

Session 3 : Basic underwater technology

- APPLICATION OF OPTICS TO UNDERWATER DETECTION :

Test of a LIDAR imaging system

- G. Kervem , A. Le Gall
- Thomson-Sintra Activités Sous-Marines
Route de Sainte Anne du Porzic
29601 Brest Cedex

ABSTRACT

Nowadays, side-looking sonar is the only equipment able to carry out long-range underwater imaging. The use of optics is limited to short-range identification by means of conventional video-cameras. However, active optical systems (lidars) manufacturing, using a blue-green laser, will enable optics to hold its place in the field of long-range underwater imaging.

After a short comparison between acoustics and optics in underwater detection and a description of the proper features of underwater optical propagation, we present the different conceivable imaging principles and propose a method to determine their performances. The experimentations described concern a lidar imager mock-up using one of the imaging principles proposed. The pictures obtained deal with specular and lambertian targets.

One lambertian echo, the range is 150 m according to the sort of water used ($c = 0.1 \text{ m}^{-1}$), at this distance the angular resolution would be of a few centimeters. Such performances enable an utilization in association with a sonar imager.

Work carried out with the support of the Direction des Recherches, Etudes et Techniques (D.R.E.T.), French Ministry of Defence.

APPLICATION DU LASER A LA DETECTION SOUS-MARINE : *
Expérimentation d'un imageur

APPLICATION OF OPTICS TO UNDERWATER DETECTION :
Test of a LIDAR imaging system

G. Kervern , A. Le Gall

THOMSON SINTRA Activités Sous-Marines
Route de Sainte Anne du Portzic
29601 BREST CEDEX - FRANCE

RESUME

Le sonar latéral est actuellement le seul instrument capable de réaliser des images sous-marines à grande distance. L'utilisation de l'optique est restreinte à l'identification courte distance par caméra vidéo classique. Cependant, la réalisation de systèmes optiques actifs (Lidar) utilisant un laser bleu-vert permettra à l'optique de tenir sa place dans le domaine de l'image sous-marine grande distance.

Après une brève comparaison entre acoustique et optique sous-marine et une description des caractéristiques propre à la propagation optique sous-marine, on présente les divers principes d'imageur concevables et on propose une méthode d'évaluation de leurs performances.

Les expérimentations décrites mettent en œuvre une maquette d'imageur lidar utilisant un des principes d'imagerie proposés. Les images obtenues concernent des cibles spéculaires et lambertiennes. Sur écho lambertien la portée est de 150 m pour le type d'eau utilisé ($c = 0,1 \text{ m}^{-1}$) à cette distance la résolution angulaire serait de quelques centimètres. De telles performances permettent d'envisager une utilisation couplée avec un sonar d'imagerie.

INTRODUCTION

Le domaine d'activités de THOMSON SINTRA ASM est la détection sous-marine, au sens large du terme. Au sein de cette filiale de THOMSON-CSF, le Département de Brest a plus particulièrement en charge tous les problèmes de classification et d'imagerie sous-marine. A l'heure actuelle, l'acoustique est le moyen couramment utilisé pour former des images du fond marin à longue distance, quelques centaines de mètres (cf. figure 1), tandis que l'utilisation de l'optique est restreinte à l'identification courte distance (quelques mètres) par caméra vidéo classique. Ce partage des rôles entre acoustique et optique en imagerie sous-marine est, en partie, la conséquence des différences de propriétés physiques des ondes acoustiques ou optiques en milieu marin, mais aussi de la différence de maturité des technologies associées. En conséquence, l'avènement de sources lumineuses cohérentes et modulables en amplitude et en fréquence (lasers) associées à l'utilisation de techniques de traitement du signal inspirées des techniques radars permet d'envisager une extension du rôle de l'optique en imagerie sous-marine, ainsi que la réalisation de systèmes nouveaux mettant à profit la propriété des ondes lumineuses de passer avec un très bon rendement l'interface air/eau, à la différence des ondes acoustiques ($T = \frac{4n_1n_2}{(n_1+n_2)^2} \sim 0,98$, en incidence normale pour $n_{\text{air}} \sim 1$, $n_{\text{eau}} \sim 1,333$).

ABSTRACT

Nowadays, side-looking sonar is the only equipment able to carry out long-range underwater imaging. The use of optics is limited to short-range identification by means of conventional video-cameras. However, active optical systems (lidars) manufacturing, using a blue-green laser, will enable optics to hold its place in the field of long-range underwater imaging.

After a short comparison between acoustics and optics in underwater detection and a description of the proper features of underwater optical propagation, we present the different conceivable imaging principles and propose a method to determine their performances. The experimentations described concern a lidar imager mock-up using one of the imaging principles proposed. The pictures obtained deal with specular and lambertian targets.

One lambertian echo, the range is 150 m according to the sort of water used ($c = 0,1 \text{ m}^{-1}$), at this distance the angular resolution would be of a few centimeters. Such performances enable an utilization in association with a sonar imager.



Figure 1 : Image sonar d'une épave d'un avion de la seconde guerre mondiale

* Travaux soutenus par la Direction des Recherches, Etudes et Techniques à Paris (France)

1 - COMPARAISON OPTIQUE-ACOUSTIQUE

Le tableau ci-dessous présente une tentative de synthèse comparative des propriétés physiques et des caractéristiques techniques entre systèmes d'investigations acoustiques et optiques.

Comparaison optique/acoustique en imagerie sous-marine

Propriétés/Caractéristiques		Optique	Acoustique
Physiques	longueur d'onde	0.410 μm - 0.550 μm onde transversale avec polarisation	(800kHz-100kHz) 2 à 15 mm onde longitudinale sans polarisation
	célérité	~ 226000 km/s	~ 1,5 km/s
	rupture d'impédance air/eau	faible	forte
Technologiques (88)	énergie par impulsion pour un émetteur typique actuel dont la longueur d'impulsion en aller-retour vaut $l = c \cdot t / 2 \approx 1 \text{ m}$	1Kw, 10ns - 10mJ	1Kw, 1,3ms - 1,3J
	formation de voies ou directivité	naturelle, 2D, $\theta \approx 1/d < 5 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$ bon marché	électronique, 1D, $\theta \approx 1/d < 5 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$ couteuse
	cohérence	mauvaise s'améliorera rapidement	bonne
	bande utile sur porteuse	large, qq. GHz	faible, qq. 10kHz
Milieu et Cibles	atténuation	variable : 5 à 0,13 dB/m, présence de diffusion \rightarrow réverbération de volume	~ 60dB/km à 200kHz
	homogénéité d'indice dans le milieu de propagation	sans doute	non
	cible	-ponctuelle si le lobe est étroit -spéculaire et lambertienne \rightarrow effet de polarisation	complexe, plusieurs points brillants dans le lobe en général spéculaire uniquement

Cette comparaison met en évidence les points suivants:

- l'efficacité de la propagation est plus variable en optique qu'en acoustique. La clarté des eaux de la zone géographique d'intérêt conditionne donc fortement la conception et le rôle des systèmes optiques de détection sous-marine destinés à y travailler.
- l'atténuation est, en moyenne, bien plus forte en optique qu'en acoustique. Ainsi l'atténuation de l'eau la plus claire, $C=0.03 \text{ m}^{-1} \Leftrightarrow a=130 \text{ dB/km}$, correspond à une fréquence acoustique assez élevée de 500kHz environ.
- la faible longueur d'onde permet de compenser en partie cette forte absorption par un gain de directivité obtenu par des lobes d'émission très fins et de plus autorise la réalisation de dispositifs à bien plus forte résolution qu'un sonar.
- les faibles pertes au passage de l'interface air/eau (2% en incidence normale) permettent la réalisation de systèmes de détection aéroportés (ce qui est pratiquement impossible pour l'acoustique).
- la très grande célérité de la lumière est compatible, sans correction, avec des vitesses de porteur de plusieurs dizaines de noeuds.
- le moindre état de développement de la technologie des émetteurs lasers dont la cohérence et les puissances moyennes restent faibles.

Considérations amènent ainsi à définir trois domaines d'utilisation où l'optique peut jouer un rôle complémentaire à l'acoustique :

1. Haute directivité 2D : il s'agit du domaine de l'imagerie "frontale" actuellement occupé sans contestation par des dispositifs optiques : les caméras de télévision classiques. La portée faible (quelques mètres) de ces caméras peut tirer partie de l'utilisation d'un illuminateur laser.

2. Grande vitesse du porteur : il s'agit du domaine de la surveillance où la plus faible portée d'un système optique peut être compensée par un taux de couverture plus important.
3. Aéroporté : domaine inaccessible à l'acoustique et où les apports de l'optique aux problèmes de détection sous-marine seront sans doute les plus originaux.

Excepté l'aéroporté où l'optique est sans rivale, le choix en faveur de l'optique se fera dès lors qu'à résolution fixée la solution acoustique devient soit compliquée et couteuse, soit de portée plus faible que la solution optique.

Le premier cas correspond aux imageurs 2D où le faible coût des caméras de télévision interdit pratiquement (et pour l'instant) tout développement d'une caméra acoustique ; le deuxième cas correspond aux investigations en eaux claires où les portées intéressantes de l'optique (quelques centaines de mètres) sont associées à des résolutions très fortes (10^{-4} - 10^{-5} rd) que seules des fréquences acoustiques de quelques mégahertz peuvent atteindre, mais au prix d'une atténuation inacceptable.

L'objet de cet exposé est de présenter quelques résultats expérimentaux relatifs à un tel imageur actif à grande portée.

Les trois exemples de réalisation ou d'étude connues, à l'heure actuelle, s'inscrivent bien dans les "créneaux" précédemment évoqués :

- bathymétrie aéroportée par petit fond (< 50m) : il s'agit d'un système de mesure rapide des hauteurs d'eau par aéronef, utilisé par les USA, l'Australie et le Canada depuis quelques années.
- caméra tomographique (range gated camera) dont un prototype a été réalisé en Grande Bretagne pour des applications off-shore et qui pourrait être utilisée sur des ROVs de chasse aux mines.
- communication laser entre satellite et sous-marin en plongée.

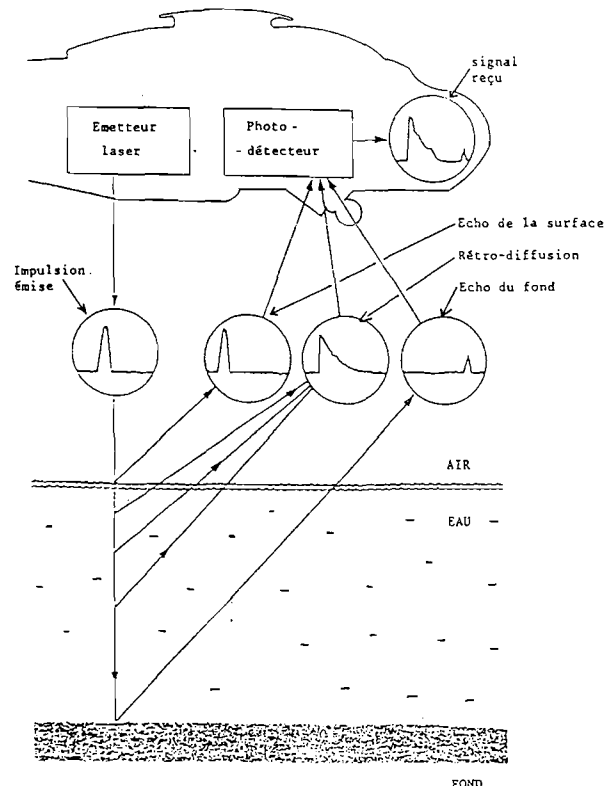


Figure 2 : Principe de la bathymétrie aéroportée par laser

2 - LA PROPAGATION OPTIQUE SOUS-MARINE

L'eau de mer est un milieu à la fois absorbant et diffusant. Absorption et diffusion sont dues en grande partie à la présence de particules organiques ou minérales, de taille en général supérieure à la longueur d'onde, en suspension dans l'eau de mer. La densité de particules peut varier énormément d'un type d'eau à l'autre mais qu'elle que soit cette densité, l'eau de mer présente toujours une fenêtre spectrale de moindre atténuation située dans le bleu-vert (cf. figure 3) entre 410 nm et 550 nm. Le minimum d'absorption évolue en fonction de la charge particulaire de l'eau considérée et se décale légèrement vers le jaune quand cette charge particulaire augmente.

Les caractéristiques optiques d'une eau de mer peuvent être modélisées simplement avec une assez bonne approximation par trois coefficients et une courbe :

- Le coefficient d'atténuation "c", dont l'inverse appelé "longueur d'atténuation", est la distance à partir de laquelle un faisceau parallèle de lumière est atténué d'un facteur e (base des logarithmes népériens) soit 4,3 dB. Les coefficients d'absorption et de diffusion "a" et "b" tels que $c = a + b$.
- L'indicatrice de diffusion qui est le diagramme de rayonnement de l'énergie diffusée par un élément de volume d'eau de mer (cf. figure 4).

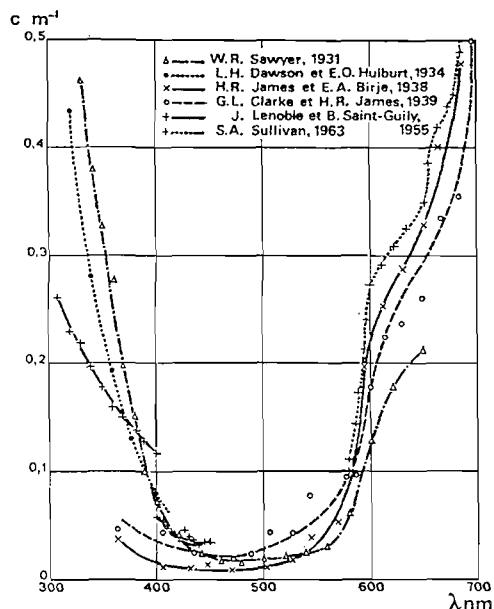


Figure 3 : Principaux résultats expérimentaux concernant le coefficient d'atténuation de l'eau pure

Expérimentalement, on constate que l'indicatrice de diffusion varie peu en forme d'une eau de mer à l'autre et en première hypothèse on peut adopter $a = b = c/2$.

En tenant compte des différents constituants de l'eau de mer, il est possible d'écrire le coefficient d'atténuation sous la forme suivante :

$$C = (a_o + a_s + a_p) + (b_o + b_s + b_p) \sim (a_o + a_p) + b_p$$

(pour λ compris entre 410 et 550nm)

où :

- . l'indice o est relatif à l'eau pure
- . l'indice s est relatif aux substances en solution (les sels dissouts principalement)
- . l'indice p est relatif aux particules en suspension (minérales=sédiments, organiques=plancton)

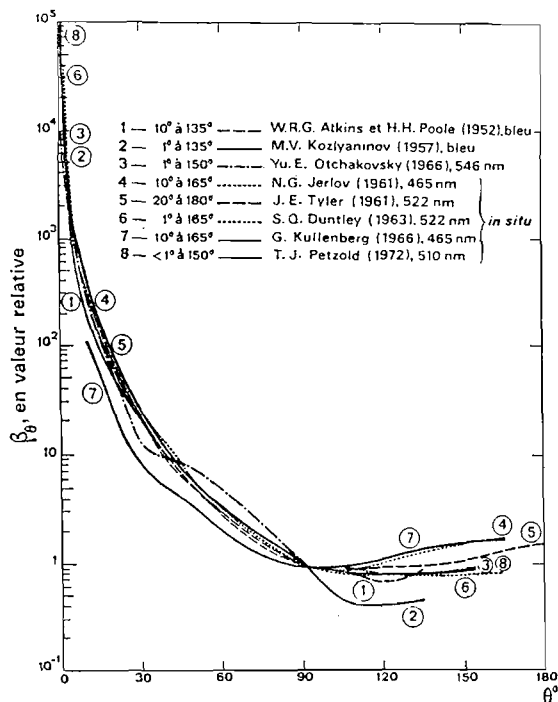


Figure 4 : Exemples d'indicatrices de diffusion par les particules en suspension, normalisée pour $\theta = 20^\circ$

Nous avons été amené à définir un classement des eaux de mer, certes plus simple que celui de JERLOV, mais qui donne directement accès aux paramètres a, b, c, $\beta(\theta)$ et permet d'évaluer les performances d'un système de détection sous-marine type lidar.

<p>eau de type "océan profond"</p> <p>ou type 1 : $c < 0,10 \text{ m}^{-1}$</p> <p>$c = a_o + a_s + b_o + b_s + b_p$</p> <p>$c \sim 0,03 + 0 + 0,002 + 0,001 + 0,05$</p> <p>$c \sim a_o + b_p \sim 0,08 \text{ m}^{-1}$</p>	<p>peut être associée</p> <p>aux classes I, IA, IB,</p> <p>II définies par JERLOV</p>
<p>eau de type "eau du large"</p> <p>ou type 2 : $0,10 < c < 0,30 \text{ m}^{-1}$</p> <p>$c = a_o + a_s + b_o + b_s + b_p$</p> <p>$c \sim 0,03 + 0 + 0,002 + 0,001 + 0,20$</p> <p>$c \sim a_o + b_p \sim 0,20 \text{ m}^{-1}$</p>	<p>peut être associée</p> <p>aux classes III à</p> <p>3 définies par JERLOV</p>
<p>eau de type "eau côtière"</p> <p>ou type 3 : $0,30 < c < 1 \text{ m}^{-1}$</p> <p>$c = a_o + a_s + a_p + b_o + b_s + b_p$</p> <p>$c \sim 0,03 + 0 + 0,15 + 0,002 + 0,001 + 0,30$</p> <p>$c \sim a_o + a_p + b_p \sim 0,50 \text{ m}^{-1}$</p>	<p>peut être associée</p> <p>aux classes IV à</p> <p>7 définies par JERLOV</p>
<p>eau de type "eau turbide"</p> <p>ou type 4 : $c < 1 \text{ m}^{-1}$</p> <p>$c = a_o + a_s + a_p + b_o + b_s + b_p$</p> <p>$c \sim 0,03 + 0 + 1,00 + 0,002 + 0,001 + 1,00$</p> <p>$c \sim a_p + b_p \sim 2 \text{ m}^{-1}$</p>	<p>peut être associée</p> <p>aux classes ≥ 9</p> <p>définies par JERLOV</p>

4 - ESTIMATION DES PERFORMANCES

Une telle modélisation permettrait de calculer sans difficulté la fonction de transfert optique d'une tranche d'eau de mer si la diffusion était "simple".

Malheureusement un rayon lumineux peut être diffusé plusieurs fois et il faut recourir aux simulations numériques pour déterminer la fonction de transfert et donc le comportement d'un faisceau lumineux dans l'eau de mer. Lors de l'étude théorique des performances de l'imageur, deux méthodes ont été utilisées :

- Une méthode approchée analytique due à W.H. Wells n'appuyant sur le fait que l'indicatrice de diffusion est très pointue dans la direction de propagation.
- Une méthode numérique dite de Monte-Carlo utilisant la modélisation des caractéristiques optiques des eaux de mer précédemment évoquée.

Ces deux méthodes nous ont fourni des résultats concordants et permettent d'évaluer le surcroît de portée due aux diffusions multiples.

3 - LES DIFFERENTS PRINCIPES D'IMAGERIE ACTIVE

L'intérêt principal d'un imageur lidar, par rapport à un système optique classique, est de pouvoir accroître la portée en séparant la lumière parasite rétrodiffusée par le milieu de celle réfléchie par la cible. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir "marquer" la lumière issue de l'émetteur de façon à obtenir un critère de discrimination de la lumière rétrodiffusée. Trois types évidents de marquage peuvent être envisagés et amènent aux trois principes classiques d'imagerie en milieu diffusant ou réverbérant (en volume) :

- **Le marquage angulaire et spatial**
Il nécessite l'utilisation de champs angulaires de réception et d'émission très fins et directs et la réalisation d'un balayage conjoint de l'émetteur et du récepteur (en position bistatique) de façon à réduire le volume de rétrodiffusion. Ce principe présente des difficultés de réalisation du point de vue mécanique.
- **Le marquage temporel**
Il utilise la différence des temps de propagation entre lumière rétrodiffusée et lumière réfléchie par la cible pour permettre la séparation des signaux parasites. Ce principe nécessite une émission très brève de l'ordre de 10 ns et un photodétecteur très rapide (plus de 100 MHz de bande passante).
- **Le marquage en polarisation**
Il met à profit la différence d'état de polarisation entre la lumière réfléchie par la cible et la lumière rétrodiffusée par le milieu, l'utilisation d'une émission polarisée et d'un analyseur en réception permet d'exploiter cette différence. La mise en œuvre de ce principe est simple mais son efficacité très variable en fonction de l'origine de la diffusion et de l'état de surface de la cible.

Ces trois principes, éventuellement associés, amènent naturellement à utiliser une source laser seule capable de concilier directivité, puissance, brièveté de l'impulsion et haut degré de polarisation. La difficulté de réalisation du balayage conjoint émission/réception et l'inconvénient de devoir recommencer le balayage pour chaque plan en distance où une cible est susceptible de se trouver nous amène à ne retenir que les deux derniers principes d'imagerie : marquages temporel et en polarisation.

En ne retenant que ces deux principes, qui sont les principes de base du radar, plusieurs schémas de réalisation de lidars sont évidemment possibles.

La détermination des performances d'un imageur lidar en eau de mer est rendue délicate par la présence des diffusions multiples qui tendent à dégrader la résolution mais cependant à accroître la portée par rapport à une prévision simple ne tenant compte que du coefficient d'atténuation global c . La démarche adoptée, pour la prédiction des performances, consiste à calculer au premier ordre ces performances grâce à "l'équation du lidar" puis à effectuer une correction en tenant compte de résultats expérimentaux et de simulations type Monte-Carlo.

- La puissance lumineuse, rétrodiffusée vers le détecteur par la cible, supposée purement lambertienne d'albedo ρ , située à la distance x de l'ensemble émetteur/récepteur et interceptant la totalité du faisceau, a pour expression :

$$P = P_0 \rho \frac{R_d^2}{x^2} e^{-2cx} \quad (\text{équation du lidar})$$

- P_0 : puissance émise
- πR_d^2 : surface de l'optique de détection
- c : coefficient d'atténuation

- La puissance lumineuse, rétrodiffusée au premier ordre vers le détecteur par une tranche diffusante (de surface $s(x)$ et d'épaisseur dx) du milieu de propagation située à une distance x de l'ensemble émetteur/récepteur, a pour expression :

$$dP = \beta \cdot \frac{P_0}{\omega x} e^{-cx} \cdot s(x) \cdot \frac{\pi R_d^2}{x^2} e^{-cx} dx$$

+	+	+	+	+
coeffi- cient de diffusion	éclairage incident	surface éclairée et vue par le détecteur	angle solide de ré- ception	atténuation en retour

Pour des angles compris entre 90° et 180°, le coefficient de (rétrodiffusion β varie très peu (cf. figure 4) et on peut adopter la valeur moyenne :

$$\beta = \beta^* b \quad \text{avec} \quad \beta^* = \frac{\beta}{b} \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ strd}^{-1}$$

- Les sources de bruits sont de deux types : d'une part un bruit interne au lidar, dû au photodétecteur utilisé, et d'autre part un bruit externe d'origine solaire, dû à la luminosité solaire parasite.

En adoptant, comme photodétecteur type le photomultiplicateur, l'évaluation du bruit interne peut être faite de la manière suivante :

La variance du bruit de courant anodique d'un photomultiplicateur a pour expression :

$$I_a^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_1} + 2eaGI_a\Delta f + \overline{I_a^2}$$

+	+	+
bruit blanc de la résistance de charge	bruit quantique blanc du photo- multiplicateur	bruit du courant d'obscurité

On y distingue trois termes : bruit quantique, bruit de résistance, bruit d'obscurité, que l'on considère comme blancs et gaussiens dans le domaine de fréquence Δf nécessaire pour effectuer la détection de l'impulsion émise.

- G : gain du photomultiplicateur $\sim 10^7$
- R : résistance de charge en sortie de photomultiplicateur $\sim 50 \Omega$
- k : constante de Boltzmann $\sim 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
- a : coefficient de bruit des dynodes du photomultiplicateur $\sim 1,5$
- T : température du détecteur $\sim 300^\circ\text{K}$
- e : charge de l'électron $\sim 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- S : sensibilité de la photocathode type S20 $\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ A/W}$ à 532 nm

$\sqrt{i_a^2}$ est l'écart type des fluctuations associées au bruit d'obscurité pour une bande de mesure Δf . Ce bruit est supposé blanc, bien que la composante alternative de ce bruit soit en partie de nature ionisante, il est bien entendu lié au courant d'obscurité cathodique moyen i_a du photomultiplicateur par la relation :

$$i_a^2 = 2eaG^2 \overline{i_o} \Delta f$$

+ courant d'obscurité cathodique moyen
valeur typique $\sim 10^{-15}$ A

$$\sqrt{i_a^2} = (4,8 \cdot 10^{-22} \text{ A}^2/\text{Hz}) \cdot \Delta f$$

en convertissant le bruit du courant anodique en bruit lumineux équivalent et en tenant compte des valeurs numériques précédentes, on aboutit à l'expression :

$$\sigma_\phi^2 = \left[\frac{4kT}{R_1} + 2eaG^2 S_\phi + 2eaG^2 \overline{i_o} \right] \cdot \frac{\Delta f}{G^2 S^2}$$

d'où l'on tire $\sigma_\phi^2 \sim (A + B \phi) \cdot \Delta f$ qui donne la va-

10^{-30} 10^{-17}

riance du bruit lumineux équivalent du photomultiplicateur. La bande Δf , qui nous est nécessaire pour détecter des impulsions de longueur au plus égale à quelques dizaines de ns, est toujours supérieure à 1 MHz et le flux minimum détectable reste supérieur à 10^{-12} w, ce qui permet en général de faire l'approximation $\sigma_\phi^2 \sim B \phi \Delta f$.

- L'évaluation du bruit lumineux ambiant est plus difficile du fait de la variabilité des conditions naturelles d'éclairage. En se plaçant dans les conditions les plus défavorables (c'est-à-dire au voisinage de la surface et pour un éclairage solaire maximum), une évaluation simple du flux lumineux parasite issu de la pleine eau (et ceci pratiquement quelque soit c) est de 10^{-9} w/nm vers 500 nm pour une surface de collection de 10^{-2} m^2 et un champ de 10^{-4} stéradian.

Pour un imageur travaillant à plusieurs longueurs d'atténuation en dessous de la surface, ce bruit sera divisé par plusieurs ordre de grandeur et peut donc être, en première approximation, négligé.

En se restreignant donc à la diffusion au premier ordre et en utilisant les modèles de propagation et de bruit précédemment évoqués, on aboutit à une portée ($P_0 = 1 \text{ Mw}$ crête, τ quelques ns) de détection sur cible lambertienne de l'ordre de 11 longueurs d'atténuation avec une résolution pratiquement liée à la divergence initiale du faisceau (à condition que l'absorption augmente avec la diffusion, c'est-à-dire a \sim b). Expérimentalement les portées constatées sont supérieures de trois à quatre longueurs d'atténuation environ et ceci du fait des diffusions multiples.

Les simulations type Monte-Carlo permettent de mettre en évidence ce phénomène qui aboutit à un coefficient d'atténuation apparent plus faible que le coefficient théorique mais dépendant de la géométrie du récepteur utilisé.

Sur cible spéculaire (ce qui est le cas général en acoustique), les échos des points brillants sont bien plus intenses que les échos diffus et la portée s'accroît de 3 à 6 L.A. à albedo fixé. On retiendra donc les évaluations de portée suivantes :

- écho lambertien : 15 L.A.
- écho spéculaire : 20 L.A.

qui appliquées à la classification sommaire proposée conduisent au tableau suivant :

	Portée typique sur cible lambertienne	Portée typique sur cible spéculaire
"Océan profond" $0.03\text{m}^{-1} \leq C \leq 0.1\text{m}^{-1}$ C typique = 0.08m^{-1}	187m	250m
"Eau du large" $0.10\text{m}^{-1} \leq C \leq 0.30\text{m}^{-1}$ C typique = 0.20m^{-1}	75m	100m
"Eau cotière" $0.30\text{m}^{-1} \leq C \leq 1\text{m}^{-1}$ C typique = 0.50m^{-1}	30m	40m
"Eau turbide" $C \geq 1\text{m}^{-1}$ C typique = 2m^{-1}	7.5m	10m

Pour mémoire :

- les portées pour l'eau la plus claire que l'on puisse rencontrer $C=0.03\text{m}^{-1}$ serait de 500m sur cible lambertienne et de 660m sur cible spéculaire ;
- la distance de visibilité pour un observateur humain et en présence d'un éclairage solaire naturel (c'est-à-dire dans une configuration bistatique parfaite minimisant les effets de réverbération de volume) est de 4 L.A. environ. Dans le cas d'un éclairage par une source artificielle et à fortiori si le capteur est un caméra de télévision la portée doit être considérée comme inférieure à 4 L.A. Pour les eaux claires des grands fonds les portées pratiques dépassent rarement 20 m.

5 - EXPERIMENTATION D'UN IMAGEUR DE TYPE LIDAR

Compte tenu de l'état actuel de la technologie laser, un seul schéma nous a semblé pouvoir concilier portée et résolution dans le cadre de l'association d'un imageur lidar avec un sonar : le balayage de la zone à imager par un faisceau laser impulsionnel et l'utilisation d'un détecteur "ponctuel" type photomultiplicateur. L'avantage du balayage est de conserver toute la puissance du laser (qui en moyenne reste faible) pour l'obtention de l'information relative à un pixel de l'image et de pouvoir moduler le nombre de pixels de cette image en fonction des paramètres du balayage.

Pour un tel schéma de réalisation, le laser Nd:YAG impulsionnel doublé émettant dans le vert à 532nm réalise un bon compromis.

Des expérimentations d'imagerie ont été menées en bassin d'eau de mer au moyen d'un dispositif mettant en œuvre le schéma de réalisation précédemment proposé (balayage et émission d'impulsions brèves et puissantes).

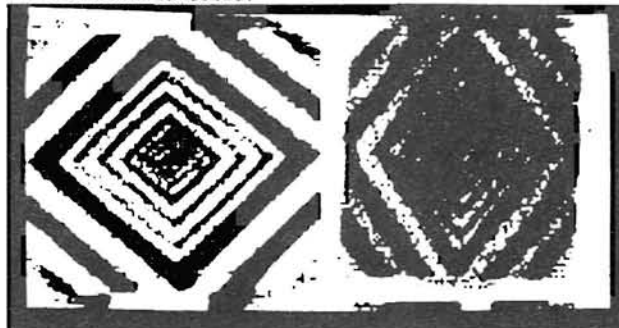
Le niveau de gris de chaque pixel est fonction linéaire de l'aire ou de la hauteur de l'écho laser correspondant. La distance d'observation est de 50 m et la puissance crête émise de 200 Kw environ pour une durée d'impulsion de 8 ns.

Quatre exemples d'images obtenues sont présentés ici :

- Figure 6 : image 100 x 100 pixels codée sur 256 niveaux de gris, cible plane blanche et noire lambertienne permettant de déterminer la limite en résolution à 1 cm environ pour une distance de 50 m. On notera la présence de deux quadrants plus flous que

les autres sur cette cible, ce phénomène est sans doute dû à la dépolarisation de la lumière laser par les bandes noires de la cible constituées par un film plastique autocollant étiré.

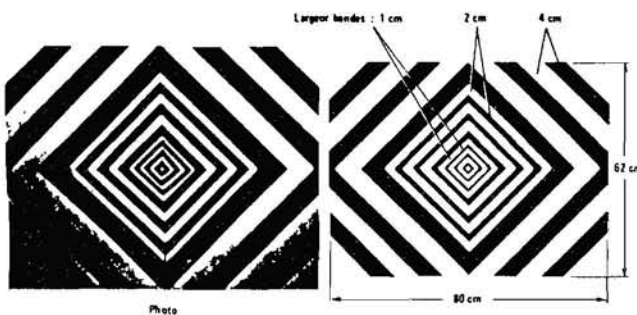
Figure 7 : image 100 x 100 pixels codée sur 64 niveaux de gris, cible métallique (inox), en volume permettant de mettre en évidence la possibilité de former des images d'objets fortement spéculaires et en volume. On notera la présence des points brillants sur les génératrices des différents cylindres constituant la cible.



Mire Perpendiculaire

Mire inclinée à 45°

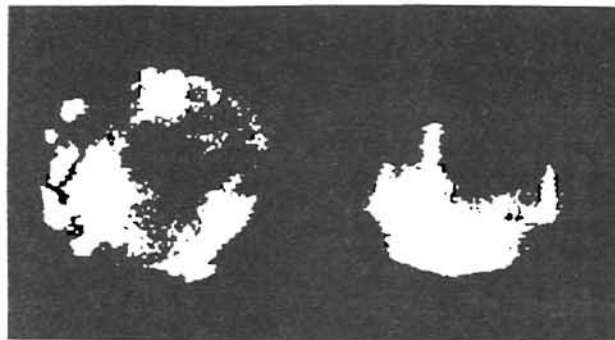
IMAGES LIDAR



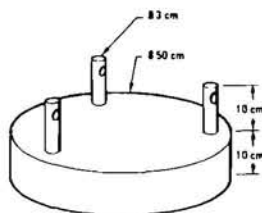
Photo

THOMSON SINEIRA

Figure 6 : Mire plane lambertienne



IMAGES LIDAR



THOMSON SINEIRA

Figure 7 : Cible métallique en volume

CONCLUSION

Les expérimentations réalisées confirment l'intérêt de l'optique dans le domaine de l'imagerie sous-marine. Plusieurs principes d'imageurs sont possibles suivant l'utilisation envisagée, le principe proposé ici privilégie la portée sans pour autant trop dégrader la résolution. Sur écho lambertien la portée est de 150 m pour le type d'eau utilisé ($c = 0,1 \text{ m}^{-1}$) à cette distance la résolution angulaire serait de quelques centimètres. De telles performances permettent d'envisager une utilisation couplée avec un sonar d'imagerie. La réalisation d'un dispositif opérationnel nécessitera cependant une amélioration de nos connaissances sur les variations de clarté du milieu marin en particulier pour les applications côtières.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. IVANOFF
Introduction à l'Océanographie : propriétés physiques et chimiques des eaux de mer
Tome I et II, librairie Vuibert Paris
- [2] MG. JERLOV
Marine Optics - 2ème Edition, Elsevier
Oceanography series.
- [3] WH. WELLS
Theory of small angle scattering
AGARD (NATO) - Lecture series n° 61
- [4] MF. PENNY, RH. ABBOT, DM. PHILLIPS, B.BILLARD
Airborne laser hydrography in Australia
Applied Optics, Vol. 25 n° 13, 1986