétique

Pour former les voies de l'antenne synthétique, il est nécessaire de connaître ou mesurer les retards  $t_n$  et gisements  $\theta_n$  des voies de l'antenne physique, ces retards et gisements dépendant des mouvements de la plateforme. Comme Cutrona l'avait indiqué [Cut75], il s'agit là du principal obstacle à la mise en oeuvre du principe de la synthèse d'ouverture dans le domaine sonar où la compensation des mouvements est beaucoup plus difficile que dans le domaine radar, notamment en raison des durées d'intégration beaucoup plus longues. La problématique de la compensation des mouvements a donné lieu cette dernière décennie à de nombreuses recherches dans le domaine des techniques dites d'autocalibration. Différentes approches ont vu le jour parmi lesquelles on peut noter les méthodes utilisant la présence de « phare acoustique » dans la scène, telle que la méthode PGA (Phase Gradient Autofocus) provenant du domaine radar, ou encore celles basées sur la corrélation spatiale et temporelle de la réverbération.

Cette dernière approche plus prometteuse et mature, a déjà fait l'objet de publication de résultats prometteurs sur signaux réels acquis à la mer dans des conditions opérationnelles réalistes [BF98].

### Principe de l'autocalibration

Le signal reçu sur le capteur d'abscisse  $\xi + L_n$  à la récurrence  $n - 1$  et celui reçu sur le capteur d'abscisse  $\xi$  à la récurrence suivante  $n$  sont corrélés lorsque  $L_n$  est égal à la somme des distances parcourues parallèlement à l'antenne entre les deux instants d'émission et les deux instants de réception. Pour que cette corrélation existe, le déplacement de l'antenne entre deux récurrences doit nécessairement être inférieur à la demi-longueur de l'antenne physique c'est à dire que l'antenne synthétique est sur-échantillonnée.

Selon ce principe, et en reprenant les notations de la figure 8, les signaux des capteurs situés sur la partie avant de l'antenne à la récurrence  $n - 1$  sont donc corrélés aux signaux des capteurs situés sur la partie arrière de l'antenne à la récurrence  $n$ . En

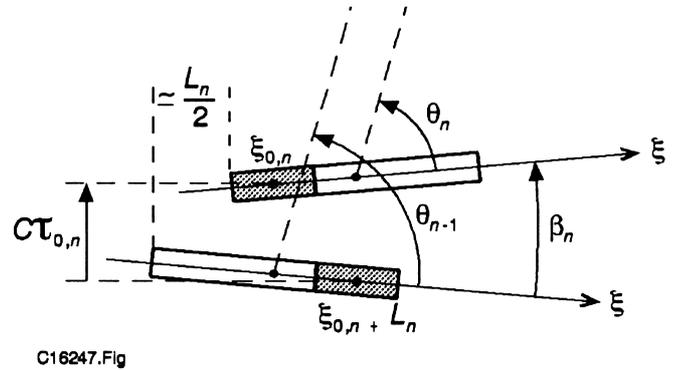


Figure 8. – Principe d'estimation des paramètres de mouvement.

recherchant les paires de capteurs présentant une corrélation maximale, on peut déterminer la composante du déplacement,  $L_n$ , parallèle à l'antenne physique. De même le retard de propagation  $\tau_{0,n} = \tau_n(\xi_{0,n})$  au centre des deux sous-réseaux de longueur  $L_r - L_n$  ainsi que le décalage en gisement  $\beta_n$  induit par les rotations de la plateforme peuvent être estimés connaissant la loi de variation des retards de corrélation le long de la sous-antenne.

Alors les retards  $t_n$  et les directions de pointage des voies de l'antenne physique  $\theta_n$ , nécessaires pour former la voie synthétique, peuvent être calculés récursivement à partir des estimations des déplacements longitudinaux  $L_n$ , des retards  $\tau_{0,n}$  et des décalages en gisement  $\beta_n$ .

$$\cos \theta_n = \cos \theta_{n-1} + \beta_n + \frac{L_n}{R}$$

$$t_n = t_{n-1} - \tau_{0,n} + (\cos \theta_n + \cos \theta_{n-1}) \frac{L_n}{2c}$$

Les premières bases de l'autocalibration s'appuyant sur le principe de la corrélation de la réverbération ont été données dès 1978 par R.S. Raven [Rav], mais ce n'est qu'à partir de 1992 que cette méthode, maintenant connue sous le nom de DPC (Displaced Phase Center), a vraiment été utilisée [She92]. Une autre méthode appelée MINT (Multibeam INTERferometry), est basée sur les mêmes principes mais travaille sur les signaux de voies de sous-réseaux de longueur  $L_r - \widehat{L}_n$ , plutôt que sur les signaux de capteurs [PFTG97].

### Résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de traitement obtenus sur deux séquences de signaux réels enregistrés en juin 1997 dans la baie de Douarnenez par 20 m d'eau en présence d'un fond de sable. Durant cette campagne nous avons utilisé le sonar 2022 MK3 de Thales Underwater Systems monté sur un véhicule SUTEC. Le sonar peut fonctionner à deux fréquences

principales ; 165 kHz en mode détection et 405 kHz en mode classification. Dans les deux cas le sonar naviguait 10 m au dessus du fond et nous avons utilisé la méthode MINT sur des segments temporels de 13 ms pour estimer les paramètres de formation des voies de l'antenne synthétique.

Dans le premier exemple, le sonar fonctionne en mode classification à 405 kHz et la cible est un cône tronqué au sommet, située à 50 m du sonar. A cette distance la résolution de l'antenne physique est de 36 cm. Les paramètres d'autocalibration estimés sur les seize récurrences constituant l'antenne synthétique sont donnés figure 9. Sur cette représentation, on note une forte dérive dans l'axe de visée correspondant à environ  $20\lambda$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde. Les images issues du traitement conventionnel de formation de voies et de la synthèse d'ouverture sont données figure 10. Dans les deux cas la zone de terrain représentées fait 4 m x 6 m. Le déplacement moyen du sonar  $VT_r$  valant 15 cm, la résolution théorique évaluée à partir de (13) est égale à 9.2 soit  $\delta_s = 3.9$  cm à 50 m. Etant donné que sur cette image aucun écho provenant d'un diffuseur ponctuel n'est identifié de manière certaine, la résolution de l'antenne synthétique ne peut être mesurée. Toutefois, du fait du contraste de l'ombre on est assurément proche de la résolution théorique ; dans le cas contraire, une défocalisation de l'antenne synthétique se serait traduite par une remontée des lobes secondaires et donc une dégradation du contraste.

Dans le second exemple, le sonar fonctionne en mode détection (165 kHz) et la cible est une sphère de 1 m de diamètre située à

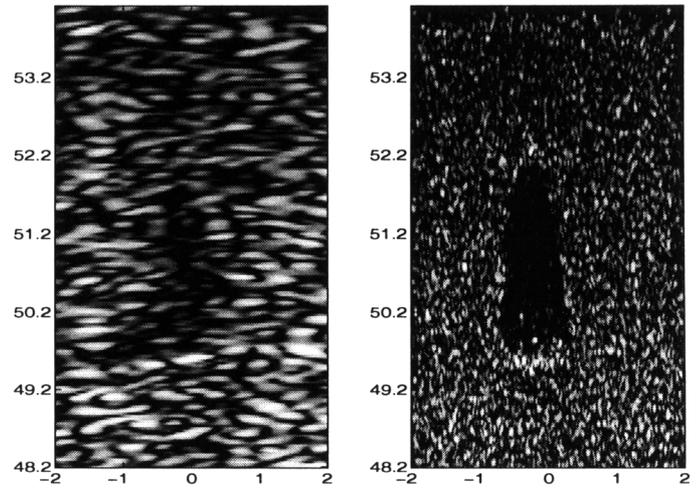


Figure 10. – Image antenne physique (gauche) et image antenne synthétique (droite).

85 m. La résolution de l'antenne physique à la distance de la cible est 1.5 m. L'antenne synthétique est cette fois-ci constituée de 21 récurrences et les paramètres d'autocalibration estimés sont représentés figure 11. Les images issues du traitement conventionnel de formation de voies et de la synthèse d'ouverture sont données figure 12.

Le déplacement moyen entre deux récurrences est égal à 14.5 cm, soit un gain de résolution théorique de 12 correspon-

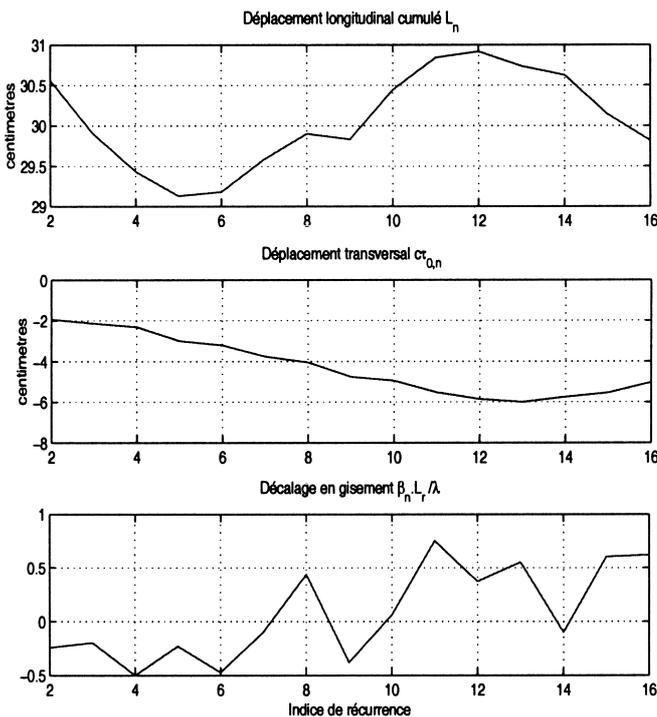


Figure 9. – Paramètres d'autocalibration – 405 kHz.

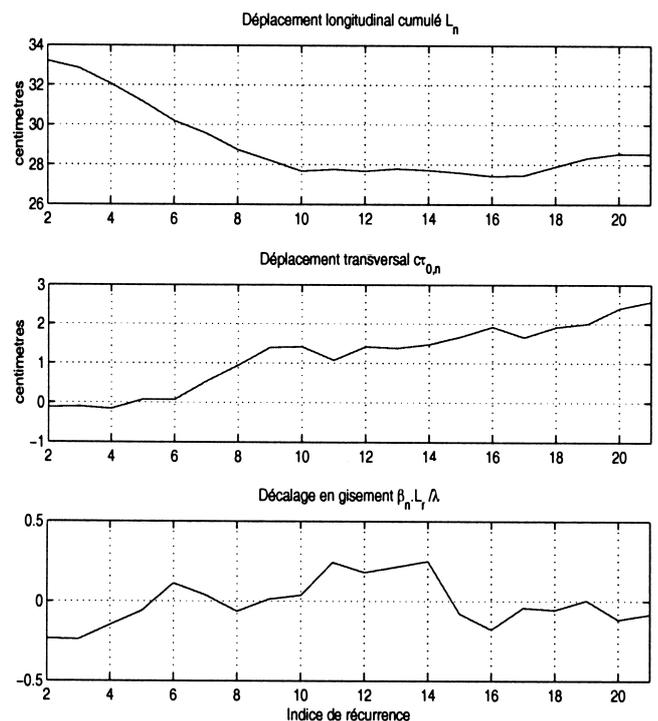


Figure 11. – Paramètres d'autocalibration – 165 kHz.

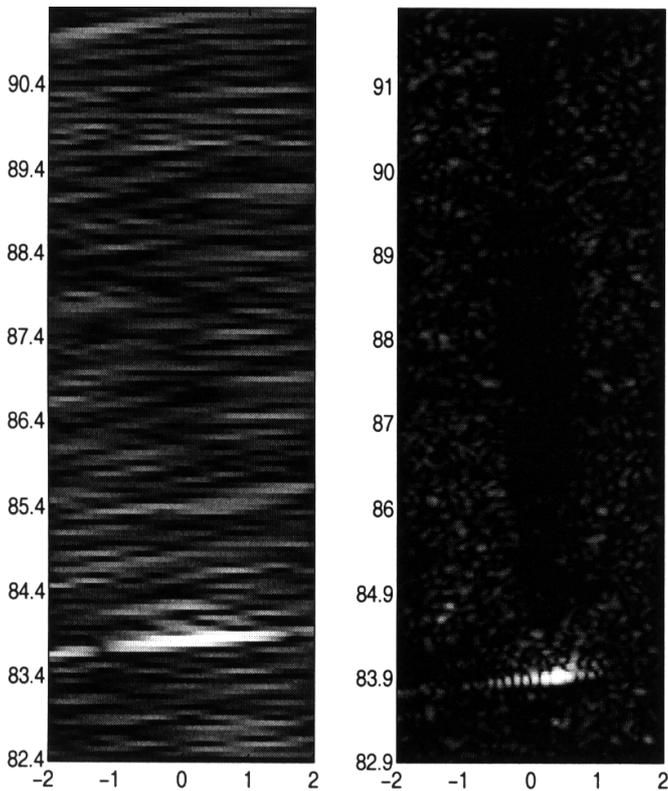


Figure 12. – Image antenne physique (gauche) et image antenne synthétique (droite).

tant à une résolution de 13 cm à 85 m. La mesure directe de la largeur de l'écho à  $-4\text{dB}$ , dont une coupe est donnée figure 13 indique une résolution de 14 cm, valeur très proche de la résolution théorique.

### Applications

Le sonar à antenne synthétique est toujours l'objet d'une recherche active. Plusieurs systèmes prototypes existent ou ont existé et démontré la faisabilité du concept à la mer (SAMI [ZC02], IMBAT [BBF02] pour des applications de survey et HF/LFSAS [FC01], MASAI [BP00] pour des applications de guerre des mines par exemple). Si un travail de recherche reste encore nécessaire pour industrialiser et fiabiliser ces systèmes, nous pouvons penser que ces techniques sont intéressantes à appliquer dans le cadre de la robotique sous-marine. En effet l'AUV est une plateforme stable et lente, ne permettant pas d'embarquer de grandes longueurs d'antenne. Ce sont trois paramètres favorables à l'emploi du SAS. Un point défavorable est la grande puissance de calcul nécessaire au traitement d'antenne. Cependant, on peut envisager un post traitement à terre au moment du dépouillement. Enfin, comme nous le verrons, la micro-navigation nécessaire au traitement peut être utilisée pour la navigation de l'AUV.

### 2.3.4. synthèse incohérente

Une autre approche plus simple et très proche de l'antenne synthétique est de faire de la synthèse incohérente. Contrairement au cas précédent, les signaux des antennes successives sont sommés en énergie et non en tenant compte de leur phase respective. Le gain en résolution est alors faible (sauf en large bande et large ouverture), mais par contre le speckle est sensiblement diminué grâce à la sommation incohérente des contributions. Cette méthode reste très intéressante à mettre en oeuvre car elle est assez facilement implémentable et les contraintes de position sont beaucoup plus faibles qu'en synthèse cohérente. De même le taux de couverture n'est pas ou peu contraint. De plus, il est tout à fait possible de moduler à volonté l'aspect cohérent et incohérent dans un traitement, permettant d'ajuster au mieux un compromis entre la résolution et le bruit de speckle.

Nous mentionnerons en particulier l'application au sonar frontal de cette méthode dans le programme COSMOS [ACC+00].

### 2.3.5. sonar paramétrique

Un domaine relativement récent est la constitution d'images « haute résolution » dans le sédiment. La pénétration dans les sédiments et la haute résolution sont contradictoires. Cependant, des techniques commencent à voir le jour.

Tout d'abord, l'antenne synthétique permet de s'affranchir de la longueur d'onde dans une large mesure. Il est donc théorique-

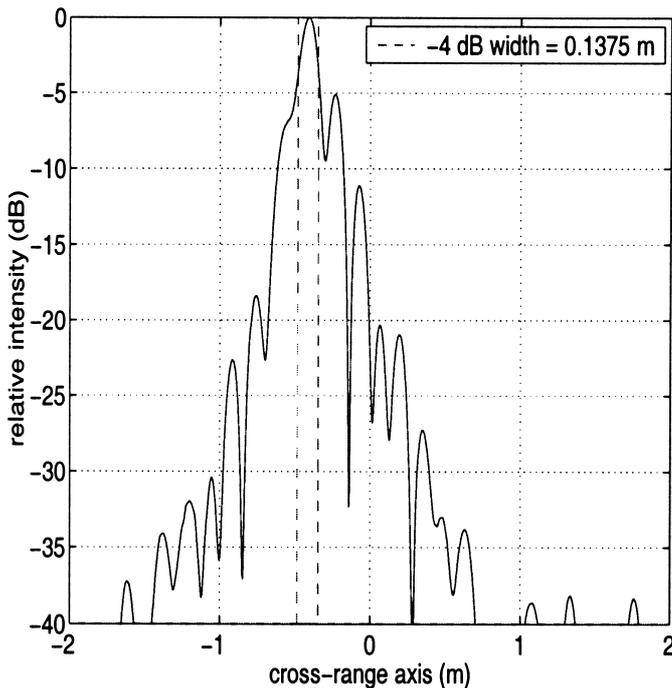


Figure 13. – Coupe longitudinale de l'écho.

ment possible d'utiliser des fréquences suffisamment basses pour pénétrer dans le sédiment (quelques kiloHertz), tout en gardant une bonne résolution.

Il faut cependant comprendre que cette synthèse n'est possible que dans une direction, selon l'avance du véhicule.

Un autre principe permet d'obtenir une résolution correcte tout en conservant des basses fréquences : le sonar paramétrique.

Les équations de propagation acoustique sont obtenues par la linéarisation de l'équation de Navier-Stokes (utilisée en mécanique des fluides) pour les petites fluctuations de vitesse et de pression. Dans cette approximation, on néglige un certain nombre de termes du second ordre dont, en particulier, les termes non linéaires de la compressibilité liant la pression  $p$  et la masse volumique  $\rho$  :

$$p = p_0 + A\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right) + \frac{B}{2}\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \dots \quad (14)$$

Pour une onde acoustique donnée, les termes non linéaires donnent naissance à des ondes secondaires de fréquence différente. Le terme source secondaire prend la forme [Bou00]

$$p(R, t) = \frac{\beta \rho_0 S_0}{8\pi \alpha c_0^2 r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} V^2\left(t - \frac{R}{c}\right) \quad (15)$$

dans le cas du rayonnement issu d'un piston de surface  $S_0$ .  $\beta$  est un terme associé à la non linéarité du fluide et  $\alpha$  est l'atténuation du fluide.  $\beta = 1 + \frac{B}{2A}$

En particulier, pour une onde primaire correspondant à la superposition de deux fréquences  $f_1$  et  $f_2$ , deux ondes secondaires aux fréquences  $f_1 + f_2$  et  $f_1 - f_2$  sont générées.

L'onde basse fréquence n'est créée que dans le faisceau haute fréquence, nous pouvons donc considérer que l'ouverture est liée à celle d'une antenne linéaire parallèlement à son axe. La directivité en pression pour des petits angles est [Wes63] :

$$D(\theta_h) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 \theta_h^4}{4\alpha^2 \lambda^2}}} \quad (16)$$

L'intérêt est évident : nous pouvons obtenir une onde basse fréquence qui possède un faisceau très fin. De plus, le système permet de faire du large bande très facilement et il ne possède pas de lobe secondaire.

Ce système est relativement simple pour générer des faisceaux étroits dans les deux directions qui soient basse fréquence. Par contre, il y a deux principaux défauts :

- l'amplitude du faisceau secondaire est très faible par rapport à celui du primaire (d'où des problèmes électroniques non négligeables) ;

- le faisceau étroit est formé à l'émission et oblige de balayer séquentiellement tout le volume. Il est impossible de faire des voies simultanées.

Grâce à cette solution légère et compact, en balayant le fond, on peut obtenir une image tridimensionnelle des objets enfouis (figure 14). Certains constructeurs proposent une grille bidimensionnelle d'émetteurs permettant d'obtenir directement une imagerie 3D de la couche sédimentaire superficielle.

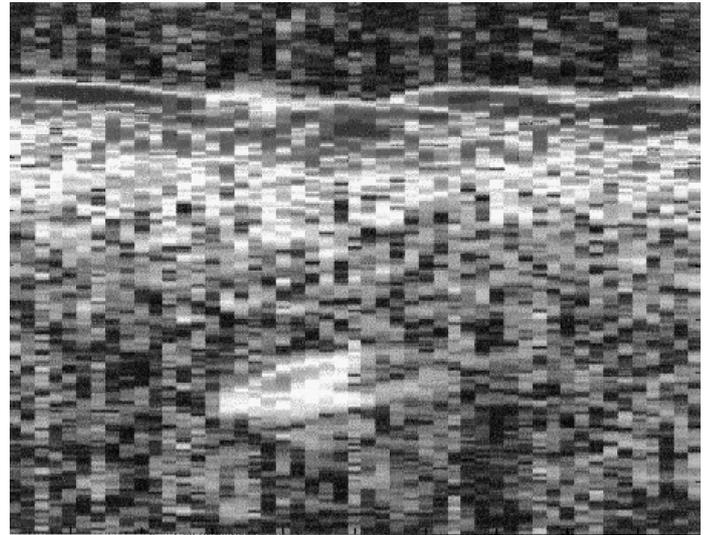


Figure 14. – Visualisation d'une roche enfouie (environ 50 cm de profondeur).

## 2.4. conclusion

Même dans le domaine de l'imagerie, beaucoup de systèmes différents existent. Tous sont nécessaires, car ils correspondent à des compromis différents en terme de conception. Tout d'abord, la première contrainte, très présente en terme de robotique sous-marine, est celle de la complexité. Il est inutile de concevoir un sonar sophistiqué si son encombrement, sa consommation ou la puissance de calcul nécessaire rendent son utilisation rédhibitoire dans un petit véhicule. Ensuite, les choix vont être guidés par des paramètres opérationnels. Pour atteindre un bon taux de couverture, si par exemple la vitesse du porteur est limitée, il est possible grâce à l'antenne synthétique, de gagner en portée tout en conservant la résolution. De même, l'interférométrie permet des géométries de mesures difficiles à atteindre pour un échosondeur multifaisceaux.

### 3. traitements de données acoustiques

#### 3.1. caractéristiques des images acoustiques

L'image acoustique possède des caractéristiques propres qui sont importantes à connaître si on souhaite une interprétation fiable de ses données.

##### Speckle

Tout d'abord, l'onde acoustique étant cohérente, chaque cellule de résolution correspond à la contribution constructive et destructive de tous les points brillants (microréflecteurs) [Goo76]. Sur chaque point, nous n'aurons pas directement la valeur de l'index, mais une valeur aléatoire de variance fonction de cet index (figure 15). De même qu'en imagerie radar, on peut réduire ce bruit en sommant plusieurs images acquises de manières différentes. Un moyen facile utilisé est de moyennner les points voisins.

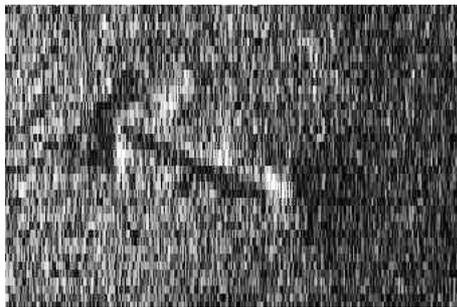


Figure 15. – Détail d'une image avec speckle.

Dans le cas, où les points brillants sont nombreux dans une cellule de résolution, le théorème central limite montre que l'image obtenue suit une loi de Rayleigh. Pour un sonar de bonne résolution ou des fonds particuliers, la statistique s'en écarte pour s'approcher d'une loi  $K$  [Dun97]. Les paramètres associés à la loi  $K$  dépendent du type de sédiments et peuvent aider à la caractérisation des fonds.

##### Mouvements de plateforme

La lenteur de la propagation de l'onde sonore implique que les mouvements de plate-forme pendant la constitution de l'image crée un effet non négligeable sur le résultat obtenu. Nous pouvons avoir plusieurs effets (détaillés pour la géométrie d'un sonar latéral) :

- les effets de lacet et de tangage impliquent une déformation de l'image (répétition du faisceau ou au contraire trous de couverture).

- ces mêmes mouvements peuvent entraîner dans des cas extrêmes une atténuation de l'énergie reçue car l'antenne est dépointée entre l'émission et la réception.
- le pilonnement entraîne une distorsion du profil du fond à la verticale du véhicule.

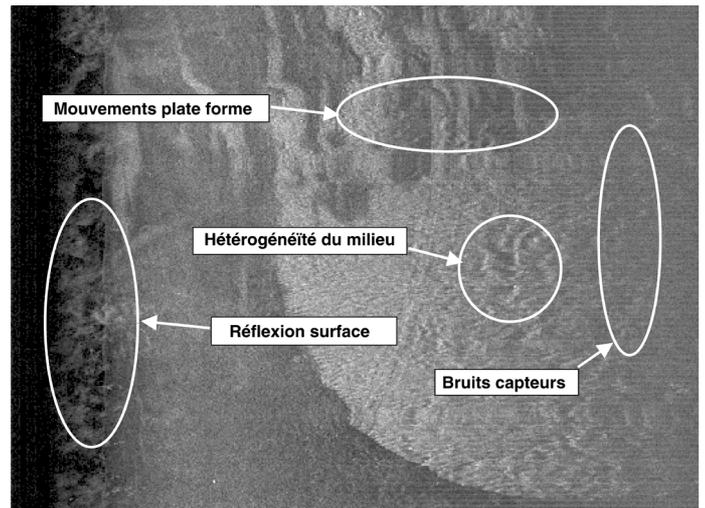


Figure 16. – Défauts divers dans une image.

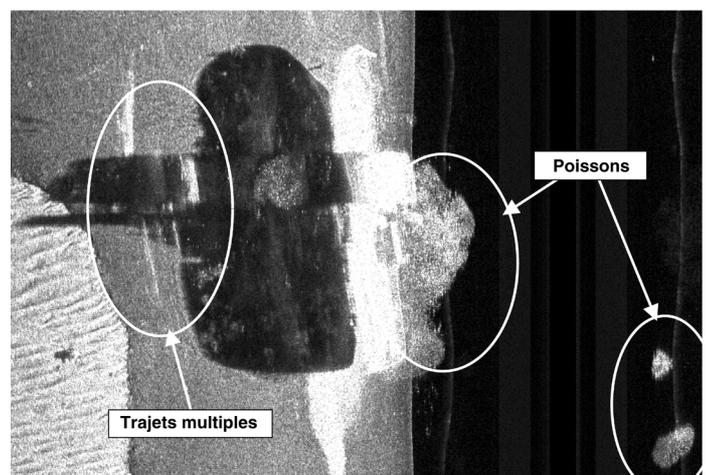


Figure 17. – Trajets multiples et faune sous-marine.

##### Hétérogénéités du milieu

Nous avons vu que la célérité sonore dépend de la salinité, de la pression et de la température. Or le milieu marin est rarement très homogène. Cette inhomogénéité se traduit par des variations d'indice dans la colonne d'eau qui entraînent une déformation des fronts d'ondes et une propagation non rectiligne.

Ces propriétés ont une importance majeure en basse fréquence, où un minimum de célérité au niveau de la thermocline peut entraîner un piège sonore qui focalise les ondes et permet des

transmissions sur des très grandes distances avec une faible perte.

Dans le cas de mesures bathymétriques à l'aide d'un sondeur multifaisceau, une mesure des angles d'arrivées très précise est nécessaire pour remonter à la distance du fond. Là aussi, la connaissance de la bathycélérité (vitesse du son en fonction de l'immersion) est indispensable à la qualité de mesure.

Dans l'imagerie sous-marine, en particulier en haute fréquence, les portées et les précisions souhaitées rendent en général négligeables la correction de la bathycélérité. Par contre, l'instabilité du milieu peut provoquer des difficultés de focalisation de l'image. C'est particulièrement vrai en antennerie synthétique, où le milieu peut changer de manière significative pendant la constitution de l'image.

Nous pouvons observer sur la figure 16, un fond très perturbé pendant une tempête.

Un autre problème très visible, quand il y a un fort contraste entre plusieurs parties de l'image est la présence d'échos multiples (sur la figure 17, le pont et le roof de l'épave sont réfléchis par la surface).

## Sources et obstacles parasites

Les échos parasites peuvent aussi perturber l'image. Nous mentionnerons en particulier les échos provenant de la surface. Ce phénomène est d'autant plus fort que la mer est formée car on peut alors se trouver dans des conditions de spéculaire, même avec des angles rasants (figure 16).

Les trajets multiples et les échos parasites sont surtout présents dans le cas du sonar frontal ou latéral, pour peu que l'immersion soit faible. Dans ces cas, effectivement, la fonction de directivité en site est ouverte pour permettre d'intercepter la plus grande fauchée possible, et le sonar est pointé proche de l'horizontal pour compenser au maximum l'énergie perdue par la divergence des signaux et avoir un gain élevé dans les grandes portées.

Enfin, dans l'imagerie des fonds marins, la faune peut créer des échos et des ombres parasites qui peuvent nuire à un traitement automatique des données. Nous pouvons observer par exemple figure 17 que l'épave est entourée de nombreux poissons qui rendent difficiles l'extraction de la silhouette. De même, les bancs de poissons peuvent créer des échos et des ombres sur les fonds marins.

Enfin, sur les fréquences inférieures à une centaine de kiloHertz, le bruit ambiant n'est pas négligeable et peut influencer de manière significative les performances du sonar.

## 3.2. correction et conditionnement des données

Dans le traitement des données sonars, le premier objectif est la correction et le conditionnement des données. Les étapes principales sont les suivantes :

**correction des gains** : compensation des variations de luminance en fonction de la portée ;

**détection de la colonne d'eau** : recherche de la distance du fond pour permettre de connaître la géométrie de l'image ;

**correction géométrique** : représentation dans un espace où le signal est approximativement une projection conforme ;

**sous échantillonnage des données** : dans le cadre d'un traitement automatique où d'une visualisation, les données sont en général trop nombreuses et doivent être sous-échantillonnées. On profite généralement de cette étape pour réduire le speckle.

Nous avons vu que les niveaux reçus au cours du temps par les capteurs varient fortement à cause de la divergence géométrique, de l'absorption, mais aussi à cause des variations des matériaux et des angles de rasance. Souvent, les sonars possèdent dans la chaîne de réception un gain variable pour compenser ces phénomènes et présenter les signaux dans une dynamique adaptée à la numérisation.

En général, le gain suit soit une loi déterministe au cours du temps (TVG : Time Varying Gain), mais on peut aussi trouver des systèmes qui asservissent les valeurs des signaux (AGC : Automatic Gain Control).

Malgré l'intérêt évident de connaître les niveaux absolus des index (en particulier en géophysique et en halieutique), beaucoup de constructeurs de systèmes commerciaux ne connaissent pas ou ne communiquent pas la fonction de transfert précise de leur chaîne de mesure (la principale difficulté est la calibration de l'antenne elle-même).

Dans le cas général, la compensation de ces variations se réduit à une normalisation de l'image obtenue pour obtenir une moyenne et une variance indépendante de la portée. Cette méthode peut dégrader assez fortement l'image, en particulier, a posteriori, on ne peut plus discriminer deux types de fond par les lois de rasance et par l'index.

La détection de la colonne d'eau, se fait en général par un filtre détecteur de bord sur la partie temporelle du signal. La difficulté est alors de séparer le fond réel avec tout signal émergeant dans la colonne d'eau (poissons, bruit surface, parasites, ...). Une première méthode est l'application de filtres morphologiques pour détruire les fausses alarmes ou encore une recherche de connexité entre les zones de fonds détectés et les zones d'ombres. Une seconde méthode est simplement l'application d'un filtre passe bas sur les hauteurs détectées au cours des pings.

La correction géométrique est parfois faite pour compenser des variations de résolution. En particulier, dans le cas d'un sonar frontal, les voies sont souvent associées à une direction angulaire donnée. Dans ce cas, pour la visualisation des données, la représentation de l'image en éventail est souvent préférée.

De même, en sonar latéral, l'image est reprojétée sur le fond, supposée plat à la distance détectée par l'algorithme précédent.

Les distorsions liées au mouvement de la plate-forme sont souvent reportées à une étape ultérieure (mosaïque).

Il est à remarquer que les étapes de corrections géométriques comportent systématiquement un rééchantillonnage des données (source de dégradation des données). Si ce traitement peut aider l'interprétation manuelle des données, il est souvent préférable, dans le cas d'algorithmes automatiques, de traiter les données brutes, simplement en tenant compte de la géométrie particulière associée à la mesure.

Le volume de données fourni par un sonar peut être très élevé. Ce nombre est directement lié au nombre de voies formées  $N$  et à la largeur de bande  $B$ . En effet, les autres paramètres (fréquence d'échantillonnage, cadence de tir) sont en général optimisés au mieux par rapport à ces informations.

Nous avons donc un débit, en nombre d'échantillons par seconde, qui est approximativement  $2BN$  si les données conservent l'information de phase et  $BN$  si seule l'amplitude est fournie.

Dans le cas d'un sonar frontal multifaisceaux,  $N$  peut dépasser la centaine de voies et  $B$  la dizaine de kiloHertz, d'où un débit supérieur à un méga-échantillon par seconde.

Les systèmes de traitements ne peuvent pas forcément traiter en temps réel un tel volume d'informations. En général, les données sont alors fortement sous-échantillonnées avant les traitements automatiques. Comme nous l'avons mentionné, cette étape permet dans le même temps de réduire le speckle.

### 3.3. interprétation des données

À l'exception des systèmes d'évitement d'obstacles, à l'heure actuelle, les robots autonomes sous-marins opérationnels se contentent de stocker les données sonars pour un dépouillement à terre.

Les traitements des données d'imagerie dépendent pour beaucoup de l'objectif souhaité. Nous pouvons les séparer en plusieurs catégories :

**Détection d'objets** : une des activités motrices dans ce domaine est la recherche et la détection de mines sous-marines ;

**Sédimentologie / géologie** : dans l'étude de la géologie superficielle des fonds marins (sédimentologie essentiellement), il est important de cartographier les différents types de fond. Plusieurs études ont été menées pour l'identification des types de sédiment à partir de données acoustiques ;

**Hydrographie** : le principal souci est de remonter à la bathymétrie des fonds marins ;

**Évitement d'obstacles** : le sonar est le vecteur privilégié pour détecter à grande distance des obstacles potentiels au mouvement du robot. La grande difficulté est de confirmer leur présence, suffisamment tôt pour permettre les stratégies d'évitement ;

**Recalage des mouvements du véhicule** : une des principales difficultés en robotique sous-marine est la localisation du robot. Le point GPS nécessite une remontée à la surface et les centrales inertielles sont très coûteuses et sujettes à des dérives.

#### 3.3.1. *segmentation et identification des petits objets*

Le principal besoin est la détection de mines sous-marines. La plupart des méthodes utilisées se contente, après normalisation des données, de segmenter les points en deux ou trois classes en fonction de leur intensité par rapport à l'index moyen [Dan98] :

**ombre** : les pixels les plus sombres sont affectés à l'absence de réflecteurs. Les régions correspondantes sont les zones d'ombres ou la colonne d'eau ;

**réverbération** : les valeurs moyennes (en général les plus nombreuses) sont affectées à la réverbération générale du fond ;

**écho** : les pixels les plus clairs sont associés à la présence d'un fort réflecteur. Il s'agit souvent d'un objet ou d'une variation locale de la pente du terrain (rides par exemple). Cette classe reste facultative, mais il est montré que l'association des ombres avec un écho augmente sensiblement la détection [Dan98].

La segmentation est souvent effectuée par seuillage d'histogrammes, ou bien par l'algorithme des  $K$  moyennes [GGM98] idéalement après un prétraitement pour réduire le speckle. Les résultats sont en général satisfaisants mais nécessitent un traitement par morphologie mathématique ou filtrage de type médian pour réduire le bruit inhérent aux images acoustiques.

La segmentation à partir de champs de Markov a été utilisée avec succès. Cependant ces méthodes restent lourdes et coûteuses et temps de calcul [CTM<sup>+</sup>98].

#### Classification des petits objets

Les petits objets sont plus facilement détectés par la forme de leur ombre que par l'écho. Il y a trois raisons à cela :

- le speckle sur l'objet entraîne une fluctuation forte des échos, empêchant une classification fiable ;
- la réflexion des objets se fait principalement sous la forme d'un nombre discret de points brillants (situés aux points anguleux des objets) qui rendent l'écho difficile à interpréter ;
- les ombres ne possèdent pas de speckle, et compte tenu de la géométrie de mesure (insonification rasante) sont réparties sur une surface plus grande de l'image sonar.

L'ombre n'est pas non plus suffisamment informative pour être non ambiguë. Des algorithmes ont été développés pour fusion-

ner les vues sous plusieurs angles et reconstituer l'objet. Cela peut passer par une reconstruction 3D de l'objet ou par la fusion des informations [Dan98].

De même, les ombres de plusieurs obstacles peuvent être mélangées. Une analyse morphologique peut permettre d'affiner la détection de l'objet (figure 18).

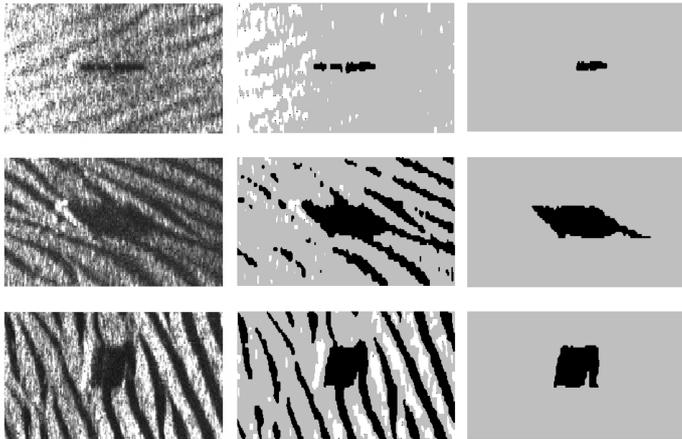


Figure 18. – Segmentation de trois vues du même objet.

### 3.3.2. segmentation et classification des fonds

#### Recherche d'attributs classifiants

Dans le cadre d'études géophysiques, les méthodes précédentes ne fonctionnent plus car il s'agit d'identifier des zones étendues correspondant à des types de sols différents (détecter les bancs de sables, les affleurements rocheux, ...).

En règle générale, les algorithmes reposent sur des informations de texture [Tho00] pour permettre la segmentation et la classification des zones.

Nous retrouvons dans les différents travaux, les attributs utilisés généralement pour les problèmes similaires :

- matrices de cooccurrences [HSD73], [LLK92], [GMK96], [PTB<sup>+</sup>02],
- paramètres identifiés dans un modèle Markovien,
- coefficients d'ondelettes [TS00], [LJ93], [VdWSD99], [ASPO2],
- filtres de Gabor [TPH95], [VBH96], [KPG99]

#### Classification supervisée et non supervisée

La première approche est de comparer les attributs obtenus avec une base de données préalablement acquise.

Cela peut se faire à partir d'un réseau neuronal (de type perceptron) [CGM98], [THo98] ou toutes autres méthodes de classification (K plus proches voisins, ...) [GDM96], [SJM94].

Les principales difficultés proviennent de la diversité des fonds, de la continuité entre les classes (par exemple, les dunes et les rides de sables sont souvent classifiées de manière différente alors qu'il n'y a pas de frontière bien différenciée entre les deux ensembles), de la variance à l'intérieur d'une même classe (figure 18, nous pouvons remarquer la forte différence d'aspect entre des vues à 90° de différences). La variation est aussi très forte en fonction de la rascasse (ce qui rend très délicate la segmentation de données d'échosondeurs multifaisceaux).

De plus l'inconvénient majeur d'une classification supervisée est la nécessité d'être exhaustif vis à vis des différents cas rencontrés. Une autre approche possible est la segmentation non supervisée (K-means, réseau neuronal de type Kohonen, réseau ART, approche Markovienne...) [ZH02], [PTB+02]. L'avantage majeur de ce type de méthode est la possibilité de s'adapter à tout type de terrain. Malheureusement, il ne peut guère qu'être une aide à l'expert qui ensuite affectera la signification de chaque classe trouvée, et se trouve mal adapté à un traitement autonome (à l'exception de l'aide à la navigation et du recalage).

### 3.4. recalage et évitement d'obstacles

En robotique sous-marine, l'obligation de remonter à la surface pour obtenir un point GPS est très contraignante. Il est donc obligatoire d'utiliser d'autres moyens plus adaptés pour que le véhicule soit capable de se localiser dans son environnement.

Les données angulaires et les accélérations sont assez facilement obtenues par des centrales d'attitude, par contre le positionnement absolu nécessite l'utilisation d'une centrale inertielle en général très coûteuse et soumise à des dérives.

En revanche, le sonar donne une position relative du véhicule par rapport au fond qui s'avère assez fiable. Des recherches sont en cours pour exploiter ces informations pour affiner le positionnement.

Nous pouvons séparer ces traitements en deux familles : le recalage à court terme et le recalage à long terme.

#### 3.4.1. recalage à court terme

Il y a deux démarches possibles :

- soit rechercher la corrélation sur les données brutes (sous la forme complexe). Dans ce cas, nous pouvons obtenir une précision très bonne (mieux que la longueur d'onde) mais cette méthode n'est possible que si la corrélation est forte entre capteurs. L'information communiquée est très précise mais partielle. Couplée avec une centrale d'attitude cette méthode pourrait obtenir de très bonnes performances (supérieure à 0,1% ) [Dug01].
- soit rechercher les corrélations sur les données incohérentes. Cette méthode est moins précise, plus robuste mais est dépendante de la présence « d'amers » sur l'image sonar.

La forte redondance des images des sonars frontaux permet aussi de donner une information utile au recalage. Cette technique est appelée « Concurrent Mapping & Localization ». Les traitements effectués sont proches de ceux nécessaires en évitement d'obstacle, nous les détaillerons dans cette partie.

### 3.4.2. recalage à long terme

Tout aussi intéressant est le recalage à long terme : si effectivement, il y a présence d'amers sur le fond, il est possible pour le robot de retrouver des objets sur le fond et de les comparer avec une base de données pré-acquises (dans le cas du retour sur base par exemple) ou avec une carte pré-établie de la zone [GMK96]. Ce type de techniques se heurte à quelques difficultés qui font que ces méthodes sont encore peu employées :

- nous avons vu que les conditions d'enregistrement peuvent fortement perturber l'image. Pour pouvoir comparer deux images, il faut garantir ou compenser les mouvements propres du porteur et dans la mesure du possible savoir s'affranchir du bruit de speckle.
- les objets étendus (roches, épaves, ...) ont un aspect très dépendant de l'angle de vue. Il y a deux raisons : l'index de rétrodiffusion est fonction de l'angle local de rasance et les ombres sont déformées.
- si certains amers, tels que les gros rochers sont des points fiables, un grand nombre de détails de l'image (parfois très étendus et très visibles dans l'image) sont variables d'une levée à l'autre : c'est le cas des bancs de poissons, mais aussi des rides et dunes de sables qui peuvent se déplacer au gré des marées et des tempêtes.

Les difficultés mentionnées montrent qu'un système fiable devra au préalable classifier les fonds observés avant de prendre une décision.

En bathymétrie ces contraintes n'existent pas, elle a donc été utilisée dans ce cadre. Cependant, l'information d'altitude y est moins riche que l'imagerie [LPPO<sup>+</sup>98].

### 3.4.3. détection d'obstacles

Une des applications les plus évidentes de la vision à la robotique sous-marine est l'utilisation d'un sonar frontal pour la détection d'obstacle.

Par rapport aux traitements précédents, celui-ci a ses spécificités propres :

- le sonar frontal fournit en général un volume important de données ;
- les données doivent être traitées en strict temps réel ;
- la qualité des données est en général assez mauvaise : le compromis volume protégé / coût et encombrement du sonar se fait aux dépens de la résolution ;

– en règle général, l'aspect dynamique (séquences d'images sonars) est important à considérer.

Compte tenu du volume de données et de la contrainte temps réel, les étapes de segmentation de l'image sont en général simples [PRL01], [Car98], par contre la fiabilité est assurée par l'exploitation des séquences d'image.

Les algorithmes classiquement utilisés sont des filtrages de Kalman multipistes [PRL01]. Dans ce cas, à chaque nouvel objet détecté, on associe une piste que l'on suit par un filtre de Kalman. La piste est ensuite détruite quand l'objet a disparu sur plusieurs récurrences.

D'autres algorithmes existent, inspirés de la robotique terrestre, telle que l'utilisation de grilles d'occupations mises à jour au fur et à mesure des informations délivrées par le sonar [CCJ<sup>+</sup>99]. En fonction de la géométrie des échos, des valeurs maximales de présence d'obstacles sont mises à jour.

## 3.5. représentation des données

Au niveau de la représentation des données, la recherche se concentre sur la façon de représenter au mieux un grand volume de données pour l'opérateur. En règle général, l'utilisateur se contente d'une représentation approximativement en projection conforme (secteurs pour un sonar frontal, « waterfall » pour un sonar latéral).

### 3.5.1. mosaïque sonar

La fusion des différentes passes sonars est courante, on obtient alors une mosaïque [BM97]. La difficulté du placage de texture et les gros volumes de données à traiter font que l'on se contente en général d'une résolution réduite. Les seuls calculs effectués sont la projection à peu près conforme en projection horizontale et la correction des variations de luminances en fonction de la portée.

Deux problèmes apparaissent sur des reliefs accentués. Tout d'abord, l'hypothèse utilisée de fond plat pour la correction géométrique devient fautive et ne permet qu'une mauvaise correction géométrique, ensuite les effets d'ombres et de variations de luminosité sont difficiles à traiter.

Nous pouvons mentionner le programme COSMOS où des mosaïques ont été obtenues à partir de la synthèse incohérente sur un sonar frontal [ACC<sup>+</sup>00], [Jan01].

### 3.5.2. modèles numériques de terrain (MNT)

Dans la mesure où le relief est présent (bathymétrie ou interférométrie), nous pouvons créer un modèle numérique de terrain. Les méthodes classiques sont utilisées telles que la triangulation de Delaunay [CB98], [SBM95] ou la reprojection sur une grille régulière [Car88], [Gué98].

Les difficultés du recalage peuvent venir de mauvaises compensations de la marée ou de la bathycélérité [Jal99]. Ceux-ci entraînent des erreurs de raccordement en vertical qui sont difficiles à corriger.

Dans les deux cas précités, en général l'index de réverbération est accessible. Il est alors possible d'associer à chaque point du maillage (si triangulation des points bruts), la luminosité associée. Nous obtenons alors une mosaïque tridimensionnelle et précise (figure 7).

### 3.6. conclusion

Le traitement des données sonars comporte trois étapes : le conditionnement des données pour corriger le plus amont possible les artefacts liés à la mesure, l'interprétation des images pour extraire les informations pertinentes et la représentation des données. Cependant, l'origine acoustique des données et plus particulièrement leur caractère cohérent rend en général l'interprétation difficile. Si, aujourd'hui, des résultats satisfaisants sont obtenus, il reste une grande marge de progrès dans l'optimisation des algorithmes pour obtenir des résultats performants en temps réel.

## 4. la vidéo comme capteur sous-marin

### 4.1. un capteur omniprésent, peu de traitements automatisés

Le sonar est le capteur sous marin par excellence. Son adéquation au milieu sous marin, de par les propriétés physiques qu'il exploite (la propagation du son dans l'eau), en est la principale raison. Les données sonars sont généralement soumises à des traitements automatiques plus ou moins complexes pour pouvoir être exploitées.

Le cas des images vidéos<sup>1</sup> est très différent. La propagation de la lumière dans l'eau est un phénomène complexe. L'atténuation de l'énergie lumineuse par la colonne d'eau est rapide, et dépend de la fréquence. Cela limite la portée visuelle à une vingtaine de mètres dans des eaux très claires, à deux mètres ou moins dans des zones turbides (par exemple dans une zone portuaire). Dans le cas extrême, la turbidité de l'eau peut limiter la visibilité à tel

1. Il existe de nombreuses techniques spécifiques d'imagerie optique sous marines à base de lasers. Une revue de ces techniques et de leurs applications est donnée dans [EH00]. On se limite ici à l'étude des images vidéo, la caméra vidéo faisant partie de l'équipement standard d'une mission sous-marine, que ce soit par plongeur, ROV (« Remotly Operated Vehicles ») ou AUV (« Autonomous Underwater Vehicle »).

point que l'image vidéo devient inutilisable. Cependant, la quasi-totalité des véhicules sous-marins, qu'ils soient destinés à des applications militaires, scientifiques ou industrielles (exploitation pétrolière, réseaux sous marins en télécommunications...) sont équipés de caméras. Par contre, les traitements automatiques de l'information apportée par ces images sont rares et n'ont commencé à émerger que relativement récemment, contrairement au cas des images sonars. Ceci s'explique par plusieurs facteurs : d'une part, la visibilité n'étant jamais garantie, la caméra ne peut constituer qu'un capteur de secondement, un « plus » pour la mission. Par ailleurs, les progrès techniques dans le matériel pour l'acquisition et la numérisation des images vidéo, la compression des images et les transmissions, et la puissance de calcul des processeurs ont rendu possible seulement récemment le traitement des données vidéo, dans un environnement contraignant comme celui des interventions sous marines. Finalement, les images sous-marines sont extrêmement bruitées, ce qui rend les traitements automatiques difficiles et peu performants.

La vidéo est un capteur de prédilection pour les interventions sous marines, mais, bien que la recherche en traitement d'image et en vision par ordinateur pendant les dernières décennies ait produit des techniques validées et exploitées commercialement, leur application au domaine sous-marin n'a commencé que relativement récemment. Dans la suite, nous tentons de mettre en contexte ce paradoxe. Les données vidéo sont caractérisées dans le paragraphe 4.2, et leurs avantages et inconvénients soulignés pour les applications sous-marines. Une revue de l'avancement des traitements automatiques de la vidéo pour le contrôle, la visualisation et l'interprétation des données est proposée dans le paragraphe 4.3. L'importance de l'utilisation conjointe de différents capteurs pour l'exploitation optimale des données vidéos est soulignée.

### 4.2. les données vidéo

#### 4.2.1. des images faciles à interpréter et riches en information

L'usage fait des données vidéo en sous-marin est principalement lié à deux des caractéristiques de ces images

– d'une part, le processus imageur étant très proche du mécanisme de vision humaine, les images optiques ou vidéo sont faciles à interpréter, ce qui n'est pas le cas des images sonar. Ainsi, la vidéo est utilisée pour le contrôle des véhicules pour la navigation, l'actionnement des manipulateurs. Elle est couramment utilisée pour observer la « réalité terrain », c'est à dire vérifier sans ambiguïté ce qui aura été observé par d'autres capteurs. La robustesse du système visuel humain permet de passer outre la souvent très faible qualité des images.

– d'autre part, la vidéo est un capteur à très haute résolution. Elle permet donc une vue détaillée, par exemple pour l'inspection de pipelines, ou l'observation du biotope sous marin. De plus, les zones caractéristiques (features) des images sont plus distinctives, et moins dépendantes du point de vue que dans le cas des images sonar.

#### 4.2.2. la formation d'images optiques dans l'eau

L'un des problèmes fondamentaux pour le traitement automatique des données vidéo sous marines est la mauvaise qualité des images, et le peu de contrôle que l'on peut avoir en pratique sur les conditions de leur acquisition. Le processus de formation des images vidéo dans l'eau est schématisé figure 19, et les différents facteurs intervenant sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

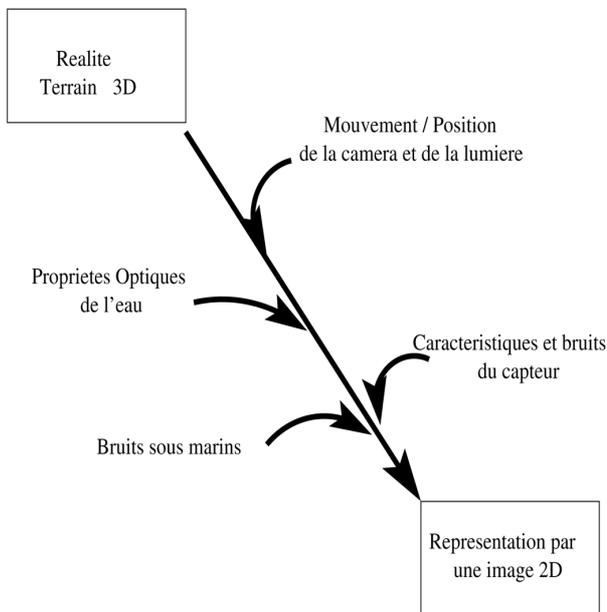


Figure 19. – La formation des images vidéo dans l'eau.

#### Propagation de la lumière dans l'eau

Contrairement aux ondes acoustiques, les ondes lumineuses sont fortement atténuées dans l'eau. Deux phénomènes en sont la cause : l'absorption et la dispersion [Tur82]. La transparence de l'eau est mesurée par une constante d'atténuation  $\alpha$  du milieu, qui relie les intensités lumineuses  $I_0$  et  $I_1$  en deux points distants de  $z$  selon :

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha z} \quad (17)$$

$\alpha$  est déterminée par les caractéristiques d'absorption et de dispersion du milieu. Son inverse,  $\alpha^{-1}$ , est appelée longueur d'atténuation, et vaut typiquement de 25 à 50 m en eaux claires, de

3 à 20 m en eaux cotières, et moins d'un mètre dans les estuaires et eaux portuaires [EH00].  $\alpha$ , de plus, dépend de la fréquence. Les fréquences dans la partie bleu-verte du spectre ( $\lambda = 460 - 490$  nm) sont les moins atténuées, tandis que la partie rouge du spectre est fortement atténuée. Un objet n'aura donc pas la même couleur selon qu'il est proche ou loin dans le champ de vue.

La visibilité dépend des caractéristiques du milieu et de l'éclairage. Les capteurs courants permettent typiquement de voir à des distances de une à deux longueurs d'atténuation. Finalement, la visibilité ne dépasse qu'exceptionnellement une vingtaine de mètres en lumière naturelle, et est plus typiquement de l'ordre de 3 à 5 mètres, en particulier quand l'éclairage est artificiel.

En eau peu profonde, la concentration de micro-particules influence la visibilité plus que l'atténuation de la colonne d'eau. Elle réduit considérablement le contraste des images. L'atténuation de l'énergie lumineuse peut être compensée en augmentant la puissance de la source lumineuse. Les effets de la turbidité par contre sont plus difficiles à contrer, puisque plus on augmente l'énergie lumineuse vers la scène à observer, plus les réfractions sur les particules en suspension dans la colonne d'eau qui sépare le capteur de la scène sont intenses. Dans des zones portuaires, en mer du Nord, ou quand un fond sédimentaire est perturbé (par exemple si le véhicule portant la caméra heurte le fond), la turbidité peut être telle que la visibilité est nulle.

#### Le contrôle des conditions d'acquisition

Les sources d'éclairage possibles sont de deux types principaux : naturel, à travers la surface de l'eau, ou artificiel, par des projecteurs montés avec la caméra ou sur le véhicule. En eau peu profonde, on peut avoir une contribution des deux, la contribution de la lumière naturelle se déplaçant vers le bleu, avec la profondeur. Dans le cas d'un éclairage par projecteur, il est souvent difficile d'obtenir une illumination uniforme dans le champ de vue. A ces disparités spectrales et spatiales s'ajoutent des variations temporelles plus ou moins rapides liées aux mouvements du véhicule (dont les projecteurs sont solidaires), et au mouvement de la surface de l'eau.

Dans la plupart des contextes applicatifs, la caméra est montée sur un véhicule, ROV (« Remotely Operated Vehicle ») ou AUV (« Autonomous Underwater Vehicle »). Dans l'eau, le véhicule a 6 degrés de liberté (trois translations et trois rotations). Sa position et son attitude sont en conséquence très difficiles à contrôler précisément. Cela doit être pris en considération pour tous les traitements où l'information 2D des images vidéo est utilisée pour inférer des propriétés du monde 3D qui est imagé. Ainsi, pour la création de mosaïques, pour l'asservissement par vision, les modèles de mouvements doivent pouvoir prendre en compte ces six degrés de liberté. Si l'on souhaite géo-référencer l'image, il faut aussi pouvoir connaître et retrouver la position et l'attitude de la caméra : la zone imagée n'est pas la même si la caméra pointe vers le bas ou obliquement.

## Les capteurs

Les caméras sous marines sont majoritairement analogiques. Les appareils photos numériques dans des containers étanches commencent à apparaître, mais ce n'est pas encore le cas pour les caméras vidéo.

La sensibilité est probablement le facteur le plus important pour une caméra sous marine : une caméra sensible a une portée plus grande, et permet d'imager même dans des conditions turbides en utilisant soit la lumière naturelle, soit un éclairage indirect (et donc plus faible).

Deux types principaux de capteurs sont utilisés pour les caméras sous marines [Sim93] : les capteurs conventionnels CCD (« Charge Coupled Devices ») et les capteurs intensifiés, notamment SIT (« Silicon Intensifier Target »), ISIT (« Intensifier SIST ») et ICCD (« Intensifier CCD »).

Les caméras CCD sous-marines ont bénéficié sur les dix dernières années des progrès énormes suscités par les produits vidéo de grande consommation : la sensibilité des caméras a augmenté d'un facteur 10, leur volume et leur consommation diminué d'un même ordre de grandeur. Les caméras CCD permettent typiquement une vision de 1 à 5 mètres, et sont utilisées pour des tâches d'inspection. Les capteurs CCD sont aussi adaptés pour les caméras couleur, l'équilibre des couleurs ne pouvant être maintenue au delà de 2 à 3 mètres<sup>2</sup>. Cependant, le pic de sensibilité de ces capteurs se trouve dans les longueurs d'ondes rouges ( $\lambda \simeq 650$  nm), qui sont les plus fortement atténuées par la colonne d'eau. En conséquence, les caméras CCD intensifiées n'ont que peu de succès en sous-marin, car elles produisent des images de qualité inférieure aux SIT. Les caméras intensifiées (monochromes), plus volumineuses et plus chères, sont adaptées pour des opérations en eau turbide, ou des opérations où la visibilité à grande distance est critique (pour la navigation d'un véhicule par exemple).

### 4.2.3. une quantité de données rédibitoire?

L'un des inconvénients principaux des données vidéo est que, en contrepartie de la haute résolution des images, la masse de données produite est très grande : cela pose des problèmes en termes de transmission, ou de stockage si le système est embarqué. La bande passante d'un signal vidéo analogique compressé (PAL/NTSC/SECAM) est de l'ordre de 6 MegaHertz. En format numérique, un signal vidéo RGB non compressé demande un taux de transmission de 340Mbps (Mega-bits par seconde). Ceci peut être réduit, pour un signal composite compressé par des techniques standards (MPEG / M-JPEG), à 25 Mbps, mais au détriment de la qualité des images.

---

2. Ceci, quelle que soit l'intensité éclairément. Le facteur déterminant est la dépendance spectrale de l'atténuation de l'énergie lumineuse.

Attribuer la bande passante nécessaire lors des opérations, quand le lien à la surface est fait par un câble ombilical, et encore plus quand il s'agit d'un lien acoustique, n'est pas toujours possible. Des algorithmes spécifiques ont été développés pour la compression et la transmission des images sous marines (par exemple [EFC96] [KC98] [NK00]). Les câbles dédiés (comme pour les caméras de pilotage des véhicules), ou les ombilicaux en fibre optique apportent des solutions pour la transmission du signal vidéo.

Mais le principal problème lié à la quantité d'information recueillie par la vidéo est le fait qu'il devient difficile d'exploiter cette information. Une mission scientifique typique produit plusieurs heures de vidéo. Une grande partie est redondante et/ou peu informative, par exemple un véhicule peut survoler une zone de sable sans bioturbation, ou être à une altitude telle que seule la colonne d'eau est visible. Les parties riches en information sont comparativement très brèves, par exemple l'apparition d'une certaine plante ou créature marine, ou encore d'une anode sacrificielle sur un pipeline.

## 4.3. traitements et applications

Dans la suite, une revue des applications au sous-marin du traitement automatique des images vidéos est présentée. On distingue deux groupes de traitements automatiques, qui reflètent chacun des usages non automatiques faits de la vidéo en sous marin : d'une part les techniques extrayant des images des informations géométriques sur la structure de la scène 3D qui est imagée. Les traitements fondés sur ces techniques ont été les premiers à apparaître. Leur différentes applications pour le contrôle et la visualisation sont mentionnées dans une première partie (4.3.1) ; d'autre part, les techniques visant à faciliter, sinon remplacer, l'usage des données vidéos par des experts, pour l'inspection détaillée ou l'observation de la réalité terrain. La problématique de cette exploitation des données vidéo et les éléments de solutions apportés sont détaillés dans la partie 4.3.2.

### 4.3.1. contrôle et visualisation

Les premiers traitements automatiques des images vidéo ont cherché à automatiser des activités de contrôle. En effet, un opérateur réalise ces tâches en se fondant principalement sur les images vidéo. Il est donc naturel d'essayer d'utiliser la même information, pour réaliser les mêmes tâches de manière automatique. Ces applications nécessitent d'extraire à partir d'images 2D une information 3D sur la scène observée et la position de la caméra dans cette scène. La construction de mosaïques, et la reconstruction 3D, qui reposent sur les mêmes techniques fondamentales, ont simultanément reçu l'attention des chercheurs. L'extraction d'information 3D à partir des projections 2D que sont les images requiert, explicitement ou implicitement, de

mettre en correspondance des points dans au moins deux images de la même scène, obtenues de deux points de vues différents, soit par deux caméras, soit par la même caméra mobile à des instants distincts.

L'extension de méthodes existantes au cas du sous marin a fait l'objet de nombreuses recherches, que se soit des méthodes « directes », utilisant le gradient des images ([NXJ99]), des méthodes fondées sur le « flux optique » [NYS90][Neg95] [SB98], sur le tracking de points caractéristiques [PT00] [BSD98][TFRT98] ou de structures particulières dans l'image, comme c'est le cas pour la poursuite de pipelines (cf. [ABF90]). Cette information peut être intégrée dans une boucle de contrôle. On parle alors d'asservissement par vision ou de commande par vision. En sous marin, on trouve des applications à la stabilisation de véhicule ([MWLR94][JXN+96][LRFB97][XN99]). L'extension à la navigation ([WgZ98][NXKA98]) et en particulier à la poursuite de câbles ou de pipelines ([Hal91][Riv97] [BTL+97][KKA98]), avec parfois usage de capteurs complémentaires (eg. [BU99a] [BU99b]) est possible. On trouve aussi des applications au contrôle de manipulateur ([SYSL94]).

Cette même information permet la construction d'images composites, ou mosaïques. Ceci est l'un des aspects clef de l'usage de la vidéo en sous marin : en terme de visualisation, la mosaïque est indispensable pour l'observation de larges zones : à cause de la visibilité réduite dans l'eau, éloigner le capteur de la scène pour augmenter le champ de vue n'est pas une solution. Un certain nombre d'institutions de recherche se sont penchées sur la création de mosaïques en sous marin. Parmi elles on peut

citer l'« University of Miami », le MBARI/Stanford, l'« Instituto Superior Technico » (Lisbonne), l'IFREMER, et « Heriot-Watt University » (UK) ([MRL94] [FMRL95] [FWRL96] [NXKA98] [GSV98] [GCY00]). Le relief de la scène peut également être estimé grâce aux informations géométriques obtenues ([NXKA98]), que peuvent compléter des informations de type photométrique ([YW94]).

Les « cartes visuelles » que sont les mosaïques sont également utilisées pour le positionnement et la navigation. Les avantages sur d'autres capteurs (sonar en particulier) sont la facilité d'interprétation des images optiques, leur haute résolution, et le fait que les caractéristiques des objets sont plus riches et moins dépendantes du point de vue, fournissant ainsi des amers fiables pour le recalage. Par exemple [HFR98] présente une interface haut niveau permettant à l'opérateur de définir la commande du véhicule visuellement. Plusieurs équipes ont présenté récemment des travaux sur l'usage de la vidéo et des cartes mosaïques pour le positionnement et la navigation. Un problème critique est la nécessité d'obtenir des mosaïques cohérentes sur de larges zones. Des techniques de re-recalage, ou de « Concurrent Mapping and Localisation » ([FRB97][GBCA01][XN01]), ou l'utilisation de capteurs de positionnement ([SHY98]), ont été suggérées.

#### 4.3.2. aide à l'exploitation des données vidéo

Un autre type d'utilisation clef de la vidéo est l'observation détaillée et la confirmation de la « réalité terrain », qui permet

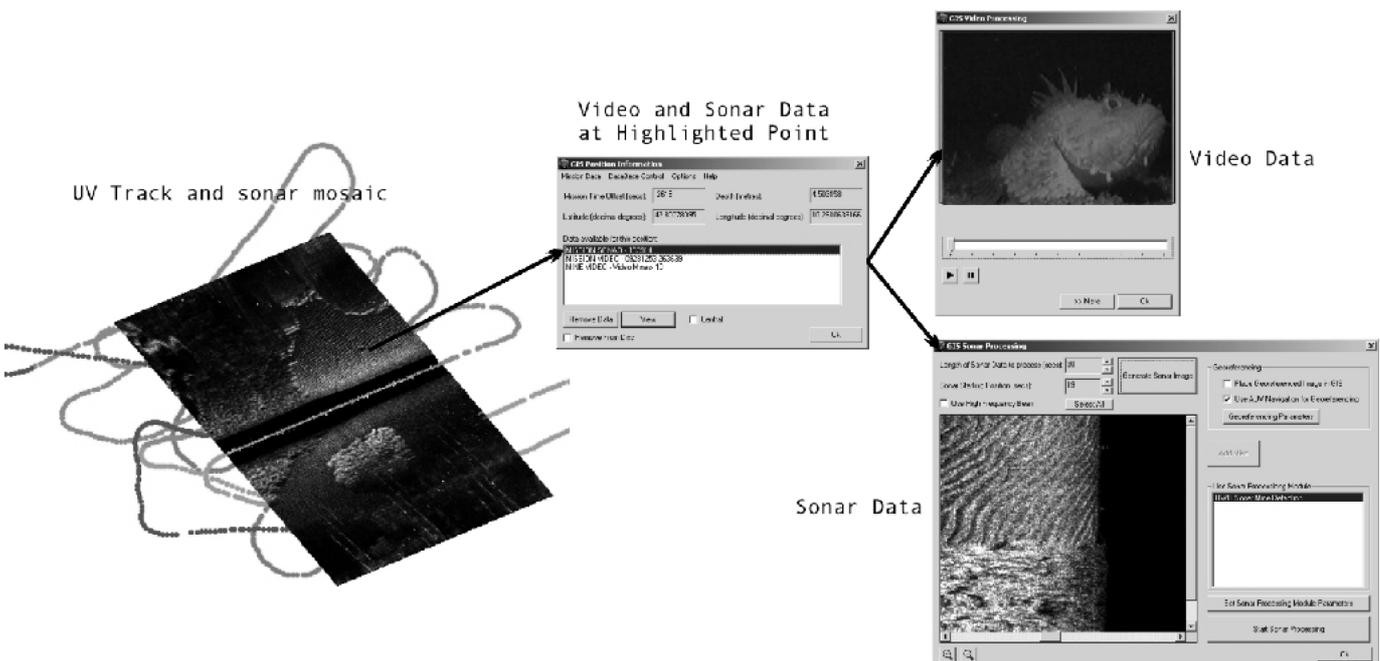


Figure 20 – SeeTrack : un GIS qui permet la présentation et le traitement automatique des données vidéo.

ensuite d'interpréter les données d'autres capteurs, en particulier les données sonar. Ceci présente un intérêt pour les applications scientifiques (biologie marine, océanographie), l'exploitation de la mer (pêche et élevage, gestion de la pollution et de l'environnement), les applications militaires et l'industrie pétrolière « off-shore ».

Les composantes nécessaires à l'exploitation automatique ou semi-automatique des images vidéo sous marines pour ce type de tâches sont, par ordre croissant de difficulté :

- Le géo-référencement des données vidéo, permettant l'utilisation des données vidéo comme un « échantillonnage » visuel des zones étudiées, ainsi que l'alignement et la fusion avec d'autres capteurs.
- L'analyse automatique des images, permettant : la réduction des données, pour ne garder que les informations clefs et supprimer les redondances ; l'interprétation de leur contenu et sa classification.

L'analyse automatique de données vidéo est un problème générique bien trop complexe pour pouvoir être approché par une solution générale. Des sous-problèmes spécifiques ont été étudiés : des traitements pour la détection et le suivi automatique d'objets manufacturés, en particulier les pipelines et câbles ([MI95][OOF97][FGZ98][GJC98][ZZ98b][ZZ98a][KKA99]), ou les cibles militaires (PLCL01), ont été développés. L'un des problèmes récurrents de l'exploitation des données vidéo pour les applications scientifiques est la quantité énorme de données, dont le dépouillement représente des heures de travail d'experts. Des méthodes de classification automatiques, visant à alléger la tâche des scientifiques plus qu'à remplacer les experts, commencent à être développées : [KdVLW99] présente un système de tracking et identification de plancton. [LTL00] présente un système développé dans le cadre du projet Européen ARAMIS (EU-MAST project MAS3-CT97-0083 « Advanced ROV Package for Automatic Investigation of Sediments ») pour les missions scientifiques. Le système détecte des changements significatifs dans la scène imagée par la vidéo, réduisant ainsi considérablement la tâche d'observation et d'extraction d'information des experts (biologistes). Le système peut être utilisé en ligne lors des missions, ou en différé pour l'indexation automatique d'archives vidéo. [SMS<sup>+</sup>01] propose une classification automatique des coraux morts ou vivants à partir de données vidéo.

Ces traitements ont pour but commun d'extraire l'information clef présente dans une grande masse de données redondantes. Cette information peut subséquemment être présentée à l'utilisateur. De façon à l'exploiter optimalement, il est intéressant de pouvoir la mettre en regard des autres données collectées lors de la mission (position, données sonars et autres capteurs). L'usage de GIS (« Georeferenced Information Systems ») est général dans les communautés sous-marines (off-shore, militaire et scientifiques), mais peu de tels systèmes peuvent gérer l'information vidéo. SeeTrack [PLCL01] est un GIS qui permet l'inté-

gration de données vidéo et de traitements automatiques, pour la présentation intégrée de missions sous marines.

L'alignement des données grâce aux GIS permet également de fusionner l'information de différents capteurs. Le projet européen AMASON (Advanced Mapping with Sonar and Video, EU Framework V project (EVK3-CT-2001-00059)) se propose d'étudier les applications possibles de la fusion de capteurs pour l'étude de l'impact à long terme de l'activité de pêche dans des zones littorales, et le recensement et suivi des coraux.

#### 4.4. conclusion

La vidéo est un capteur omniprésent dans les interventions sous marines, mais son traitement automatique n'est apparu que récemment. Des progrès technologiques récents ouvrent la voie pour la numérisation, la transmission et le traitement des images vidéo dans l'environnement contraignant des missions sous marines. Le potentiel de ces données hautes résolution est énorme, en particulier si elles sont utilisées en complément d'autres capteurs, mais la faible qualité des images et le peu de contrôle sur leur condition d'acquisition limitent encore les performances de leur traitement automatique.

### 5. conclusion générale

Nous avons présenté les principaux matériels et traitements en perception sous-marine. Certains des systèmes présentés sont connus et disponibles depuis longtemps « sur étagère » chez des constructeurs. D'autres sont plus innovants et commencent lentement à percer dans le milieu industriel.

Les traitements, par contre, intègrent aujourd'hui systématiquement l'homme dans la boucle car ils n'ont pas actuellement atteint le degré de fiabilité qui permettrait de leur confier la survie de véhicules de grande valeur. Si plusieurs AUV sont présents sur le marché, aucun n'est doté actuellement d'une autonomie décisionnelle. C'est probablement le défi le plus immédiat, d'autant plus que le seul moyen de communication réellement souple entre le robot et l'homme est la liaison acoustique, qui reste limitée par sa lenteur et de faibles débits.

Aujourd'hui plusieurs laboratoires développent des algorithmes qui proposent une analyse temps réel des données pour l'évitement d'obstacle et le recalage notamment. Par contre, à notre connaissance, peu d'études ont été faites sur la fiabilité de ces méthodes, alors nous pensons que ce sera une étape indispensable à leur acceptation dans des applications industrielles.

Dans le cas de la vidéo sous-marine, où les activités de recherche sont plus récentes, mais aussi où les volumes à traiter sont beaucoup plus importants, les algorithmes d'analyse sont encore très loin de parvenir aux performances de l'être humain.

Celui-ci restera indispensable pendant encore de longues années, et l'effort de recherche actuel consiste essentiellement à alléger son travail dans la phase de dépouillement, grâce en particulier, aux méthodes de data-mining (extraction automatique des informations intéressantes à partir d'un gros volume de données) et à des outils de représentation de données et d'aide à la décision.

Au cours de cet article, nous avons quand même pu observer des préoccupations communes (conditionnement des données, évitement d'obstacles, Concurrent Mapping & Localization, intégration des données au SIG (Systèmes d'Informations Géographiques)) qui laissent penser qu'une synergie est tout à fait possible. La complémentarité des conditions de fonctionnement et des informations extraites (haute résolution, facilité d'interprétation pour les images vidéos à comparer avec les grandes portées, la relative facilité d'avoir la 3D et le bon taux de couverture de l'acoustique) laisse entrevoir un enrichissement mutuel de ces deux grandes familles de capteurs.

On pourrait imaginer des scénarios, où le véhicule sous marin utilise conjointement et de manière complémentaire les capteurs acoustiques et vidéos. Citons deux exemples :

- levée de terrain par le sonar latéral, avec pour chaque zone non reconnue, un déroutement automatique du véhicule pour prendre des images vidéos à proche distance ;
- utilisation d'informations bathymétriques issues de capteurs acoustiques, pour aider la reconstitution de mosaïques vidéos sur des fonds très accidentés.

Enfin, il apparaît que les capteurs acoustiques présents actuellement sur le marché ne sont pas toujours adaptés à une utilisation dans un robot sous-marin. Le concepteur d'AUV dispose de beaucoup d'outils pour chacune des fonctions à exercer, mais le nombre de capteurs rend la conception très difficile en terme d'intégration (consommation, encombrement, duplication de l'électronique) ainsi qu'en terme de compatibilité (synchronisation des capteurs entre eux pour éviter les interférences). Nous pouvons penser qu'une forte marge de progrès existe dans la conception de capteurs multifonctions.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ABJ90] F. Aguirre, J.M. Boucher, and J.J. Jacq. Underwater navigation by video sequence analysis. In *Proceedings., 10th International Conference on Pattern Recognition*, volume ii, pages 537-539, 1990.
- [ACC+00] P. Alais, P. Cervenka, P. Challande, P. Janvrin, and J. Marchal. A multilook front scan sonar system, first imaging results. In *Proceedings of the Fifth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2000*, volume 1, pages 349-354, July 2000.
- [APS02] L. Attalah and P. J. Probert Smith. Using wavelet analysis to classify and segment sonar signals scattered from underwater sea beds. In *Proceedings of the Sixth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2002*, pages 59-64, June 2002.
- [BBF02] D. Bréchet, D. Billon, and F. Fohanno. Results from imbat, a deep sea mapping sonar system. In *6th workshop on underwater acoustics*, pages B1-B15, Brest, June 2002.
- [BF98] D. Billon and F. Fohanno. Theoretical performance and experimental results for synthetic aperture sonar self-calibration. In *Proceedings of Oceans'98 IEEE/OES*, volume 2, pages 965-970, september 1998.
- [BLCH93] D. Billon, F. Le Clerc, and L. Hué. Detection and imaging performance of a synthetic aperture sonar. In *Proceedings of Oceans 93*, volume 1, september 1993.
- [BM97] P. Blondel and B. J. Murton. *Handbook of seafloor sonar imagery*. Wiley, 1997.
- [BMT01] E. Belcher, B. Matsuyama, and G. Trimble. Object identification with acoustic lenses. In *Ocean's 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 6-11, November 2001.
- [Bou00] David Boulinguez. *Reconnaissance 2d et 3d d'objets sous-marins enfouis*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2000.
- [BP95] D. Billon and M. A. Pinto. Some general considerations for synthetic aperture sonar design. In *Proceedings of Oceans 95*, october 1995.
- [BP00] A. Bellettini and M. Pinto. Experimental results of a 100 khz multi-aspect synthetic aperture sonar. In *5<sup>èmes</sup> journées acoustique sous-marine*, Brest, November 2000.
- [BSD98] A. Branca, E. Stella, and A. Distanto. Autonomous navigation of underwater vehicles. In *Proceedings of the Oceans '98 MTS/IEEE*, 1998.
- [BTL+97] B. A. A. P. Balasuriya, M. Takai, W. C. Lam, Tamaki Ura, and Y. Kuroda. Vision based autonomous underwater vehicle navigation: Underwater cable tracking. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, volume 2, pages 1418-1424, 1997.
- [BU99a] Arjuna Balasuriya and Tamaki Ura. Multi-sensor fusion for autonomous underwater cable tracking. In *Proceedings of the Oceans '99 MTS/IEEE*, volume 1, pages 209-215, 1999.
- [BU99b] Arjuna Balasuriya and Tamaki Ura. Sensor fusion technique for cable following by autonomous underwater vehicles. In *IEEE Conference on Control Applications - Proceedings*, volume 2, pages 1779-1784, 1999.
- [Bur91] William S. Burdic. *Underwater acoustic system analysis*. Prentice Hall, 2nd edition, 1991.
- [Car88] J. R. Carter. Digital representations of topographic surfaces. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54(11):1577-1580, November 1988.
- [Car98] R. N. Carpenter. Concurrent mapping and localization with fls. In *Proceedings of AUV98*, August 1998.
- [CB98] G. Canepa and O. Bergem. Testing a new algorithm for automatic processing of bathymetric data. In *Ocean's 98 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 313-317, September 1998.
- [CCJ+99] M. Cardew, J. Champeau, Cognet J.M., P. Dhaussy, and N. Seube. A integrated approach for sonar based obstacle avoidance for auvs. In *11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST) Proceedings*, Durham, New Hampshire, August 1999.
- [CTM+98] C. Collet, P. Thourel, M. Mignotte, P. Pérez, and P. Bouthemy. Une nouvelle approche en traitement d'images sonar haute résolution : la segmentation markovienne hiérarchique multimodèle. *Revue Traitement du Signal*, 15(3):231-250, September 1998.
- [Cut75] L. J. Cutrona. Comparison of sonar system performance achievable using synthetic-aperture techniques with the performance achievable by more conventional means. *J. Acoust. Soc. Am*, 58:336-348, 1975.
- [Dan98] S. Daniel. *Fusion multisource appliquée à la reconnaissance d'objets dans le milieu sous-marin*. PhD thesis, Université de Rennes, 1998.
- [Den89] P. N. Denbigh. Swath bathymetry principles of operation and an analysis of errors. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 14(4), October 1989.
- [Dug01] A. Duguet. Autonomous underwater vehicle navigation by means of a bottom imaging sonar. In *Ocean's 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 375-379, November 2001.

- [Dun97] J. Dunlop. Statistical modelling of sidescan sonar images. In *Oceans'97 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 33-38, October 1997.
- [EFC96] R. L. Eastwood, L. E. Freitag, and J. A. Catipovic. Compression techniques for improving underwater acoustic transmission of images and data. In *Proc. Oceans 96*, volume CD, Fort Lauderdale, FL, 1996.
- [EH00] Ferial El-Hawary. *The Ocean Engineering Handbook*. CRC Press, 2000.
- [FC01] J. E. Fernandez and J. T. Christoff. Multi aspect synthetic aperture sonar. In *Ocean's 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 177-180, November 2001.
- [FG2a] R. E. Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based upon ocean measurements. part i : Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am*, 72:896-907, 1982a.
- [FG2b] R. E. Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based upon ocean measurements. part ii : Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am*, 72:1870-1890, 1982b.
- [FGZ98] G.L. Foresti, S. Gentili, and M. Zampato. Vision-based system for autonomous underwater vehicle navigation. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, volume 1, pages 195-199, 1998.
- [Fle82] B.W. Fleming. A historical introduction to underwater acoustics with special reference to echo-sounding, sub-bottom profiling and side-scan sonar. In *Recent Developments in Side Scan Sonar*. W.G.A. Russell-Cargill, 1982.
- [FMRL95] S.D. Fleisher, R.L. Marks, S.M. Rock, and M.J. Lee. Improved real-time video mosaicking of the ocean floor. In *Proceedings of the Oceans '95 MTS/IEEE*, volume 1, 1995.
- [FRB97] S.D. Fleischer, S.M. Rock, and R. Burton. Global position determination and vehicle path estimation from a vision sensor for real-time video mosaicking and navigation. In *Oceans Conference Record Oceans '97 (IEEE)*, volume 1, pages 641-647, 1997.
- [FWRL96] S.D. Fleischer, H.H. Wang, S.M. Rock, and M.J. Lee. Video mosaicking along arbitrary vehicle paths. In *Proceedings of the 1996 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 293-299, 1996.
- [GBCA01] R. Garcia, J. Battle, X. Cufi, and J. Amat. Positioning an underwater vehicle through image mosaicking. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2779-2784, 2001.
- [GCY00] J. Guo, S. W. Cheng, and J. Y. Yinn. Underwater image mosaicking using maximum a posteriori image registration. In *IEEE*, pages 393-398, 2000.
- [GDM96] S. Guillaudoux, S. Daniel, and E. Maillard. Optimization of a sonar image processing chain : a fuzzy rules based expert system approach. In *Ocean's 1996 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 3, pages 1319-1323, September 1996.
- [GGM98] S. Guillaudoux, D. Guériot, and E. Maillard. Optimizing extracted features for sonar image texture segmentation and sea-bed characterization. In *5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, volume 1, pages 340-347, September 1998.
- [GJC98] A. Grau and J. Aranda J. Climent. Real-time architecture for cable tracking using texture descriptors. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1998.
- [GMK96] D. Guériot, E. Maillard, and J. P. Kernin. Sonar image registration through symbolic matching : a fuzzy local transform approach using genetic algorithm. In *Ocean's 1996 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 3, pages 1324-1329, September 1996.
- [Goo76] J. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, 66(11):1145-1150, November 1976.
- [GRM+97] H. D. Griffiths, T. A. Rafik, Z. Meng, C. F. N. Cowan, H. Shafeeu, and D. K. Anthony. Interferometric synthetic aperture sonar for high resolution 3-d mapping of the seabed. *IEEE Proc. Radar, Sonar, Navig.*, 144(2), April 1997.
- [GSV98] Nuno Gracias and Jose Santos-Victor. Automatic mosaic creation of the ocean floor. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, volume 1, pages 257-262, 1998.
- [Gué98] D. Guériot. *Utilisation des algorithmes génétiques pour des problèmes d'optimisation spécifiques-application aux réseaux de neurones et au traitement d'images sonar*. PhD thesis, Université de Haute Alsace, 1998.
- [GZW88] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner. Satellite radar interferometry : two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4):713-720, July-August 1988.
- [Hal91] J.O. Hallset. Simple vision tracking of pipelines for an autonomous underwater vehicle. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2767 - 2772, Sacramento, CA, USA, 1991.
- [HFR98] A. Huster, S.D. Fleischer, and S.M. Rock. Demonstration of a vision-based dead-reckoning system for navigation of an underwater vehicle. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 185-189, 1998.
- [HSD73] R. M. Haralick, K. Shanmugam, and I. Dinstein. Textural features for image classification. *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, 3(6):610-621, November 1973.
- [Jal99] B. Jalving. Depth accuracy in seabed mapping with underwater vehicles. In *Ocean's 99 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 2, pages 973-978, September 1999.
- [Jan01] P. Janvrin. *Sonar frontal pour l'imagerie par synthèse non-cohérente et la bathymétrie*. PhD thesis, Université Paris 6, 2001.
- [JXN+96] L. Jin, X. Xu, S. Negahdaripour, C. Tsukamoto, and J. Yuh. A real-time vision-based stationkeeping system for underwater robotics applications. In *Oceans '96*, volume 3, pages 1076-1081, 1996.
- [KC98] D. M. Kocak and F. M. Caimi. Dsp hardware implementation of transform-based compression algorithm for auv telemetry: recent advancements. In *Proc. Oceans 98*, volume 3, Nice France, 1998.
- [KdVLW99] D. M. Kocak, N. da Vitoria Lobo, and E. Widder. Computer vision techniques for quantifying, tracking, and identifying bioluminescent plankton. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24:81-200, 1999.
- [KKA98] Junichi Kojima, Yoichi Kato, and Naomi Asakawa, Kenichiand Kato. Experimental results of autonomous underwater vehicle 'aqua explorer 2' for inspection of underwater cables. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, volume 1, pages 113-117, 1998.
- [KKA99] Junichi Kojima, Yoichi Kato, and Kenichi Asakawa. Autonomous underwater vehicle for inspection of submarine cables. In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, volume 2, pages 458-462, 1999.
- [KPG99] P. Kruijinga, N. Petkov, and S.E. Grigorescu. Comparison of texture features based on gabor filters. In *Proceedings of 10th International Conference on Image Analysis and Processing*, pages 142-147, Venice, Italy, September 1999.
- [KS00] S. Kay and S. Saha. Design of sparse linear arrays by monte carlo importance sampling. In *Ocean's 2000 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 3, pages 1501-1508, September 2000.
- [LJ93] A. Laine and Fan J. Texture classification by wavelet packet signature. *IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 15(11), November 1993.
- [LLK92] J.H. Lee, N.I. Lee, and S.D. Kim. A fast and adaptive method to estimate texture statistics by the spatial gray level dependance matrix (sgldm) for texture image segmentation. *Pattern Recognition Letters*, 13:291-303, April 1992.
- [Log01] C. D. Loggins. A comparison of forward-looking sonar design alternatives. In *Ocean's 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 1, pages 1536-1545, November 2001.
- [LLPO+98] L. Lucido, B. Pesquet-Popescu, J. Opderbecke, V. Rigaud, R. Deriche, Z. Zhang, P. Costa, and P. Larzabal. Segmentation of bathymetric profiles and terrain matching for underwater vehicle navigation. *International Journal of Systems Science*, 29(10):1157-1176, 1998.
- [LRFB97] K.N. Leabourne, S.M. Rock, S.D. Fleischer, and R. Burton. Station keeping of an rov using vision technology. In *Oceans '97*, volume 1, pages 634-640, 1997.

- [LTL00] K. Lebart, E. Trucco, and D. M. Lane. Real-time automatic sea-floor change detection from video. In *Proc. IEEE Oceans 2000*, Providence, Rhode Island, 2000.
- [Lur98] X. Lurton. Precision analysis of bathymetry measurements using phase difference. In *Oceans'98 IEEE/OES Conference Proceedings*, volume 2, pages 1131-1134, September 1998.
- [Mac90] D. N. MacLennand. Acoustic measurement of fish abundance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87:1-15, 1990.
- [MC98] H. Medwin and C. S. Clay. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Associated Press, 1998.
- [MI95] S. Matsumoto and Y. Ito. Real-time vision-based tracking of submarine cables for auv/rov. In *Proceedings of the Oceans'95 Conference, San Diego, California*, volume 3, pages 1997-2002, 1995.
- [MRL94] R.L. Marks, S.M. Rock, and M.J. Lee. Real-time video mosaicking of the ocean floor. In *Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 21-27, 1994.
- [MWLR94] R.L. Marks, H.H. Wang, M.J. Lee, and S. M. Rock. Automatic visual station keeping of an underwater robot. In *Oceans '94*, volume 2, pages 137-142, Brest, France, 1994.
- [Neg98] S. Negahdaripour. Revised definition of optical flow: integration of radiometric and geometric cues for dynamic scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20:961-979, 1998.
- [NK00] S. Negahdaripour and A. Khamene. Motion-based compression for underwater video imagery for the operation of unmanned submersible vehicles. *Computer vision and image understanding*, 79:162-183, 2000.
- [NXJ99] S. Negahdaripour, X. Xu, and L. Jin. Direct estimation of motion from sea floor images for automatic station-keeping of submersible platforms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24:370-382, 1999.
- [NXKA98] S. Negahdaripour, X. Xu, A. Khamene, and Z. Awan. 3-d motion and depth estimation from sea-floor images for mosaic-based station-keeping and navigation of rovs/auvs and high-resolution sea-floor mapping. In *IEEE*, pages 191-200, 1998.
- [NYS90] S. Negahdaripour, C.H. Yu, and A.H. Shokrollahi. Recovering shape and motion from undersea images. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15:189-198, 1990.
- [OOF97] A. Ortiz, G. Olivier, and J. Frau. A vision system for underwater real-time control tasks. In *IEEE*, pages 1425-1430, 1997.
- [PFTG97] M. A. Pinto, F. Fohanno, O. Trémois, and S. Guyonic. Autofocusing a synthetic aperture sonar using the spatial and temporal coherence properties of the seafloor reverberation. In *High Frequency Acoustics in Shallow Water, SACLANTCEN Conference Proceedings Series CP-45*, July 1997.
- [PLCL01] Y. Petillot, K. Lebart, A. Cormack, and D. Lane. Seetrack, a system for post mission analysis of auv data products. In *GOATS 2000 conference*, La Spezia, Italy, 2001.
- [PRL01] Y. Petillot, I. T. Ruiz, and D. M. Lane. Underwater vehicle obstacle avoidance and path planning using a multi-beam forward looking sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(2):240-251, April 2001.
- [PT00] C. Plakas and E. Trucco. Developing a real-time, robust, video tracker. In *Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, pages 1345-1352, 2000.
- [PTB+02] E. Poulighen, M. Trevorrow, Ph. Blondel, G. Canepa, F. Cernich, and R. Hollett. Multi-sensor analysis of the seabed in shallow water areas : overview of the maple'2001 experiment. In *Proceedings of the Sixth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2002*, pages 21-29, June 2002.
- [Rav] R.S. Raven. Electronics stabilization for displaced phase center systems. In *United States Patent 4,244,0336*, volume January 1981 (filed on Dec. 21, 1978).
- [Riv97] J. J. Rives, P. and Borrelly. Underwater pipe inspection task using visual servoing techniques. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 63-68, 1997.
- [SB98] F. Spindler and P. Bouthemy. Real time estimation of dominant motion in underwater video images for dynamic positioning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1063-1068, 1998.
- [SBM95] M. Sambridge, J. Braun, and H. McQueen. Geophysical parameterization and interpolation of irregular data using natural neighbours. *Geophys. J. Int.*, 122:837-857, 1995.
- [She92] R. W. Sheriff. Synthetic aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars. In *Proceedings of the 1992 Symposium On Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 236-245, July 1992.
- [SHY98] H. Singh, J. Howland, and D. Yoerger. Quantitative photomosaicking of underwater imagery. In *Proceedings of the Oceans '98 MTS/IEEE*, volume 1, 1998.
- [Sim93] Kongsberg Simrad. Underwater television sensors - selection criteria. *Technical Note*, 1993.
- [SJM94] W. K. Stewart, M. Jiang, and Martin Marra. A neural network approach to classification of sidescan sonar imagery from a midocean ridge area. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 19(2):214-224, April 1994.
- [SMS+01] M. Soriano, S. Marcos, C. Salorna, M. Quibilan, and P. Alino. Image classification of coral reef components from underwater color video. In *Oceans, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 1008-1013, 2001.
- [SS00] C. Sintès and B. Solaiman. Strategies for unwrapping multisensors interferometric side scan sonar phase. In *Ocean's 2000 MTS/IEEE Conference Proceedings*, volume 3, pages 2059-2066, September 2000.
- [SYSL94] J.S. Smith, R. Yu, I. Sarafis, and J. Lucas. Computer vision control of an underwater manipulator. In *Oceans '94*, volume 1, pages 187-192, 1994.
- [TFRT98] T. Tommasini, A. Fusiello, V. Roberto, and E. Trucco. Robust feature tracking in underwater video sequences. In *Proceedings of the Oceans '98 MTS/IEEE*, 1998.
- [Tho98] Hélène Thomas. *Contribution à la reconnaissance des fonds marins en imagerie sonar*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale- Ecole Navale, Décembre 1998.
- [Tho00] Hélène Thomas. Classification de textures en imagerie sonar et invariance en rotation. *Revue Traitement du signal*, 17(1), 2000.
- [TPH95] A. Teuner, O. Pichler, and B.J. Hosticka. Unsupervised texture segmentation of images using tuned matched gabor filters. *IEEE Trans. Image Process.*, 4(6):863-870, June 1995.
- [TS00] X. Tang and W. K. Stewart. Optical and sonar image classification : wavelet packet transform vs fourier transform. *Computer Vision and Image Understanding*, 29:25-46, 2000.
- [Tur82] J. Turner. *Underwater photography*. Focal Press London - Boston, 1982.
- [Uri83] Robert J. Urick. *Principles of underwater sound*. McGraw-Hill Book Company, 3rd edition, 1983.
- [VBH96] P. Vautrot, N. Bonnet, and M. Herbin. Comparative study of different spatial/spatial-frequency methods (gabor filters, wavelets, wavelets packets) for texture segmentation/classification. In *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'96)*, pages 145-148, Lausanne, Switzerland, September 1996.
- [VdWSVD99] G. Van de Wouwer, P. Scheunders, and D. Van Dyck. Statistical texture characterization from discrete wavelet representations. *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(4):592-598, April 1999.
- [Wen62] G. M. Wenz. Acoustic ambient noise in the ocean : Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34(12):1936-1956, 1962.
- [Wes63] P. J. Westervelt. Parametric acoustic array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(4):535-537, April 1963.
- [WgZ98] D. Wettergreen, C. Gaskett, and A. Zelinsky. Development of a visually-guided autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of the Oceans '98 MTS/IEEE*, volume 1, 1998.
- [WZ95] G. S. K. Wong and S. Zhu. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(3):1732-1736, 1995.

[XN99] X. Xu and S. Negahdaripour. Automatic optical station keeping and navigation of an roV; sea trial experiments. In *Proceedings of the Oceans '99 MTS/IEEE*, volume 1, pages 71-76, 1999.

[XN01] X. Xu and S. Negahdaripour. Application of extended covariance intersection principle for mosaic-based optical positioning and navigation of underwater vehicles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2759 -2766, 2001.

[YW94] Chih-Ho Yu and Chuanjun Wang. Shape from underwater image shading. In *Oceans '94*, volume 1, pages 181-186, 1994.

[ZC02] M. Zakharia and J. Ch, tillon. Sami, a low frequency wideband subsurface synthetic system for deep water imaging and mapping. In *6th workshop on underwater acoustics*, pages A1-A11, Brest, June 2002.

[ZH02] B. Zerr and R. Hollett. Seabed characterization using backscattering discontinuities in sonar images. In *Proceedings of the Sixth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2002*, pages 53-58, June 2002.

[ZZ98a] S.M. Zanoli and P. Zingaretti. Underwater imaging system to support roV guidance. In *Oceans Conference Record (IEEE)*, volume 11, pages 257-268, 1998.

[ZZ98b] Primo Zingaretti and Silvia Maria Zanoli. Robust real-time detection of an underwater pipeline. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11:257-268, 1998.

*Manuscrit reçu le 8 juillet 2002*

## LES AUTEURS

Michel LEGRIS



Michel LEGRIS est enseignant chercheur au laboratoire « Extraction et Exploitation de l'Information en Environnements Incertains » (E3I2) à l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armement (ENSIETA) à Brest depuis 2001. Titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris en 1985 et d'un Doctorat en Génie Electrique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 1996, il a travaillé

successivement dans les domaines électromagnétiques puis acoustiques au sein de la Délégation Générale pour l'Armement.

Katia LEBART



Katia LEBART est depuis 2001 « lecturer » à Heriot-Watt University (Ecosse, GB), et y travaille depuis 1999 au sein du « Oceans Systems Lab » sur le traitement de l'image vidéo sous marine. Elle est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (1995) et d'un Doctorat en traitement du signal (1999), réalisé en co-tutelle entre l'Université de Rennes I (France) et Sussex University (Angleterre, GB).

Franck FOHANNO



Franck FOHANNO a obtenu le diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Bretagne (ENSTBr) et le DEA STIR option Signal de l'Université de Rennes 1 en 1995. Depuis novembre 1995 il est ingénieur d'études au Service Etudes Générales Sonar de Thalès Underwater Systems. Ces travaux concernent le traitement d'antenne synthétique et les transmissions acoustiques sous-marine.

Benoit ZERR



Benoit ZERR, titulaire d'un DEA, spécialité EEA de l'Université de Haute Alsace (Mulhouse), rejoint le GESMA (Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique) en 1985. Ingénieur de recherche et développement dans le domaine du traitement d'images sonars, il obtient son doctorat, spécialité EEA de l'Université de Haute Alsace en 1989. De 1995 à 2000, il est détaché comme Senior Scientist au SACLANT Undersea

Research Center à La Spezia (Italie). Depuis 2001, il est chef du département acoustique haute fréquence au GESMA, et en parallèle, depuis 2002, il est chercheur associé au laboratoire ITI (Image et Traitement de l'Information) de l'ENST Bretagne. Dr Zerr est membre des sociétés IEEE Neural Networks, Remote Sensing et Systems, Man and Cybernetics.